doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.12.001

“双碳”目标下行业能源责任碳排放测算与分析

刘志红[1,2],袁杰辉[1,2]

(1. 宜春学院 经济与管理学院,江西 宜春 336000;
2. 宜春学院 能源资源环境与碳中和研究中心,江西 宜春 336000)

摘要:识别碳减排关键部门和领域,为“双碳”目标实施提供经验借鉴,从能源供给侧视角,基于电热分摊原则,对 2005—2019 年中国能源消费直接碳排放和责任碳排放进行测算,并比较两者动态变化趋势和差异性。结果表明:首先,中国能源消费量具有一定的刚性,能源结构优化效果明显,碳排放量处于高位平台期,碳达峰可期,碳中和任重道远。其次,各行业直接碳排放与责任碳排放存在较大的差异性,碳减排的重点部门已经发生变化。提出了妥善处理碳达峰、碳中和的关系、提倡低碳生产生活模式、从能源供给侧和需求侧促进能源结构优化、明确各行业能源碳排放核算口径等启示和建议。

关键词:责任碳排放;能源消费;双碳目标;启示

中图分类号:F113.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7545(2022)12-0001-09

Calculation and Analysis of Sectors Responsible Carbon Emissions under the Carbon Peak and Neutralization Target

LIU Zhi-hong[1,2], YUAN Jie-hui[1,2]

(1. School of Economics and Management, Yichun University, Yichun 336000, Jiangxi, China;
2. Institute of Energy & Resource, Environment and Carbon Neutrality, Yichun University, Yichun 336000, Jiangxi, China)

Abstract: In order to identify the key sectors and fields of carbon emission reduction, and provide evidences for the implementation of the carbon peak and carbon neutralization goals, the direct carbon emissions and responsible carbon emissions of China's energy consumption from 2005 to 2019 were calculated from the perspective of energy provide side and based on the principle of electric heating allocation. The dynamic change trends and differences between them were compared. The results show that: firstly, China's energy consumption has a certain degree of rigidity, the effect of energy structure optimization is obvious, and the carbon emission is in the high platform stage, the carbon peak can be reached, but the carbon neutralization has a long way to go. Secondly, there are great differences between direct carbon emissions and responsible carbon emissions of various industries, and the key departments of carbon emission reduction have changed. It also puts forward enlightenment and suggestions on properly handling the relationship between carbon peaking and carbon neutralization, advocating a low-carbon production and living mode, promoting the optimization of energy structure from the energy supply side and the demand side, clarifying the accounting scope of energy carbon emissions of various industries, so as to objectively reflect the carbon emissions of various industries and strengthen responsible carbon emissions.

Key words: responsible carbon emissions; energy consumption; carbon peak and neutralization target; enlightenment

收稿日期:2022-07-31

基金项目:江西省高校人文社会科学研究项目(TJ21102)

作者简介:刘志红(1979-),男,博士,讲师;**通信作者**:袁杰辉(1985-),男,博士,副教授

IPCC第五次气候变化评估报告进一步肯定了人为活动和化石能源燃烧是引起全球气候变暖的结论,认为全球温升与累积碳排放之间有着近似线性的关系[1]。2018年IPCC发布的《全球升温1.5 ℃特别报告》为气候变暖再次敲响了警钟,阐述了平均室温比工业革命前升高1.5 ℃和2 ℃对环境影响的差异巨大。表明了减少温室气体,尽快实现碳中和的紧迫性和必要性。中国作为世界上最大的发展中国家和碳排放国,面临着来自国际碳减排和国内人民追求美好生活需要的双重压力。继做出"大幅降低碳排放强度"和"于2030年左右二氧化碳排放达到峰值"的相对减排承诺后,国家主席习近平在联合国大会上进一步做出"力争于2030年前达到碳排放峰值,在2060年前实现碳中和"的绝对减排承诺。将极大利好于全球1.5 ℃温控目标的实现。

实施碳减排,实现碳达峰、碳中和目标的路径大体可归结为"做减法"和"做加法"。"做减法"是指调整产业结构,优化能源结构,提高能源利用效率等以减少碳排放量。"做加法"是指通过森林碳汇工程,碳捕集与封存等负排放技术,增加碳汇能力,实现绿色负排放。然而中国年均森林碳汇量相对于年碳排放量而言非常有限[2]。碳捕集与封存等负排放技术,尽管未来可期,但还不够成熟[3],存在推广应用成本高、高能耗等难题。总体碳汇量非常有限,并且存在较大的不确定性[4]。因此,在短期内,实施碳减排,实现碳达峰和碳中和的主要发力点还在于"做减法"。

碳达峰、碳中和目标的实现有赖于碳排放责任在省域空间上的分摊,最终在行业上落实。要对中国庞大的碳排放体量进行"瘦身",则需要摸底现有各行业碳排放现状,碳减排效果,识别碳减排关键部门和领域,为碳减排政策的不断改进与完善提供经验借鉴。因此,确认各行业碳减排责任,识别碳减排的关键行业和领域具有较强的现实意义。

