李雯晴,何国华,杨清海,等.消费端视角下中国碳排放演变特征与驱动机制研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1682−1693.
Li W Q, He G H, Yang Q H, et al. Study on the evolutionary characteristics and driving mechanisms of China's carbon emissions from a consumption-based perspective [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1682−1693.

消费端视角下中国碳排放演变特征与驱动机制研究

李雯晴[1],何国华[1*],杨清海[2],林 绿[3],严增民[2],肖 潺[4],刘绿柳[4] (1.中国水利水电科学研究院,流域水循环与水安全全国重点实验室,北京 100038；2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083；3.中国石油大学(北京)经济管理学院,北京 102249；4.国家气候中心,北京 100081)

摘要：本研究从消费端视角出发,依托全球 189 个经济体的长时序投入产出数据,核算了 1997~2021 年中国(特指大陆地区,不含港澳台)隐含碳转移规模,识别了农业、采矿及采石业、轻工业、重工业、机械设备制造业、电力燃气和水供应业、其他行业、生活及第三产业等 8 个行业的消费端碳排放特征,并分析了不同时期消费端碳排放变化的关键驱动因素.研究发现,1997~2021 年中国始终处于隐含碳排放的净出口状态,轻工业、重工业和机械设备制造业是隐含碳出口的主要行业,美国、日本和中国香港是隐含碳出口的主要目的地.2021 年,中国消费端碳排放量为 101.56 亿 t,比生产端碳排放偏小 12.89 亿 t,表明消费端视角下中国的碳排放责任比生产端视角偏低 11.26%. 从驱动因素来看,消费规模增加是 1997~2021 年推动中国消费端碳排放增长的主要因素,其贡献率为 159.31%,人口规模变化、能源利用效率提升、能源结构调整对消费端碳排放变化的贡献则分别为 11.04%、−63.40%和−6.96%. 基于研究结果,本研究讨论了生产端视角下碳排放责任认定的不公平性,分析了中国碳减排需要关注的重点环节,并论证了研究结果的可靠性.

关键词：国际贸易；碳排放；投入产出分析；演变特征；驱动机制；中国
中图分类号：X321 **文献标识码**：A **文章编号**：1000−6923(2026)03−1682−12

Study on the evolutionary characteristics and driving mechanisms of China's carbon emissions from a consumption-based perspective.

LI Wen-qing[1], HE Guo-hua[1*], YANG Qing-hai[2], LIN Lü[3], YAN Zeng-min[2], XIAO Chan[4], LIU Lü-liu[4] (1.State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China；2.Petro China Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China；3.School of Economics and Management, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China；4.National Climate Center, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1682~1693

Abstract：This study adopts a consumption-based perspective and, drawing on long time-series input-output data from 189economies around the world, calculates the scale embodied carbon transfers in China (referring specifically to China's mainland and excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan) from 1997 to 2021. It identifies the characteristics of consumption-based carbon emissions of eight industries: agriculture; mining and quarrying; light industries; heavy industries; machinery and equipment manufacturing; electricity, gas, and water supply; other industries; and living and tertiary industries. Furthermore, it analyzes the key drivers of changes in consumption-based carbon emissions across different periods. The findings reveal that from 1997 to 2021, China consistently remained a net exporter of embodied carbon emissions, with light industries, heavy industries, and machinery and equipment manufacturing serving as the main sources of embodied carbon exports. The United States, Japan, and China's Hong Kong were the main destinations of these exports. In 2021, China's consumption-based carbon emissions totaled 10,156million tons, 1,289million tons lower than its production-based emissions, indicating that under the consumption-based perspective, China's carbon emission responsibility is 11.26% lower than that under the production-based perspective. In terms of driving factors, the increase in consumption scale was the main factor driving the growth of China's consumption−based carbon emissions from 1997 to 2021, with a contribution rate of 159.31%. Changes in population size, improvements in energy utilization efficiency, and adjustments in the energy structure contributed 11.04%, −63.40%, and −6.96%, respectively, to changes in consumption-based carbon emissions. Based on these results, the study discusses the unfairness of assigning carbon emission responsibility under the production-based perspective, highlights key areas of focus for China's carbon emission reduction efforts, and demonstrates the reliability of the findings.

