

DOI:10.13205/j.hjgc.202303031

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.

2020年中国区域及省级电网电力碳足迹研究

宁礼哲¹ 任家琪² 张哲^{3*} 蔡博峰^{3*} 周才华⁴

(1. 浙江吉利控股集团数字科技板块,北京 100176; 2. 北京师范大学 环境学院,北京 100875;
3. 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心,北京 100043; 4. 中环联合认证中心,北京 100101)

摘 要: 电力碳排放的数据质量取决于电网排放因子的准确性。为了获得用于产品碳足迹计算的电网电力碳足迹排放因子,基于电网排放因子数据和计算方法,将核算范围扩展到电力上游的燃料开采与生产、发电设施建设与退役以及电力生产过程,考虑 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体排放,得到 2020 年中国区域及省级的电网电力碳足迹排放因子。结果表明:华北地区排放因子最高(1.005 t CO₂e/MW·h),南方地区排放因子最低(0.470 t CO₂e/MW·h),可再生能源占比高的省份排放因子低,全国排放因子显著降低。研究得到的电网电力碳足迹排放因子可为电力碳排放计算提供参考,建议在计算产品碳足迹时优先使用。

关键词: 电力行业;区域电网;省级电网;碳足迹

CARBON FOOTPRINT OF CHINA'S REGIONAL AND PROVINCIAL POWER GRIDS IN 2020

NING Lizhe¹, REN Jiaqi², ZHANG Zhe^{3*}, CAI Bofeng^{3*}, ZHOU Caihua⁴

(1. Zhejiang Geely Holding Group Digital Technology Sector, Beijing 100176, China;
2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Center for Carbon Neutrality, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100043, China;
4. China Environment United Certification Center, Beijing 100101, China)

Abstract: The data quality of power carbon emissions depends on the accuracy of grid emission factors. In order to obtain the carbon footprint emission factors of the power grid for the calculation of product carbon footprint, based on the original data and calculation method of power grid emission factors, the accounting scope was extended to the upstream fuel mining and production, power generation facility construction and decommission and power production, taking CO₂, CH₄ and N₂O emissions into account. The carbon footprint emission factors of the regional and provincial power grid in China in 2020 (unit: t CO₂e/MW·h) were obtained. The results showed that North China has the highest emission factor (1.005 t CO₂e/MW·h), south China has the lowest emission factor (0.470 t CO₂e/MW·h), the provinces with a high proportion of renewable energy have the lowest emission factors, and the emission factors in nationwide scale decreased significantly. The carbon footprint emission factors of the power grid given in the study provide a reference for the calculation of power carbon emissions, which are recommended to the calculation of product carbon footprint.

Keywords: power industry; regional power grid; provincial power grid; carbon footprint

收稿日期:2022-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目“基于排放情景-空气质量模型的中国城市‘双达’评估方法研究”(72074154)

第一作者:宁礼哲(1996-),男,助理工程师,主要从事企业温室气体排放管理与咨询方面工作。ninglizhe@outlook.com

*通信作者:张哲(1996-),女,助理研究员,主要研究方向为温室气体排放核算和碳达峰碳中和研究。zhangzhe@caep.org.cn

蔡博峰(1977-),男,研究员,主要研究方向为温室气体清单方法学和碳达峰碳中和路径研究。caibf@caep.org.cn

0 引 言

为了应对气候变化,合理规划碳达峰、碳中和路径,需要采集高质量的碳排放数据。电力部门是我国碳排放的首要部门,其碳排放量占我国总碳排放的40%以上^[1]。我国发电量总量不断增加,能源结构也在不断变化。2021年,我国电力需求增长10%,可再生能源发电量也迎来了有史以来最大增长,占全国总发电量的28%^[2]。及时更新数据,准确核算电力碳排放非常重要。目前,电力碳排放核算方法主要有3种:排放因子法、物料衡算法和实测法^[3]。排放因子法由于数据可获得性高,计算方便,因此使用最为广泛。其计算方法是购入和使用电量乘以电网排放因子。电网排放因子取值的准确性直接关系到碳排放数据的质量。目前在国家层面发布的电网排放因子包括:国家发展和改革委员会发布的2010年中国区域和省级电网平均排放因子^[4]、2011年和2012年中国区域电网平均排放因子^[5]、2012年省级电网平均排放因子^[6]、生态环境部发布的2018年省级电网平均排放因子^[7]。除此之外,我国还发布了用于计算清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)减排量的基准线排放因子^[8]。目前公开发布的有国家发展和改革委员会发布的2016年中国区域电网基准线排放因子^[9]、生态环境部发布的2006—2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子^[10]。

