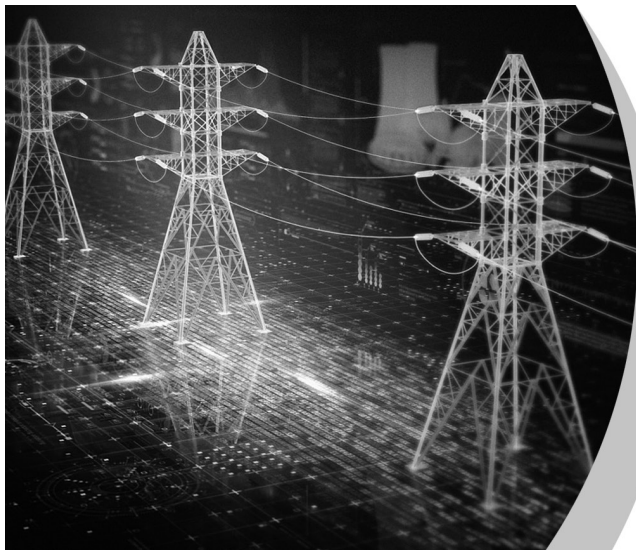


DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2023.276

魏夕凯, 谭效时, 阮嘉桐, 等. 2005—2021年区域和省级电网碳排放因子研究 [J]. 气候变化研究进展, 2024, 20 (3): 337-350

Wei X K, Tan X S, Ruan J T, et al. Research on carbon emission factors of regional and provincial power grids from 2005 to 2021 [J]. Climate Change Research, 2024, 20 (3): 337-350



2005—2021年区域和省级电网 碳排放因子研究

魏夕凯^{1,2}, 谭效时¹, 阮嘉桐², 林明³,
秦露², 孙国立¹, 向可祺¹, 褚曜琿⁴

1 中国船舶集团有限公司第七一四研究所, 北京 100020;

2 中国人民大学环境学院, 北京 100872;

3 广船国际有限公司, 广州 511466;

4 山东大学计算机科学与技术学院, 青岛 250101

摘要: 区域和省级电网碳排放因子是企业用电间接碳排放核算的重要基础, 但官方数据存在时间不连续和较长滞后的问题。文中采用国家发改委公布的区域和省级电网碳排放因子计算方法, 对2005—2021年电网碳排放因子进行计算。通过对比官方数据, 验证了计算结果准确性, 深入研究电网碳排放因子的分布特征、变化趋势及其差异, 并对两种电网碳排放因子进行应用场景分析。结果表明, 区域电网碳排放因子的空间分布呈东北高、西南低, 省级电网碳排放因子的空间分布呈东部高、中西部低, 2005—2021年整体呈下降趋势, 但地区间低碳发展的不平衡加剧。各省发电结构与输入电力来源不同导致省级电网碳排放因子与所在区域电网的碳排放因子存在较大差异, 东部和中部省份的省级电网碳排放因子显著高于区域电网, 西部省份相反。为提升行业企业电力碳排放核算准确度, 优先选择省级电网碳排放因子; 为评估同一区域内各行业企业的减排成效, 应避免各省电力差异导致的不公平问题, 优先选择区域电网碳排放因子。

关键词: 区域电网; 省级电网; 碳排放因子; 碳排放核算; 电力碳排放

引言

随着我国工业化和城市化进程加速推进, 电力需求不断增长, 电力系统碳排放问题引起广泛关注^[1]。目前, 煤炭、石化等24个行业的企业温室气体排放报告均已纳入外购电力的间接碳排放, 其核算方法为政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的排放因子法, 即净购入电量乘以电网碳排放因子^[2]。电网碳排放因子是从电网获取和消费

单位电量对应的间接碳排放量, 受能源结构、电力生产技术、电力系统效率等多种因素影响, 可用于评估全国、区域、省级等不同层级电力系统的碳排放^[3]。区域电网和省级电网是电力系统的重要组成部分, 其碳排放因子的研究可为制定和调整各地能源政策提供科学依据, 进而推动电力行业低碳化发展, 对实现“双碳”目标至关重要。

国内学者多聚焦于区域或省级电网碳排放因子研究, 并取得显著进展。马翠梅等^[3-4]以区域电

收稿日期: 2023-12-13; 修回日期: 2024-01-16

资助项目: 工业和信息化部高技术船舶科研项目“船舶工业碳达峰、碳中和技术路线图和实施方案研究”(CBZ1N21-1); 工业和信息化部高技术船舶科研项目“船舶制造业碳足迹核算方法及碳标识制度研究”(CBG01N23-01-05)

作者简介: 魏夕凯, 男, 工程师, wxk7140732@163.com

网碳排放因子为基础,纳入省际电力交换,开创性地提出省级电网的碳排放因子计算方法,为电力间接碳排放研究提供了新思路。在此基础上,宁礼哲等^[5]计算了2020年区域和省级电网碳排放因子。付坤等^[6]基于生产端与消费端碳排放责任共担原则,提出一种省级电力碳核算方法,并估算出2011年区域和省级电网碳排放因子,为碳核算研究提供了新的方法和数据。侯萍等^[7]充分考虑电力生产技术的影响,提出组织层面的电网碳排放因子,提高了数据的准确性和可比性。宋然平等^[8]提出了涵盖CO₂、CH₄和N₂O三种温室气体的企业外购电排放因子,从而得到更全面的区域电网CO₂当量排放因子。国外研究鲜有涉及区域和省级电网碳排放因子,部分研究基于发电量、燃料、电力市场价格等数据,实现小时级或亚小时级电网碳排放因子计算。Chalendar等^[9-10]提出基于经济投入产出模型的分时分地区电网碳排放因子。Miller等^[11]利用机器学习提出建筑级、小时级的电网碳排放因子计算方法。Hawkes^[12]、Khan等^[13]基于碳强度特征提出实时变化的电网碳排放因子计算方法。上述研究丰富了电网碳排放因子的计算方法,并为深入理解电力碳排放问题提供了重要参考,但与我国政府实际采用的计算方法仍存在差异,未能提供较长时间内区域和省级电网碳排放因子的连续数据,无法动态支撑我国企业电力间接碳排放核算。

各国的能源结构、电力市场组织不同,导致电网碳排放因子的区域划分、电力交换等方面既存在共性特征,又存在个体差异^[14-18]。美国、加拿大、澳大利亚主要根据电网的联系程度,分别将全国电力市场划分为26个次区域电网、13个区域电网、7个区域电网,而欧盟则同时考虑了整体电网碳排放因子和成员国电网碳排放因子。不同国家根据跨区域电力交换量占比等因素,对是否将电力交换纳入电网碳排放因子核算进行差异化处理。例如,美国、欧盟、新西兰的电力交换占比较低^[19],电网碳排放因子核算时不纳入电力交换,而英国与法国、挪威、比利时等周边国家的电力交换占比较高^[19],因此纳入跨区域电力交换。

国内电网碳排放因子根据目标和管理需要,分为全国电网碳排放因子、区域电网碳排放因子、省级电网碳排放因子和区域电网基准线碳排放因子。全国电网碳排放因子主要用于核算参与全国碳市场交易的企业碳排放^[20],国家发改委和生态环境部现已公布2015、2021和2022年数据。区域电网碳排放因子涵盖东北、华北等6个区域电网,主要用于24个行业企业温室气体排放报告^[19,21]。省级电网碳排放因子涵盖30个省级电网,主要用于国家发改委考核各省碳强度下降目标时的净购入电力碳核算^[22-23]。区域电网基准线碳排放因子表示新能源电力设施生产单位电量的减碳量^[24],包括电量边际排放因子和容量边际排放因子,用于核算清洁发展机制项目、温室气体自愿减排项目的减碳量^[25],现已公布2006—2021年数据。