Key words：international trade；carbon emissions；input-output analysis；evolutionary characteristics；driving mechanisms；China

收稿日期：2025−07−23
基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFE0213100);中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WR110145B0022025)

* 责任作者，高级工程师, hegh@iwhr.com

目前,碳减排已经成为国际社会的普遍共识,但不同机构或学者关于碳排放责任划分存在着显著分歧,争议焦点在于碳排放责任究竟是由生产者承担还是消费者承担.例如,IPCC[1]、国际能源署[2]、美国能源信息署[3]等机构主张采用生产者原则进行碳排放的责任划分,而斯德哥尔摩国际环境研究院[4]、中国科学院[5]和部分学者[6]等则倾向于消费者责任.碳排放责任划分的巨大争议导致全球协同减排始终难以形成合力.

碳排放核算可以分为生产端与消费端两大视角,传统的碳排放核算主要基于生产端视角,即通过测算生产过程中的直接碳排放量来评估区域碳排放规模,进而划分碳排放责任.国际主流的碳排放数据库,如二氧化碳信息与分析中心数据库(CDIAC)、国际能源署(IEA)数据库、全球大气研究排放数据库(EDGAR)、美国能源信息署(EIA)数据库、中国碳核算数据库(CEADs)、多尺度排放清单数据库(MEIC)等都是基于生产端视角进行碳排放计算[7].然而,这种计算方法忽视了国际贸易中的隐含碳排放转移,难以全面反映一个地区真实的碳排放规模[8].随着全球价值链不断深化,从消费端核算碳排放规模已经成为近年来的研究热点[9].消费端碳排放指为满足某一地区最终消费需求所产生的全部碳排放,包括本地生产带来的直接碳排放和国际进出口贸易产生的隐含碳排放[10].消费端碳排放的计算方法与生产端碳排放存在显著区别,前者仅统计区域内的直接排放,而后者则追踪最终消费驱动的全链条排放,其理论基础是“消费者付费原则”[11].

目前,消费端碳排放主要采用投入产出法进行研究,分析尺度涵盖了城市、区域、国家等不同层级[7-17].在国家层面,学者关注隐含碳跨国转移规模与碳排放的公平责任问题[7,12-14],普遍发现发达国家通过贸易将碳排放向发展中国家转移[12-14],并指出单一生产端核算难以体现真实责任[7,14].例如,Davis等[12]利用全球贸易数据构建了消费端碳排放核算框架,量化了发达国家向发展中国家的碳排放转移规模;沈群等[7]通过 MRIO 模型核算了全球 24 个主要国家 1990~2019 年的消费端碳排放量,发现发展中国家因贸易持续输出隐含碳,建议建立融合“生产-消费”视角的公平碳排放核算体系.在区域尺度方面,研究主要聚焦在具体省区的消费端碳排放驱动因素分析[8,15].如罗芳等[8]结合 MRIO 模型与 Tapio 脱钩模型,分析了长江经济带碳排放与经济增长的相互关系,研究发现长江经济带各省市碳排放与经济增长的脱钩状态存在显著视角差异,生产端视角核算会系统高估实际的减排成效;Zheng 等[15]基于 MRIO 模型分析了我国各省区 2012~2015 年消费端碳排放的主要驱动因素.在方法改进方面,学者们通过构建高分辨率数据库[16]、提出“自我责任-共同责任”碳排放核算框架[9]及区域“收支-责益”双平衡碳补偿机制[17]等方式,推动核算精度与责任分担机制的完善,为建立公平的碳排放核算体系提供了重要支持.

