



DOI 10.12030/j.cjee.202403142 中图分类号 X192 文献标识码 A

基于多源数据的中国家庭碳排放核算与占比估计

谢金良^{1,✉}, 郭静^{1,✉}, 黄雨婷², 刘伟², 徐明¹

1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 阿里巴巴集团 ESG 战略运营和研究部, 杭州 310052

摘要 家庭碳排放占比能直观反映家庭消费领域碳减排的相对重要性, 在媒体报道中频繁出现。然而, 不同媒体引用和使用的占比数值差异显著 (30% 至 65%), 可能误导公众和决策者。为分析差异产生的原因, 对媒体报道和学术论文中的占比数据进行了系统探查。同时, 对家庭碳排放占比的分子和分母进行了界定, 使用多个数据源通过投入产出分析提供了占比的基准范围。研究发现, 媒体报道中的占比数据通常缺乏来源, 且过度简化背景信息, 其可靠性存疑。相比之下, 学术论文更关注排放量而非占比, 且在核算范围与数据来源上存在显著差异。通过投入产出分析得到的占比在 27.83% 到 38.43% 之间, 通常低于媒体报道值与发达国家占比值。为提高研究结果的可比性和透明度, 建议根据温室气体协议的范围 1、2、3 核算家庭碳排放, 并明确核算所涵盖的能源与行为类型。总体来看, 80% 以上的家庭碳排放为间接碳排放, 其减排依赖于对消费者选择的科学引导, 是政府应重点关注的方向。此外, 为避免误导, 应要求媒体在报道占比数据时标明来源与背景信息。最后, 为在气候问题对话中掌握更多话语权, 应支持中国机构优化投入产出分析方法论与建设多区域投入产出表数据库。

关键词 家庭碳排放占比; 中国; 投入产出分析; 核算范围; 数据溯源

减少人为碳排放, 积极应对全球变暖, 已经成为了人类需要面对的重要议题之一^[1]。为应对迫在眉睫的气候危机, 中国提出了“双碳”目标, 即力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和^[2-3]。家庭消费领域是重要的排放来源, 在食品、住房和交通等部门引致了大量碳排放^[4-6]。研究表明, 全球约 72% 的碳排放可归因于占全球生产总值约 66% 的家庭消费^[7]。对于美国、英国以及日本等发达国家而言, 这一数字为 80% 左右^[8-10]。家庭碳排放占比, 即特定国家家庭碳排放与国家碳排放的比值, 直观反映了家庭消费对碳排放的相对贡献, 在全球媒体报道中频繁出现^[11]。然而, 在媒体报道中, 我国家庭碳排放占比差异显著, 最低的为 30%, 高的能达到 65%, 误导公众认知与公共决策^[12-14]。

“家庭碳排放占比”, 即家庭碳排放与国家碳排放的比值, 存在多种可能的含义。首先, “碳排放”可能代表 CO₂ 气体、3 种重要温室气体 (CO₂、CH₄ 以及 N₂O) 或全部温室气体等^[15]。其次, 家庭碳排放按其来源可细分为家庭直接碳排放与家庭间接碳排放。家庭直接碳排放指居民生活直接消耗的能源所产生的碳排放, 例如通过燃烧煤炭和天然气进行照明、烹饪和室温调节, 以及交通工具运行所消耗能源产生的碳排放。家庭直接碳排放通常可通过加总家庭对不同类能源的物理消耗量与相应碳排放强度的乘积来得出^[16-17]。家庭间接碳排放则与居民生活所消耗电力、热力、商品与服务的生产、分配和废物处理过程相关, 是居民消费行为间接引起的上下游碳排放之和 (生命周期碳排放)^[18-19]。最后, 根据核算方式与范围差异, 国家碳排放也有不同的含义^[20]。

为帮助决策者、研究者与大众把握中国家庭碳排放的状况和趋势, 提高相关研究的参考价值, 本研究将首先对家庭碳排放占比进行剖析和界定。然后, 对媒体报道与学术论文中出现的家庭碳排放占比进行系统性综述, 了解其在特定语境下的含义并刻画其分布情况。最后, 基于多个数据库通过投入产出分析方法计算不同口径的中国家庭碳排放量, 提供可靠的中国家庭碳排放占比取值基准。

收稿日期: 2024-03-23 录用日期: 2024-08-23

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2023M731873)

第一作者: 谢金良 (1996—), 男, 博士研究生, xie-jl23@mails.tsinghua.edu.cn ✉通信作者: 郭静 (1992—), 女, 博士, 助理研究员, guo_jing@mail.tsinghua.edu.cn

1 材料与方法

1.1 家庭碳排放占比界定

为避免混淆,下文所提及的碳排放均为 CO_2 排放。家庭碳排放占比是家庭碳排放量与国家碳排放量的比值。因此,为厘清家庭碳排放占比的含义,有必要对其分子和分母分别进行分析与界定。参考 GHG protocol 的划分方式,家庭碳排放可分为范围 1、范围 2 和范围 3 碳排放。首先,范围 1 排放涵盖了家庭的直接碳排放,包括家庭使用煤、天然气、汽油和柴油等燃料用于取暖、烹饪和交通工具(如私家车)所产生的排放。其次,范围 2 排放属于家庭消费所间接引起的排放,主要来自家庭使用的外购电力、蒸汽、供热和制冷。尽管这些排放实际发生在能源生产过程中,但它们由家庭的能源需求引起。最后,范围 3 排放涵盖了家庭的其他间接碳排放,包括家庭消费的商品和服务在生产和运输过程中产生的排放,以及家庭废弃物处理引起的排放。

如图 1 所示,本研究将特定国家家庭范围 1 碳排放界定为家庭消费引致直接碳排放,将范围 2 和范围 3 碳排放之和界定为家庭消费引致间接碳排放^[21]。为了考察贸易的影响,将家庭消费引致间接碳排放进一步区分为特定国家家庭部门对全球商品的消费所间接引致的碳排放(以下简称家庭消费引致全球间接碳排放)和特定国家家庭部门对在国内生产的商品的消费所间接引致的碳排放(以下简称家庭消费引致国内间接碳排放)。家庭消费引致直接碳排放与家庭消费引致间接碳排放之和,即为家庭消费引致碳排放。为考察贸易对核算结果的影响,将家庭消费引致直接碳排放与家庭消费引致全球间接碳排放之和界定为家庭消费引致全球碳排放,将家庭消费引致直接碳排放与家庭消费引致国内间接碳排放之和界定为家庭消费引致国内碳排放。