区域和省级电网碳排放因子的官方数据不连续且缺乏时效性,不利于准确核算企业电力间接碳排放。随着绿色发展进程加快,全国可再生能源发电占比较2005年增长13.8个百分点^[26-27],火电能效显著提升^[20],促使电网碳排放因子持续降低。目前,国家发改委和生态环境部仅公布2010—2012年的区域电网碳排放因子数据^[28-29],以及2010、2012、2016年的省级电网碳排放因子数据^[22-23,28],存在7~11年的时间滞后,无法反映各地电力系统低碳发展现状,无法准确评估企业用电碳排放,无法支撑外向型企业应对欧盟碳关税。因此,本文采用国家发改委公布的区域和省级电网碳排放因子计算方法,计算得到2005—2021年中国区域和省级电网碳排放因子,然后通过对比官方数据分析核算结果的准确性,进一步探究电网碳排放因子的空间分布特征、变化趋势及差距,并对两种电网碳排放因子进行应用场景分析。

1 方法与数据

1.1 电网边界

中国区域电网分为华北、东北、华东、华中、西北和南方电网,因数据缺失暂不覆盖港澳台和西藏地区^[28]。其中,内蒙古的东、西部分别隶属

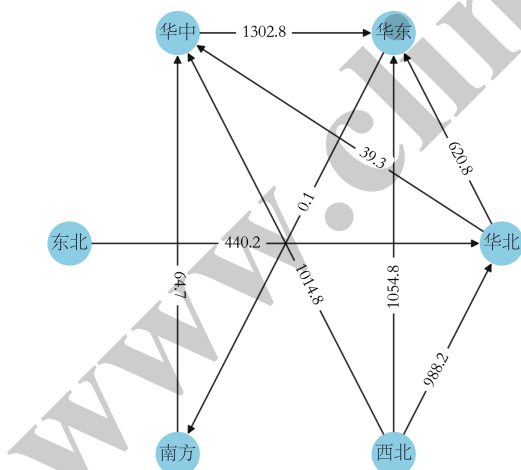
东北、华北电网,但现有的能源统计无法区分,因此为与区域电网保持一致,将内蒙古按隶属华北电网处理^[3,5,30]。按省级行政区域边界划分为 30 个省级电网^[28]。中国区域电网覆盖范围见表 1。

表 1 区域电网覆盖范围
Table 1 The scope of regional power grid

区域电网	覆盖范围
华北电网	北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古
东北电网	辽宁、吉林、黑龙江
华东电网	上海、江苏、浙江、安徽、福建
华中电网	河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆
西北电网	陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆
南方电网	广东、广西、云南、贵州、海南

1.2 区域电网碳排放因子

区域电网碳排放因子的计算方法分为三步:首先,明确区域电网内的发电量和发电直接碳排放。其次,明确区域电网电力净流向关系,2021 年区域电网电力净流向关系如图 1 所示。最后,按照计算公式对每个区域电网依次构建方程式,同时求解所有碳排放因子。



注:图中数值的单位为亿 kW·h。

图 1 2021 年区域电网净流向图

Fig. 1 Net output power flow of regional power grid in 2021

区域电网碳排放因子的计算公式^[28]如下:

$$F_{\text{grid},i} = \frac{C_{\text{grid},i} + \sum_j (F_{\text{grid},j} \times E_{\text{imp},j,i}) + \sum_k (F_k \times E_{\text{imp},k,i})}{E_{\text{grid},i} + \sum_j E_{\text{imp},j,i} + \sum_k E_{\text{imp},k,i}} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{grid},i}$ 为区域电网 i 的碳排放因子, $C_{\text{grid},i}$ 为发电直接碳排放, $E_{\text{grid},i}$ 为总发电量, $E_{\text{imp},j,i}$ 是电网 j 向电网 i 净输送的电量, $F_{\text{grid},j}$ 为区域电网 j 的碳排放因子, $E_{\text{imp},k,i}$ 是电网 i 从 k 国净进口电量, F_k 为 k 国发电碳排放因子。

其中,发电直接碳排放的公式如下:

$$C_{\text{grid},i} = \sum_m (F_m \times D_{m,i}) \quad (2)$$

式中: m 表示第 m 种能源, $D_{m,i}$ 为区域电网 i 用于发电的能源数据, F_m 为第 m 种能源碳排放系数。

碳排放系数由平均低位发热量、含碳量、氧化率组成,公式如下:

$$F_m = N_m \times C_m \times O_m \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式中: N 为平均低位发热量, C 为含碳量, O 为氧化率。

1.3 省级电网碳排放因子

省级电网碳排放因子的计算方法与区域电网碳排放因子基本一致^[28],不同之处是省级电网的电力来源除本省发电量、跨省电力交换量、进口电量外,增加了省级电网所在区域电网向省级电网的净输送电量^[3]。2021 年省级电网电力净流向关系见图 2,同一区域电网和不同区域电网内的省

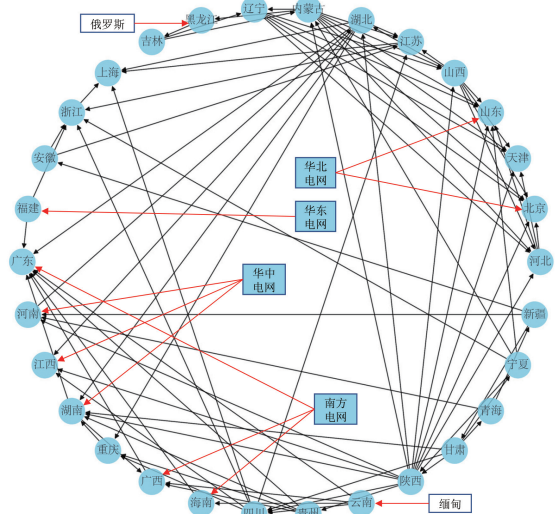


图 2 2021 年省级电网净流向关系

Fig. 2 Net output power flow of provincial power grid in 2021

级电网均存在电力调动，黑龙江、云南分别从俄罗斯、缅甸进口电力。

省级电网碳排放因子的计算公式^[28]如下：

$$F_p = \frac{C_p + \sum_n (F_n \times E_{imp,n,p}) + F_{grid,i} \times E_{imp,i,p} + \sum_k (F_k \times E_{imp,k,p})}{E_p + \sum_n E_{imp,n,p} + E_{imp,i,p} + \sum_k E_{imp,k,p}} \quad (4)$$

式中： F_p 为 p 省电网碳排放因子， C_p 是发电直接碳排放， E_p 是总发电量； $E_{imp,n,p}$ 是 n 省向 p 省净输送电量， F_n 是 n 省电网碳排放因子； $F_{grid,i}$ 为 p 省所在区域电网 i 的碳排放因子， $E_{imp,i,p}$ 是区域电网 i 向 p 省净输送电量； $E_{imp,k,p}$ 是 p 省从 k 国净进口电量。考虑到广东对港澳地区每年输送核电和抽水蓄能电力，因此计算广东省级电网碳排放因子时需在分母中予以扣除。

相关区域电网向省级电网的净输送电量在现

有统计水平下无法精确计算，由于其在各省用电量中平均占比为0.57%，对电网碳排放因子核算结果影响较小，因此可采用以下方法进行近似计算，公式如下：

$$E_{imp,i,p} = \max((E_{u,p} - E_p - \sum_n E_{imp,n,p} - \sum_k E_{imp,k,p}), 0) \quad (5)$$