作为全球最大的生产端碳排放国,中国是全球碳排放研究的热点地区[18-22].国内外学者针对中国碳排放的总量核算、区域差异分析、贸易隐含碳转移的量化评估等方面开展了深入研究,并取得了一定成果.但总体来看,现有研究仍存在一定局限.首先,大部分研究仍然聚焦生产端碳排放核算与影响因素分析,对消费端碳排放长期演变规律的研究较为缺乏[19-20].其次,中国作为“世界工厂”承担了大量高收入国家的碳排放转移责任[21],但具体行业转移规模及其动态变化尚未明晰.此外,现有研究未能充分揭示不同发展阶段能源结构转型、消费水平提升、技术进步等因素对消费端碳排放的差异化影响,导致中国基于消费视角的碳排放特征及其驱动因素的研究仍存在不足.基于上述挑战,本研究通过对全球 189 个经济体的贸易数据进行分析,构建了包含碳排放模块在内的多区域投入产出模型,从消费端视角重新评估中国(本研究特指中国大陆地区,不含港澳台)碳排放演变特征与关键驱动因素,旨在深入理解中国碳排放的动态演变特征,并为完善全球碳排放核算体系和优化中国碳减排政策提供参考.

1　材料与方法

1.1　数据来源与处理

本研究包含 5 类数据,分别是 1997~2021 年全球多区域投入产出数据、全球碳排放数据、中国能源消费总量数据、中国实际最终消费数据以及人口数据.其中 1997~2021 年全球多区域投入产出数据来源于 Eora 数据库,该数据库包含有 189 个经济体,每个经济体包含 26 个行业,是目前全球经济体数量

最多、行业门类最齐全的投入产出数据库[16].为了与我国行业分类口径相匹配,本研究基于行业属性相似性,将 Eora 数据库中的 26 个行业合并为农业、采矿及采石业、轻工业、重工业、机械设备制造业、电力燃气和水供应业、其他工业、生活及第三产业共 8 大行业(见表 1).行业合并的核心依据是中国国民经济行业分类标准(GB/T 4754-2017)及中国统计年鉴.该合并方法在隐含碳、虚拟水及隐含污染物转移的投入产出分析领域中被广泛采用[23-25],是一种成熟且公认的处理策略,能够在保持宏观经济表征精度的前提下,有效降低模型复杂性与数据不确定性.1997~2021 年全球碳排放数据来自于 PRIMAPHIST 数据库,该数据库包含上述 189 个经济体 26 个行业的直接碳排放量数据,行业分类与 Eora 数据库一致.本研究同样将其合并为上文所述的 8 大行业.中国能源消费总量数据、实际最终消费数据和人口数据来自于 1997~2021 年中国统计年鉴.

表 1 本研究行业名称与 Eora 数据库行业名称对应关系

Table 1 Correspondence between the names of industries in this study and in the Eora database

Eora 数据库中需合并的行业名称	合并后行业名称
农业;渔业	农业
采矿及采石业	采矿及采石业
食品和饮料;纺织业和服装;木材和纸张	轻工业
石油开采、化工和非金属制造业;金属制品业	重工业
机电及机械制造业;交通运输设备制造业;其他制造业	机械设备制造业
电力、燃气和水	电力燃气和水供应业
循环再生;建筑业;产业再出口和再进口	其他工业
维护和修理业;批发业;零售业;酒店和餐饮业;交通业;邮电业;金融业和商业;公共管理;教育、卫生和其他服务;私人家庭;其他	生活及第三产业

为保证数据质量的可靠性,本研究对上述数据进行了如下处理:(1)本研究采用的 Eora26MRIO 数据库为澳大利亚悉尼大学综合可持续性分析中心(ISA)发布的最终平衡版本.该数据考虑了 189 个经济体贸易数据的完整性与一致性,并处理了原始数据中可能存在的缺失与统计误差[16].因此,本研究直接使用平衡后的数据,未对其基础结构进行修改.(2)对于 PRIMAPHIST 数据库提供的分行业碳排放数据,本研究重点关注中国数据的准确性.将其与《中国碳排放核算数据库(CEADs)》进行交叉验证,以确保文中 8 大合并行业碳排放数据的趋势合理性.(3)PRIMAPHIST 数据库中个别国家(地区)(如百慕大、开曼群岛等)的历史碳排放数据存在缺失.鉴于这些经济体与中国的贸易体量在全球贸易中占比极小,可忽略不计(经核实,数据缺失地区与中国的贸易额占比不足中国贸易总量的 1%),故在模型中遵循国际同类研究的常规做法,将缺失数据按照 0 处理.(4)为消除价格波动因素带来的影响,确保时序可比性,本研究利用平减指数将中国 1997~2021 年实际最终消费数据统一处理为 2010 年不变价.