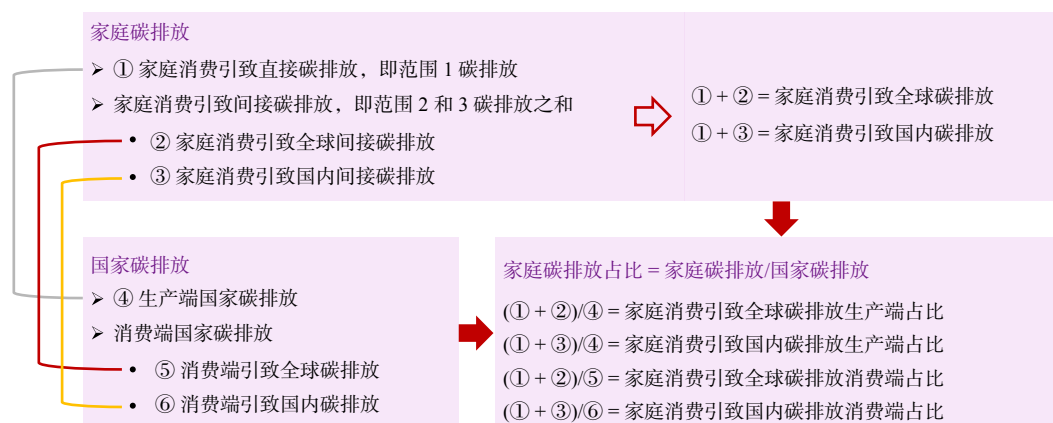


图 1 家庭碳排放占比界定示意图

Fig. 1 Definition of household carbon emission proportion

国家碳排放可被划分为特定国家各行业活动中能源燃烧(有时也会包括过程排放)导致的生产端国家碳排放,以及由特定国家最终需求间接引起的消费端国家碳排放。对于消费端排放而言,又可以进一步区分为特定国家对全球产品的最终需求间接引起的碳排放(以下简称消费端引致全球碳排放)与特定国家对在国内生产的产品的最终需求间接引起的碳排放(以下简称消费端引致国内碳排放)。

在投入产出分析框架下,家庭消费引致直接碳排放的核算逻辑与生产端国家碳排放一致,家庭消费引致间接碳排放的核算逻辑与消费端国家碳排放一致。因此,可将家庭消费引致全球碳排放与生产端国家碳排放的比值界定为家庭消费引致全球碳排放生产端占比,将家庭消费引致国内碳排放与生产端国家碳排放的比值界定为家庭消费引致国内碳排放生产端占比。根据是否涵盖与在国内生产但并未在国内消费的产品相关的碳排放,将家庭消费引致全球碳排放与消费端引致全球碳排放的比值界定为家庭消费引致全球碳排放消费端占比,将家庭消费引致国内碳排放与消费端引致国内碳排放的比值界定为家庭消费引致国内碳排放消费端占比。

1.2 系统性综述

本研究将对与家庭碳排放相关的媒体文本与学术论文进行系统性检索、筛选与分析,明确家庭碳排放占比的取值与分布,并分析家庭碳排放占比差异的来源。

1) 媒体报道溯源。由于媒体渠道广泛且数据量庞大,因此本研究使用互联网智能舆情监测与分析工具对包括微博、新闻(如门户网站、主流媒体)、自媒体(如知乎、微信)、纸媒和政务等所有主流媒体渠道进行了全面搜索。以 2022 年 1 月 21 日国家发展改革委等部门发布《促进绿色消费实施方案》为起点,选取该日到 2022 年 11 月 22 日这 10 个月作为检索时间。设置监控词为“CO₂ 排放”“碳足迹”“碳排放”“温室气体排放”,搭配词为“家庭”“家庭消费”“家庭生活消费”“居民生活”“居民生活消费”“居民消费”“生活”“生活消费”,并采用“AND”连接,初步检索出 90 903 篇文章。其中,微信和新闻渠道的相关信息量最大,分别占 54% 和 36%;政务渠道占 6%;头条和其他自媒体各占 2% 和 1%。鉴于样本量较大,结合随机分层抽取与增补筛选方法,调高较为权威的政务渠道抽取比例,抽取 1 290 篇文章进一步筛选,最终得到 48 篇文章作为最终的分析样本。

2) 学术论文综述。通过在中国知网 CNKI、Web of Science Core Collection™ (SCI-E) 和 Scopus 文献库进行关键词检索,筛选与中国家庭碳排放相关的中英文期刊论文。检索关键词串为: [TS = (“carbon footprint” OR “carbon emission*” OR GHG OR “greenhouse gas” OR “carbon dioxide” OR CO₂) AND TS = (household*) AND TS = (China)] 和 [(家庭 OR 家庭消费 OR 家庭生活消费 OR 居民生活 OR 居民生活消费 OR 居民消费 OR 生活 OR 生活消费) AND ((CO₂ 排放 OR 碳足迹 OR 碳排放 OR 温室气体排放)]。初步检索和筛选出文献 300 余篇,随后通过浏览标题和摘要以及研读内容,提取得到分布在 20 多篇文献中的 75 条中国家庭碳排放占比相关结果。

1.3 投入产出分析

为了提供占比的科学参照,本研究基于 3 个多区域投入产出数据库对中国家庭碳排放与国家碳排放进行了核算。投入产出法是估计消费间接碳排放的主要方法之一,为美国经济学家里昂惕夫于 20 世纪 30 年代提出^[22]。该方法主要依托于国家或地区的投入产出表,反映国民经济各部门间、产品生产与消费之间的数量依存关系^[23]。基于投入产出法计算家庭碳排放,即利用经济活动之间的投入产出关系,结合能源消耗数据来估算各个部门的碳排放量,再分摊到家庭消费中。投入产出分析的基本方程如式 (1) 所示。

$$X = (I - A)^{-1} \cdot Y = B \cdot Y \quad (1)$$

式中: X 为经济总产出; $(I - A)^{-1}$ 和 B 为里昂惕夫逆矩阵,其中 A 为反映部门间经济流动的技术系数矩阵; I 为单位矩阵; Y 为需求矩阵。基于投入产出基本方程可计算家庭间接碳排放,公式如式 (2) 所示。

$$C = E \cdot (I - A)^{-1} \cdot Y' \quad (2)$$

式中: C 为家庭间接碳排放量; E 为直接碳排放强度向量,代表各部门单位产出的能源消耗碳排放; Y' 代表家庭消费支出向量。

投入产出表可以分为多区域投入产出表和单区域投入产出表。前者考虑了不同国家或地区之间的贸易关系,能实现对国家碳排放的较准确评估,但需要更多数据和计算资源支撑。后者,如 CEEIO^[24] 和 CEADs,则实现了核算与分析的简化,但不能完全涵盖国际贸易对碳排放的影响。本研究基于参考年份为 2014 年的 WIOD 表、参考年份为 2017 年的 GTAP 表和参考年份为 2016 年的 EORA (26 部门) 这三个多区域投入产出表计算中国家庭碳排放占比。