但这些排放因子并不能用于生命周期影响评价(life cycle assessment, LCA)研究和产品碳足迹计算。产品碳足迹指的是产品从原材料收集到废弃的全生命周期中直接和间接排放的温室气体总量,而电网平均排放因子计算时只考虑火电燃料燃烧过程的碳排放,不追溯燃料开采和生产过程排放,也不考虑由于发电带来的基础设施建设和废弃的排放。而对于可再生能源发电而言,后者的碳排放不容忽视^[11]。且电网平均排放因子未考虑CH₄、N₂O等温室气体排放,这导致实际的电网排放因子被低估。

部分学者从全生命周期的角度研究了电网电力碳排放。Zhao等^[12]采用LCA法计算了中国某代表性燃煤电厂和风电厂的碳排放因子;张莉^[13]采用LCA法计算了燃煤电厂各个阶段的碳排放因子;王彦哲等^[14]以不同发电厂和发电机组为研究对象,用LCA方法对比了不同发电方式的排放因子;Li等^[15]以发电厂为研究对象,对比了风电和火电全生命周期各个阶段的排放因子。以上研究多以特定发电厂为

研究对象,自下而上计算电力碳排放因子。侯萍等^[8]在国家发展和改革委员会2008年OM排放因子的基础上进行修正和补充,自上而下计算了2008年中国区域电网的产品碳足迹排放因子,并说明了CDM电力边际排放因子、火力发电排放因子、组织碳足迹排放因子和产品碳足迹排放因子的区别。

以上研究结果表明:只计算火电燃料燃烧过程碳排放会远远低估实际的电网排放因子,目前尚缺少从全生命周期的角度计算最新全国区域及省级电网电力碳足迹排放因子的研究。

在全球减排的大背景下,准确计算产品碳足迹的重要性日益增加。欧盟委员会要求自2024年起,电动汽车电池必须建立产品碳足迹声明^[16];欧洲议会通过了碳边境调节机制提案,要求2023年起对多个行业征收碳关税^[17]。国际上也发布了多个用于产品碳足迹计算的标准^[18-20]。但目前计算产品碳足迹的电力排放部分时只能采用国家发改委公布的电网平均排放因子,甚至有研究错用了用于CDM项目减排量计算的基准线排放因子。采用更全面的核算方法和最新的数据计算电网电力碳足迹排放因子,对于准确计算产品碳足迹非常重要。本研究考虑了火力发电、风力发电、水力发电、核能发电、太阳能发电的碳足迹,核算范围包括电力上游燃料和原料开采及生产、发电设施建设和退役、电力生产过程,并考虑输变电线损,核算了CO₂、CH₄、N₂O 3种温室气体的排放,得到2020年中国区域及省级电网电力碳足迹排放因子,用二氧化碳当量排放因子(t CO₂e/MW·h)表示。

1 方法和数据

1.1 核算边界及区域划分

1.1.1 核算边界

火力发电核算范围包括燃料开采与生产、火电站建设与退役、燃料燃烧过程排放。燃料开采与生产排放包括原煤、原油、天然气开采及其他燃料的生产导致的排放。燃料的运输排放数据缺失,且在整个火力发电过程中所占排放不高^[21],因此在本研究中暂不考虑。风力发电、水力发电、核能发电、太阳能发电等非化石能源发电的核算范围包括设备制造、发电厂建设、运行维护和退役全过程的温室气体排放,同时计算考虑输变电损过程。温室气体覆盖范围包括CO₂、CH₄、N₂O 3种温室气体排放,用二氧化碳当量(CO₂e)表示。由于缺少电网建设和运营排放因子,本研究暂不考虑该部分排放。

1.1.2 区域划分

国家发展和改革委员会公布的《2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》^[4]将电网边界统一划分为东北、华北、华东、华中、西北和南方区域电网,不包括西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省。其中,华北区域电网包含蒙西地区(除赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟外的内蒙古其他地区),东北区域电网覆盖蒙东地区(赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟)。但多数数据源无法区分蒙东和蒙西地区,参考生态环境部最新公布的《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》^[10],将内蒙古自治区划归华北电网,不再单独区分蒙东和蒙西电网。因此,上述电网边界包括的地理范围见表1。

表1 中国区域电网边界

Table 1 China's regional power grids' boundary

电网名称	覆盖的地理范围
华北区域	北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、内蒙古自治区
东北区域	辽宁省、吉林省、黑龙江省
华东区域	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省
华中区域	河南省、湖北省、湖南省、江西省、四川省、重庆市
西北区域	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区
南方区域	广东省、广西壮族自治区、云南省、贵州省、海南省

按照省级电网边界与省级行政区域边界相一致的原则,将中国的省级电网划分为北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东、辽宁、吉林、黑龙江、上海、江苏、浙江、安徽、福建、河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广东、广西、云南、贵州和海南电网。由于缺少相关信息,暂不考虑西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省的省级电网。