1.2 隐含碳排放转移规模核算

1.2.1 MRIO 模型基本假设及框架 MRIO 模型基于多个国家(地区)的经济活动数据,可追踪跨区域经济价值量的流动路径.模型主要基于 3 个核心假设[26]:(1)同质性假设.此假设包含了三层含义,一是每个行业具有单一的投入结构;二是单个行业生产的所有产品是同质的,相互间可完全替代或者保持固定比例;三是不同行业产品之间无替代性.(2)比例性假设.即行业消耗的各种投入量和该行业的总产出成正比例.(3)直接消耗系数不变假设.即直接消耗系数在一定时期内不随时间变化并在同一行业不同企业间保持不变.尽管这些假设可能忽略了各区域、各行业的异质性,但为系统追踪全球价值链中的隐含碳流动提供了现实可行的框架.

MRIO 模型基本框架描述如下.在全球范围内,假设有 m 个国家(地区),每个国家(地区)有 n 个行业,一个国家(地区)t 年行业 i 的总产出 $x_{u\text{-}i}^t$ 由中间消耗和最终需求两部分组成:

$$x_{u-i}^t = \sum_{v=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} z_{u-i,v-j}^t + \sum_{v=1}^{m} y_{u-i,v}^t \tag{1}$$

式中:x_{u-i}^t 表示 t 年国家(地区)u 行业 i 的总产出,元;$z_{u-i,v-j}^t$ 表示 t 年国家(地区)u 行业 i 的产出作为中间投入流向国家(地区)v 行业 j 的部分,元;$y_{u-i,v}^t$ 表示 t 年国家(地区)u 行业 i 的产出用于满足国家(地区)v

最终需求的部分,元.

令 $a^t_{u-i,v-j}=z^t_{u-i,v-j}/x^t_{v-j}$,则式(1)可写成:

$$x^t_{u-i}=\sum_{v=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}a^t_{u-i,v-j}x^t_{v-j}+\sum_{v=1}^{m}y^t_{u-i,v} \tag{2}$$

式中:$a^t_{u-i,v-j}$ 是直接消耗系数,为国家(地区)v 行业 j 消耗的国家(地区)u 行业 i 的中间投入($z^t_{u-i,v-j}$,元)与国家(地区)v 行业 j 总产出(x^t_{v-j},元)的比值.

将式(2)写成矩阵形式:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{Y} \tag{3}$$

通过矩阵变换可以得到:

$$\boldsymbol{X}=\left(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{Y} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{X}$ 为各经济行业的总产出向量;$\boldsymbol{Y}$ 为各行业最终总需求矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为直接消耗系数矩阵;$\boldsymbol{I}$ 是单位矩阵;式中$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$ 被称为 Leontief 逆矩阵.

1.2.2　MRIO 模型核算隐含碳排放　本研究基于 Eora 数据库中的 MRIO 数据,通过将不同经济体各行业生产过程中的碳排放量纳入其中,形成包含碳排放模块的投入产出表.进一步测算 1997~2021 年与中国有贸易往来的所有经济体分行业的直接碳排放系数和完全碳排放系数,结合贸易流通规模即可分析得到 1997~2021 年中国隐含碳排放转移特征.

直接碳排放系数即单位经济产出的 CO_2 排放量,代表各经济体各行业的碳排放强度[27-28].计算公式如下:

$$f_i^t=\frac{C_i^t}{x_i^t} \tag{5}$$

式中:f_i^t 为中国 t 年(t=1997,…,2021)行业 i 的直接碳排放系数,t/元;C_i^t 为中国 t 年行业 i 的直接碳排放量,t;x_i^t 为中国 t 年行业 i 的总产出,元.

