DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.06.026

分时分区电碳因子计算及其在产品碳足迹核算中的应用研究

芦新波[1]，赵良[1*]，杨阳[1]，舒印彪[2]，黄海威[1]，舒安杰[1]，叶健诚[3]，朱寰[4]

（1. 中国华能集团有限公司能源研究院，北京 100031；2. 国家电网有限公司，北京 100031；3. 北京创拓国际标准技术研究院有限责任公司，北京 100053；4. 国网江苏省电力有限公司，南京 210024）

摘要：精确核算产品碳足迹依赖具有适宜计算颗粒度并可随时间变化的电碳因子，分时分区电碳因子计算及应用成为行业性研究热点，有助于精细化计算电碳因子、丰富电碳因子应用场景、加强产品碳足迹核算管理。本文论述了分时分区电碳因子在产品碳足迹核算中的重要作用，结合电力系统生产运行实际建立了分时分区电碳因子的计算方法和应用流程；以江苏省为例展示了分时分区电碳因子的详细计算过程，从季节变化、典型日各时段差异、不同地级市分布情况等方面分析了该省份电碳因子的时空变化特性。进一步从优化产品碳足迹核算的基础参数、完善碳足迹核算标准与碳减排政策体系、促进更加绿色低碳的产品生产模式等方面展望了分时分区电碳因子在产品碳足迹核算中的应用前景。建议在推动分时分区电碳因子应用、加强火电碳排放的连续在线监测、制定产品碳足迹核算标准、建立与国际接轨的产品碳足迹核算认证体系等方面采取行动，全面加强我国产品碳足迹核算工作。

关键词：电碳因子；碳足迹核算；时空变化特性；间接碳排放；电力生产运行

中图分类号：TM11　　**文献标识码：**A

Calculation of Time- and Area-Specific Electric Carbon Factor and Its Application in Product Carbon Footprint Accounting

Lu Xinbo[1], Zhao Liang[1*], Yang Yang[1], Shu Yinbiao[2], Huang Haiwei[1], Shu Anjie[1], Ye Jiancheng[3], Zhu Huan[4]

(1. Energy Research Institute of China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Beijing Chuangtuo International Standard Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: Accurately calculating the carbon footprint of products relies on an electric carbon factor with appropriate calculation granularity and time-varying characteristics. The calculation and application of time- and area-specific electric carbon factors have become a research hotspot in the industry, which helps refine the calculation of the electric carbon factor, enrich its application scenarios, and strengthen the management of product carbon footprint accounting. This study analyzes the important role of time- and

收稿日期：2025-05-23；**修回日期：**2025-07-18

通讯作者：*赵良，中国华能集团有限公司能源研究院教授级高级工程师，研究方向为碳中和理论及减碳技术；E-mail: zhao_liang@chng.com.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“‘双碳’目标下绿色低碳发展机制研究”(2025-PP-06)；江苏省科技项目(BT2024014)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

area-specific electric carbon factor in product carbon footprint accounting, and establishes a calculation method and application process for the factor based on actual production and operation of power systems. Taking Jiangsu Province as an example, the detailed calculation process of the time- and area-specific electric carbon factor was demonstrated, and the spatiotemporal variation feature of the factor was analyzed from the aspects of seasonal changes, differences in typical days at different time periods, and distribution of different prefecture level cities. Furthermore, the application prospects of the time- and area-specific electric carbon factor in product carbon footprint accounting were discussed from the aspects of optimizing the basic parameters of product carbon footprint accounting, improving carbon footprint accounting standards and carbon reduction policy systems, and promoting greener and low-carbon product production models. It is recommended to take actions in promoting the application of the time- and area-specific electric carbon factor, strengthening the continuous online monitoring of thermal power carbon emissions, developing product carbon footprint accounting standards, and establishing an internationally aligned product carbon footprint accounting certification system, thus to comprehensively strengthen the product carbon footprint accounting in China.

Keywords: electric carbon factor; carbon footprint accounting; spatiotemporal variation feature; indirect carbon emissions; electricity production and operation

一、前言

我国正在加快产品碳足迹管理体系建设，健全绿色低碳发展机制，构建碳排放统计核算体系、产品碳标识认证制度、产品碳足迹管理体系[1]。《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》（2023年）、《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》（2024年）提出，以产品碳足迹核算标准、碳足迹因子数据库为基础，构建碳标识认证、产品碳足迹分级管理、信息披露等制度[2]。可见，未来产品碳足迹管理将是我国消费侧控碳的重要举措，引导全社会形成绿色低碳的生产生活方式，推动以绿色为特征的新质生产力发展。与此同时，国际绿色贸易规则规制对产品碳足迹核算提出了新要求，产品国际竞争已从“成本+质量”扩大为“成本+质量+低碳”，碳足迹成为影响产品竞争力的关键因素之一。例如，欧盟碳边境调节机制（CBAM）提出，2026年开始对钢铁、氢等6类商品征收碳关税[3]；欧盟《电池与废旧电池法》要求2025年起披露动力电池的碳足迹，2028年起禁售高碳的动力电池产品。近年来，我国电动汽车、锂电池、太阳能电池（“新三样”）对外贸易快速发展，需要尽快建立符合国情、与国际贸易规则衔接的产品碳足迹管理体系。

产品碳足迹指产品在从原料获取、生产制造、流通使用到废弃回收的全生命周期中的温室气体排放[4]。在产品生产制造等过程中使用电力带来的间接碳排放，是产品碳足迹的重要组成。电碳因子表示单位电量的含碳量，又称电力CO_2排放因子、电网碳排放因子，是核算产品全生命周期过程中电力间接碳排放的基本依据，相应的覆盖范围、随时间变化的特性对核算产品碳足迹的准确性至关重要。《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》（2024年）提出，建设温室气体排放因子数据库，建立定期更新发布机制，为地方、企业开展产品碳足迹核算提供基准数据。《完善碳排放统计核算体系工作方案》（2024年）要求，建立基于电力大数据的碳排放核算机制，研究电–碳分析模型，完善电碳因子核算方法，定期更新全国、省级、地区级电碳因子。随着我国新型电力系统加速构建，电源结构将从以传统化石能源为主体逐步转向以新能源、水电等清洁能源为主体[5~7]。受新能源出力随机性的影响，发电结构实时变化，也将显著增强电力碳排放的时变性。亟需开展精细化的电碳因子计算，支撑电力间接碳排放核算和产品碳足迹管理体系建设[8~10]。