1 文献综述

对各行业的能源碳排放量进行测算是碳减排政策制订、规划碳达峰及碳减排路线图的基础[5]。行业能源消费碳排放可以分为能源直接碳排放和能源责任碳排放。直接碳排放是指行业在生产和消费能源过程中直接产生和直接排放到自然中的二氧化碳量。基于能源终端消费所测算的能源碳排放属于能源直接碳排放。多从生产者责任视角或称为领地责任视角,运用IPCC方法进行测度,具有测度方法简单、直观性强、能强化生产过程的减排作用和责任等优点。基于消费者责任法,根据能源终端消费量测算的行业能源碳排放量没有包括电力和热力等二次能源在生产和运输过程中排放的二氧化碳,该部分碳排放在能源平衡表"电力、热力生产和供应业"中进行核算。从而使得其他行业忽视了其在能源终端消费中应当承担的间接部分碳排放责任。能源责任碳排放指行业在消耗化石能源进行生产生活活动中需要承担碳减排责任的二氧化碳排放量,既包括直接碳排放量也包括消费二次能源所产生的间接碳排放量。

责任碳排放是一个主观量,基于不同的原则就会有不同的责任核算方法[6]。行业核算视角大多基于能源需求侧,即消费侧核算。已有研究多是基于能源消费侧视角对农业[7]、工业[8]、有色金属行业[9]、交通运输行业[10]等的能源消费碳排放进行了核算。研究视角多是基于降低碳强度的相对减排目标,研究产业部门尤其是工业领域碳减排问题。然而,在碳达峰、碳中和背景下,碳强度目标对"双碳"目标的实现约束力较弱,应该向约束力较强的碳排放总量目标转向。工业领域能源碳排放量总体趋于稳定,能源直接碳排放已开始下降[11],抑或是工业领域碳排放进入平台期。说明工业领域绝对减排的空间已经非常有限,应该识别碳减排的重点部门和领域,以实现我国碳达峰目标,而且是尽量实现"低峰值"达峰以为碳中和愿景目标留足空间。同时,碳减排措施不能局限于传统的技术减排和能源结构调整,必须加大行业减排力度[12]。

现有关于各行业能源碳排放总量的研究多是从能源终端消费的边界展开,有利于减少行业对终端能源消费,有利于识别和选择有较大节能减排潜力的行业作为碳减排实施重点[13]。但却存在碳排放重复计算的可能,会削弱二次能源生产行业减排的直接动力[14]。随着电气化水平提升,电力和热力替代终端对煤油气等化石能源的直接使用,减少了终端用能部门的直接碳排放,使部分碳排放从终端用能环节转移至电力和热力部门的二次能源生产环节。因此,把电力和热力部门碳排放量分解到其他行业,能更加清晰地呈现行业能源碳排放的实际面貌,把握碳排放的特征和发展变化趋势,从而有效识别碳减排的重点行业。

综上所述,本文在借鉴前人研究成果的基础上,尝试在两个方面进行改进创新:一是在能源碳排放测算边界方面,从能源供给侧测算能源碳排放量的

同时,把电力和热力部门碳排放量分解到其他行业,从而更全面地反映各行业的能源碳排放量和动态变化情况;二是从碳排放来源角度研究不同行业碳排放的动态变化,探讨各行业的减排潜力。现有研究主要关注工业领域、产业部门、家庭部门等的能源终端消费碳排放量。同时关注多行业或领域能源碳排放动态变化,厘清各部门能源碳排放之间的关系的研究尚不多见。本文从碳排放来源角度,对 2005—2019 年能源消费碳排放进行测算,研究不同行业碳排放的动态变化情况,从而有效识别碳减排的重点行业。

2　能源碳排放测算方法与数据来源

2.1　测算方法

本文基于 2006IPCC 指南和省级指南推荐的二氧化碳测算的参考方法,即排放因子法,对各行业能源消费碳排放进行测算。公式为:

$$EC=\sum_{i=1}^{n}CO_2=\sum_{i=1}^{n}(E_i\times V_i\times F_i\times O_i)\times 44/12 \tag{1}$$

式中,EC 为能源二氧化碳排放量;i 为能源消费类别;E_i 为第 i 种能源消费量;V_i 为第 i 种能源的低位发热值(10^{12} J/t);F_i 为第 i 种能源单位热值碳排放因子(t C/10^{12} J);O_i 为第 i 种能源的氧化率(%);44/12 为碳与二氧化碳转换系数。能源类别的选取和低位发热值、碳排放因子、氧化率等数据参考刘志红[15]的研究。

在生产侧碳排放核算中,热力和电力碳排放量计入工业部门中的“电力、热力生产与供应业”,但根据责任碳排放核算原则,此部分碳排放量应分摊到使用电力、热力的各行业。根据涂正革提出的电热分摊原则[16],将在电力、热力生产转换过程中产生的碳排放量分摊到相应电力和热力使用行业,使得行业的能源使用与碳排放责任匹配,以准确反映其碳排放责任的问题。具体分摊方法是:假设各行业所消费的“电力”和“热力”来源中所含水电、风电和核电等清洁能源结构相似,各行业“电力”和“热力”碳排放按照所消费的比列在能源平衡表中“火力发电”和“供热”项的碳排放进行推算。