完全碳排放系数是指生产单位最终产品所导致的整个系统的碳排放量[29].完全碳排放系数由直接碳排放系数与 Leonitief 逆矩阵相乘得到:

$$\overline{f_i^t}=f_i^t\left(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}\right)^{-1} \tag{6}$$

式中:$\overline{f_i^t}$ 为中国 t 年行业 i 的完全碳排放系数,t/元;$\boldsymbol{I}$ 为 n 阶单位矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为 t 年直接消耗系数矩阵.

商品贸易会引起隐含碳排放转移,隐含碳排放量等于产品进出口量与对应的完全碳排放系数的乘积,而隐含碳排放的净转入量则等于隐含碳排放进口量与出口量之差:

$$\mathrm{CI}_i^t=\sum_i I_i^t\cdot\overline{f_i^t} \tag{7}$$

$$\mathrm{CE}_i^t=\sum_i E_i^t\cdot\overline{f_i^t} \tag{8}$$

$$\mathrm{CN}_i^t=\mathrm{CI}_i^t-\mathrm{CE}_i^t \tag{9}$$

式中:CI_i^t、CE_i^t 和 CN_i^t 分别为中国 t 年行业 i 的隐含碳进口量、出口量和净进口量,t;I_i^t 分别为行业 i 在 t 年的产品进口和出口规模,元.

消费端碳排放量强调消费对碳排放的影响,需要综合考虑境内生产导致的碳排放量和国际贸易中隐含碳排放的净进口量.中国消费端碳排放量计算公式如下:

$$\mathrm{CC}_i^t=C_i^t+\mathrm{CN}_i^t \tag{10}$$

式中:CC_i^t 表示中国行业 i 在 t 年的消费端碳排放量.

1.3　消费端碳排放影响因素分解识别

1.3.1　影响因素分解识别　1989 年,日本学者 Yoichi Kaya 构建了反映 CO_2 排放量变化的 Kaya 恒等式,该公式从生产端视角分析了如能源、政策、经济、人口等因素与 CO_2 排放之间的动态关系[30-31],具有计算简洁、容易量化及对影响因素解释能力强等优势,近年来已经得到广泛应用.由于本研究是对消费端碳排放因素进行分解,和生产端碳排放因素分解有所不同,因此对该公式改进如下:

$$\mathrm{CC}^t=\frac{\mathrm{CC}^t}{\mathrm{PE}^t}\cdot\frac{\mathrm{PE}^t}{\mathrm{FC}^t}\cdot\frac{\mathrm{FC}^t}{\mathrm{POP}^t}\cdot\mathrm{POP}^t=m^t\cdot s^t\cdot g^t\cdot p^t \tag{11}$$

式中:CC^t 表示 t 年中国消费端碳排放总量,t;PE^t 为 t 年中国能源消费总量,代表 t 年全国各行业和居民生活消费的各种能源的总和,tce;FC^t 为 t 年中国实际最终消费,是指 t 年居民消费支出与政府消费支出之和,代表 t 年居民和政府为满足物质与精神需求,从境内和境外购买的货物和服务的支出,元;POP 代表 t 年中国人口总量,人.进一步地,可将消费端碳排放的变化分解为能源结构效应 m(即单位能源消费所产生的碳排放量)、消费隐含能源强度效应 s(即单位实际最终消费所消耗的能源量)、消费规模效应 g(即人均实际最终消费水平)和人口规模效应 p(即人口总量)四种因素.

本研究采用对数平均迪氏指数法(LMDI)评估不同因素对 1997~2021 年中国消费端碳排放总体变化的贡献.该方法因其完全分解、无残差、直观易懂等优势,在碳排放研究领域得到广泛应用[32].通过对数变换可直接将公式(11)转化为 LMDI 的加法分解形式[32-33].假设基期消费端碳排放总量为 CC^0,t 期总