目前，我国主要基于年度能源消耗实际统计数据，开展全国、区域、省级的全年平均电碳因子计算和发布，该方法存在一定的局限性：计算时间维度采用年度平均，不能有效反映新能源出力波动带来的电碳因子时间变化特性；没有考虑同一省份内不同地级市电源结构的差异，难以精准体现电碳因子的地理分布特性；以能源消费历史统计数据而非实时采集数据作为计算基础数据，导致计算结果及发布相对滞后。为此，以清华大学为代表的研究机构提出了碳排放流理论，即依托电网有功潮流模拟碳排放的虚拟网络流动，表征某一支路上所流过功率对应的碳排放，为电力系统中碳排放责任的精确划分提供了一类解决方案。然而，该方法需要模拟10 kV及以上变电站、线路、电源等电力系统元器件，涉及数据规模庞大，计算复杂度和应用难度均较高。

本文结合生态环境部门采用的电力行业CO_2排放核算法思路，吸收碳排放流理论的有益经验，发

展一种分时分区电碳因子计算方法。分时分区电碳因子指在特定时间、特定区域范围内单位电量对应的CO_2排放量，相比已正式发布的国家级、区域级、省级的全年平均电碳因子具有以下特点：在时间维度，将计算时段进一步细化，实现小时级甚至更短时间段的电碳因子计算，以更准确反映电力碳排放的实时变化；在空间维度，将计算地理范围进一步细分，实现地级市、县等层级的电碳因子计算，以更准确反映电力碳排放的地区差异。应用这一方法，可以简化地级市级逐日或逐小时的电碳因子计算过程，获得更精细的电碳因子计算结果并进行动态更新；在此基础上，提出结合分时分区电碳因子完善我国产品碳足迹管理体系的相关措施，可以为我国加强产品碳足迹核算和管理提供参考。

二、分时分区电碳因子在产品碳足迹核算中的重要作用

（一）成为计算产品碳足迹中电力间接碳排放的基础参数

由区域边界内的活动引起但发生在区域外的排放称为间接排放。例如，企业外购电力用于产品生产，这个过程中隐含的碳排放发生在发电端但由用电端的消费活动引起，对于用电端而言属于间接排放。分时分区电碳因子作为基础参数，与产品各环节的用电量相乘，即可计算得到精细化的电力间接碳排放，为核算产品碳足迹提供数据支持。以“新三样”为代表的新型能源技术装备的产品碳足迹以电力间接排放为主。例如，硅料生产是光伏组件最主要的碳排放来源，电力间接碳排放占产品碳排放总量的比例高达67%[11]；电动汽车整车生产中的电力间接碳排放占比保持在90%左右[12]。未来，随着终端能源利用过程中再电气化的深入推进，各类产品在生产制造、流通、废弃物处理等环节将更多使用电能，相应的电力间接碳排放占比也将增加，因而分时分区电碳因子在产品碳足迹核算中的作用将更加显著。

（二）能够准确反映碳排放的时空变化

电力系统发用电结构、网络拓扑结构是实时变化的，尤其是在新能源大规模并网和多元负荷接入后，时变性更加突出。2024 年发布的 2022 年我国电力CO_2排放因子[13]，分为全国、区域、省级电网3个范围，计算时段为当年的平均值（如全国平均值为0.536 6 $kgCO_2/(kW·h)$）。对于一个地区或单一企业而言，电碳因子采用全年的平均数必然不能及时反映生产过程中清洁电力利用情况，也将难以满足产品碳足迹核算真实、透明、可溯源的实际需求；有必要缩短电碳因子的计算时段。此外，不同的电网覆盖范围不同，包含的电源结构和送 / 受电关系随之变化；合理划分电碳因子的覆盖范围，将反映用户用电结构及相应的碳足迹构成。分时分区电碳因子能够实时反映用电量中含碳量的变化，也可有效表征不同地区之间的电碳因子差异，进而精细化地呈现电碳因子在时间、空间上的分布特性。

（三）利于电力碳排放溯源

碳排放与环境足迹评估对碳足迹的数据溯源核验提出了明确要求。分时分区电碳因子基于电网物理拓扑与跨区输电数据的动态耦合，可实现碳排放计算时间颗粒度的小时级细化、排放源头的市（县）行政单元级溯源，支持推动碳排放责任从全省模糊分摊到精准透明溯源的科学划分。企业通过分时分区电碳因子实时计算电力间接碳排放，结合物理溯源与数字存证，为产品碳足迹核算认证提供依据，推动产品低碳价值的展现。发达国家较多开展分时分区电碳因子计算探索，提出电力碳溯源完整性、真实性、透明度相关的规定，同步研究碳标签制度[14]。2022 年，美国以立法的形式要求美国能源信息署发布小时级平均和边际碳排放因子，为产品碳足迹核算提供基础数据。英国国家电网与科研单位合作，以 30 min 的时间分辨率提前 96 h 预测全国 14 个区域的电力碳排放强度变化趋势。欧盟与日本、加拿大、美国等国家联合建立电力小时级溯源机制，探索将时间颗粒度缩短至 15 min，以与电力现货市场的出清时间相匹配。此外，芬兰电网实现了 3 min/次的电碳因子发布频率[15]。缩小电碳因子计算地域范围，开展小时级甚至更短时段碳排放核算，有利于实施更精准的碳溯源。