式中 $E_{u,p}$ 是 p 省年度总用电量。

1.4 数据来源

2005—2021年各省的发电能源数据来自《中国能源统计年鉴》，发电量、跨省电力交换量、跨区域电力交换量、进口电量以及总用电量来自《电力工业统计资料汇编》。

能源碳排放系数见表2，平均低位发热量数据源自《中国能源统计年鉴》和《公共机构能源资

表 2 能源碳排放系数
Table 2 Carbon emission coefficients of fuels

能源	平均低位发热量 / (PJ/(10 ⁴ t) 或 (PJ/(10 ⁸ m ³))	含碳量 / (t C/TJ)	氧化率 / %	碳排放系数 / (t CO ₂ /t 或 (t CO ₂ /(10 ⁴ m ³))
原煤	0.21	26.37	98	1.98
洗精煤	0.26	26.37	98	2.50
其他洗煤	0.10	26.37	98	0.99
型煤	0.18	33.56	98	2.17
煤矸石	0.21	25.80	98	1.94
焦炭	0.28	29.42	93	2.85
焦炉煤气	1.74	13.58	99	8.55
高炉煤气	0.38	70.80	99	9.68
转炉煤气	0.80	46.90	99	13.54
其他煤气	1.06	13.58	99	5.24
其他焦化产品	0.28	29.50	93	2.82
原油	0.42	20.08	98	3.02
汽油	0.43	18.90	98	2.93
煤油	0.43	19.60	98	3.03
柴油	0.43	20.20	98	3.10
燃料油	0.42	21.10	98	3.17
液化石油气	0.50	17.20	98	3.10
炼厂干气	0.46	18.20	98	3.01
其他石油制品	0.51	20.00	98	3.67
天然气	3.56	15.32	98	19.59
液化天然气	0.51	15.32	99	2.86

源消耗统计制度》^[31], 含碳量、氧化率数据来自《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[32]、《中国温室气体清单研究: 2005》^[33]和《综合能耗计算通则》。热力的碳排放系数为 0.11 t CO₂/GJ, 数据来自《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[34]。少数省份从俄罗斯、缅甸进口电力, 电网碳排放因子来自国际能源署^[28]。

2 结果分析

2.1 区域电网碳排放因子

为检验区域电网碳排放因子计算结果的准确性, 需要与官方公布数据^[28-29]进行对比分析。2010—2012 年区域电网碳排放因子的计算数据与官方公布数据的平均差距为 2.14%, 具体见表 3。其中, 2010、2011、2012 年区域电网碳排放因子的平均差距分别为 2.06%、1.97%、2.39%, 华北、东北、华东、华中、西北、南方电网的碳排放因子平均差距分别为 1.30%、2.77%、3.38%、1.34%、1.27%、2.80%。上述结果表明, 计算结果与官方数据较为接近, 准确度较高。

2005—2021 年区域电网碳排放因子如图 3 所示。我国区域电网碳排放因子在空间分布上表现为东北高、西南低。其中, 华北、东北电网碳排放因子较高, 普遍位于 0.75 ~ 0.90 kg CO₂/(kW·h), 华中、南方电网碳排放因子较低, 普遍位于 0.40 ~ 0.60 kg CO₂/(kW·h)。2005—2021 年间区域电网碳排放因子整体均呈现下降趋势, 平

均值由 0.7427 kg CO₂/(kW·h) 逐渐下降至 0.5751 kg CO₂/(kW·h), 表明电力结构向可再生能源转变。其中, 华中、南方电网碳排放因子下降幅度较大, 分别为 -34.4%、-32.2%, 主要由于水电、风电、光电等可再生能源装机容量快速增长^[35-36], 同时西电东送工程与用电侧“电能替代”的全面实施有力提升了可再生能源消纳^[37-38]。而华北、东北电网碳排放因子下降幅度较小, 分别为 -18.6%、-19.2%, 西北电网碳排放因子呈现先上升、后下降, 下降幅度最低, 为 -16.3%。区域电网碳排放因子的变异系数由 2005 年的 0.1665 增长至 2017 年的 0.2736, 表明我国区域间低碳发展差异显著增加。随着电力行业深入开展节能降碳^[1,39-40], 全国火电供电标准煤耗显著下降^[20], 促使变异系数逐渐下降, 2021 年降至 0.2287, 区域间低碳不平衡发展有所改善。

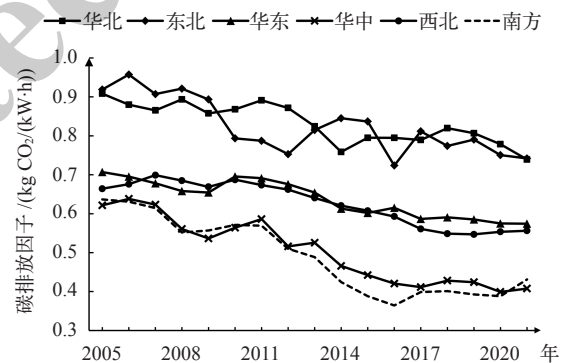


图 3 2005—2021 年区域电网碳排放因子
Fig. 3 Carbon emission factors of regional power grids from 2005 to 2021

表 3 区域电网碳排放因子计算数据与官方数据的比较

Table 3 Comparison between the calculated carbon emission factors of regional power grids from 2010 to 2012 and official data
kg CO₂/(kW·h)

区域电网	2010 年			2011 年			2012 年			平均差距
	计算数据	官方数据	差距	计算数据	官方数据	差距	计算数据	官方数据	差距	
华北电网	0.8680	0.8845	1.86%	0.8914	0.8967	0.59%	0.8716	0.8843	1.44%	1.30%
东北电网	0.7936	0.8045	1.36%	0.7872	0.8189	3.88%	0.7529	0.7769	3.08%	2.77%
华东电网	0.6957	0.7182	3.13%	0.6911	0.7129	3.05%	0.6757	0.7035	3.95%	3.38%
华中电网	0.5642	0.5676	0.61%	0.5864	0.5955	1.53%	0.5158	0.5257	1.87%	1.34%
西北电网	0.6873	0.6958	1.22%	0.6735	0.6860	1.82%	0.6620	0.6671	0.76%	1.27%
南方电网	0.5711	0.5960	4.18%	0.5692	0.5748	0.97%	0.5099	0.5271	3.26%	2.80%

2.2 省级电网碳排放因子

2010、2012、2016年省级电网碳排放因子的计算数据与官方公布数据^[22-23,28]的平均差距为3.27%。其中,2010、2012、2016年省级电网碳排放因子的平均差距分别为2.78%、3.05%、3.99%,北京、河北、山西等19个省级电网的3年平均差距低于4%。上述结果表明,省级电网碳排放因子计算结果与官方数据误差较小,准确度较高。

2005—2021年省级电网碳排放因子如图4所示。省级电网碳排放因子在空间分布上具有较强的规律性,2021年省级电网碳排放因子高于0.7000 kg CO₂/(kW·h)的7个省份全部分布在东部地区,低于0.5000 kg CO₂/(kW·h)的11个省份中,8个省份集中分布在中西部地区。所有省份的省级电

网碳排放因子整体呈下降趋势,平均值由0.7255 kg CO₂/(kW·h)下降至0.5560 kg CO₂/(kW·h),较2005年下降24.0%。云南、四川的省级电网碳排放因子下降幅度较高,分别为-72.9%、-69.0%,主要原因是两地位于第一、第二地势阶梯的交界处,地势落差大,水系发达且河流径流量高,水电禀赋丰富^[41],2010年以来相继建成溪洛渡、向家坝等多个大型水电站^[42],2021年发电结构中水电占比均为80%以上,较2005年增长约20个百分点^[27]。河北、内蒙古、黑龙江、宁夏等省份的煤炭资源丰富,发电结构中火电占比约70%,新增装机以火电为主^[27],而煤炭的低位发热量相对较低、含碳量较高,发电效率较低^[43],导致单位发电量的碳排放量较高,因此省级电网碳排放因