量为 CC^t,最终分解结果可表示为:

$$\Delta CC^t = CC^t - CC^0 = \Delta CC^t_m + \Delta CC^t_s + \Delta CC^t_g + \Delta CC^t_p \quad (12)$$

$$\Delta CC^t_m = \frac{CC^t - CC^0}{\ln CC^t - \ln CC^0} \cdot \ln \frac{m^t}{m^0} \quad (13)$$

$$\Delta CC^t_s = \frac{CC^t - CC^0}{\ln CC^t - \ln CC^0} \cdot \ln \frac{s^t}{s^0} \quad (14)$$

$$\Delta CC^t_g = \frac{CC^t - CC^0}{\ln CC^t - \ln CC^0} \cdot \ln \frac{g^t}{g^0} \quad (15)$$

$$\Delta CC^t_p = \frac{CC^t - CC^0}{\ln CC^t - \ln CC^0} \cdot \ln \frac{p^t}{p^0} \quad (16)$$

式中:ΔCC^t_m、ΔCC^t_s、ΔCC^t_g、ΔCC^t_p 分别代表 0~t 时期能源结构效应、能源强度效应、消费规模效应和人口规模效应的变化对消费端碳排放总量变化的影响,t.

1.3.2 分解结果不确定性与敏感性 为评估数据质量对 LMDI 分解结果的影响,本研究采用基于增长率扰动的蒙特卡洛模拟和单因素扰动法进行不确定性量化和敏感性分析.鉴于数据的年度增长率较小,为保持时间序列趋势不变,选择对各变量的年度增长率施加扰动.根据不同数据源的质量特征,各变量增长率的扰动设定了差异化的误差分布,消费端碳排放数据因涉及跨国数据库匹配和投入产出计算,对其增长率施加的扰动服从均值为观测增长率、标准差为观测增长率 25%的正态分布;实际最终消费受统计口径调整和价格平减影响,对其施加的扰动服从标准差为观测增长率 20%的正态分布;能源消费总量基于官方统计数据,扰动服从标准差为观测增长率 15%的正态分布;而人口数据质量较高,扰动设定为误差 10%的均匀分布.在敏感性分析中,本研究采用单因素扰动法,每次仅对一个变量的增长率施加 20%的扰动,保持其余变量不变.通过 10000 次蒙特卡洛模拟,最终计算出各因素贡献率的均值、标准差和 95%置信区间.

2 结果与分析

2.1 1997~2021 年中国隐含碳转移规模

如图 1 所示,总体来看,1997 年以来中国隐含碳一直处于净出口状态,表明中国在全球价值链中始终承担着为他国(地区)消费服务的碳排放责任.2021 年,中国隐含碳净出口规模为 12.89 亿 t,约占全国生产端碳排放的 11.26%.在出口端,2001~2007 年是中国隐含碳出口的高速增长阶段,年均增长率达到 20%,在此期间轻工业、重工业、机械设备制造业等工业行业的隐含碳出口量分别占出口总量的 24%、18%和 42%,这种工业隐含碳出口态势与中国出口导向型经济发展战略以及在全球制造业价值链中的定位密切相关.2008 年全球金融危机后,中国隐含碳出口增速明显放缓,且规模呈波动下降趋势,这一变化主要源于机械设备制造业产品出口的减少.在进口端,重工业和机械设备制造业同样也是中国隐含碳进口规模增长最快的行业,年均增幅分别为 925 万 t、997 万 t,对中国隐含碳进口的平均贡献率分别为 31%、33%,远高于其他行业,这可能是由于中国工业生产对原材料和中间产品大量需求所致.