2.2　数据来源

能源消费数据主要来源于历年《中国能源统计年鉴》和《中国统计年鉴》。能源的低位发热值、能源单位热值碳排放因子和能源氧化率来自 2011《省级温室气体清单编制指南(试行)》。

3　测算结果及分析

2006 年,“十一五”规划首次明确提出了节能减排约束性指标,碳减排指标以 2005 年为参照基础,这被视为中国正式启动低碳发展战略的标志[17]。因此,以 2005 年为基期,测算 2005—2019 年中国能源消费碳排放量,并分析其动态变化特征。需要说明的是,本文所测算的能源碳排放量要略低于实际碳排放量。主要原因在于:为便于对电力和热力碳排放量在各行业、产业和家庭部门进行分摊和比较,未把能源平衡表中“能源损失量”和“能源加工转换损失量”部分的能源纳入测算。同时,未测算能源平衡表中“其他能源”消耗引致的碳排放量。本文的主要目的在于对行业能源责任碳排放进行测算,分析其动态变化特征,分析各行业减排潜力和进行碳减排关键行业的识别。因此,比实际略低的能源碳排放量对本文研究结论基本不构成影响。

3.1　能源碳排放总量分析

如图 1 所示,在研究期内,本文所测算的 2005—2019 年中国能源碳排放量与英国石油公司(BP)所发布的中国能源碳排放量变化趋势基本一致。本文测算的能源碳排放量略低于 BP 发布的碳

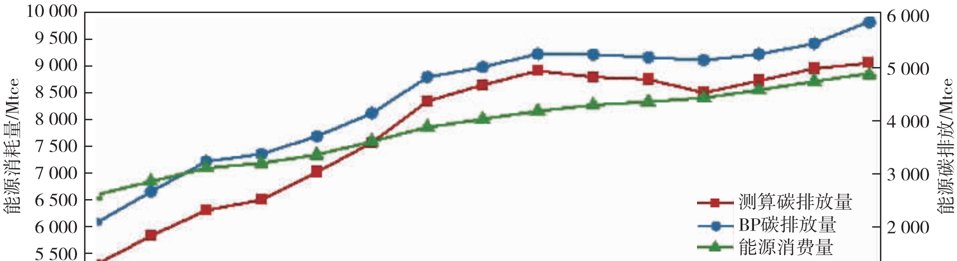

图 1　中国能源消费量、本文测算能源碳排放量及与 BP 比较

Fig. 1　Comparison of the amount of China's energy consumption, carbon emissions of calculation and BP

排放量,符合现实情况和预期,且差值基本在 10%以内。说明本文所测算的能源碳排放量具有较强的科学性,能客观体现我国能源消费碳排放量实际和动态变化趋势,为后文的分析提供了坚实的基础。

3.1.1 能源碳排放量处于高位平台波动期,碳达峰可期

中国能源碳排放量变化趋势大体可以分为两个阶段。2005—2013 年,能源碳排放量处于较快增长期。能源碳排放量从 50.2 亿吨增长到 89.1 亿吨,年均增长 6.7%。2013 年能源碳排放量为第一个高位平台峰值。2013—2019 年,能源碳排放量稳中趋升,或称为平台期。2018 年和 2019 年能源碳排放量分别为 89.5 亿吨和 90.6 亿吨,小幅高出 2013 年高位平台值。总体来讲,中国能源碳排放量已处于高位平台波动阶段。因此,中国能源碳排放达峰可期,关键在于加快能源结构、产业结构、经济发展模式优化与转型,以及生活方式低碳化以达到削峰发展,压低峰值,压缩高位平台期,为碳中和愿景的实现留足时间。由于当前技术瓶颈和森林碳汇量相对较小,碳捕集封存和碳汇在碳中和所起作用相对有限[18]。碳中和主要路径还是在于控制碳源,碳源管控的关键在于供给侧能源结构向低碳或零碳转型,消费侧能源生产和消费的电气化。

3.1.2 能源消费与碳排放呈现弱脱钩状态

从能源消费量和碳排放量来看,中国能源消费量处于持续增长态势,而能源碳排放量稳中趋升,处于平台期。能源结构优化效果明显,能源消费与碳排放呈现弱脱钩状态。能源消费量处于持续增长,2005—2019 年,中国能源消费量从 26.14 亿吨标准煤增长到 48.7 亿吨标准煤,年均增长 4.5%,高于能源碳排放量年均 3.8%的增速,近些年能源消费量仍保持年均 3 个百分点的增速。而能源碳排放量却保持稳中趋升,在“十一五”和“十二五”期间持续增长,“十三五”期间能源碳排放量稳中波动,处于平台期。

3.1.3 能源结构优化效果明显

如图 2 所示,2005—2019 年,煤炭在能源结构中的比重由 70%以上下降到 60%以下,一次电力及其他能源在能源结构中的比重由 7%左右提高到 15%以上。但由于我国能源禀赋特征,煤炭能源比重仍占近 60%,煤炭为主的能源消费结构仍是我国碳中和愿景实现所面临最大障碍。