三、分时分区电碳因子计算方法与应用

（一）分时分区电碳因子计算方法

参考生态环境部门发布的电力行业CO_2排放核

算法思路[16~19]，结合实时电网拓扑结构、分时发 / 输电量数据，以某时段、某地区的总发电量和该地区净输入电量之和作为分母，以某时段、某地区的火电发电碳排放和来自输出地区电量对应的碳排放量之和作为分子，即可计算出该时段该地区电碳因子（见图1、图2）。

（二）分时分区电碳因子计算方法应用——以江苏省为例

以江苏省为例，选取2023年5月1日、8月10日、10月10日、12月28日分别作为春季、夏季、秋季、冬季的典型日；再按照行政区划，计算南京、苏州、无锡、徐州等13个地级市的各典型日逐小时电碳因子。文中主要给出2023年5月1日的相关输入数据，以简便呈现计算过程及结果。

1. 基础数据

江苏省通过建苏、锦苏、锡泰、雁淮、龙政5回直流通道受入四川省、内蒙古自治区、山西省、湖北省的电力，经由淮盱双回、涂目、涂天等17回500 kV及以上交流输电线路与安徽省、浙江省、上海市进行电力交换。其中，2023年5月1日江苏省外来电规模如图3所示。

江苏省整体呈现“北电南送、西电东输”的送电格局，以徐州、连云港、盐城、淮安、泰州等地为电源中心，向南京、无锡、苏州等负荷中心输送电力电量。2023年5月1日江苏省地级市之间的电量交换示意如图4所示。