为全面理解上述 3 个应用最为广泛的多区域投入产出表数据库在家庭碳排放研究中的适用性和局限性,对其各自的特征分析和评估如下。其中, EORA 数据库涵盖了最多的国家和地区,最能反映全球经济活动的结构,适用于针对全球性环境问题和可持续发展目标进行环境足迹分析^[25]。然而, EORA 数据库不包括部分国家或地区的直接排放数据。WIOD 数据库在国家账户结构方面具有优势,能够准确反映国民经济各部门之间的数量依存关系^[25-26]。此外, WIOD 数据库提供了详细的时间序列数据,有助于分析碳排放的历史变化趋势。但是, WIOD 数据库的数据更新频率较低,可能无法及时反映最新的经济和环境变化,且在处理国际贸易和供应链问题时可能不如其他数据库全面。GTAP 数据库更多关注贸易结构,适用于研究全球贸易政策和供应链问题。目前, GTAP 数据库被广泛用于政策模拟和经济分析,具有很高的适用性和灵活性。美中不足

的是, GTAP 数据库的碳排放数据主要侧重于能源数据, 不完全包括工业过程的排放。总体而言, 上述数据库在用于分析家庭碳排放时各有优缺点, 将其综合起来分析有助于提高研究结果与结论的可靠性、稳健性和准确性。

2 结果与讨论

2.1 媒体报道中的中国家庭碳排放占比

最终筛选得到的 48 篇媒体报道中的中国家庭碳排放占比介于 30% 到 65% 之间, 且报道间存在一定的引用关系。如表 1 所示, 在提及 53% 这一核心数据的 21 篇文章中, 有 2 种不同的表述: ①“居民消费产生的碳排放量占 53%”, 被 18 篇文章提及; ②“消费端如工业过程、居民生活等占 53%”, 被 3 篇文章提及。本研究溯源后发现, 53% 首次出现是在 2021 年 5 月 30 日中国科学院学部第七届学术年会上, 由中国科学院院士丁仲礼在《中国“碳中和”框架路线图研究》专题报告中提出。报告中的描述与表述②相符, 即消费端(包括工业过程、居民生活等)碳排放占总排放的 53%, 而与大多数媒体文章引用的表述①存在明显差异。由于消费端涵盖的方面比居民消费更广, 因此经过简化的表述②夸大了中国家庭碳排放占比。此外, 还有 6 篇媒体文章提及核心数据 52%, 并明确指出数据来源为中国社会科学院和中国气象局发布的《应对气候变化报告(2020): 提升气候新动力》。经核查, 该数据出自该报告的《2020 年全球净零碳排放动向与中国战略选择》章节, 原文直接给出了 52% 的数据, 但未详细阐述其计算逻辑与数据来源。在 48 篇媒体报道中出现的其它家庭碳排放占比大多无明确的数据来源。

表 1 媒体报道中的中国家庭碳排放占比与典型描述
Table 1 China household carbon emission proportion in media reports

核心数据	典型描述	时间代表性	发布时间	篇数	占比
30%	由居民生活和食品生产等工业过程引发的消费端碳排放占全社会碳排放总量的53%, 其中居民生活的碳排放约占30%。	未说明	2022.05	1	2%
40%	我国居民碳排放占全国总体排放的40%。	1992—2007	2021.08	3	6%
40%~50%	在中国, 居民消费产生的碳排放量占总量的40%~50%。	未说明	2022.04	3	6%
50%	研究表明, 我国居民消费产生的碳排放量超过全国碳排放总量的50%。	未说明	2022.06	3	6%
52%	根据《应对气候变化报告(2020): 提升气候新动力》的研究结果, 我国家庭生活消费所引发的CO ₂ 等温室气体排放, 占到我国温室气体排放总量的52%。	未说明	2022.07	6	13%
53%	我国大约100×10 ⁸ t CO ₂ 排放中, 发电端占比约47%, 消费端如工业过程、居民生活等占了53%。	未说明	2022.05	3	44%
	中国科学院发布的一份报告显示, 居民消费产生的碳排放量占总量的53%。	未说明	2022.11	18	
54%	中国居民消费端的碳排放约占全国碳排放总量的54%。	未说明	2022.10	1	2%
65%	大量研究表明, 家庭消费占有CO ₂ 排放的65%以上。	未说明	2022.02	3	6%

为深入分析媒体报道中占比结果差异产生的原因, 本研究从以下几个方面进行了深入分析。首先, 进一步考虑了数据时间代表性的影响。然而, 如表 1 所示, 仅包含“我国居民碳排放占全国总体排放的 40%”表述的报道之一明确说明其为 1992—2007 年期间家庭消费的直接和间接 CO₂ 排放占一次能源利用的碳排放总量的比例, 其余报道均无明显的时间代表性信息。然后, 受限于版面等因素, 媒体在报道家庭碳排放占比时会忽略核算边界、假设条件等关键信息, 导致占比的具体含义模糊不清。最后, 部分报道在引述数据时, 对原始数据进行了简化、概括或解读, 这可能导致数据失真。例如, 部分报道对“消费端”的定义过于宽泛, 导致得出较高的家庭碳排放占比。基于上述分析, 我们发现媒体报道中家庭碳排放占比数据的可靠性存在疑问, 有必要对相关学术文献进行更详细的分类和分析, 更清晰地展示数据差异的原因。

2.2 研究论文中的中国家庭碳排放占比

如表 2 所示, 中国家庭碳排在总体上呈现明显的上升趋势。基于投入产出延长表和年鉴数据核算得到家庭碳排放量估计值在 2007 到 2011 年间从 16.6×10⁸ t 上升到 23.8×10⁸ t, 增幅为 43.37%^[9]。同时, 基于投