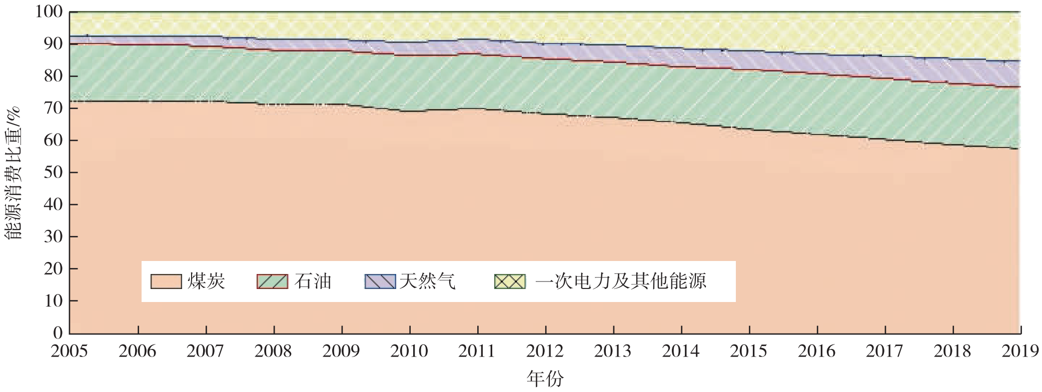

图 2 中国能源结构变化趋势

Fig. 2 The change trend of China′s energy structure

从以上比较分析可以得到两点启示。第一,能源是社会经济发展的动力和基础,实施碳减排,实现碳中和的关键不在于控制能源消费量,而在于控制化石能源消费量,在于调整能源结构,提高低碳、零碳能源比重。第二,为保持社会经济中高速增长,满足人民对美好生活的需求,我国能源消费量保持一定的增速,但近些年能源碳排放量总体稳定,主要原因之一是能源结构得到进一步优化。

中国调整产业结构、优化能源结构、节能提效等积极应对气候变化的举措,使得能源碳排放得到有效控制。但由于中国能源碳排放处于高位平台期,使得进一步碳减排的空间相对有限。要压低峰值,缩短平台期,则需进一步分析各部门碳排放量变化趋势和特征,以识别碳减排的关键行业。

3.2 三部门能源直接碳排放分析

参考欧盟将碳排放来源分为三个部门以使碳减排目标在 15 个成员国之间进行分解的“三部门法”[19]。同时,根据中国能源平衡表,将我国能源消费的碳排放源分解为“电力及热力部门”“产业部门”和“家庭部门”三个独立的部门,以分析能源

消费碳排放在三个部门的动态变化。"电力及热力部门"指能源平衡表"加工转换投入(—)产出(+)"子矩阵中火力发电和供热行业，所生产的电力和热力主要供产业部门和家庭部门使用。在该子矩阵有9大分类，"火力发电"、"供热"是二氧化碳排放的主要来源，"煤炭洗选"、"炼焦"、"炼油及煤制油"、"制气"、"天然气液化"、"煤制品加工"在加工过程中主要涉及物理变化，燃料燃烧排放二氧化碳相对较少，可忽略[12]。"加工转换投入(—)产出(+)"子矩阵中的其他能源产生化学变化的碳排放量在"终端消费量"子矩阵中的"产业部门"和"家庭部门"进行测算。"产业部门"是指能源平衡表"终端消费量"子矩阵中包含第一产业、工业、建筑业、第三产业等的各个行业。"家庭部门"指能源平衡表"终端消费量"子矩阵中的生活消费，包含城镇和乡村两部分，测算家庭部门日常生活中的能源消费量。三部门能源直接碳排放变化情况如图3所示。

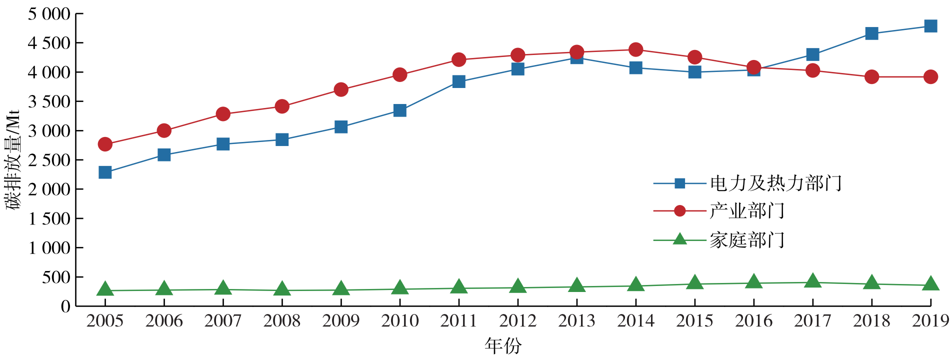

图3　三部门能源碳排放量变化趋势

Fig. 3　Energy carbon emissions change trend of 3 sectors

产业部门能源直接碳排放处于高位平台期，碳达峰可能性显现。2014年产业部门能源直接碳排放量为43.8亿吨，为研究期内的碳排放量高峰值，产业部门碳峰值是否已经出现还有待观察。电力及热力部门能源直接碳排量一直处于增长状态，2017年碳排放量超过产业部门，并呈扩大趋势。两者能源直接碳排放量呈现此消彼长的态势。主要原因是产业部门能源消费端的电气化改造使得部分终端能源碳排放转移至电力和热力部门。家庭部门能源直接碳排放绝对量相对较小，但增速较快，2005年家庭部门能源直接碳排放量为2.6亿吨，增加到2017年最高值的4.1亿吨，年均增速为4.8%，近两年略有下降。