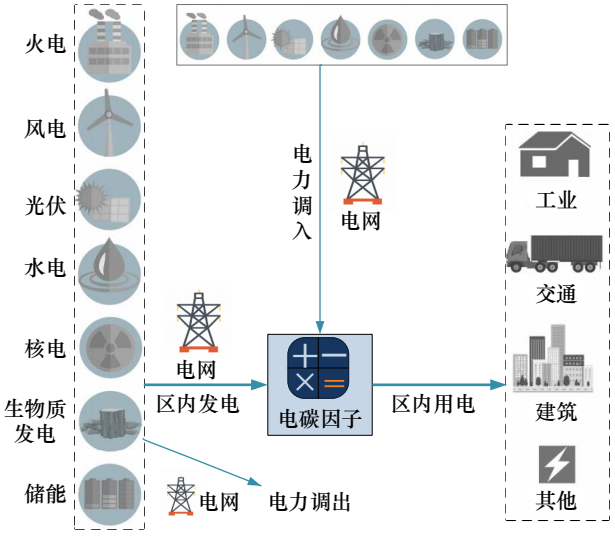

图1　分时分区电碳因子计算示意

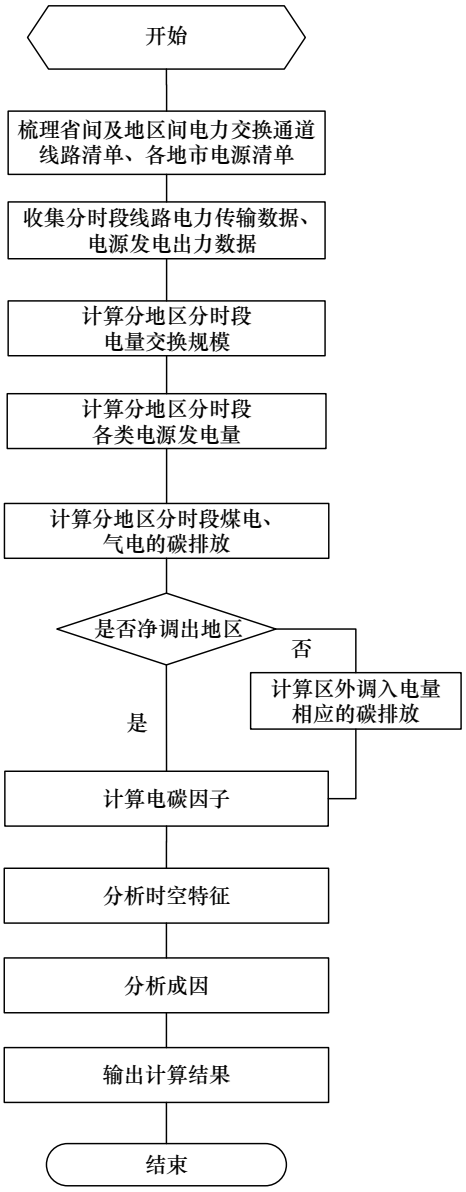

图2　分时分区电碳因子计算流程

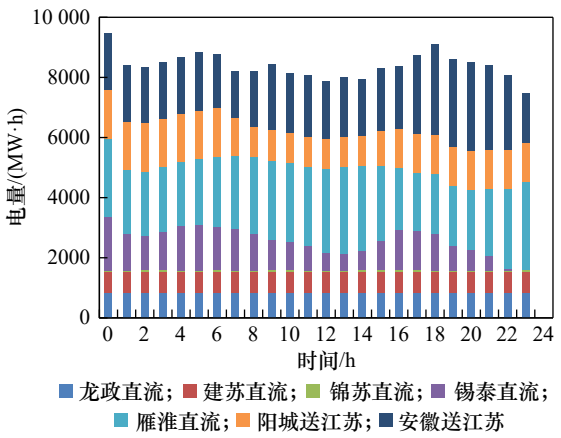

图3　江苏省分时段受入省外电量规模（2023年5月1日）

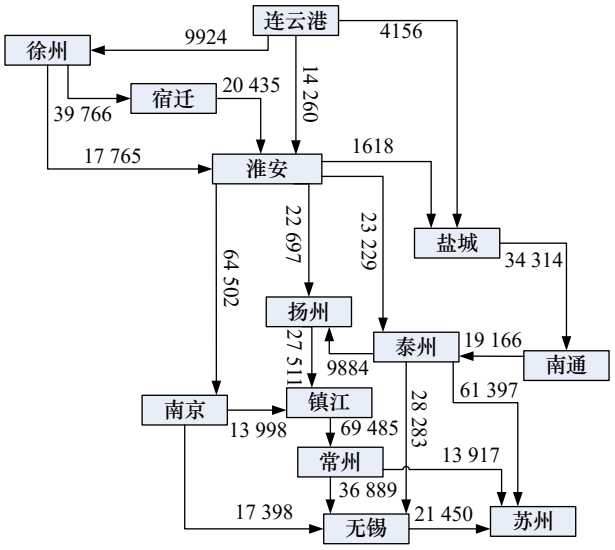

图4　地级市之间电量交换示意（2023年5月1日）

注：电量单位为MW·h。

根据生态环境部门发布的数据[15]，四川省、内蒙古自治区、山西省、湖北省的电力平均CO_2排放因子分别为125.5 $gCO_2/(kW·h)$、702.5 $gCO_2/(kW·h)$、722.2 $gCO_2/(kW·h)$、367.2 $gCO_2/(kW·h)$。

2023年5月1日，江苏省内电源总发电量为$1.174×10^9$ kW·h，其中煤电、气电、核电、风电、光伏、生物质及其他分别占69.5%、4.2%、5.4%、12.8%、5.5%、2.6%。江苏省及典型地级市的逐小时各类电源发电量分别如图5~7所示。

参考中国华能集团有限公司的煤电、气电实际统计数据[20]，江苏省内煤电、气电的度电CO_2排放分别为800 $gCO_2/(kW·h)$、380 $gCO_2/(kW·h)$。

2. 分时分区电碳因子计算结果分析

应用分时分区电碳因子计算流程，结合江苏省各地级市之间的电量交换情况，先计算净送出电量地级市的电碳因子，再计算净受入电量地级市的电碳因子，依次获得连云港、徐州、宿迁、淮安、盐城、南通、泰州、扬州、南京、镇江、常州、无锡、苏州的电碳因子（见表1）。

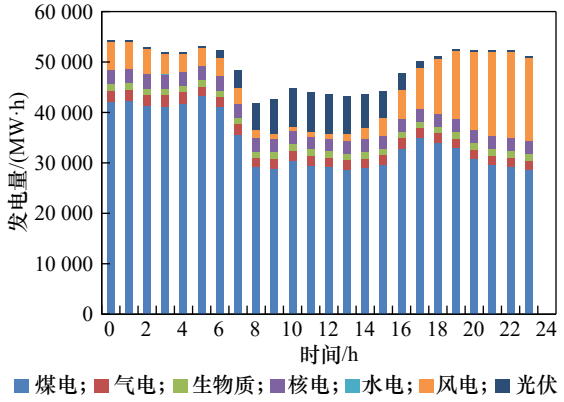

图5　江苏省分时段发电结构（2023年5月1日）

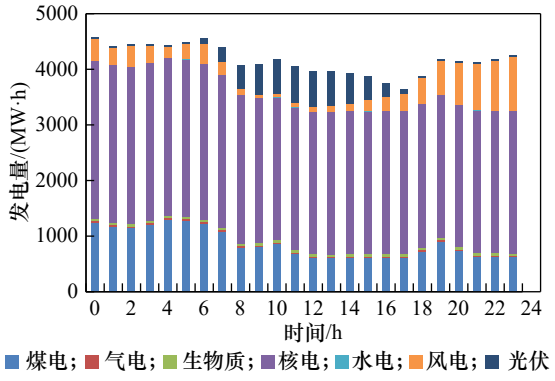

图6　连云港分时段发电结构（2023年5月1日）

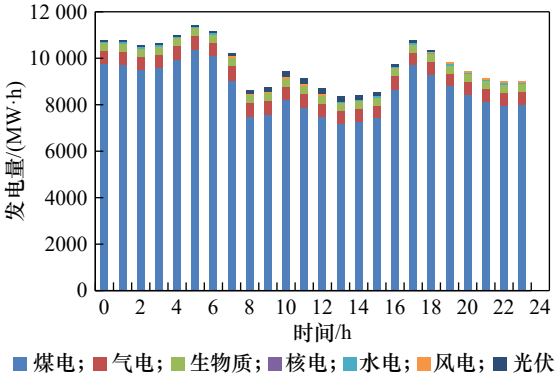

图7　苏州分时段发电结构（2023年5月1日）

图8~11分别给出了2023年5月1日、8月10日、10月10日、12月28日的江苏省及各地级市分时分区电碳因子计算结果。江苏省春季、夏季、秋季、冬季典型日平均电碳因子分别为575 $gCO_2/(kW·h)$、554 $gCO_2/(kW·h)$、583 $gCO_2/(kW·h)$、642 $gCO_2/(kW·h)$。分季节看，江苏省冬季电碳因子较高、夏季较低：冬季光伏发电量较小、火电发电量大幅增加，清洁能源发电量占比较低；夏季是丰水期，来源于四川、湖北等水电大省的外来电接近满送，省内光伏发电量也大幅增加，清洁能源发电量占比较高。

从逐小时变化情况看，春季、夏季、秋季、冬季典型日10~15 h时段的电碳因子均较低，约为全天平均值的92%，原因是该时段光伏大发、清洁能源发电量占比显著增加；春季19~23 h、夏季3~8 h