表 2 中国家庭碳排放总量综述结果 (10 ⁸ t)			
Table 2 Summary of total household carbon emissions of China (hundred million tons)			
年份	结果	主要数据来源	核算方法
2007	16.6 ^[9]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2008)；中国能源统计年鉴 (2008)	投入产出分析法
	33.3 ^[27]	中国投入产出学会中国时间序列投入产出表 (2007)；中国能源统计年鉴 (2008)	投入产出分析法
2008	17.6 ^[9]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2009)；中国能源统计年鉴 (2009)	投入产出分析法
2009	19.7 ^[9]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2010)；中国能源统计年鉴 (2010)	投入产出分析法
2010	14.2 ^[28]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2011)；中国能源统计年鉴 (2011)	消费者生活方式分析法 (CLA)
	21.5 ^[9]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2011)；中国能源统计年鉴 (2011)	投入产出分析法
	21.6 ^[29]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2011)；中国能源统计年鉴 (2011)	投入产出分析法
	24.6 ^[30]	中国投入产出延长表 (2010)；中国家庭金融调查 (CHFS, 2011)；中国碳核算数据库 (CEADs, 年份不明确)	消费者生活方式分析法 (CLA)
	26.8 ^[31]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2011)；中国能源统计年鉴 (2011)	投入产出分析法
	28.3 ^[32]	中国投入产出学会中国时间序列投入产出表 (2010)；中国能源统计年鉴 (2011)	投入产出分析法
	30.5 ^[33]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2011)；中国能源统计年鉴 (2011)	投入产出分析法
	37.1 ^[27]	中国投入产出学会中国时间序列投入产出表 (2010)；中国能源统计年鉴 (2011)	投入产出分析法
2011	23.8 ^[34]	中国投入产出表 (年份不明)；中国统计年鉴 (2012)；中国能源统计年鉴 (2012)	投入产出分析法
	23.8 ^[9]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2012)；中国能源统计年鉴 (2012)	投入产出分析法
	23.8 ^[35]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2013)；中国能源统计年鉴 (2008)	投入产出分析法
	28.0 ^[31]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2012)；中国能源统计年鉴 (2012)	投入产出分析法
2012	23.0 ^[36]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2013)；中国能源统计年鉴 (2013)	投入产出分析法
	27.4 ^[37]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2013)；中国能源统计年鉴 (2013)	投入产出分析法
	29.1 ^[31]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2013)；中国能源统计年鉴 (2013)	投入产出分析法
	29.7 ^[38]	中国国务院发展研究中心多区域投入产出表 (2012)；中国统计年鉴 (2013)；中国能源统计年鉴 (2013)；中国碳核算数据库 (CEADs, 2012)	投入产出分析法
	30.9 ^[39]	中国碳核算数据库 (CEADs, 2012)；中国省级统计年鉴 (2013)；中国能源统计年鉴 (2013)	投入产出分析法
	31.5 ^[40]	世界投入产出数据库 (WIOD, 2007)；中国家庭追踪调查 (CFPS, 2012)	结合调查数据的投入产出分析法
	34.7 ^[33]	中国投入产出延长表 (2010)；中国统计年鉴 (2013)；中国能源统计年鉴 (2013)	投入产出分析法
2013	29.8 ^[31]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2014)；中国能源统计年鉴 (2014)	投入产出分析法
2014	33.0 ^[31]	中国投入产出表 (2007)；中国统计年鉴 (2015)；中国能源统计年鉴 (2015)	投入产出分析法
	38.8 ^[40]	世界投入产出数据库 (WIOD, 2007)；中国家庭追踪调查 (CFPS, 2012)	结合调查数据的投入产出分析法
2015	26.8 ^[28]	中国投入产出延长表 (2015)；中国统计年鉴 (2016)；中国能源统计年鉴 (2016)	消费者生活方式分析法 (CLA)
2017	25.2 ^[41]	中国投入产出表 (2017)；中国统计年鉴 (2018)；中国能源统计年鉴 (2018)；中国家庭金融调查 (CHFS, 2017年)；中国碳核算数据库 (CEADs, 2017)	结合调查数据的投入产出分析法
	28.3 ^[42]	中国碳核算数据库 (CEADs, 2017)	投入产出分析法

入产出表和年鉴数据核算得到家庭碳排放量估计值在 2010 到 2014 年间从 26.8×10⁸ t 上升到 33.0×10⁸ t，增幅仅为 23.13%，增速趋于放缓^[31]。受限于数据可得性，许多研究采用同一年份的投入产出表进行若干年份的家庭碳排放核算。在这种情况下，同一研究中不同年份核算结果的差异主要来自于宏观经济指标与能源消耗量的变化。

不同研究对同一年份中国家庭碳排放的估计结果之间也存在较大差异, 首要原因在于所使用的核算方法不同(表 2)。部分研究并未基于投入产出分析法、而是基于消费者生活方式分析法(CLA) 计算家庭碳排放, 从而较为精准地反映出不同类型家庭在食物、交通、能源等具体消费领域的碳足迹^[30]。CLA 方法的优势在于可以细化到具体的家庭消费行为, 但会受调查数据所涵盖家庭消费行为类型的影响。与之类似, 结合调查数据进行投入产出分析, 与基于投入产出表进行投入产出分析, 也会导致结果出现差异。

不同研究采用的核算边界与数据来源的异质性, 也会导致同一年份中国家庭碳排放估计结果之间的差异(图 2)。首先, 核算边界对家庭碳排放的估计结果影响巨大。对于家庭消费引致直接碳排放而言, 核算所涵盖的能源类型可能为 18 种^[43]、17 种^[42]、16 种^[33]、14 种^[44]、11 种^[34]、10 种^[45] 或 3 种^[46] 等。此外, 需要说明的是, 部分研究并未明确核算所涵盖的能源类型^[38]。对于家庭消费引致间接碳排放而言, 直接与间接碳排放边界的界定方式会对其造成较大影响。在所调研的学术论文中, 约 32.14% 将范围 1 和 2 的排放界定为直接碳排放, 四分之一的将范围 2 和 3 的排放界定为间接碳排放。界定方式不明确的学术论文占比达到了 17.86%, 界定方式不规则的学术论文占比也达到了四分之一。不同研究的界定方式差异, 也进一步加剧了家庭消费引致直接碳排放与间接碳排放估计结果之间的差异。