从三部门能源碳排放变化得到以下几点发现：第一，产业部门和家庭部门能源直接碳排放量得到较好的管控，主要原因是两部门能源终端消费的电气化，使得两部门的能源碳排放转移到了电力和热力部门，这是我国电力和热力部门能源直接碳排放持续增长并超越产业部门成为碳排放主要部门的主要原因。第二，电力和热力部门生产的电力占产业部门和生活部门所消费的电力的比重逐年下降，说明我国能源结构得到优化，清洁可再生新能源的使用率在提升，这是我国碳减排取得较大成果的重要原因。第三，家庭部门能源直接碳排量相对较低，但增长较为迅速。

3.3　行业能源责任碳排放动态变化分析

把电力及热力部门能源碳排放量分摊到其他行业得到能源责任碳排放量，以全面客观地体现各行业能源碳排放量变化情况。

3.3.1　行业能源直接碳排放与能源责任碳排放呈现此消彼长态势

从行业能源责任碳排放绝对量来看，相对于能源直接碳排放而言，产业部门内各行业和家庭部门能源间接碳排放量显著增加，导致责任碳排放量处于增长态势。以工业领域为例，如图4所示，工业领域能源责任碳排放量与直接碳排放量的差距在逐年增大，即由于能源消费端电气化改造，越来越多的工业领域能源消费转移到了热力和电力部门，工业领域能源直接碳排放和间接碳排放呈现此消彼长的态势。工业领域能源直接碳排放量在2014年达到高峰值32.8亿吨，之后处于稳中趋降的态势。而工业能源间接碳排放量处于增长态势，并超过直接碳排放量。

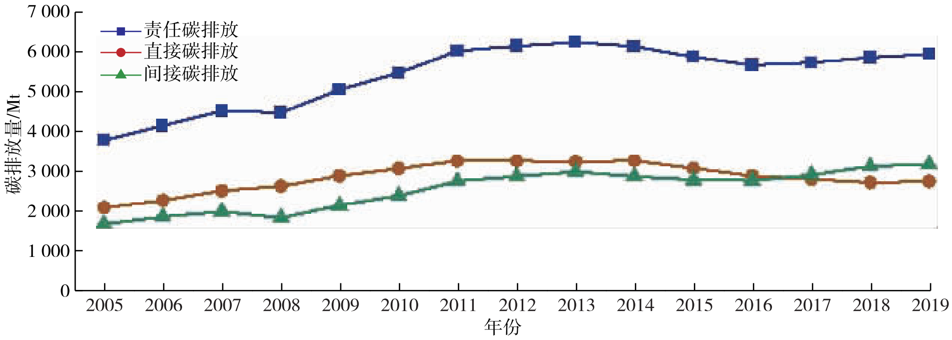

图 4　工业领域能源直接碳排放和责任碳排放比较

Fig. 4　Comparison between direct and responsible carbon emissions of industry sector

3.3.2　工业领域直接碳排放量趋于稳定且呈一定下降趋势,碳减排的重点部门已发生变化

2019 年工业领域能源直接碳排放量为 27.7 亿吨,比 2014 年的 32.8 亿吨的高峰值降低了 5.1 亿吨,降低了 15.6%。此数据是根据能源平衡表(实物量)中工业生产(扣除用作原料、材料)能源消费量而测算的碳排放量。需要注意的是,由于工业生产所使用的热力和电力能源主要为清洁的二次能源,其碳排放在能源平衡表(实物量)中“加工转换投入(—)产出(+)量”的“火力发电”和“供热”中进行测算。如果把此部分的碳排放量分摊到工业生产中的电力和热力能源投入中,工业领域能源责任碳排放量则显著增加。2019 年工业领域能源责任碳排放量为 59.6 亿吨,比 2013 年的 62.7 亿吨的高峰值降低了 3.1 亿吨。总体来讲,碳排放量保持在 60 亿吨左右。但工业碳排放所占整体能源责任碳排放比重却呈现明显的下降趋势。2019 年工业领域能源直接碳排放占整体能源碳排放比例为 30.6%,而 2009 年占比达 41.31%,下降了 10 个百分点。工业领域能源责任碳排放占整体能源碳排放比重由 2011 年的 76.7%下降到 2019 年的 65.8%。