表1　2023年5月1日江苏省分时分区电碳因子计算示例

地区	电力变量	计算时段/h		
		0~1	12~13	21~22
连云港	煤电发电量	1273	634	647
	总发电量	4557	3965	4105
	电碳因子	0.223	0.128	0.126
苏州	煤电发电量	9752	7505	8132
	气电发电量	549	530	539
	总发电量	10 721	8698	9096
	常州送苏州电量	545	1148	697
	泰州送苏州电量	2481	3072	3306
	无锡送苏州电量	790	778	1703
	（四川）建苏直流输电量	763	763	761
	（四川）锦苏直流输电量	0	0	0
	电碳因子	0.696	0.636	0.613
江苏省	煤电发电量	42 148	29 157	29 617
	气电发电量	2249	1881	1912
	总发电量	54 135	43 642	52 038
	（湖北）龙政直流输电量	823	825	824
	（四川）建苏直流输电量	763	763	761
	（四川）锦苏直流输电量	0	0	0
	（内蒙古）锡泰直流输电量	1778	573	466
	（山西）雁淮直流输电量	2606	2801	2244
	（山西）阳城电厂输电量	1602	1001	1297
	（安徽）送淮安电量	552	94	755
	（安徽）送南京电量	0	0	1079
	（安徽）送常州电量	1336	1839	990
	电碳因子	0.634	0.556	0.487

注：电量单位为MW·h；电碳因子单位为$kgCO_2/(kW·h)$。

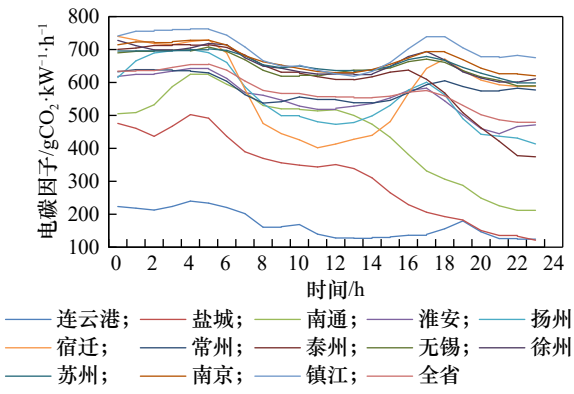

图8　江苏省及各地级市春季典型日电碳因子曲线

时段的电碳因子相对较低，约为全天平均值的85%，原因是该时段风电大发、清洁能源发电量占比较高；夏季、秋季、冬季典型日19~24 h时段的电碳因子较高，约为全天平均值的1.05倍，原因是该时段处于用电高峰期，火电发电量大幅增加，而清洁能源发电量占比较低。

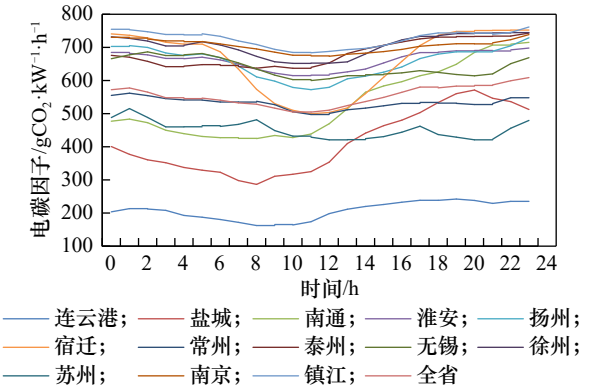

图9　江苏省及各地级市夏季典型日电碳因子曲线

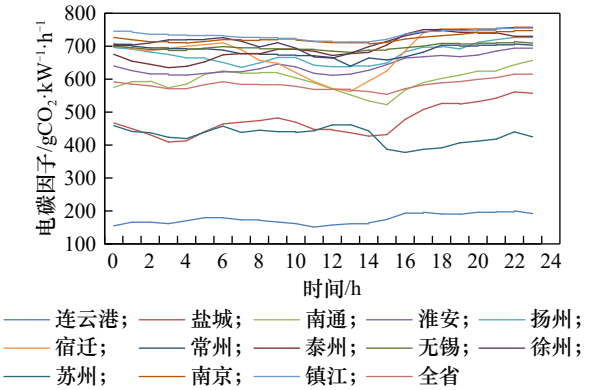

图10　江苏省及各地级市秋季典型日电碳因子曲线

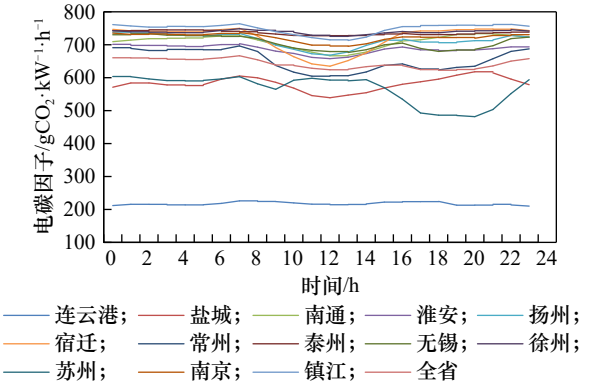

图11　江苏省及各地级市冬季典型日电碳因子曲线

从地级市分布情况看，镇江、南京、徐州的电碳因子较高，约为全省平均值的1.2~1.3倍，原因是相关地区的火电发电量占比较高（>90%）；连云港、盐城、苏州的电碳因子较低，分别约为全省平

均值的30%、60%、80%，原因是3个地区的清洁能源发电量占比均较高，如连云港的核电发电量较大，盐城的海上风电发电量较大，苏州通过锦苏、白鹤滩–江苏直流大规模受入四川省的水电。

四、分时分区电碳因子在产品碳足迹核算中的应用展望

（一）分时分区电碳因子在产品碳足迹核算中的应用前景

1. 优化产品碳足迹核算的基础参数

分时分区电碳因子计算方法与电力行业CO_2排放核算法一脉相承，数据来源可监测、易验证，计算流程简洁清晰。从计算范围看，目前国家正式发布的电碳因子是全国和各省份的年度平均数据，而分时分区电碳因子计算方法能够计算地级市、逐日或逐小时的电碳因子，用于补充计算更精细的地区性电碳因子。从计算时效性看，基于年度化石能源消耗统计数据计算的电碳因子间隔时间过长，而分时分区电碳因子计算方法可基于电网企业、发电企业实时采集的电量统计数据来动态更新电碳因子。可见，分时分区电碳因子作为年度平均电碳因子的细化和拓展，能够完善我国电碳因子计量体系、支撑省市级电碳因子数据库建设；为企业核算电力间接碳排放提供更加精准的基础计算参数，为碳排放溯源提供可靠依据，支持跨区域、跨行业的检验和对比，提高产品碳足迹计算结果的国际认可度。与之相似，美国国家环境保护局建设了发电排放和资源综合数据库，提供各州的碳排放总量和碳排放率的统计数据，用于分析和比较不同电力生产条件下的产品环境性能[21]。