为进一步反映中国与其他地区隐含碳的转移特点,本研究利用全球 189 个经济体的投入产出数据,识别了 1997~2021 年中国隐含碳的主要进出口地区及其行业.根据图 1 展示的变化趋势,本研究选择 1997 年、2007 年和 2021 年为分析年份.表 2 表明,韩国、美国、俄罗斯与日本长期稳居中国前四大隐含碳进口来源国,2021 年其合计占比达中国隐含碳进口总量的 48%,且进口产品主要集中在机械设备制造业与重工业领域.与此同时,美国、日本与中国香港则始终是中国前三大隐含碳出口目的地,2021 年其合计占比达中国出口总量的 62%,出口隐含碳主要来源于机械设备制造业与轻工业产品.从动态趋势看,中国与这些主要合作伙伴的隐含碳流动规模经历了显著变化.1997~2007 年为中国隐含碳进出口量的高速增长期,中国自前四大来源国的隐含碳进口量从 34.72 亿 t 增长到 144.48 亿 t,增长了约 3 倍;向前三大目的地的出口量从 339.36 亿 t 增长到 945.25 亿 t,增长了约 2 倍.2007~2021 年,中国自前四大来源国的隐含碳进口从 144.48 亿 t 增长到 224.46 亿 t,增速明显放缓,增幅约为 55%;由于 2008 年全球金融危机爆发,全球其他地区产品需求出现下降,加之我国产业结构调整等因素影响,2021 年向美国、日本、中国香港出口的隐含碳总量为 804.52 亿 t,较 2007 年峰值水平回落了约 15%.尽管近年来中国隐含碳排放的主要进出口国家(地区)没有发生明显变化,但纵观整个研究期,中国与这些国家(地区)的隐含碳流动规模出现了大幅增长,2021 年中国对前四大来源国的隐含碳进口量较 1997 年增加了 5 倍,向前三大目的地的出口总量增长了 1.4 倍.此外,

中国隐含碳贸易的行业结构也发生了改变.韩国作为中国第一大隐含碳进口国,主要进口行业从 1997 年的机械设备制造业转变为 2021 年的重工业;而在出口端,中国香港作为中国主要出口目的地之一,其承接中国隐含碳出口的主要行业也已从轻工业转变为机械设备制造业.

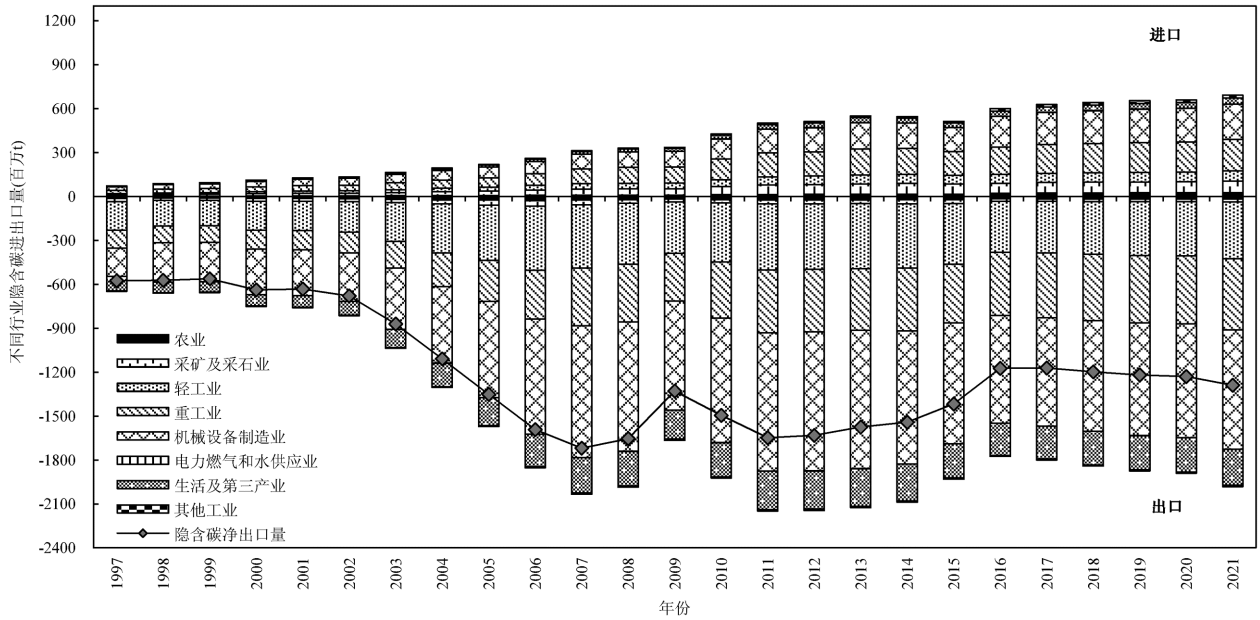


图 1　1997~2021 年中国不同行业隐含碳转移情况

Fig.1　Embodied carbon transfers by industry in China, 1997~2021

表 2　不同年份中国隐含碳进出口前 10 大经济体及其主要进出口行业

Table 2　Top 10 economies and their major trading industries in China's embodied carbon imports and exports by year