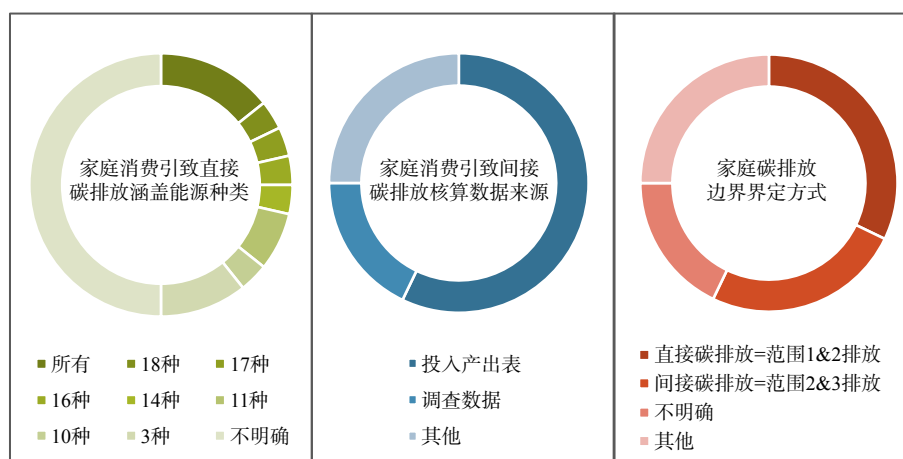


图 2 学术论文的中国家庭碳排放核算边界与数据来源差异

Fig. 2 Variations in accounting boundaries and data sources for China household carbon emission in articles

数据来源差异也是引起家庭间接碳排放估计结果差异的重要原因。首先, 在计算家庭消费引致间接碳排放时, 约 57.14% 的论文基于投入产出表展开, 约 17.86% 的论文基于调查数据展开^[41], 其估计结果存在明显的分异特征。另一方面, 基于投入产出表展开的研究使用投入产出表的类型与时间代表性也不尽相同^[32,37,39]。例如, 在核算 2012 年的家庭碳排放时, 不同研究分别使用了 2007 年和 2010 年的投入产出表。此外, 与排放系数等相关的数据来源差别也会引起估计结果差异。排放系数指每单位活动水平的温室气体排放量, 直接影响碳排放的计算精度。例如, 同样是估算煤炭消耗的碳排放, 不同研究可能会使用 IPCC 提供的国际通用排放系数或国家统计局发布的本地排放系数, 这将直接导致最终碳排放估算的不同。

目前, 学术研究通常更关注家庭碳排放绝对量, 缺少对占比的讨论。为考察其中隐含的占比趋势, 本研究利用中国历年国家碳排放进行粗略估算, 仅作为对比参考。CAIT、PIK、UNFCCC、GCP、CEADs 和 World Bank 来源的国家碳排放均为生产端排放。CAIT、PIK 和 UNFCCC 仅涵盖与能源消耗相关的排放, 其余多考虑了水泥生产过程排放。综合考虑核算范围的全面性和对中国生产活动的代表性, 选取 CEAD_s 数据库中的中国历年国家碳排放作为分母, 家庭碳排放占比如图 3 所示。在使用投入产出分析方法计算家庭碳排放的文章中, 占比介于 25.34% 与 32.09% 之间, 且呈现明显的先上升后稳定的趋势; 在所有相关文章中, 占比介于 26.04% 与 38.09% 之间, 但未见明显趋势。

2.3 基于投入产出分析的中国家庭碳排放占比

1) 中国家庭碳排放总量。如表 3 所示, 基于不同投入产出表数据源的中国家庭碳排放估计值存在一定差

异 (Eora-2016 数据源并未直接给出与家庭消费相应的直接碳排放, 为避免误差在此不考虑)。基于 WIOD-2014 数据源得到的中国家庭消费引致直接碳排放估计值为 5.82×10^8 tCO₂ 当量, 基于 GTAP-2017 数据源得到的估计值仅为 0.31×10^8 tCO₂ 当量。两者之间的巨大差异可能归因于 WIOD 数据表涵盖了化石燃料燃烧和工业过程排放, 而 GTAP 数据表则更多侧重于能源数据, 未完全包括工业过程排放^[47]。

基于 EORA-2016 数据源得到的中国家庭消费引致间接碳排放最高, 家庭消费引致国内间接碳排放为 34.53×10^8 tCO₂ 当量, 家庭消费引致全球间接碳排放为 35.14×10^8 tCO₂ 当量。相比之下, 基于 WIOD-2014 数据源, 这两个数值分别为 21.85×10^8 与 22.69×10^8 tCO₂ 当量; 基于 GTAP-2017 数据源, 这两个数值分别为 24.66×10^8 与 25.47×10^8 tCO₂ 当量。基于 EORA 数据源得到的工业排放数据量显著大于其他数据源, 这可能是其估计值较高的主要原因^[48]。基于 EORA-2016 数据源得到的家庭消费引致间接碳排放最高, 甚至高于基于其他数据源得到的家庭消费引致碳排放量。基于 GTAP-2017 数据源得到的家庭消费引致碳排放量最低, 部分原因在于其未完全包括工业过程排放。基于 WIOD-2014 数据源得到的家庭消费引致国内碳排放和家庭消费引致全球碳排放分别为 27.67×10^8 与 28.51×10^8 tCO₂ 当量。总体而言, 家庭消费引致间接碳排放是家庭消费引致碳排放的主要组成部分, 占 80% 以上。

2) 中国国家碳排放总量。由于不同投入产出表在参考年份、数据结构、覆盖范围和数据类型等方面存在不同, 中国国家碳排放量估计值波动范围较大。生产端国家碳排放估计值介于 74.16×10^8 到 106.90×10^8 tCO₂ 当量之间; 消费端引致国内碳排放估计值介于 64.74×10^8 到 95.04×10^8 tCO₂ 当量之间; 消费端引致全球碳排放估计值介于 66.27×10^8 到 99.37×10^8 tCO₂ 当量之间。如图 4 所示, 生产端国家碳排放估计值均高于消费端国家碳排放估计值, 主要原因在于由对外贸易引起的碳排放转移。21 世纪前 20 年, 中国均有近三分之一的碳排放服务于来自国外的最终需求, 尤其是来自美国、欧盟和日本的需求^[49-50]。

3) 中国家庭碳排放占比。如图 5 所示, 基于 WIOD-2014 数据源得到的家庭直接碳排放占生产端排放的 5.86%, 而基于 GTAP-2017 数据源的占比结果则仅为 0.42%。图 5 还展示了家庭间接排放占消费端排放的比例。其中, 基于 WIOD-2014 数据源得到的家庭消费全球商品引起的间接排放占比最低, 为 26.37%; 基于 EORA-2016 和 GTAP-2017 数据源得到的结果较为接近, 分别为 36.09% 和 37.96%。家庭消费国内商品引起的家庭间接排放占比也呈现相似的趋势, 分别为 26.00% (WIOD-2014)、36.34% (EORA-2016)、37.61% (GTAP-2017)。值得注意的是, 基于 EORA-2016 数据源得到的家庭消费国内商品引起的家庭间接排