工业领域一直是我国碳排放的主要来源,由于产业结构调整、能源结构转型和技术进步等因素加持下,无论是工业领域能源直接碳排放量还是间接碳排放量近些年都趋于稳定,所占能源碳排放量的比例明显下降。说明我国在工业领域的碳减排已取得了显著成效。同时也说明我国碳减排重点领域或部门应进行调整。在碳中和目标约束下,我国必须实施“削峰模式”的碳达峰战略,压低碳峰值水平,为碳中和目标的实现留足空间。

从行业能源责任碳排放相对量来看,能源直接碳排放占责任碳排放的比重逐年减小,且各行业能源直接碳排放量占责任碳排放量的比重呈现明显的差异性。如图 5 所示,农业能源直接碳排放占责任碳排放比重在研究期内相对比较稳定,维持在 55%左右。工业能源直接碳排放占责任碳排放的比重有所下降,由 2005 年的 55.5%下降到 2019 年的 46.4%。工业作为我国主要的碳排放源,其碳排放更多的来源于间接碳排放。建筑业、交通运输业能源直接碳排放占责任排放的比重相对较高,下降幅度有限。批发和零售业、住宿和餐饮业和其他行业能源直接碳排放占责任排放的比重大幅下降,2019 年

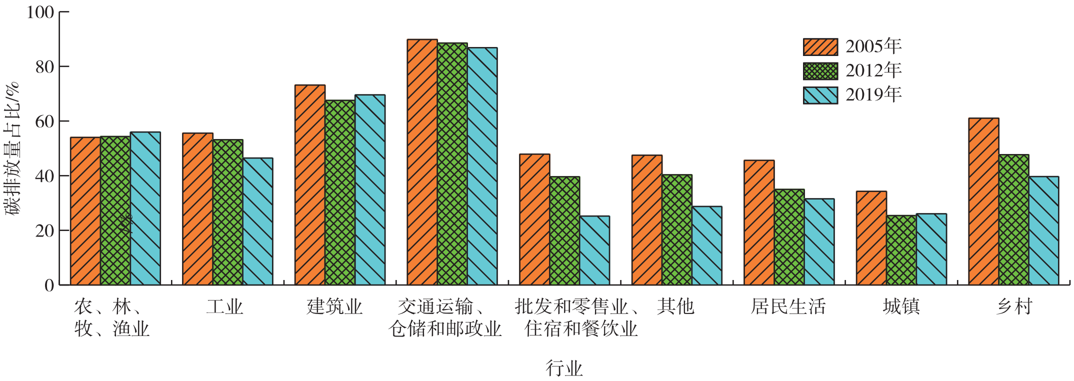

图 5　各行业能源直接碳排放量占责任排放量比重

Fig. 5　Ratio of direct carbon emission in responsible carbon emission in different sectors

在 25%左右，说明这些行业能源碳排放主要来自于间接碳排放。家庭部门能源消费碳排放量主要来源于间接碳排放，且城镇居民和农村居民生活碳排放来源存在较大的差异，城镇居民能源直接碳排放仅占责任碳排放的 26%，乡村居民为 40%。说明能源终端消费正在发生明显的变化。煤炭等碳基一次能源在终端消费所占比例持续下降，电能等二次能源和清洁能源所占比例逐步提升。

以上研究表明，电能替代煤炭、石油、天然气等化石能源的直接使用[20]提高了各行业终端能源消费的电气化水平，减少了对一次能源的消费，从而显著减少各行业直接碳排放。电力部门是重要的碳排放源，电力低碳转型对实现“双碳”目标具有全局性意义[21]，持续加大非化石能源发电量，逐步淘汰高耗能火电，实现电力行业的低碳转型。但由于可再生能源存在间歇性和波动性特点，在技术层面，加大电网的稳定性，增加可再生能源发电装机并网规模，提高可再生能源发电调峰、储能水平[22]。

4　研究启示与建议

1)在碳达峰可期，碳中和面临较大压力背景下，各地区和各产业应妥善处理好碳达峰和碳中和的关系。本文测算的能源碳排放量和 BP 公布的能源碳排放数据都表明，中国能源碳排放量处于平台期。中国能源碳排放峰值可能在 100 亿吨左右，占全球总量近 30%。排放体量大，处于碳排放高位。碳达峰到碳中和的过渡期只有 30 年时间，时间紧。同时面临着经济社会发展、工业化和城市化进程，以及满足人民对美好生活需要的压力，碳中和目标的实现面临着较大的压力和挑战。

2)应注重家庭部门的节能减排，加大清洁能源在能源结构中的比重，提倡低碳生产生活模式。工业领域直接碳排放量趋于稳定并且呈一定的下降趋势，碳减排的重点部门或领域已经发生变化。在工业领域能源碳排放趋于稳定，碳减排空间有限的情况下，我国碳减排的重点领域应该向居民生活和交通运输、电力部门等领域转变。尤其是居民生活领域，无论是绝对碳排放量还是所占比重近些年一直处于增长态势。2019 年家庭部门责任碳排放量达 11.3 亿吨，占比为 13.51%，相比于 2010 年分别增加了 3.66 亿吨和 2.95 个百分点。并且随着我国居民消费水平的提高和城市化进程，尤其是近年来中国依靠扩大内需拉动经济增长的发展战略，家庭消费模式呈现重资源化、重污染化的特征[23]。在降低外贸依存度，构建国内大循环为主体国内国际双循环相互促进的新发展格局，以及满足人民对美好生活需求的背景下，未来居民消费模式、数量和结构的变化必将对碳排放产生越来越重要的影响[24]，家庭部门碳排放所占比重将进一步提高。