2. 完善碳足迹核算标准与碳减排政策体系

以分时分区电碳因子计算结果为基础，通过缩小计算地域范围并细化时段，可实现小时级甚至分钟级的发用电碳排放核算，促进精准分摊电能交易中的碳排放责任。由此形成国际互认的碳排放因子计算标准，完善产品碳足迹核算标准体系，解决我国碳足迹领域标准滞后的问题，支持国内企业对接国际绿色贸易规则，打破国际绿色贸易壁垒，增强工业产品的绿色竞争力。分时分区电碳因子可反映各地区不同时间的电力碳排放水平，为国家和地方制定碳排放约束性目标提供精准参考，将降碳目标落实到具体的用户主体，推进全社会降碳工作，完善碳排放“双控”制度体系。在更多的高耗能、高排放行业进入碳市场后，可结合分时分区电碳因子，将碳排放因素纳入企业在电力市场、碳市场的报价策略，推动建设更加完善的全国统一大市场。与之相似，挪威相关机构建立了涵盖1.08×10^5个欧洲城市的地区级碳排放因子清单，支持平方千米级空间分辨率的碳排放估算，更加准确地开展城市层面的碳排放管理[22]。

3. 促进更加绿色低碳的产品生产模式

基于分时分区电碳因子，可将清洁能源发电与电力消费含碳量进行关联，可靠预测未来数天的分时分区电碳因子变化趋势，引导企业和居民根据电碳因子信息、电价水平制定更合理的生产生活计划（低碳时段多用电、高碳时段少用电），进而优化用能行为，推动绿色电力消费，促进清洁能源消纳，降低产品碳足迹的碳排放值，从消费端推动电力生产源头减碳。2024年7月，国家电网有限公司基于分时分区电碳因子开发了“电碳表”，在江苏省苏州市开展了试点应用[23]。“电碳表”准确分类并统计用户的购电成分，溯源度电到厂，动态分析能源生产、传输、消纳全过程数据，实时度量电力市场用户购电形成的间接碳排放，支持企业掌握碳排放情况并优化生产用电安排，实施更加绿色低碳的生产模式。与之相似，美国WattTime技术公司提供了分时分区的边际电力碳排放因子信息，支持用户实时了解电力系统的碳排放情况，从而选择更清洁、更低碳的电力[24]。

（二）结合分时分区电碳因子完善产品碳足迹核算的有关措施

我国产品碳足迹核算工作仍处于起步阶段，存在碳足迹数据库涵盖产品种类单一且更新速度慢、电碳因子等基础参数难以满足可溯源要求、认证机构“小散弱”、较少参与制定国际标准等问题，造成部分出口企业被迫选择欧洲的第三方机构进行产品碳足迹核算认证。未来，可从四方面着手完善我国产品碳足迹核算工作。

1. 推动分时分区电碳因子应用

建立常态化的电碳因子更新和发布机制，完善分时分区电碳因子的计算方法，引入人工智能、大数据等技术提高计算参数的可获得性和准确度，更

加真实地反映电力消费中的碳排放水平，推动碳排放的精准量化评估，提高分时分区电碳因子的权威性和应用价值。加强分时分区电碳因子的推广应用，推动电碳数据联动监测，开展融合电能计量和碳计量的“电碳表”试点示范，基于电力交易信息实现企业用电精准溯源、基于分时分区因子的碳排放数据测算，切实支撑产品碳足迹核算。结合地区发展实际，明确不同层级电碳因子的应用范围，开展未来分时分区电碳因子的预测性计算，建立中长期电碳因子数据库并拓展数据库的应用场景。

2. 加强火电碳排放的连续在线监测

火电是电力间接碳排放的主要来源，采用连续在线监测技术进行碳排放的自动和实时测量，可从源头保障电力实时碳排放数据的准确性和可信度。自20世纪90年代起，美国即对火电CO_2排放进行监测。我国正在推进相关技术示范应用，如生态环境部已启动两批次碳监测评估试点，共有114台火电机组安装了CO_2在线监测装置[25~27]。应用人工智能、区块链、智能合约等信息技术，发展高精度、数智化火电连续碳排放监测装置，拓展碳排放监测试点的行业范围，健全监测数据质量评价指标体系。基于火电碳排放连续监测数据开展分时分区电碳因子计算，为我国产品碳足迹核算提供精确、透明的基础数据。

3. 制定产品碳足迹核算标准

产品碳足迹标准体系是碳核算认证的重要支撑，电力间接碳排放核算是重要的组成部分。依托电力企业实施科技攻关，规范分时分区电碳因子计算过程和数据来源，推动计算结果公开发布，确保基础数据的有效性和一致性；开展国际比较和案例验证，增强相关计算结果的可信度和可比性，形成分时分区电碳因子核算国家标准和技术规范。发挥标准引领作用，完善电力间接碳排放核算核查、碳减排量化评估、降碳减污控制监测、产业链低碳数字化等标准[28,29]，推动产品碳足迹核算技术研发和标准研制。形成以通用技术标准为基础、不同类型产品碳足迹技术标准全覆盖的标准体系，鼓励行业领军企业发挥技术和资源优势，推进国家标准成果向国际标准转化。