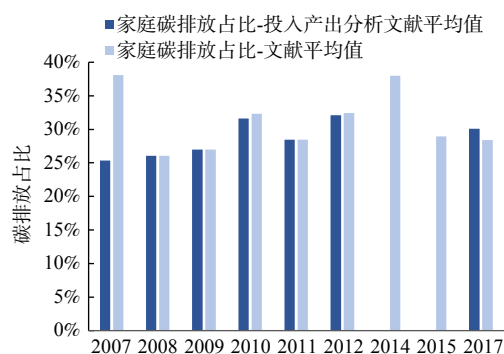


图 3 基于文献的中国家庭碳排放占比

Fig. 3 China household carbon emission proportion in literature sources

表 3 基于投入产出分析的中国家庭碳排放量 (10^8 t)

Table 3 China household carbon emissions based on input-output analysis (hundred million tons)

	WIOD-2014	EORA-2016	GTAP-2017
家庭消费引致直接碳排放	5.8	—	0.31
家庭消费引致全球间接碳排放	22.7	35.1	25.2
家庭消费引致国内间接碳排放	21.9	34.5	24.4
家庭消费引致全球碳排放	28.5	—	25.5
家庭消费引致国内碳排放	27.7	—	24.7

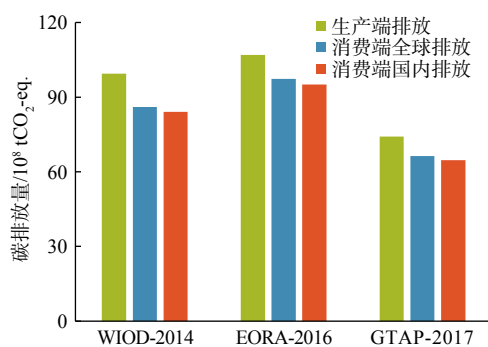


图 4 基于投入产出分析的中国国家碳排放量

Fig. 4 China household carbon emissions based on input-output analysis

放占比高于全球商品引起的间接排放占比,而基于 WIOD-2014 和 GTAP-2017 数据源的结果则相反。

由于 EORA-2016 数据源并未直接给出与家庭消费相应的直接碳排放数据,图 5 呈现了基于 WIOD-2014 和 GTAP-2017 数据源得到的家庭碳排放占比结果。两者在不同占比含义下的数值特征基本相同,但前者结果均小于后者。当生产端国家碳排放作为基数时,基于 WIOD-2014 数据源得到的家庭消费引致碳排放占比估计结果为 27.83%~28.67%,基于 GTAP-2017 数据源得到的占比估计结果为 33.26%~34.25%。当以消费端国家碳排放为基数时,基于 GTAP-2017 数据源得到的家庭消费引致碳排放占比最高达 38.43%,即使不考虑对国外产品的消费,占比略低,为 38.09%;基于 WIOD-2014 数据源得到的家庭消费引致碳排放占比较低,在 33% 左右。总体而言,基于不同数据源得到的中国家庭消费引致碳排放占比介于 27.83% 到 38.43% 之间,与文献中的占比平均取值相当,但普遍低于媒体报道的水平,也远低于发达国家 80% 的水平。一方面,这表明媒体报道对家庭碳排放重要性的高估倾向。另一方面,也表明中国的国家碳排放目前在很大程度上仍主要集中于工业生产和出口,而非家庭消费^[37]。相比之下,欧美等发达国家的碳排放则更多依赖于服务业和以高消费为特征的生活方式^[51]。

3 结论

1) 政策层面。随着人民生活水平的提高,中国家庭碳排放的绝对量的确有明显的增长趋势。但是,为降低实现碳中和目标的全局成本,决策者需要客观看待家庭碳减排的相对重要性,不应该赋予其过高的地位。此外,为实现高效率的家庭碳减排,政策制定应尤其具有前瞻性和针对性。本研究表明,间接碳排放是家庭碳排放的主体,其减排需要依赖系统性变革,是决策者需要重点关注的方向。对此,应进行深入有效的供应链减排机制设计,引导消费者个人选择,促进行业低碳转型。在当前的信息时代,媒体报道对公众的认知和态度塑造具有重要作用。然而,部分媒体报道的中国家庭碳排放量及占比数据或缺乏明确来源,或对背景信息过度简化。这可能追求新闻效应的结果,在一定程度上导致了家庭碳减排信号的误读和误传。政府需要引导媒体,确保其引用或使用占比数据具有可靠的来源于规范的说明,避免部分媒体沦为特定商业利益群体的吹鼓手。最后,对于数据来源不明的媒体报道,大众与决策者应保持警惕,不可轻信。

2) 核算层面。在计算家庭碳排放占比时,需要采取科学的核算方法,明确其分子与分母的定义与范围,避免因范围差异而导致的数据偏差。对于分子即家庭碳排放而言,建议参考温室气体协议,按照范围 1、2、3 及其组合的形式进行核算,不仅可以避免直接与间接碳排放之间的边界模糊,还可以与 IPCC 推荐的组织碳排放核算方法接轨^[52]。对于范围 1 碳排放,研究者应明确所涵盖的能源类型;对于范围 2&3 碳排放,研究者应明确核算所依据的方法。如果研究基于调查数据开展,还需阐明所涵盖的家庭行为类型。对于分母即国家碳排放而言,需要明确其是生产端排放还是消费端排放,及其对贸易的处理方式。此外,家庭碳排放的核算方式与范围需要与国家碳排放相匹配。例如,当分子为中国家庭需求所驱动的全球碳排放时,分母也应该是中国消费端需求所驱动的全球碳排放,而非其所驱动的国内碳排放。最后,报告碳排放时,研究者应明确估计值代表温室气体还是 CO₂。如果是温室气体,必须明确包括哪些温室气体。

此外,投入产出方法的优势在于其宏观性和系统性,但是用于考察家庭碳排放时可能会忽略具体的家庭消费细节,以及同类消费品之间的质量差别。例如,投入产出方法基于平均生产技术和消费模式,忽略了家