1.2 排放因子计算方法

1.2.1 区域电网

区域电网电力碳足迹排放因子计算公式如下:

$$EF_{grid,i} = [Em_{grid,i} + \sum_j (EF_{grid,j} \times E_{imp,j,i}) + \sum_k (EF_k \times E_{imp,k,i})] / [\sum_q E_{grid,i,q} + \sum_j E_{imp,j,i} + \sum_k E_{imp,k,i}] \times TL_i \quad (1)$$

式中: $EF_{grid,i}$ 为区域电网 i 的排放因子, $t CO_2e/10^4 kWh$; $Em_{grid,i}$ 为区域电网 i 覆盖的地理范围内发电产生的直接温室气体排放量,由式(2)计算得到, $t CO_2e$; $EF_{grid,j}$ 为向区域电网 i 净送出电量的区域电网 j 的温室气体排放因子, $t CO_2e/10^4 kW \cdot h$; $E_{imp,j,i}$ 为区域电网 j 向区域电网 i 净送出的电量, $10^4 kW \cdot h$;

EF_k 为向区域电网 i 净出口电量的 k 国发电温室气体排放因子, $t CO_2e/10^4 kW \cdot h$; $E_{imp,k,i}$ 为 k 国向区域电网 i 净出口的电量, $10^4 kW \cdot h$; $Em_{grid,i}$ 为区域电网 i 覆盖的地理范围内,应用 q 类型技术发电厂年净上网电量,由式(4)计算得到, $10^4 kW \cdot h$; TL_i 为 i 省年度电力线损率,%; i 为东北、华北、华东、华中、西北和南方区域电网之一; j 为向区域电网 i 净送出电量的其他区域电网; k 为向区域电网 i 净出口电量的其他国家; q 为火电、水力发电、风力发电、核能发电以及太阳能发电之一。

在区域电网 i 覆盖的地理范围内,发电产生的直接温室气体排放量 ($Em_{grid,i}$) 包括火电发电、水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电 5 种发电类型的温室气体排放。

火电发电温室气体排放可通过化石燃料消耗量 (FC_m)、燃料平均低位发热量 (NCV_m)、燃料开采和生产排放因子 ($EF_{1,m}$) 以及燃料燃烧排放因子 ($EF_{2,m}$) 求得,计算见式(2):

$$Em_{grid,i} = \sum_m (FC_m \times EF_{1,m} \times 10^4) + \sum_m \left(\frac{FC_m \times NCV_m \times EF_{2,m}}{100} \right) \quad (2)$$

式中: FC_m 为电网 i 覆盖的地理范围内用于火力发电的化石燃料 m 的消费量,固态和液态燃料单位为 $10^4 t$ 、气态燃料单位为 $10^8 m^3$; $EF_{1,m}$ 为化石燃料 m 开采和生产的温室气体排放因子,固态和液态燃料单位为 $t CO_2e/t$ 、气态燃料单位为 $t CO_2e/10^4 m^3$; NCV_m 为化石燃料 m 的平均低位热值,其中固态和液态燃料单位为 MJ/t 、气态燃料单位为 $MJ/10^4 m^3$; $EF_{2,m}$ 为化石燃料 m 燃烧的温室气体排放因子,由式(3)计算得到, $g CO_2e/MJ$; m 为火力发电消费的化石燃料种类。

$$EF_{2,m} = CC_m \times OF_m \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式中: CC_m 为化石燃料 m 的单位热值含碳量, $g C/MJ$; OF_m 为化石燃料 m 的碳氧化率,%; $\frac{44}{12}$ 为 C 到 CO_2 的质量换算系数。水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电温室气体排放可通过发电量 ($E_{grid,i,q}$) 与每度电隐含的发电生命周期排放因子 (EF_q) 乘积得到,计算见式(4):

$$Em_{grid,i} = \sum_q (E_{grid,i,q} \times EF_q \div 100) \quad (4)$$

式中: EF_q 为水力发电、核能发电、风力发电、太阳能

发电(包括设备制造、发电厂建设、运行维护和退役全过程)分摊到每度电的温室气体排放因子, $g\ CO_2e/kW \cdot h$; $E_{grid,i,q}$ 为水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电厂净上网电量, $10^4\ kW \cdot h$; q 为水力发电、风力发电、核能发电以及太阳能发电之一。

在计算本区域内电厂的净上网电量时,应当扣除发电企业自身厂用电量,计算见式(5):

$$E_{grid,i,q} = E_{plant,i,q} \times (1 - PCR_{i,q}) \quad (5)$$

式中: $E_{plant,i,q}$ 为区域电网 i 覆盖的地理范围内,应用 q 类型技术的电厂年发电量, $10^4\ kW \cdot h$; $PCR_{i,q}$ 为区域电网 i 覆盖的地理范围内,应用 q 类型技术发电厂平均厂用电率, %。