3)从能源供给侧和需求侧两端发力促进能源结构优化。实施碳减排，降低碳排放量不等于减少能源消费量。在满足人民对美好生活需要的过程中，能源消费量的增长具有一定的刚性。碳达峰、碳中和的本质是能源转型[25]，在“双碳”目标约束下，能源消费量的持续增长，必然通过能源结构的优化来实现。在能源供给侧，大力发展风能、太阳能、氢能等清洁可再生能源，提高非化石能源发电量；在需求侧，推动能源消费端电气化，提倡生活方式低碳转型，如低碳出行、低碳住宅等；在技术端，提高能源能效，大力发展碳捕集、利用与封存（CCUS）等技术，提高可再生能源发电调峰、储能水平。

4)尚需明确各行业能源碳排放核算口径，以客观体现各行业的碳排放，强化责任碳排放。测算结果表明各行业能源直接碳排放和责任碳排放呈现较大差异。碳排放核算边界以终端使用为准，电力和热力产业部门的碳排放量应该分解到电力和热力消费的相应部门和行业。因此，该以能源责任碳排放口径来报告各行业的能源碳排放量。

5　结论

碳达峰、碳中和目标的实现有赖于碳排放责任在省域空间上的分摊，最终依赖于碳排放在行业层面的责任分摊。因此，确认各行业碳减排责任，识别碳减排的关键行业和领域具有较强的现实意义。基于能源供给侧视角，根据电热分摊原则，测算 2005—2019 年各行业能源责任碳排放量，并分析其动态变化趋势。研究发现：从能源消费量和碳排放量变化趋势来看，中国能源消费量具有一定的刚性，处于持续增长态势；能源结构优化效果明显，碳排放量处于高位平台期，能源消费量与碳排放量呈现弱脱钩状态。从行业碳排放量来看，各行业碳排放量增长态势存在较大的差异性，工业领域直接碳排放量趋于稳定并且呈一定的下降趋势，碳减排的重点部门已经发生变化，我国碳减排的重点领域应该向居民生活和交通运输、电力部门等领域转变。从能源直接碳排放和责任碳排放关系来看，能源直接碳排放与能源责任碳排放呈现此消彼长态势，能源直

接碳排放占责任碳排放的比重逐年减小，且各行业能源直接碳排放量占责任碳排放量的比重呈现明显的差异性。

参考文献

[1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013:326.

[2] 姜霞，黄祖辉. 经济新常态下中国林业碳汇潜力分析[J]. 中国农村经济，2016(11):57-67.
JIANG X, HUANG Z H. Analysis of forestry carbon sequestration potential in China under new economic normal[J]. Chinese Rural Economy, 2016(11):57-67.

[3] 王克，刘芳名，尹明健，等. 1.5 ℃温升目标下中国碳排放路径研究[J]. 气候变化研究进展，2021，17(1):7-17.
WANG K, LIU F M, YIN M J, et al. Research on China's carbon emissions pathway under the 1.5 ℃ target[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1):7-17

[4] 刘晓龙，崔磊磊，李彬，等. 碳中和目标下中国能源高质量发展路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版)，2021，23(3):1-8.
LIU X L, CUI L L, LI B, et al. Research on the high-quality development path of China's energy industry under the target of carbon neutralization[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(3):1-8.

[5] 赵红艳，耿涌，郗凤明，等. 基于生产和消费视角的辽宁省行业能源消费碳排放[J]. 环境科学研究，2012，25(11):1290-1296.
ZHAO H Y, GENG Y, XI F M, et al. Analysis of CO_2 emissions related to sectoral energy consumption in Liaoning province based on production and consumption perspectives[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(11):1290-1296.

[6] FERNG J J. Allocating the responsibility of CO_2 over-emissions from the perspectives of benefit principle and ecological deficit [J]. Ecological Economics, 2003, 46(1):121-141.

[7] 伍国勇，刘金丹，陈莹. 中国农业碳排放强度空间特征及溢出效应分析[J]. 环境科学与技术，2021，44(11):211-219.
WU G Y, LIU J D, CHEN Y. Analysis of spatial characteristics and spillover effects of agricultural carbon emission intensity in China[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(11):211-219.

[8] 袁晓玲，郗继宏，李朝鹏，等. 中国工业部门碳排放峰值预测及减排潜力研究[J]. 统计与信息论坛，2020，35(9):72-82.
YUAN X X, XI J H, LI Z P, et al. A study on carbon emission peak forecast and emission reduction potential of China's industrial sector [J]. Statistics & Information Forum, 2020, 35(9):72-82.