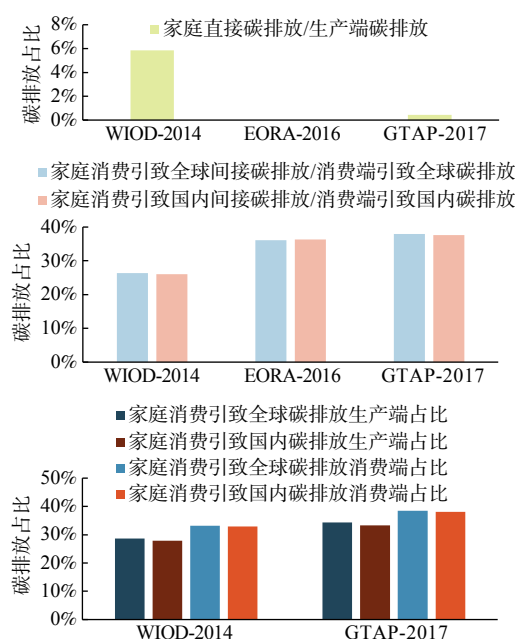


图5 基于投入产出分析的中国家庭碳排放占比

Fig. 5 China household carbon emission proportion based on input-output analysis

庭在实际消费过程中的个体差异和行为变化。此外，行业内同类消费品的质量差别在投入产出表中往往被平均化处理，导致对高质量或低质量产品的碳排放估算不准确。为了弥补这些不足，需要结合以生命周期评价为代表的自下而上的核算方法。生命周期评价能够深入到产品的具体使用阶段，捕捉到家庭消费行为的微观细节，提供更为细致的碳排放估算，在细化产品碳足迹方面具有独特优势。因此，需要完善将两者优点结合在一起的家庭碳排放综合分析框架，既能保持宏观系统分析的优势，又能细化到具体产品和服务的生命周期，能提供更全面的碳排放分析。

3) 数据层面。在使用投入产出分析方法计算家庭碳排放占比时，基于不同数据库得到的占比估计结果差异较大，可比性不强。因此，在报道占比结果时，应该说明所使用和参考的数据库，以便提供科学参照。此外，鉴于国际贸易对于家庭消费与碳排放愈来愈重要的影响，基于多区域投入产出表核算家庭碳排放占比更加合适。然而，当前研究所使用的主流多区域投入产出表数据库多由国外机构建设，其与中国相关的数据难免会有不全面和不准确之处。因此，相关机构应支持高校等中国本土机构，以中国视角优化投入产出分析方法论、从中国实际情况出发建设多区域投入产出表数据库。这不仅能为家庭碳排放占比估计提供更加坚实的数据基础，增强数据的参考价值，还有助于我国在气候问题对话中掌握更多话语权。

参 考 文 献

- [1] WORKING GROUP III P R, SHUKLA J, SKEA, et al. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Summary for policymakers: Sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (AR6) [R]. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), 2022: 2258.
- [2] 贾璐宇, 王克. 碳中和背景下中国交通部门低碳发展转型路径[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6): 3231-3243.
- [3] 李文翔, 李晔, 蔡近近. 政府-企业-居民协同共治的道路交通碳交易机制[J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4426-4438.
- [4] MA R, ZHENG X, ZHANG C, et al. Distribution of CO₂ emissions in China's supply chains: A sub-national MRIO analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 345: 130986.
- [5] CAO Q, KANG W, XU S, et al. Estimation and decomposition analysis of carbon emissions from the entire production cycle for Chinese household consumption[J]. Journal of environmental management, 2019, 247: 525-537.
- [6] 王长波, 胡志伟, 周德群. 中国居民消费间接 CO₂ 排放核算及其关键减排路径[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(3): 15-27.
- [7] HERTWICH E G, PETERS G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(16): 6414-6420.
- [8] SONG K H, QU S, TAIEBAT M, et al. Scale, distribution and variations of global greenhouse gas emissions driven by U. S. households[J]. Environment International, 2019, 133: 105137.
- [9] MARASENI T N, JIANGSHENG Q U, ZENG J J. A comparison of trends and magnitudes of household carbon emissions between China, Canada and UK[J]. Environmental Development, 2015, 15: 103-119.
- [10] YU F, DONG H J, GENG Y, et al. Uncovering the differences of household carbon footprints and driving forces between China and Japan[J]. Energy Policy, 2022, 165: 112990.
- [11] DU M, ZHANG X, XIA L, et al. The China carbon watch (CCW) system: A rapid accounting of household carbon emissions in China at the provincial level[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111825.
- [12] 卢乐书, 王翀. 以消费端绿色金融创新引导和鼓励绿色需求[N]. 光明日报, 2022-04-26. [2023-11-30].
- [13] 李禾. 个人碳账户让减碳逐步进入全民时代[N]. 新华网, 2022-09-06. [2023-11-30].
- [14] 刘茜贤, 赵琳. 明确 40 项绿色低碳行为, 消费领域碳减排有了统一“标尺”[N]. 新京报, 2022-05-08. [2023-11-30].
- [15] HUA W, CHEN Y, QADRAN M, et al. Applications of blockchain and artificial intelligence technologies for enabling prosumers in smart grids: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112308.
- [16] GUO F, ZHENG X, WANG C, et al. Sharing matters: Household and urban economies of scale for a carbon-neutral future[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 184: 106410.
- [17] XIE J, ZHOU S, TENG F, et al. The characteristics and driving factors of household CO₂ and non-CO₂ emissions in China[J]. Ecological Economics, 2023, 213: 107952.
- [18] WU S. Smart cities and urban household carbon emissions: A perspective on smart city development policy in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 373: 133877.
- [19] ZHANG X, LUO L, SKITMORE M. Household carbon emission research: an analytical review of measurement, influencing factors and mitigation prospects[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 873-883.
- [20] JONES M W, ANDREW R M, PETERS G P, et al. Gridded fossil CO₂ emissions and related O₂ combustion consistent with national inventories 1959–2018[J]. Scientific Data, 2021, 8(1): 2.
- [21] CHOUDHARY P, SRIVASTAVA R K, DE S. Integrating greenhouse gases (GHG) assessment for low carbon economy path: Live case study of Indian national oil company[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 351-363.
- [22] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. The Review of Economics and Statistics, 1936, 18(3): 105.
- [23] 彭璐璐, 李楠, 郑智远, 等. 中国居民消费碳排放影响因素的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 463-472.