1.2.2 省级电网

省级电网电力碳足迹排放因子计算方法与区域电网类似,但比区域电网多了一重电力来源——区域电网 i 向 p 省净送出的电量。部分区域,如北京,社会总用电量高于本地发电量、其他省份净送入电量之和。因此,考虑缺口部分为华北电网向北京净送出电力。省级电网电力碳足迹排放因子计算如下:

$$EF_p = [Em_p + \sum_n (EF_n \times E_{imp,n,p}) + \sum_k (EF_k \times E_{imp,k,p}) + (EF_{grid,i} \times E_{imp,i,p})] / [\sum_q E_{p,q} \times TL_p + \sum_n E_{imp,n,p} \times TL_p + \sum_k E_{imp,k,p} + E_{imp,i,p} \times TL_p] \quad (6)$$

式中: EF_p 为 p 省电网的温室气体排放因子, $t\ CO_2e/10^4\ kW \cdot h$; Em_p 为 p 省发电产生的温室气体直接排放量,由式(2)计算得到, $t\ CO_2e$; EF_n 为向 p 省净送出电量的 n 省电网温室气体排放因子, $t\ CO_2e/10^4\ kW \cdot h$; $E_{imp,n,p}$ 为 n 省向 p 省净送出的电量, $10^4\ kW \cdot h$; EF_k 为向 p 省净出口电量的 k 国发电温室气体排放因子, $t\ CO_2e/10^4\ kW \cdot h$; $E_{imp,k,p}$ 为 k 国向 p 省净出口的电量, $10^4\ kW \cdot h$; $EF_{grid,i}$ 为区域电网 i 的温室气体排放因子, $t\ CO_2e/10^4\ kW \cdot h$; $E_{imp,i,p}$ 为区域电网 i 向 p 省净送出的电量,由式(7)计算得到, $10^4\ kW \cdot h$; $E_{p,q}$ 为 p 省应用 q 类型技术发电厂年净上网电量,经由式(4)计算为 $10^4\ kW \cdot h$; TL_p 为 p 省年度电力线损率, %; p 为北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东、辽宁、吉林、黑龙江、上海、江苏、浙江、安徽、福建、河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广东、广西、云南、贵州和海南 30 个省份之一; n 为向 p 省净送出电量的其他省份; k 为向 p 省净出口电量的

国家; i 为 p 省所在的区域电网; q 为火电、水力发电、风力发电、核能发电以及太阳能发电之一。

其中,区域电网 i 向 p 省净送出的电量应按式(7)计算,

$$E_{imp,i,p} = \max((E_{u,p} - (E_p - \sum_n E_{imp,n,p} - \sum_k E_{imp,k,p}) \times TL_p), 0) \quad (7)$$

式中: $E_{u,p}$ 为 p 省年度全社会总用电量, $10^4\ kW \cdot h$ 。

1.3 数据来源

1.3.1 活动水平

发电燃料消费量 (FC_m) 来自《中国能源统计年鉴 2021》^[22]; 火电、水电、风电、太阳能发电量 ($E_{p,q}$) 来自《中国电力统计年鉴 2021》^[23]; 核电发电量以及厂用电率 ($PCR_{i,q}$) 来自《2020 年电力工业统计资料汇编》^[24]; 跨省电量交换 ($E_{imp,n,p}$)、进出口电量 ($E_{imp,k,p}$) 以及全社会总用电量 ($E_{u,p}$) 来自《2020 年电力工业统计资料汇编》^[24]。

1.3.2 排放因子

1) 燃料开采和生产排放因子。

燃料开采和生产排放因子数据均来自中国产品全生命周期温室气体排放系数库 (CPCD)^[25]。

2) 燃料燃烧排放因子。

燃料含碳量数据主要采用 2011 年发行的《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[26] 第一章(能源活动)的表 1.5(公共电力与热力),少量未尽数据来自《2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories》^[27]、《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[26]、《2005 中国温室气体清单研究》^[28]。

燃料碳氧化率 (OF_m) 中燃煤的碳氧化率按照 2022 年 12 月发布的《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》^[29] 中提供的最新数据取 99%。其他燃料类型按照 2011 年《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[26] 和《2005 中国温室气体清单研究》^[28]。

平均低位发热量数据主要取自《中国能源统计年鉴 2021》^[22],部分数据来源于《公共机构能源资源消耗统计制度》(2017 年)^[30] 和《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》^[10]。

燃料 CH_4 和 N_2O 排放因子由于缺少中国本土数据,因此采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[27] 的缺省值。