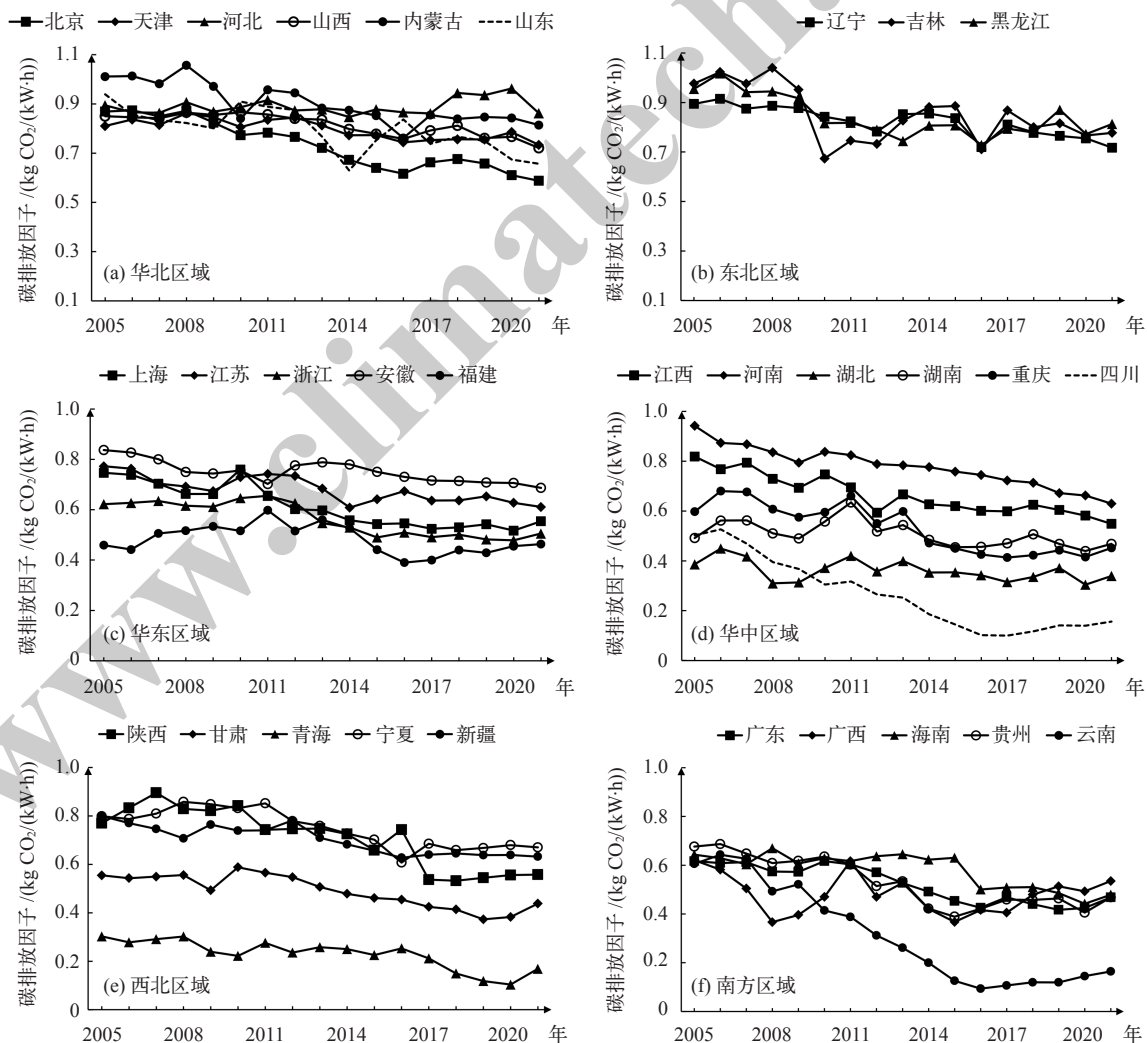


图4 2005—2021年省级电网碳排放因子

Fig. 4 Carbon emission factors of provincial power grids from 2005 to 2021

子下降幅度低于 15%。

相较于区域电网碳排放因子, 省级电网碳排放因子的差异更加明显。2021 年电网碳排放因子最高的河北省 ($0.8624 \text{ kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$) 是电网碳排放因子最低的四川省 ($0.1559 \text{ kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$) 的 5.53 倍, 极差 $0.7064 \text{ kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 较 2005 年的极差增大 80.1%。同时, 省级电网碳排放因子的变异系数由 0.2515 增长至 0.3780, 显著高于区域电网碳排放因子的变异系数, 表明我国省际间低碳发展的不均衡加剧。

2.3 区域和省级电网碳排放因子差距

由于相同区域内各省的发电能源结构、输入电力来源和占比不同^[3,44], 导致省级电网碳排放因子与所在区域电网的碳排放因子存在较大差异。2005 与 2021 年区域与省级电网碳排放因子差距对比如图 5 所示, 其中, 电网碳排放因子差距 = (省级电网碳排放因子 - 区域电网碳排放因子) / 区域电网碳排放因子。

省级电网碳排放因子显著高于区域电网的省份主要分布在东部和中部, 省级电网碳排放因子显著低于区域电网的省份主要分布在西部。华中电网各省的排放因子差距最大, 2005 和 2021 年的差距分别为 27.5%、32.2%。其中, 河南 2005 年省级电网较华中电网碳排放因子高 51.6%, 主要原

因是发电结构中火电占比高达 95.2%, 显著高于华中区域火电平均占比^[26], 随着火电装机容量持续提升^[45], 2021 年差距增长至 54.5%。四川 2021 年省级电网比华中电网碳排放因子低 61.8%, 差距为 $0.2518 \text{ kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 而 2005 年二者差距为 $0.1192 \text{ kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 表明水电规模增加促使四川电力低碳化水平持续提高。青海 2005 年省级电网较西北电网碳排放因子低 54.5%, 主要原因是其可再生发电占比为 74.4%, 而西北电网内的陕西、宁夏、新疆可再生能源占比均低于 15%^[26]; 随着“十二五”以来青海的风电、光电快速发展^[46-47], 2021 年可再生能源发电占比增长至 84.9%^[27], 电网碳排放因子差距为 -69.7%。东北电网各省的电网碳排放因子差距最小, 2005 和 2021 年的差距分别为 4.3%、5.9%, 主要由于黑龙江、吉林、辽宁均以火电为主, 并且与其他省份存在较少的电力净输入。2005 年区域与省级电网碳排放因子的平均差距为 13.9%, 2021 年增长至 18.1%, 表明同一区域内不同省份的低碳发展不均衡加剧。

少数省份的电网碳排放因子差距较为特殊。北京火电占比始终高于华北区域平均火电占比, 但由于北京火电投入的化石燃料总量中天然气占比为 93.4%^[48], 单位热量的天然气碳排放量约为煤炭的 60%^[3], 因此 2021 年北京省级电网碳排放因子低于华北电网碳排放因子 20.5%。2005 年广东