4. 建立与国际接轨的产品碳足迹核算认证体系

碳认证是建立产品碳足迹管理体系的组成部分，发挥着“传递信任、服务发展”的重要作用[26]。发达国家开展碳标识、碳足迹工作，均建立了相应的管理与认证制度，呈现认证制度国际统一的发展态势[30]。在我国构建碳足迹管理体系过程中，将建立健全统一、规范、互认的产品碳足迹认证制度作为重点工作，主动对接国际绿色贸易规则规制，健全碳足迹认证体系，支持第三方机构对碳足迹认证结果的检验，提高认证结果的科学性、有效性、权威性。培育具有国际影响力的碳排放认证机构，推动与主要贸易伙伴建立碳足迹数据库、建模方法、认证机构资质的互认机制，顺畅衔接国际互认的碳足迹数字护照制度。建立产品碳足迹标签的智能化平台，开展重点行业碳足迹碳标签技术应用验证，推行产品碳标识制度。

五、结语

分时分区电碳因子是计算电力间接碳排放的基础参数，在产品碳足迹核算中发挥着重要作用。本文基于电力系统生产运行实际，提出了分时分区电碳因子计算方法，精细化地计算地级市级逐日或逐小时的电碳因子，以准确反映碳排放的地理分布、季节性、时段性变化特征，促成电碳因子数据库的完善和更新。分时分区电碳因子将在完善碳足迹核算标准和碳减排政策体系、推进更加绿色低碳的产品生产模式方面发挥基础性作用，可积极开展相关应用，深化火电碳排放连续在线监测能力，加快建设与国际接轨的产品碳足迹核算认证体系，全面加强我国产品碳足迹核算工作。

后续，进一步提升基础数据的可获得性，完善分时分区电碳因子计算流程，编制相应的计算规范和标准。拓展分时分区电碳因子的实际应用场景，在产品碳足迹核算认证平台、“电碳表”、虚拟电厂中引入实时电碳因子模块，引导企业用户降低产品生产过程中的电力间接碳排放，提升产品绿色价值。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 23, 2025; **Revised date:** July 18, 2025

Corresponding author: Zhao Liang is a professor-level senior engineer of Energy Research Institute of China Huaneng Group Co., Ltd. His major research fields include carbon neutrality theory and carbon reduction technology. E-mail: zhao_liang@chng.com.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Green and Low Carbon Development Mechanism under the ‘Dual Carbon’ Goal” (2025-PP-06); Jiangsu Provincial Science and Technology Project (BT2024014)

参考文献

[1] 周楠, 邱波, 赵良, 等. 我国碳达峰碳中和“1+N”政策体系分析与展望 [J]. 可持续发展经济导刊, 2023 (S2): 62–66.
Zhou N, Qiu B, Zhao L, et al. Analysis and prospect of China’s carbon peak and carbon neutrality “1+N” policy system [J]. China Sustainability Tribune, 2023 (S2): 62–66.

[2] 生态环境部2024年11月例行新闻发布会实录 [EB/OL]. (2024-11-06)[2025-07-15]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202411/t20241106_1093622.shtml.
Ministry of Ecology and Environment transcript of regular press conference in November 2024 [EB/OL]. (2024-11-06)[2025-07-15]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202411/t20241106_1093622.shtml.

[3] 周楠, 邱波, 赵良, 等. 欧盟碳边境调节机制影响分析 [J]. 中国财政, 2022 (13): 80–81.
Zhou N, Qiu B, Zhao L, et al. Impact analysis of EU carbon border adjustment mechanism [J]. China State Finance, 2022 (13): 80–81.

[4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南: GB/T 24067—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Greenhouse gases—Carbon footprint of products: Requirements and guidelines for quantification: GB/T 24067—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[5] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 195–204.
Shu Y B, Xie D, Zhao L, et al. Re-electrification in China under the carbon neutrality goal [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 195–204.

[6] 谢典, 高亚静, 刘天阳, 等. “双碳”目标下我国再电气化路径及综合影响研究 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44(3): 1–8.
Xie D, Gao Y J, Liu T Y, et al. Study on the impact of re-electrification on the path to carbon peaking and carbon neutralization in China [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(3): 1–8.

[7] 刘天阳, 谢典, 刘美, 等. 再电气化是实现碳中和的关键路径 [J]. 中国电力企业管理, 2022 (4): 63–64.
Liu T Y, Xie D, Liu M, et al. Re-electrification is the key path to achieve carbon neutrality [J]. China Power Enterprise Management, 2022 (4): 63–64.

[8] 李姚旺, 张世旭, 杨晨, 等. 考虑绿电与绿证交易的实时用电碳核算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(12): 4543–4556.
Li Y W, Zhang S X, Yang C, et al. Real-time carbon emission accounting method considering green electricity and green certificate transactions [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4543–4556.

[9] 江亿, 张吉, 张涛, 等. 电力动态碳排放责任因子 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 7024–7039.
Jiang Y, Zhang J, Zhang T, et al. Dynamic carbon emission responsibility factor of electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 7024–7039.

[10] 马军, 刘玉文, 胡乐德, 等. 基于碳排放核算的园区级新型电力系统零碳建设要素分析 [J]. 电工技术, 2024 (2): 184–187.
Ma J, Liu Y W, Hu L D, et al. Carbon emission accounting-based analysis of zero-carbon elements in construction of park-level new power systems [J]. Electric Engineering, 2024 (2): 184–187.

[11] 远景科技集团, 德勤中国. 光伏组件碳足迹及低碳发展报告 [R]. 北京: 德勤中国, 2024.
Envision, Deloitte. Photovoltaic module carbon footprint and low carbon development report [R]. Beijing: Deloitte, 2024.

[12] 康小平, 聂慧慧, 郜敏, 等. 电动汽车全生命周期碳排放 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 976–984.
Kang X P, Nie H H, Gao M, et al. Research on carbon emission of electric vehicle in its life cycle [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 976–984.