3) 水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电排放因子。

数据均来自中国产品全生命周期温室气体排放系数库(CPCD)^[25]。

4) 进口电量隐含的温室气体排放因子(EF_k)。

中国电力企业联合会发布的《2020 年电力工业统计资料汇编》^[24]显示,2020 年我国与周边多国存在电力跨境交易,以向周边国家售电,支持边境地区发展为主。但仍有例外,2020 年通过黑龙江省从俄罗斯联邦净购入 302804 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电、通过云南省从缅甸联邦共和国净购入 72694 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电。上述 2 国电网二氧化碳排放因子来自 International Renewable Energy Agency (IRENA)^[31],俄罗斯联邦电网二氧化碳排放因子为 $295\text{ g CO}_2/\text{kW}\cdot\text{h}$,缅甸联邦共和国电网二氧化碳排放因子为 $262\text{ g CO}_2/\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

5) 全球升温潜值(GWP)。

计算 CO_2e 依据的是《气候变化 2019:联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告》^[32]中提出的 100 年全球变暖潜势值。 GWP_{CH_4} 取 29.8, $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 取 273。

2 结果与分析

2.1 区域电网电力碳足迹排放因子

2008、2012、2020 年中国区域电网电力碳足迹排放因子如表 2 所示。可知:2020 年华北地区的电网电力碳足迹排放因子($1.005\text{ t CO}_2\text{e}/\text{MW}\cdot\text{h}$)最高,南方地区的排放因子最低($0.470\text{ t CO}_2\text{e}/\text{MW}\cdot\text{h}$)。经计算,各区域之间排放因子标准差为 0.2,说明电网脱碳发展不均衡。区域电网不同阶段碳足迹排放因子见图 1。可知:电网电力碳足迹排放因子中有 93%~95% 来自电力生产,电力生产过程对其电网碳排放影响最大。华北地区燃料开采和电力生产环节的排放因子超过其他地区,而发电厂建设和退役排放位居倒数第 2。原因为:一是华北地区火电占比高,尤其煤炭使用量大,导致温室气体排放量大;二是华北地区再生资源有限,尤其水力资源匮乏。参照国家发展改革委出台的《关于发挥价格杠杆作用促进光伏产业健康发展的通知》^[33]和《关于完善风力发电上网电价政策的通知》^[34],除了内蒙古风光资源丰富外,华北大部分地区均处于Ⅳ类风能资源区、Ⅲ类太阳能资源区。南方地区排放因子最低,与其水电利用密切相关。2020 年全国省级行政区水资源总量排名全国前 10 的省区中,南方 5 省区占据 4 席^[35]。相对丰富的水资源使水电成为南方电网重要的清洁能源,水电不仅装机量大,而且利用率高,为电网减排做出

重要贡献。

表 2 2008、2012、2020 年中国区域电网电力碳足迹排放因子

Table 2 Emission factors for carbon footprint of China's regional power grid in 2008, 2012 and 2020

区域	2008 年碳足迹	2012 年区域电网	2020 年碳足迹
	排放因子 ^[8]	平均排放因子 ^[5]	排放因子
东北	1.370	0.777	0.972
西北	0.944	0.667	0.773
华中	0.826	0.526	0.502
华北	1.280	0.884	1.005
华东	1.040	0.704	0.706
南方	0.853	0.527	0.470

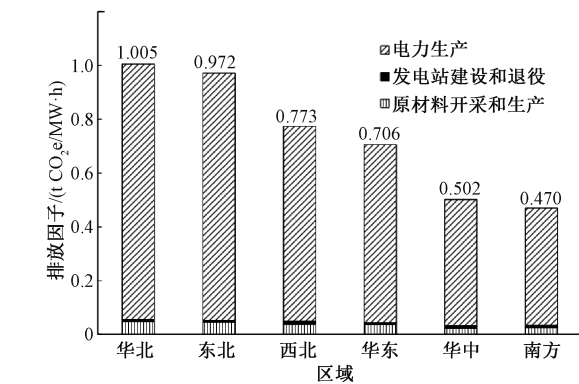


图 1 区域电网不同阶段碳足迹排放因子
Figure 1 Carbon footprint emission factors at different stages of regional power grid

由于本研究核算考虑了可再生能源排放,核算范围纳入了燃料的开采及生产排放、基础设施建设和退役排放以及 CH_4 、 N_2O 的排放,与 2012 年^[5]仅计算燃料燃烧排放的区域电网平均排放因子相比,2020 年计算得出的区域电网电力碳足迹排放因子平均增加了 6%,只有南方地区和华中地区分别下降 11% 和 5%。目前尚未公布 2020 年区域电网平均排放因子,但其值应远小于 2012 年,故 2020 年电网电力碳足迹排放因子的实际增加比例应远大于 6%。说明可再生能源排放、燃料开采及生产、基础设施建设和退役以及 CH_4 、 N_2O 的排放不应该在计算中被省略。如果计算产品碳足迹时使用之前公布的电网平均排放因子计算电网碳排放,会偏离实际。