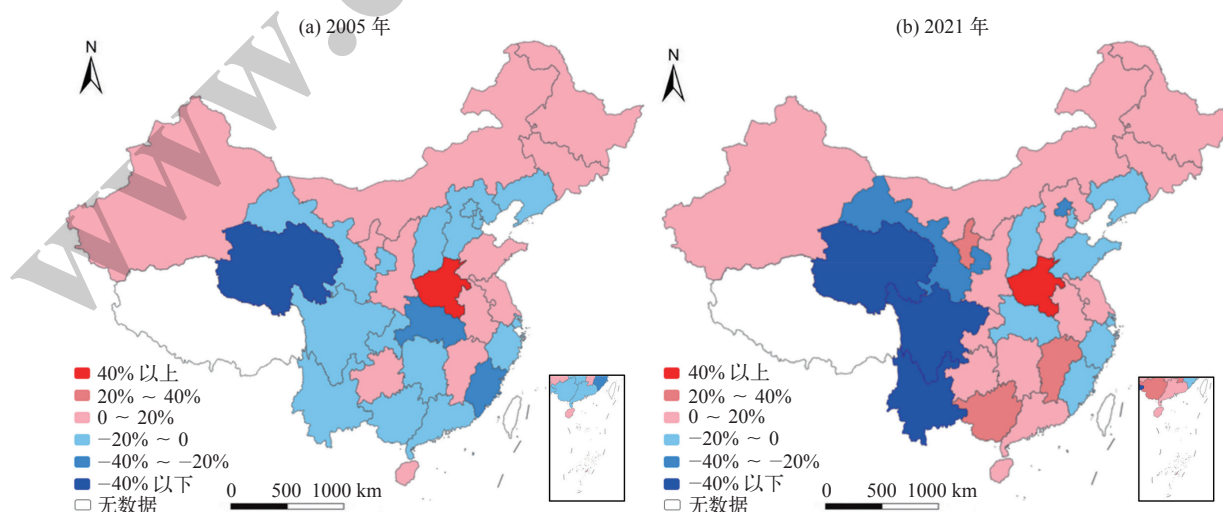


图 5 2005 与 2021 年区域与省级电网碳排放因子差距

Fig. 5 Difference in carbon emission factors between regional and provincial power grids in 2005 and 2021

火电占比高于南方区域平均火电占比 9.6 个百分点^[26]，但由于 49% 的调入电力来自电网碳排放因子较低的湖北^[26]，从而促使广东省级电网碳排放因子低于南方电网碳排放因子。随着广东火电占比持续提升，2021 年达到 73.6%，高于南方电网区域平均火电占比 19.7 个百分点，同时来自湖北的调入电力降至 7%^[27]，促使广东省级电网碳排放因子高于南方电网碳排放因子。

2.4 应用场景分析

区域电网碳排放因子主要用于编制行业和企业碳排放报告中的电力间接碳排放核算。以电力消费最高的有色金属冶炼和压延加工业（以下简称有色行业）为例，分别采用 2012 年和 2021 年区域电网碳排放因子、2021 年省级电网碳排放因子核算了 2021 年各省有色行业电力碳排放，如表 4 所示。采用滞后的区域电网碳排放因子（2012 年数

表 4 2021 年各省有色金属冶炼和压延加工业电力碳排放
Table 4 Carbon emissions from smelting and pressing of nonferrous metals industries in provinces in 2021

省份	电力消费量 / 亿 kWh	基于 2012 年区域电网碳排放 因子的电力碳排放 / 万 t	基于 2021 年区域电网碳排放 因子的电力碳排放 / 万 t	基于 2021 年省级电网碳排放 因子的电力碳排放 / 万 t
北京	3.5	30.9	26.2	20.9
天津	9.7	84.2	71.4	70.9
河北	17.1	149.2	126.6	147.7
山西	201.6	1757.1	1490.0	1453.9
内蒙古	954.6	8320.0	7055.4	7773.1
山东	1287.7	11224.0	9518.1	9238.1
辽宁	108.2	814.8	803.0	841.2
吉林	6.9	52.3	51.5	56.4
黑龙江	4.2	31.4	31.0	23.2
上海	5.7	38.7	32.9	35.0
江苏	93.6	632.6	537.5	473.3
浙江	90.6	612.4	520.4	622.7
安徽	53.3	360.4	306.2	247.2
福建	135.3	914.1	776.8	742.1
江西	118.5	611.1	483.0	778.7
河南	448.3	2312.6	1827.9	2823.2
湖北	28.9	148.9	117.7	98.0
湖南	52.3	269.8	213.3	244.9
重庆	101.2	521.8	412.4	473.3
四川	162.2	836.9	661.5	868.2
广东	127.9	652.3	551.7	612.7
广西	281.4	1434.8	1213.6	1271.2
海南	0.4	1.8	1.5	0.6
贵州	255.8	1304.3	1103.3	1197.0
云南	532.0	2712.7	2294.5	873.3
陕西	188.4	1247.4	1047.9	1050.9
甘肃	430.6	2850.9	2394.9	1885.4
青海	373.7	2473.8	2078.1	630.6
宁夏	181.0	1198.3	1006.6	1212.5
新疆	1026.0	6792.4	5705.8	6481.5

据)导致高估行业企业的电力碳排放,不利于准确评估实际碳排放水平。分别采用 2012 和 2021 年区域电网碳排放因子核算的 2021 年山东有色行业电力碳排放差距达 1706 万 t,占使用 2021 年区域电网碳排放因子核算结果的 17.9%。随着欧美逐渐建立碳关税,省级电网碳排放因子开始应用于产品碳足迹的电力碳排放核算。采用省级电网碳排放因子导致电力碳排放的省际差异显著增加,青海、云南等 13 个省采用省级电网碳排放因子的核算结果较采用区域因子的核算结果低 24.7%。有色行业为达成政府碳强度考核要求、降低环保履约成本,未来可能由内蒙古、新疆等富煤地区转移至清洁能源富集省份。采用省级电网碳排放因子的电力碳核算结果相较于采用区域电网碳排放因子精确度更高,但由于省级电网碳排放因子取决于当地的资源禀赋、电力结构和发电效率^[49],电网碳排放因子下降也将促使行业企业电力碳排放下降,因此无法准确评估同一区域内不同省份电力消费行业和企业实施节能减排的实际成效。

省级电网碳排放因子主要用于计算各省碳强度下降率目标考核中的净购入电力碳排放。以 2021 年为例,核算各省的净购入电力碳排放,如表 5 所示。北京、浙江等 15 个省为电力碳排放净购入省份,这些省份集中在东部沿海地区。山东净购入电力碳排放最高,达 8771.7 万 t,内蒙古净

输出电力碳排放最高,达 15234.7 万 t。随着能耗双控逐步向碳排放双控转变,省级电网碳排放因子对各省碳强度核算的准确性尤为关键。降低省级电网碳排放因子是各省完成碳强度考核的重要举措,不仅需要提高本省发电效率,未来可能促使各地建立跨省跨区域绿电输送通道和绿电交易机制,以及来源清晰、数据准确的跨省绿电交换量统计。目前,张北柔性直流电网工程每年将约 140 亿 kW·h 河北绿电输入北京电网^[50]。

区域和省级电网碳排放因子的选择应根据管理需求和应用场景进行综合考虑。为提升行业企业电力间接碳核算结果的准确度,应在外购电来源和购入量统计明确的前提下,优先采用省级电网碳排放因子。另一方面,为评估、比较同一区域内各行业企业的减排成效,应避免因各省电力结构差异导致的碳核算不公平问题,优先采用区域电网碳排放因子。行业企业未来可能同时面临碳排放报告编制要求和政府的碳强度考核,需要根据后续中国降碳政策的具体要求,选择合适层级的电网碳排放因子。

3 结论与建议

3.1 结论

区域和省级电网碳排放因子是电力间接碳排

表 5 2021 年各省净购入电力碳排放
Table 5 Carbon emissions from net electricity purchases by provinces in 2021