[13] 关于发布2022年电力二氧化碳排放因子的公告 [EB/OL]. (2024-12-20)[2025-07-15]. http://res.cenews.com.cn/hjw/news.html?aid=1185766.
Announcement on the release of carbon dioxide emission factors for electricity in 2022 [EB/OL]. (2024-12-20)[2025-07-15]. http://res.cenews.com.cn/hjw/news.html?aid=1185766.

[14] 中国工业节能与清洁生产协会碳中和专业委员会. 全球视野下的碳足迹政策: 比较与启示 [R]. 北京: 中国工业节能与清洁生产协会碳中和专业委员会, 2024.
China Industrial Energy Conservation and Cleaner Production Association Carbon Neutrality Committee. Carbon footprint policy from a global perspective: Comparison and enlightenment [R]. Beijing: China Industrial Energy Conservation and Cleaner Production Association Carbon Neutrality Committee, 2024.

[15] 刘广一, 王继业, 汤亚宸, 等. 电网碳排放因子研究方向与应用需求的演变进程 [J]. 电网技术, 2024, 48(1): 12–28.
Liu G Y, Wang J Y, Tang Y C, et al. Evolution process of research directions and application requirements of electricity carbon emission factors [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 12–28.

[16] 关于发布2021年电力二氧化碳排放因子的公告 [EB/OL]. (2024-04-12)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202404/content_6945445.htm.
Announcement on the release of carbon dioxide emission factors for electricity in 2021 [EB/OL]. (2024-04-12)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202404/content_6945445.htm.

[17] 2021年电力二氧化碳排放因子计算说明 [EB/OL]. (2024-04-12)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202404/content_6945445.htm.
Calculation explanation of carbon dioxide emission factors for electricity in 2021 [EB/OL]. (2024-04-12)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202404/content_6945445.htm.

[18] 蔡博峰, 赵良, 张哲, 等. 中国区域电网二氧化碳排放因子研究 (2023) [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2023.
Cai B F, Zhao L, Zhang Z, et al. Research on carbon dioxide emission factors of regional power grids in China (2023) [R]. Beijing: Environmental Planning Institute of the Ministry of Ecology and Environment, 2023.

[19] 贾敏, 张立, 张哲, 等. 动态省级电力CO_2排放因子对区域碳达峰路径的影响 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 121–133.
Jia M, Zhang L, Zhang Z, et al. Impacts of dynamic province-level power-grid CO_2 emission factor on regional carbon-peaking pathways [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 121–133.

[20] 中国华能集团有限公司统计资料汇编(2022) [R]. 北京: 中国华能集团有限公司, 2023.
Compilation of statistical data of China Huaneng Group Co., Ltd. (2022) [R]. Beijing: China Huaneng Group Co., Ltd., 2023.

[21] e GRID data explorer [EB/OL]. (2025-04-30)[2025-07-15]. https://www.epa.gov/egrid/data-explorer.

[22] Moran D, Pichler P, Zheng H R, et al. Estimating CO_2 emissions for 108 000 European cities [J]. Earth System Science Data, 2022, 14(2): 845–864.

[23] 贾彦鹏. 碳排放统计核算体系建设背景下完善电碳因子测算的措施研究 [J]. 中国经贸导刊, 2024 (17): 56–58.
Jia Y P. Research on measures to improve the calculation of electric carbon factor under the background of carbon emission statistical accounting system construction [J]. China Economic & Trade Herald, 2024 (17): 56–58.

[24] Grid emissions intensity by electricgrid [EB/OL]. [2025-07-15]. https://www.watttime.org/explorer/#3/41.23/-97.64.

[25] 张春雷, 赵良, 刘逍, 等. 火电CO_2排放连续监测的国际经验分析及启示 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 134–151.
Zhang C L, Zhao L, Liu X, et al. Analysis of international experience in continuous monitoring of CO_2 emissions from thermal power plants and its insights for China [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 134–151.

[26] 吴昊, 任鑫, 朱俊杰. 发电行业二氧化碳排放监测技术现状与综述 [J]. 热力发电, 2023, 52(7): 1–13.
Wu H, Ren X, Zhu J J. Current situation and review of carbon dioxide emission monitoring technology in power generation industry [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 1–13.

[27] 谢典, 高亚静, 芦新波, 等. 能耗“双控”向碳排放“双控”转变的实施路径研究 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44(7): 73–80.
Xie D, Gao Y J, Lu X B, et al. Research on the implementation path of the transition from dual control on energy consumption to dual control on carbon emission [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7): 73–80.

[28] 周楠, 常明, 杨阳, 等. 碳配额收紧, 发电企业如何经营管理碳资产? [J]. 环境经济, 2024 (15): 58–63.
Zhou N, Chang M, Yang Y, et al. With the tightening of carbon quota, how do power generation enterprises manage carbon assets? [J]. Environmental Economy, 2024 (15): 58–63.

[29] 市场监管总局等部门关于开展产品碳足迹标识认证试点工作的通知 [EB/OL]. (2024-09-12)[2025-07-15]. https://www.samr.gov.cn/zw/zfxxgk/fdzdgknr/xwxcs/art/2024/art_205f11161f9a4da0b9fdedd5fccf6c67.html.
Notice of the State Administration for Market Regulation and other departments on carrying out the pilot work of product carbon footprint identification certification [EB/OL]. (2024-09-12)[2025-07-15]. https://www.samr.gov.cn/zw/zfxxgk/fdzdgknr/xwxcs/art/2024/art_205f11161f9a4da0b9fdedd5fccf6c67.html.

[30] 于佳卉, 钱立华, 鲁政委. 碳足迹标识与认证制度: 国际经验与启示 [R]. 上海: 兴业经济研究咨询股份有限公司, 2025.
Yu J H, Qian L H, Lu Z W. Carbon footprint labeling and certification system: International experience and implications [R]. Shanghai: CIB Research Co., Ltd., 2025.