侯萍等^[8]也计算了我国区域电网电力碳足迹排放因子,计算方法与本研究最接近。对比二者的计算结果,从 2008 年到 2020 年,各区域电网电力碳足迹排放因子均降低明显,平均下降了 31%。可再生能源利用率最高的南方地区下降幅度最大,达到 45%,火电为主的西北地区下降幅度最小,但也下降了

18%。全国电网排放因子同样具有下降趋势。全国电网排放因子从 2015 年 $0.6101 \text{ t CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ^[36] 下降为 2021 年的 $0.5839 \text{ t CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ^[37], 在 2022 年再次下降为 $0.5810 \text{ t CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ^[29], 降低了 4.8%。电网脱碳的成果显著, 归因于我国实施了一系列发展低碳发电的政策。2012—2017 年的《大气污染防治行动计划》^[38] 强化了化石燃料控制政策。此外, 我国还实行了多个煤炭消费控制政策^[39], 制定了到 2020 年和 2030 年可再生能源一次能源占比分别达到 15% 和 20% 的国家目标^[40]。由结果来看, 可再生能源比例的大幅增加为电力排放因子的降低作出了重要贡献^[41], 同时也说明电力排放因子应当定期、及时更新, 过时的数据可能会误导利益相关方。

2.2 省级电网电力碳足迹排放因子

2020 年中国省级电网碳足迹排放因子如表 3 所示。可知: 河北、内蒙古、吉林、天津、山西等燃煤发电占主导地位的省份排放因子较高, 均超过了 $1 \text{ t CO}_2\text{e}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。低碳技术对资源禀赋的依赖程度大, 对于这些内陆缺水省份而言, 增加风能和光伏发电是脱碳的主要途径。尽管上述省份积极增加风电光电装机容量, 却均面临装机量大、消纳量低的问题, 河北情况尤为突出, 年光伏发电小时数 $< 1000 \text{ h}$, 年风电发电小时数也仅为 1500 h 。与生态环境部 2019 年公开的 2018 年省级电网排放因子相比, 2020 年吉林和内蒙古的省级电网电力碳足迹排放因子增长了 50% 以上, 是各省平均增长率 (26%) 的 2 倍; 主要原因就是火力发电, 尤其是煤炭发电仍然在两者发电结构中占有绝对优势。广东、重庆、云南、四川等省份碳排放因子较低, 青海省最低。这些省份根据当地的情况实行了适合的电力减排方案, 比如云南和四川拥有丰富的水电资源^[42], 水电占比超过 80%。青海省尽管地处西北地区, 但具有发展清洁能源的地理和资源优势, 水电、风电、光电均装机量大且利用率高。2020 年, 青海省清洁能源发电装机容量达到 3638 万 kW, 清洁能源发电量 847 亿 $\text{hW} \cdot \text{h}$ 时, 风光发电率达到 90% 以上^[43]。此外, 北京提出 2020 年北京市煤矿全部关停的目标, 一方面用燃气电厂取代燃煤电厂, 另一方面调用省外绿电, 排放因子大幅降低。

从各省 2020 年发电结构 (图 2) 来看, 火电比重小、清洁能源比重大的省份排放因子低, 火电比重大的省份排放因子高。将火电占比与省级电网电力碳足迹排放因子作相关性分析, 发现两者相关性较好

表 3 2020 年中国省级电网碳足迹排放因子

Table 3 Emission factors for carbon footprint of China's provincial power grid in 2020

(t CO ₂ e/MW·h)			
省份	排放因子	省份	排放因子
辽宁	0.9869	江苏	0.8029
吉林	1.0185	浙江	0.6165
黑龙江	0.9842	安徽	0.9051
北京	0.8073	福建	0.5714
天津	1.0149	江西	0.6962
河北	1.2067	河南	0.8304
山西	1.0078	湖北	0.3800
内蒙古	1.1621	湖南	0.5559
山东	0.8852	重庆	0.5010
陕西	0.7592	四川	0.1533
甘肃	0.5344	广东	0.5188
青海	0.1312	广西	0.5730
宁夏	0.9503	海南	0.5550
新疆	0.9281	贵州	0.4940
上海	0.6512	云南	0.1764