省份	净购入电力碳排放 / 万 t	省份	净购入电力碳排放 / 万 t	省份	净购入电力碳排放 / 万 t
北京	3728.0	浙江	7588.5	海南	25.5
天津	2702.9	安徽	-2402.3	重庆	684.4
河北	6242.5	福建	-435.1	四川	-999.1
山西	-7036.4	江西	605.3	贵州	-2957.1
内蒙古	-15234.7	山东	8771.7	云南	-2679.3
辽宁	3629.5	河南	2727.2	陕西	-3171.3
吉林	-1020.5	湖北	-1880.2	甘肃	-1856.6
黑龙江	-759.8	湖南	1646.0	青海	178.7
上海	2724.4	广东	5800.9	宁夏	-6053.0
江苏	6871.9	广西	-154.7	新疆	-7287.1

放核算的重要基础,对制定各地能源政策和实现电力低碳化发展至关重要。但官方数据不连续且存在 7~11 年的时间滞后,无法反映各地电力系统低碳发展现状。因此,本文基于国家发改委公布的方法,计算了 2005—2021 年区域和省级电网碳排放因子,通过对比官方数据评估核算结果准确性,探究电网碳排放因子的空间分布特征、变化趋势及差距,并对两种电网碳排放因子进行应用场景分析。主要结论如下:

(1) 区域和省级电网碳排放因子的计算结果与官方数据较为接近,平均差距分别为 2.14%、3.27%。

(2) 2005—2021 年区域和省级电网碳排放因子整体呈下降趋势,平均下降约 24%。不同省份差异较大,省际低碳发展的不均衡进一步加剧。在空间分布上,区域电网碳排放因子表现为东北高、西南低,省级电网碳排放因子表现为东部地区高、中西部地区低。

(3) 各省发电结构、输入电力来源的不同导致省级电网碳排放因子与所在区域电网的碳排放因子存在较大差异,具体表现为东部和中部省份的省级电网碳排放因子显著高于区域电网,西部省份相反。

(4) 区域和省级电网碳排放因子应根据管理需求和应用场景综合选择。为提升行业企业电力碳排放核算准确度,应在外购电统计清晰的前提下,优先选择省级电网碳排放因子;为评估同一区域内各行业企业的减排成效,应避免各省电力差异导致的不均衡问题,优先选择区域电网碳排放因子。

3.2 建议

为推动我国电力系统实现低碳发展,基于上述研究结果,提出如下政策建议:

(1) 加强对区域和省级电网碳排放因子的监测评估与数据公布,扩大电力数据的统计范围,实现对各省火电和绿电跨省交换量的准确区分,并通过应用遥感、人工智能、机器学习等先进技术提高数据精确度,以便准确评估电力系统的低碳

发展情况,有效支撑各地电力碳责任的公平划分。

(2) 由于各地电网碳排放因子差异的根本原因是资源禀赋不同,建议结合各省能源结构、电力结构、经济水平等特点,建立区域协同控碳机制,通过加强区域间能源协同、共享低碳技术、建设绿电交易市场等措施,促进跨省跨区域优势互补,实现成本最小化和兼顾公平性的双重目标,避免对行业企业发展的不合理制约。这有助于改善省际低碳发展的不均衡,推动全国一体化低碳发展。

(3) 由于省级电网碳排放因子的应用可能导致电力高消费产业转移,为确保产业转移的可持续性和公平性,建议政府通过投资奖励、税收减免等措施激励企业技术创新,提高电力利用效率,并通过在青海、云南等优势地区设立绿电产业集聚区,吸引电力高消费产业转入,促进绿电资源合理配置,实现产业低碳发展。■

参考文献

- [1] 赵玉荣,刘含眸,李伟,等. “双碳”目标下我国电力部门低碳转型政策研究[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19 (5): 634-644. Zhao Y R, Liu H M, Li W, *et al.* Research on the low-carbon transition policies of power sector under the “double carbon” goal [J]. Climate Change Research, 2023, 19 (5): 634-644 (in Chinese)
- [2] 陈健华,孙亮,陈亮,等. 国内外企业温室气体排放核算标准的比较分析[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12 (6): 545-553. Chen J H, Sun L, Chen L, *et al.* The comparative analysis on the national and international greenhouse gas emission accounting standards for the enterprise [J]. Climate Change Research, 2016, 12 (6): 545-553 (in Chinese)
- [3] 马翠梅,李士成,葛全胜. 省级电网温室气体排放因子研究[J]. 资源科学, 2014, 36 (5): 1005-1012. Ma C M, Li S C, Ge Q S. Greenhouse gas emission factors for grid electricity for Chinese provinces [J]. Resources Science, 2014, 36 (5): 1005-1012 (in Chinese)
- [4] 马翠梅,葛全胜. 中国省域电力部门 CO₂ 排放计算方法研究[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10 (5): 377-383. Ma C M, Ge Q S. Method for calculating CO₂ emissions from power sector at the provincial level in China [J]. Climate Change Research, 2014, 10 (5): 377-383 (in Chinese)
- [5] 宁礼哲,张哲,蔡博峰,等. 2020 年中国区域和省级电网温室气体排放因子研究[J]. 环境工程, 2023, 41 (3): 222-228. Ning L Z, Zhang Z, Cai B F, *et al.* Research on China's regional and provincial electricity GHG emission factors in 2020 [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (3): 222-228 (in Chinese)
- [6] 付坤,齐绍洲. 中国省级电力碳排放责任核算方法及应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24 (4): 27-34. Fu K, Qi S Z. Accounting