- [24] TIAN X, LIU Y, XU M, et al. Chinese environmentally extended input-output database for 2017 and 2018[J]. *Scientific Data*, 2021, 8(1): 256.
- [25] LENZEN M, KANEMOTO K, MORAN D, et al. Mapping the structure of the world economy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8374-8381.
- [26] LENZEN M, MORAN D, KANEMOTO K, et al. Building EORA: A global multi-region input-output database at high country and sector resolution[J]. *Economic Systems Research*, 2013, 25(1): 20-49.
- [27] ZHANG Y J, BIAN X J, TAN W P, et al. The indirect energy consumption and CO₂ emission caused by household consumption in China: an analysis based on the input-output method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 69-83.
- [28] WANG Y, YANG G C, DONG Y, et al. The scale, structure and influencing factors of total carbon emissions from households in 30 provinces of China—Based on the Extended STIRPAT Model[J]. *Energies*, 2018, 11(5): 1125.
- [29] MARASENI T K, QU J, ZENG J, et al. An analysis of magnitudes and trends of household carbon emissions in China between 1995 and 2011[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2016, 10(1): 179-192.
- [30] LI J, ZHANG D Y, SU B. The impact of social awareness and lifestyles on household carbon emissions in China[J]. *Ecological Economics*, 2019, 160: 145-155.
- [31] 曲建升, 刘莉娜, 曾静静, 等. 中国居民生活碳排放增长路径研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(12): 2389-2398.
- [32] ZHANG Y J, BIAN X J, TAN W P. The linkages of sectoral carbon dioxide emission caused by household consumption in China: evidence from the hypothetical extraction method[J]. *Empirical Economics*, 2018, 54(4): 1743-1775.
- [33] 米红, 张田田, 任正委, 等. 城镇化进程中家庭 CO₂ 排放的驱动因素分析[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 3183-3192.
- [34] 王莉, 曲建升, 刘莉娜, 等. 1995-2011 年我国城乡居民家庭碳排放的分析与比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(5): 6-11.
- [35] QU J S, MARASENI T, LIU L N, et al. A comparison of household carbon emission patterns of urban and rural China over the 17 year period (1995–2011)[J]. *Energies*, 2015, 8(9): 10537-10557.
- [36] 刘莉娜, 曲建升, 黄雨生, 等. 中国居民生活碳排放的区域差异及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1364-1377.
- [37] LI Y M, ZHAO R, LIU T S, et al. Does urbanization lead to more direct and indirect household carbon dioxide emissions? Evidence from China during 1996–2012[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 102: 103-114.
- [38] WU S M, LEI Y L, LI S T. CO₂ emissions from household consumption at the provincial level and interprovincial transfer in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 93-104.
- [39] YUAN R, JOÃO F D, RODRIGUES P B. Driving forces of household carbon emissions in China: A spatial decomposition analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 932-945.
- [40] ZHANG H W, SHI X P, WANG K Y, et al. Intertemporal lifestyle changes and carbon emissions: Evidence from a China household survey[J]. *Energy Economics*, 2020, 86: 104655.
- [41] ZHANG Z X, CUI Y L, ZHANG Z K. Unequal age-based household carbon footprint in China[J]. *Climate Policy*, 2022, 23(5): 577-592.
- [42] WANG J, YUAN R. Inequality in urban and rural household CO₂ emissions of China between income groups and across consumption categories[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 94: 106738.
- [43] 刘云鹏, 王泳璇, 王帆, 等. 居民生活消费碳排放影响分析与动态模拟预测[J]. *生态经济*, 2017, 33(6): 19-22.
- [44] SHI Y Y, HAN B T, HAN L, et al. Uncovering the national and regional household carbon emissions in China using temporal and spatial decomposition analysis models[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 966-979.
- [45] 计志英, 赖小锋, 贾利军. 家庭部门生活能源消费碳排放: 测度与驱动因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(5): 64-72.
- [46] ZHAO L T, ZHAO T, YUAN R. Scenario simulations for the peak of provincial household CO₂ emissions in China based on the STIRPAT model[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151098.
- [47] ARTO I, RUEDA-CANTUCHE J M, PETERS G P. Comparing the GTAP-MRIO and WIOD Databases for carbon footprint analysis[J]. *Economic Systems Research*, 2014, 26(3): 327-353.
- [48] OWEN A, WOOD R, BARRETT J, et al. Explaining value chain differences in MRIO databases through structural path decomposition[J]. *Economic Systems Research*, 2016, 28(2): 243-272.
- [49] WANG W, HU Y. The measurement and influencing factors of carbon transfers embodied in inter-provincial trade in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122460.
- [50] YU C, MIZUNOYA T, YAN J, et al. Guangdong's embodied carbon emission in China's inter-provincial trade based on MRIO model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(18): 23432-23447.
- [51] MINX J C, BAIOCCHI G, PETERS G P, et al. A “carbonizing dragon”: China's fast growing CO₂ emissions revisited[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9144-9153.
- [52] GARCIA R, FREIRE F. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 66: 199-209.

(责任编辑: 金曙光)

Accounting for household carbon emissions and estimating their proportion in China based on multi-source data

XIE Jinliang¹, GUO Jing^{1,*}, HUANG Yuting², LIU Wei², XU Ming¹

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. ESG Strategy Operation and Research Department, Alibaba Group Holding Limited, Zhejiang, Hangzhou 310052, China

*Corresponding author, E-mail: guo_jing@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract The household carbon emission proportion provides an intuitive reflection of the relative importance of carbon reduction in the domain of household consumption and frequently appears in media reports. However, the proportion cited by different media sources show significant variations (ranging from 30% to 65%), potentially misleading the public and policymakers. To analyse the causes of these discrepancies, the proportion data presented in media reports and academic papers were systematically investigated. Additionally, this study delineated the numerator and denominator of the household carbon emission proportion, as well as employs multiple data sources to establish a benchmark through input-output analysis. Results revealed that the proportion data in media reports often lacked clear sources and oversimplify background information, casting doubt on their reliability. In contrast, academic papers tended to focus more on emission volumes rather than proportions, and exhibited significant differences in accounting scope and data sources. The proportion derived from input-output analysis ranged between 27.83% and 38.43%, typically lower than the values reported in the media and the proportions of developed countries. To enhance the comparability and transparency of research findings, it was recommended to account for household carbon emissions according to scope 1, 2, and 3 of the GHG protocol and to clarify energy types and behaviours covered. Overall, over 80% of household carbon emissions were indirect emissions, and their reduction relied on scientific guidance of consumer choices, which was the direction that the government should focus on. Additionally, to prevent misinformation, the media should be required to cite sources and background information when reporting proportion data. Lastly, to gain more discourse power in climate issue discussions, it was crucial for Chinese institutions to optimize input-output analysis methodologies and develop multi-regional input-output table databases.

Keywords household carbon emission proportion; China; input-output analysis; accounting scope; data traceability