($R^2 = 0.6846$), 说明火力发电, 尤其是燃煤发电比例是影响电力碳排放的决定性因素^[44]。云南、青海、四川等省份水电占比极高, 可继续发挥地理优势, 建设水力发电; 海南、福建、广东、浙江等东部沿海地区的省份核力发电量占比均达到 20% 以上, 这些省份具有临海优势, 且经济发展较好, 有利于核电的发展^[45]。北京、天津、上海等地虽然火电占比大, 但本地自发电量很小, 用电多采用调用省外清洁绿电, 因此排放因子也较小。未来具有发展清洁能源地理优势的省份应扩大优势, 增加清洁能源的比重。内蒙、宁夏、山西等燃煤为主的省份, 应提高已有可再生能源发电设备的利用率, 同时提高火力发电效率。在省级层面, 整体火力发电厂效率提高显著, 但由于火力发电的技术和设备存在差异, 不同省份之间仍然具有较大差别。未来技术先进的省份可以进行技术共享, 带动技术落后的省份, 提高整体火电厂发电效率。

3 结 论

电力排放是我国碳排放的主要部分, 准确、及时地获取电网电力碳足迹排放因子是核算电力碳排放的关键。本研究计算了 2020 年中国区域及省级电网电力碳足迹因子, 主要得出以下结论:

在燃料燃烧排放的基础上, 将可再生能源发电、电力上游燃料和原料开采及生产、发电设施建设和退役等过程排放以及 CH_4 , N_2O 排放纳入考虑后, 排放因子增加明显。以上过程对电网电力碳足迹排放因子的计算影响显著, 不容忽视, 后续计算电网排放时

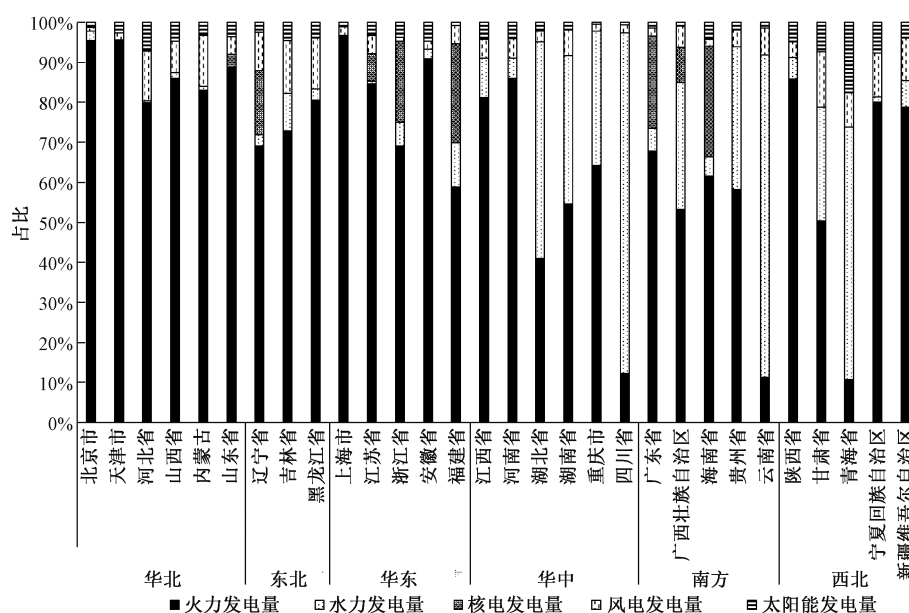


图2 2020年各省份发电结构

Figure 2 Power generation structure of each province in 2020

应纳入考虑。计算产品碳足迹,建议优先使用本研究排放因子。

区域电网电力碳足迹排放因子最大的是华北地区,最小的是南方地区;省级电网电力碳足迹排放因子最大的5个地区是河北、内蒙古、吉林、天津、山西,最小的5个省份是贵州、湖北、云南、四川、青海。总体而言,以火电为主的内陆地区碳排放因子较大,而可再生能源发电占比高的省份碳排放因子大大降低。华北地区发电受地理条件限制,可再生能源大多只能发展风电和光电,其自身资源禀赋较为薄弱,且与火电、水电、核电相比,风电和光电发电不稳定,面临严重的能源消纳问题,即装机量大,但电力未被电网收购,导致资源闲置浪费。对于风电和光电而言,碳排放主要来自于设备生产过程^[14],大量设备的闲置导致华北地区实际的电网碳足迹排放因子将比本研究结果更高。除了华北地区,目前多地的可再生能源发电存在装机容量大,但闲置率高的问题,短期内反而使电网碳排放增大。电网去碳不应仅增加可再生能源发电的装机容量,还要解决电力消纳问题。应该通过技术支持克服部分可再生能源发电不稳定的问题,同时通过政策导向提升现有可再生能源消纳市场,提高已有设备的利用率。此外,还应通过技术共享和革新,提高火力发电效率。

参考文献

[1] 刘惠,蔡博峰,张立,等. 中国电力行业 CO₂ 减排技术及成本研

究[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 8-14.