[9] 王威，吴晶晶，葛亚平，等. 双碳背景下碳排放核算法及策略分析：以铜铝行业为例[J]. 有色金属(冶炼部分)，2022(4):1-11.
WANG W, WU J J, GE Y P, et al. Carbon emission accounting method and strategy analysis under the background of double carbon: taking copper and aluminum industry as example[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(4):1-11.

[10] 袁长伟，赵潇，孙璐. 中国交通运输碳排放效率测度及收敛性研究[J]. 环境科学与技术，2019，42(12):222-229.
YUAN C W, ZHAO X, SUN L. Research on measurement and convergence of transport carbon emission efficiency in China [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(12):222-229.

[11] 柴麒敏，傅莎，郑晓奇，等. 中国重点部门和行业碳排放总量控制目标及政策研究[J]. 中国人口·资源与环境，2017，27(12):1-7.
CHAI Q M, FU S, ZHENG X Q, et al. Carbon emission cap control target and policy study of selected sectors and industries in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(12):1-7.

[12] 田华征，马丽. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析[J]. 自然资源学报，2020，35(3):639-653.
TIAN H Z, MA L. Study on the change of China's industrial carbon emission intensity from the perspective of sector structure[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3):639-653.

[13] 王斯一，吕连宏，罗宏. "十四五"及未来我国应对气候变化目标指向及战略路径研究[J]. 环境保护，2020，48(20):51-55.
WANG S Y, LYU L H, LUO H. Study on China's climate change targets and strategies for the 14th Five-year Plan and the future[J]. Environmental Protection, 2020, 48(20):51-55.

[14] 张同斌，孟令蝶，孙静. 碳排放共同责任的测度优化与国际比较研究[J]. 财贸研究，2018，29(10):19-31.
ZHANG T B, MENG L D, SUN J. Common responsibility for carbon emissions: Measure optimization and international comparison[J]. Finance and Trade Research, 2018, 29(10):19-31.

[15] 刘志红. 中国区域能源消费碳排放测算、收敛及脱钩研究[M]. 北京：中国财政经济出版社，2018:29-43.

LIU Z H. Carbon emission measurement, convergence and decoupling of regional energy consumption in China[M]. Beijing: China Financial & Economic Publishing House, 2018: 29-43.

[16] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择:基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J]. 中国社会科学, 2012(3): 78-94, 206-207.

TU Z G. Strategic measures to reduce China's carbon emissions: based on index decomposition analysis of carbon emissions in eight industries[J]. Social Sciences in China, 2012(3): 78-94, 206-207.

[17] 张友国. 碳达峰、碳中和工作面临的形势与开局思路[J]. 行政管理改革, 2021(3): 77-85.

ZHANG Y G. Situation and start-up thought of carbon peaking and carbon neutralization[J]. Chinese Public Administration, 2021(3): 77-85.

[18] 潘家华, 廖茂林, 陈素梅. 碳中和:中国能走多快?[J]. 改革, 2021(7): 1-13.

PAN J H, LIAO M L, CHEN S M. Carbon neutrality: how fast can China go?[J]. Reform, 2021(7): 1-13.

[19] 邢璐, 马中, 单葆国. 欧盟碳减排目标分解方法解读及借鉴[J]. 环境保护, 2013, 41(1): 65-67.

XING L, MA Z, SHAN B G. Interpretation and reference of the decomposition method of EU carbon emission reduction targets[J]. Environmental Protection, 2013, 41(1): 65-67.

[20] 张运洲, 鲁刚, 王芃, 等. 能源安全新战略下能源清洁化率和终端电气化率提升路径分析[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 1-8.

ZHANG Y Z, LU G, WANG F, et al. Analysis on the improvement path of non-fossil energy consumption proportion and terminal electrification rate under the new energy security strategy[J]. Electric Power, 2020, 53(2): 1-8.

[21] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.

SU Y B, ZHANG L Y, ZHANG Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.

[22] 杜冬梅, 曹冬惠, 何青. "双碳"目标下我国电力行业低碳转型的思路探讨[J/OL]. 热力发电: 1-9[2022-07-21]. DOI: 10.19666/j.rlfd.202204074.

DU D M, CAO DH, HE Q. Discussion on low-carbon transformation of China's power industry under the "double-carbon" goal[J/OL]. Thermal Power Generation: 1-9[2022-07-21]. DOI: 10.19666/j.rlfd.202204074.

[23] LIU L C, WU G, WANG J L, et al. China's carbon emissions from urban and rural households during 1992-2007[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(15): 1754-1762.

[24] 万文玉, 赵雪雁, 王伟军. 中国城市居民生活能源碳排放的时空格局及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3445-3455.

WAN W Y, ZHAO X Y, WANG W J. Spatial-temporal patterns and impact factors analysis on carbon emissions from energy consumption of urban residents in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(9): 3445-3455

[25] 庄贵阳, 窦晓铭. 新发展格局下碳排放达峰的政策内涵与实现路径[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2021(6): 124-133.

ZHUANG G Y, DOU X M. Policies on peaking carbon emissions and their implementation in the new development pattern[J]. Journal of Xinjiang Normal University(Edition of Philosophy and Social Sciences), 2021(6): 124-133.