- method and its application of provincial electricity CO₂ emissions responsibility [J]. *China Population, Resources, and Environment*, 2014, 24 (4): 27-34 (in Chinese)
- [7] 侯萍, 王洪涛, 张浩, 等. 用于组织和产品碳足迹的中国电力温室气体排放因子 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32 (6): 961-967. Hou P, Wang H T, Zhang H, *et al.* Greenhouse gas emission factors of Chinese power grids for organization and product carbon footprint [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32 (6): 961-967 (in Chinese)
- [8] 宋然平, 朱晶晶, 侯平, 等. 准确核算每一吨排放: 企业外购电力温室气体排放因子解析 [R]. 世界资源研究所, 2013. Song R P, Zhu J J, Hou P, *et al.* Getting everyone on emissions right: an analysis of emission factors for purchased electricity in China [R]. World Resources Institute, 2013 (in Chinese)
- [9] Chalendar J D, Benson S M. Why 100% renewable energy is not enough [J]. *Joule*, 2019, 3 (6): 1389-1393
- [10] Chalendar J D, Taggart J, Benson S M. Tracking emissions in the US electricity system [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116 (51): 25497-25502
- [11] Miller G J, Novan K, Jenn A. Hourly accounting of carbon emissions from electricity consumption [J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17 (4): 044073
- [12] Hawkes A D. Estimating marginal CO₂ emissions rates for national electricity systems [J]. *Energy Policy*, 2010, 38 (10): 5977-5987
- [13] Khan I, Jack M W, Stephenson J. Analysis of greenhouse gas emissions in electricity systems using time-varying carbon intensity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 1091-1101
- [14] Agency U E P. The emissions & generation resource integrated database for 2012 technical support document [R/OL]. 2017 [2024-04-28]. https://19january2017snapshot.epa.gov/energy/emissions-generation-resource-integrated-database-egrid-questions-and-answers_.html
- [15] Canada E. National inventory report 1990–2011: greenhouse gas sources and sinks in Canada [R/OL]. 2013 [2024-04-28]. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/En81-4-2021-3-eng.pdf
- [16] Department for Environment Fa R A. 2013 government GHG conversion factors for company reporting: methodology paper for emission factors [R/OL]. 2013 [2024-04-28]. <https://www.gov.uk/government/publications/green-house-gas-conversion-factors-for-company-reporting-2013-methodology-paper-for-emission-factors>
- [17] Environment M F T. Guidance for voluntary corporate greenhouse gas reporting: data and methods for the 2011 calendar year [R/OL]. 2012 [2024-04-28]. <https://environment.govt.nz/publications/guidance-for-voluntary-corporate-greenhouse-gas-reporting-data-and-methods-for-the-2011-calendar-year/>
- [18] Australian Government/Clean Energy Regulator. National greenhouse and energy reporting system measurement: technical guidelines for the estimation of greenhouse gas emissions by facilities in Australia [R/OL]. 2013 [2024-04-28]. <https://cer.gov.au/schemes/national-greenhouse-and-energy-reporting-scheme>
- [19] 陈政, 何耿生, 尚楠. 面向碳达峰碳中和的电网碳排放因子改进计算方法 [J/OL]. *南方电网技术*, 2024 [2024-01-16]. <http://hfgga60aabc7d15084b00hx5vo0cku6wfv6v95.fhaz.libproxy.ruc.edu.cn/kcms/detail/44.1643.TK.20230912.1021.002.html>. Chen Z, He G S, Shang N. Improved calculation method of power grid carbon emission factor for carbon peak and carbon neutrality goals [J/OL]. *Southern Power System Technology*, 2024 [2024-01-16]. <http://hfgga60aabc7d15084b00hx5vo0cku6wfv6v95.fhaz.libproxy.ruc.edu.cn/kcms/detail/44.1643.TK.20230912.1021.002.html> (in Chinese)
- [20] 张森林. “双碳”背景下优化调整电网碳排放因子的思考 [J]. *中国电力企业管理*, 2022 (22): 62-65. Zhang S L. Reflection on optimizing and adjusting power grid carbon emission factors in the context of “dual carbon” [J]. *Management of China Power Enterprises*, 2022 (22): 62-65 (in Chinese)
- [21] 苏崇崇, 赵锦洋, 胡建信. 中国电力行业 1990—2050 年温室气体排放研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11 (5): 353-362. Su S S, Zhao J Y, Hu J X. Greenhouse gas emissions from power sector in China from 1990 to 2050 [J]. *Climate Change Research*, 2015, 11 (5): 353-362 (in Chinese)
- [22] 国家发展和改革委员会. 国家发展改革委办公厅关于开展“十二五”单位国内生产总值二氧化碳排放降低目标责任考核评估的通知 [Z/OL]. 2016 [2024-04-28]. https://www.bijie.gov.cn/bm/bjsfzggw/dt/tzgg/201708/t20170821_74664200.html. National Development and Reform Commission. Notice of the general office of the national development and reform commission on carrying out responsibility assessment and evaluation for reducing carbon dioxide emissions of gross domestic product units during the 12th Five Year Plan period [Z/OL]. 2016 [2024-04-28]. https://www.bijie.gov.cn/bm/bjsfzggw/dt/tzgg/201708/t20170821_74664200.html (in Chinese)
- [23] 国家发展和改革委员会. 关于做好 2016、2017 年度碳排放报告与核查及排放监测计划制定工作的通知 (发改办气候〔2017〕1989 号) [Z/OL]. 2017 [2024-04-28]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/xdqhbh/wsqtz/201904/t20190419_700399.shtml. National Development and Reform Commission. Notice on doing a good job in carbon emission reporting, verification, and emission monitoring plan development for 2016 and 2017 (Development and Reform Office Climate [2017] No. 1989) [Z/OL]. 2017 [2024-04-28]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/xdqhbh/wsqtz/201904/t20190419_700399.shtml (in Chinese)
- [24] 生态环境部. 2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子 [Z/OL]. 2020 [2024-04-28]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/xdqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml. Ministry of Ecology and Environment. The 2019 emission reduction project China regional power grid baseline emission factors [Z/OL]. 2020 [2024-04-28]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/xdqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml (in Chinese)
- [25] 张时聪, 王珂, 徐伟. 建筑碳排放标准化计算的电力碳排放因子取值研究 [J]. *建筑科学*, 2023, 39 (2): 46-57. Zhang S C, Wang K, Xu W. Study on the value of electricity emission factor for standardized calculation of building carbon emission [J]. *Building Science*, 2023, 39 (2): 46-57 (in Chinese)
- [26] 中国电力企业联合会统计与数据中心. 2005 电力工业统计资料汇编 [M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2006. China Electric Power Enterprise Federation Statistics and Data Center. Compilation of