[2] International Energy Agency (IEA). Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021 [EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>. 2022.

[3] 招景明,李经儒,潘峰,等. 电力碳排放计量技术现状及展望[J]. 电测与仪表, 2022; 1-9.

[4] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子[Z]. 2013.

[5] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子[Z]. 2014.

[6] 国家发展改革委应对气候变化司. 2012年省级电网排放因子[Z]. 2016.

[7] 生态环境部. 生态环境部关于商请提供2018年度省级人民政府控制温室气体排放目标责任落实情况自评报告的函[Z]. 2019.

[8] 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.

[9] 国家发展改革委应对气候变化司. 2016年中国区域电网基准线排放因子[Z]. 2017.

[10] 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]. 2020.

[11] ASDRUBALI F, BALDINELLI G, D ALESSANDRO F, et al. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: review and results harmonization[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1113-1122.

[12] ZHAO X L, CAI Q, ZHANG S F, et al. The substitution of wind power for coal-fired power to realize China's CO₂ emissions reduction targets in 2020 and 2030[J]. Energy (Oxford), 2017, 120: 164-178.

[13] 张莉. 基于LCA的电力行业CO₂排放预测及燃煤电厂实例分

- 析[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [14] 王彦哲,周胜,王宇,等. 中国核电和其他电力技术环境影响综合评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(4): 377-384.
- [15] LI H, JIANG H D, DONG K Y, et al. A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119192.
- [16] European Parliament (EP). Batteries: deal on new EU rules for design, production and waste treatment[Z]. 2022.
- [17] European Parliament (EP). Carbon Border Adjustment Mechanism[Z]. 2022.
- [18] International Organization For Standardization (ISO). ISO 14067—2018 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南[S]. 2018.
- [19] British Standards Institution (BSI). PAS2050:2011 产品与服务生命周期温室气体排放的评价规范[S]. 2011.
- [20] 世界资源研究所,世界可持续发展工商理事会. 温室气体核算体系:产品生命周期核算与报告标准[S]. 2011.
- [21] 赵晓丽,蔡琼,胡雅楠. 中国火电产业环境外部成本分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2016, 18(1): 10-17.
- [22] 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.
- [23] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [24] 中国电力企业联合会统计与数据中心. 2020 电力工业统计资料汇编[M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2021.
- [25] 中国城市温室气体工作组. CPCD, China Products Carbon Footprint Factors Database[EB/OL]. <http://lca.cityghg.com/>. 2022.
- [26] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[Z]. 2011.
- [27] IPCC. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[Z]. 2006.
- [28] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2005 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [29] 生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施[Z]. 2022.
- [30] 国家统计局国务院机关事务管理局. 公共机构能源资源消耗统计制度[Z]. 2017.
- [31] International Renewable Energy Agency (IREA). Statistical Profiles[EB/OL]. <https://www.irena.org>. 2022.
- [32] IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2021.
- [33] 国家发展改革委. 关于发挥价格杠杆作用促进光伏产业健康发展的通知[Z]. 2013.
- [34] 国家发展改革委. 关于完善风电上网电价政策的通知[Z]. 2019.
- [35] 中华人民共和国水利部. 2020 中国水资源公报[Z]. 2021.
- [36] 国家发展改革委. 电网企业 2016(2017)年温室气体排放报告补充数据表[Z]. 2017.
- [37] 生态环境部. 关于公开征求企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施(2021 年修订版)(征求意见稿)[Z]. 2021.
- [38] 国务院. 大气污染防治行动计划[Z]. 2013.
- [39] 杨依然,李曼,吕卓,等. 基于环境统计调查数据的中国省会城市煤炭消费变化历史趋势研究[J]. 环境工程, 2020, 38(11): 6-11.
- [40] 国家能源局国家发展改革委. 能源发展“十三五”规划[Z]. 2016.
- [41] ZHANG H, ZHANG X, YUAN J. Driving forces of carbon emissions in China: a provincial analysis [J]. Environmental Science And Pollution Research, 2021, 28(17): 21455-21470.
- [42] LI J J, ZHANG Y L, TIAN Y J, et al. Reduction of carbon emissions from China's coal-fired power industry: insights from the province-level data [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118518.
- [43] 青海日报. 特高压时代下的青海“优势”——青海打造国家清洁能源产业高地系列综述之三 [EB/OL]. <http://www.qinghai.gov.cn/zwgk/system/2021/11/25/010397701.shtml>. 2021.
- [44] 赵亚涛,南新元,贾爱迪. 基于情景分析法的煤电行业碳排放峰值预测[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 177-181.
- [45] WANG J, SONG C, YUAN R. CO₂ emissions from electricity generation in China during 1997—2040: the roles of energy transition and thermal power generation efficiency[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773(145026): 145026.