- statistical data on the electric power industry in 2005 [M]. Beijing: China Electric Power Enterprise Federation, 2006 (in Chinese)
- [27] 中国电力企业联合会统计与数据中心. 2021 电力工业统计资料汇编 [M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2022. China Electric Power Enterprise Federation Statistics and Data Center. Compilation of statistical data on the electric power industry in 2021 [M]. Beijing: China Electric Power Enterprise Federation, 2022 (in Chinese)
- [28] 国家发展和改革委员会. 2010 年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子 [Z/OL]. 2013 [2024-04-28]. <https://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchinaacn/UpFile/Files/Default/20131011145155611667.pdf>. The National Development and Reform Commission. The average carbon dioxide emission factor of regional and provincial power grids in China in 2010 [Z/OL]. 2013 [2024-04-28]. <https://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchinaacn/UpFile/Files/Default/20131011145155611667.pdf> (in Chinese)
- [29] 国家发展和改革委员会. 2011 年和 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子 [Z/OL]. 2014 [2024-04-28]. <https://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchinaacn/UpFile/Files/Default/20140923163205362312.pdf>. National Development and Reform Commission. The average carbon dioxide emission factors of China's regional power grid in 2011 and 2012 [Z/OL]. 2014 [2024-04-28]. <https://www.ccchina.org.cn/archiver/ccchinaacn/UpFile/Files/Default/20140923163205362312.pdf> (in Chinese)
- [30] 宁礼哲, 任家琪, 张哲, 等. 2020 年中国区域及省级电网电力碳足迹研究 [J]. 环境工程, 2023, 41 (3): 229-236. Ning L Z, Ren J Q, Zhang Z, *et al.* Carbon footprint of China's regional and provincial power grids in 2020 [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (3): 229-236 (in Chinese)
- [31] 国家机关事务管理局. 公共机构能源资源消费统计制度 [Z/OL]. 2017 [2024-04-28]. https://ecpi.ggj.gov.cn/zlxz/201707/t20170728_40347.htm. State Administration for State Organ Affairs. Statistical system for energy resource consumption in public institutions [Z/OL]. 2017 [2024-04-28]. https://ecpi.ggj.gov.cn/zlxz/201707/t20170728_40347.htm (in Chinese)
- [32] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南 (试行) [Z/OL]. 2011 [2024-04-28]. http://www.ncsc.org.cn/SY/tjkhybg/202003/t20200319_769763.shtml. National Development and Reform Commission. Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventory (Trial) [Z/OL]. 2011 [2024-04-28]. http://www.ncsc.org.cn/SY/tjkhybg/202003/t20200319_769763.shtml (in Chinese)
- [33] 国家发展和改革委员会. 中国温室气体清单研究: 2005 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2014. National Development and Reform Commission. Research on China's greenhouse gas inventory: 2005 [M]. Beijing: China Environment Publishing House, 2014 (in Chinese)
- [34] 国家发展和改革委员会. 中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行) [Z/OL]. 2013 [2024-04-28]. <https://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1101.pdf>. National Development and Reform Commission. Accounting methods and reporting guidelines for greenhouse gas emissions of Chinese power generation enterprises (Trial) [Z/OL]. 2013 [2024-04-28]. <https://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1101.pdf> (in Chinese)
- Chinese)
- [35] 党杰, 徐友平, 奚江惠, 等. 当前华中电网面临的挑战及应对措施 [J]. 湖南电力, 2014, 34 (4): 31-33, 41. Dang J, Xu Y P, Xi J H, *et al.* Present situation and challenges of Central China power grid [J]. Hunan Electric Power, 2014, 34 (4): 31-33, 41 (in Chinese)
- [36] 蔡立亚, 郭剑锋, 石川, 等. “双碳”目标下中国能源供需演变路径规划模拟研究 [J]. 气候变化研究进展, 2023, 19 (5): 616-633. Cai L Y, Guo J F, Shi C, *et al.* Simulation research on the evolution pathway planning of energy supply and demand in China under the dual carbon targets [J]. Climate Change Research, 2023, 19 (5): 616-633 (in Chinese)
- [37] 胡飞雄, 周保荣, 卢斯煜. 南方电网促进可再生能源消纳的实践及发展展望 [J]. 中国电力, 2018, 51 (1): 22-28. Hu F X, Zhou B R, Lu S Y. The practice and perspective of promoting renewable energy integration in China southern power grid [J]. Electric Power, 2018, 51 (1): 22-28 (in Chinese)
- [38] 蒯鹏, 徐梦昕, 李影, 等. 西电东送北通道碳转移特征研究 [J]. 中国环境科学, 2023, 43 (7): 3766-3774. Kuai P, Xu M X, Li Y, *et al.* Study on carbon transfer characteristics of the North channel of China's west-east power transmission [J]. China Environmental Science, 2023, 43 (7): 3766-3774 (in Chinese)
- [39] 刘志强, 赵毅, 潘荔. 中外火电节能减排效率分析与比较 [J]. 热力发电, 2021, 50 (3): 9-18. Liu Z Q, Zhao Y, Pan L. Analysis and comparison of energy saving efficiency and emission reduction efficiency of thermal power between China and foreign countries [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50 (3): 9-18 (in Chinese)
- [40] 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 等. 基于重点行业 / 领域的我国碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35 (2): 309-319. Yan G, Zheng Y X, Wang X S, *et al.* Pathway for carbon dioxide peaking in China based on sectoral analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35 (2): 309-319 (in Chinese)
- [41] 陈芳森, 曹晓红, 温静雅, 等. 我国水电开发特征分析与发展建议 [J]. 环境保护, 2016, 44 (7): 47-51. Chen F M, Cao X H, Wen J Y, *et al.* Characteristics analysis and suggestions of the hydropower development in China [J]. Environmental Protection, 2016, 44 (7): 47-51 (in Chinese)
- [42] 马洪琪, 李伟起, 迟福东. 能源革命推动西南地区共享发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23 (1): 86-91. Ma H Q, Li W Q, Chi F D. Promoting shared development in Southwest China through energy revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23 (1): 86-91 (in Chinese)
- [43] 于伟静, 杨鹏威, 王放放, 等. 双碳战略背景下中国煤电技术发展挑战 [J]. 煤炭学报, 2023, 48 (7): 2641-2656. Yu W J, Yang P W, Wang F F, *et al.* Research and challenge of coal power technology development in China under the background of dual carbon strategy [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48 (7): 2641-2656 (in Chinese)
- [44] 生态环境部环境规划院. 中国区域电网二氧化碳排放因子研究 (2023) [R/OL]. 2023 [2024-04-28]. https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhjzx/zxdt/202310/t20231027_1044179.shtml. Environmental Planning Institute of the Ministry of Ecology and Environment. Research on carbon dioxide emission factors in China's regional power

- grid (2023) [R/OL]. 2023 [2024-04-28]. https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhjz/xzdt/202310/t20231027_1044179.shtml (in Chinese)
- [45] 寿浩璘, 张力. 新形势下河南电力市场营销策略及分析 [J]. 中国市场, 2020 (6): 114-116. Shou H L, Zhang L. Marketing strategy and analysis of Henan electricity market under the new situation [J]. China Market, 2020 (6): 114-116 (in Chinese)
- [46] 金勇, 马吉明, 朱守真, 等. 可再生能源开发及多能互补分析: 以青海为例 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2022, 62 (8): 1357-1365. Jin Y, Ma J M, Zhu S Z, *et al.* Renewable energy development and multi-energy complementation, taking Qinghai as an example [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62 (8): 1357-1365 (in Chinese)
- [47] 王礼宁. 双碳背景下青海打造清洁能源产业高地的难点与破解路径 [J]. 青海社会科学, 2022 (4): 20-27. Wang L N. Challenges and solutions in building Qinghai as a clean energy industry hub in the context of dual carbon goals [J]. Qinghai Social Sciences, 2022 (4): 20-27 (in Chinese)
- [48] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. Energy Statistics Department of the National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2022 (in Chinese)
- [49] 邱忠涛, 金艳鸣, 徐沈智. 全国碳市场扩容下电力平均排放因子选择对高耗能产业的影响分析 [J]. 中国电力, 2023, 56 (12): 1-7. Qiu Z T, Jin Y M, Xu S Z. Impacts of electricity emission factor selection on high energy-consuming industries with the expanded national carbon market [J]. Electric Power, 2023, 56 (12): 1-7 (in Chinese)
- [50] 刘芳芳. 智慧电力来敲门 [J]. 国家电网, 2021 (1): 32-35. Liu F F. Smart power knocks on the door [J]. State Grid, 2021 (1): 32-35 (in Chinese)

Research on carbon emission factors of regional and provincial power grids from 2005 to 2021

WEI Xi-Kai^{1,2}, TAN Xiao-Shi¹, RUAN Jia-Tong², LIN Ming³,
QIN Lu², SUN Guo-Li¹, XIANG Ke-Qi¹, CHU Yao-Hui⁴

1 714 Research Institute of China Shipbuilding Co., Ltd., Beijing 100020, China; 2 School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 3 Guangzhou Shipyard International Co., Ltd., Guangzhou 511466, China; 4 School of Computer Science and Technology, Shandong University, Qingdao 250101, China

Abstract: The carbon emission factors of regional and provincial power grids are an important basis for accounting of the indirect carbon emissions of enterprise electricity consumption, but official data have problems of discontinuous time and long lag. In this paper, the regional and provincial power grid carbon emission factors from 2005 to 2021 were calculated by using the method published by the National Development and Reform Commission, People's Republic of China. By comparing official data, the accuracy of the calculation results was verified. In-depth research was conducted on the distribution characteristics, change trends, and differences of emission factors, and application scenario analyses were conducted on the two types of emission factors. The results indicate that the carbon emission factors in regional power grids are higher in the northeast and lower in the southwest, carbon emission factors in provincial power grids are higher in the east and lower in the central and west, with an overall downward trend from 2005 to 2021. However, the inequality in low-carbon development between regions has intensified. The different power generation structures and input power sources in different provinces lead to significant differences in emission factors between provincial power grids and regional power grids. The emission factors of provincial power grids in eastern and central provinces are significantly higher than those of regional power grids, while the emission factors of western provinces are the opposite. To improve the accuracy of carbon emissions accounting for industry enterprises, priority should be given to selecting provincial power grid emission factors; to evaluate the emission reduction effectiveness of enterprises in various industries within the same region, it is necessary to avoid unfair issues caused by power differences in different provinces and prioritize the selection of regional grid emission factors.

Keywords: Regional power grid; Provincial power grid; Carbon emission factor; Carbon emission accounting; Carbon emissions of electricity