年份	经济体	隐含碳进口(百万 t)	主要进口行业	经济体	隐含碳出口(百万 t)	主要出口行业
1997	韩国	9.74	机械设备制造业	美国	131.05	机械设备制造业
	美国	9.53	机械设备制造业	日本	107.75	轻工业
	俄罗斯	7.92	重工业	中国香港	100.56	轻工业
	日本	7.53	机械设备制造业	德国	40.66	机械设备制造业
	德国	3.80	机械设备制造业	韩国	27.59	机械设备制造业
	澳大利亚	2.05	采矿及采石业	英国	20.63	机械设备制造业
	印度	2.03	采矿及采石业	法国	16.92	机械设备制造业
	印度尼西亚	1.89	轻工业	加拿大	14.69	机械设备制造业
	马来西亚	1.74	机械设备制造业	意大利	14.36	轻工业
	中国台湾	1.57	机械设备制造业	中国台湾	13.89	机械设备制造业
2007	韩国	57.09	重工业	美国	456.88	机械设备制造业
	日本	38.34	机械设备制造业	中国香港	263.31	轻工业
	美国	25.35	机械设备制造业	日本	225.06	轻工业
	俄罗斯	23.70	重工业	德国	128.96	机械设备制造业
	德国	15.10	机械设备制造业	韩国	107.17	机械设备制造业
	马来西亚	12.48	机械设备制造业	英国	79.06	机械设备制造业
	印度	10.68	重工业	法国	53.85	机械设备制造业
	印度尼西亚	9.48	轻工业	加拿大	53.47	机械设备制造业
	泰国	8.46	机械设备制造业	意大利	49.30	机械设备制造业
	伊朗	7.26	采矿及采石业	荷兰	44.94	机械设备制造业
2021	韩国	82.00	重工业	美国	413.72	机械设备制造业
	美国	53.39	机械设备制造业	中国香港	266.58	机械设备制造业
	日本	44.87	机械设备制造业	日本	124.22	轻工业
	俄罗斯	44.20	重工业	德国	98.64	机械设备制造业

续表 2

年份	经济体	隐含碳进口(百万 t)	主要进口行业	经济体	隐含碳出口(百万 t)	主要出口行业
2021	印度	27.49	重工业	韩国	94.67	机械设备制造业
	德国	22.23	机械设备制造业	印度	61.60	重工业
	泰国	21.70	机械设备制造业	英国	54.25	机械设备制造业
	越南	20.48	采矿及采石业	新加坡	53.71	机械设备制造业
	马来西亚	18.07	机械设备制造业	法国	48.97	机械设备制造业
	伊朗	15.70	采矿及采石业	泰国	44.86	机械设备制造业

2.2 1997~2021 年中国消费端碳排放演变特征

由图 2 可见,从农业看,1997 年以来中国生产端、消费端碳排放均呈波动上升趋势,其中 1997~2015 年农业生产端碳排放大于消费端碳排放,但 2015 年后这一关系发生逆转,目前中国农业生产端和消费端碳排放相差 958 万 t,若完全依靠境内生产满足消费需求,农业碳排放将增加 1.5%.从六个工业行业来看,轻工业、重工业和机械设备制造业的生产端碳排放持续高于消费端,三个行业合计隐含碳净出口量在 2021 年达到 11.64 亿 t.2005 年之前,中国采矿与采石业的生产端和消费端碳排放基本处于平衡状态(二者比值维持在 0.87~1.11 之间),2006 年后消费端碳排放开始明显大于生产端,这说明其他国家(地区)一定程度上承担了中国采矿与采石业的碳排放量.1997 年以来,中国电力燃气和水供应业、其他工业的生产端与消费端碳排放基本持平,两者生产端和消费端碳排放比值始终在 0.99~1.01 区间窄幅波动.

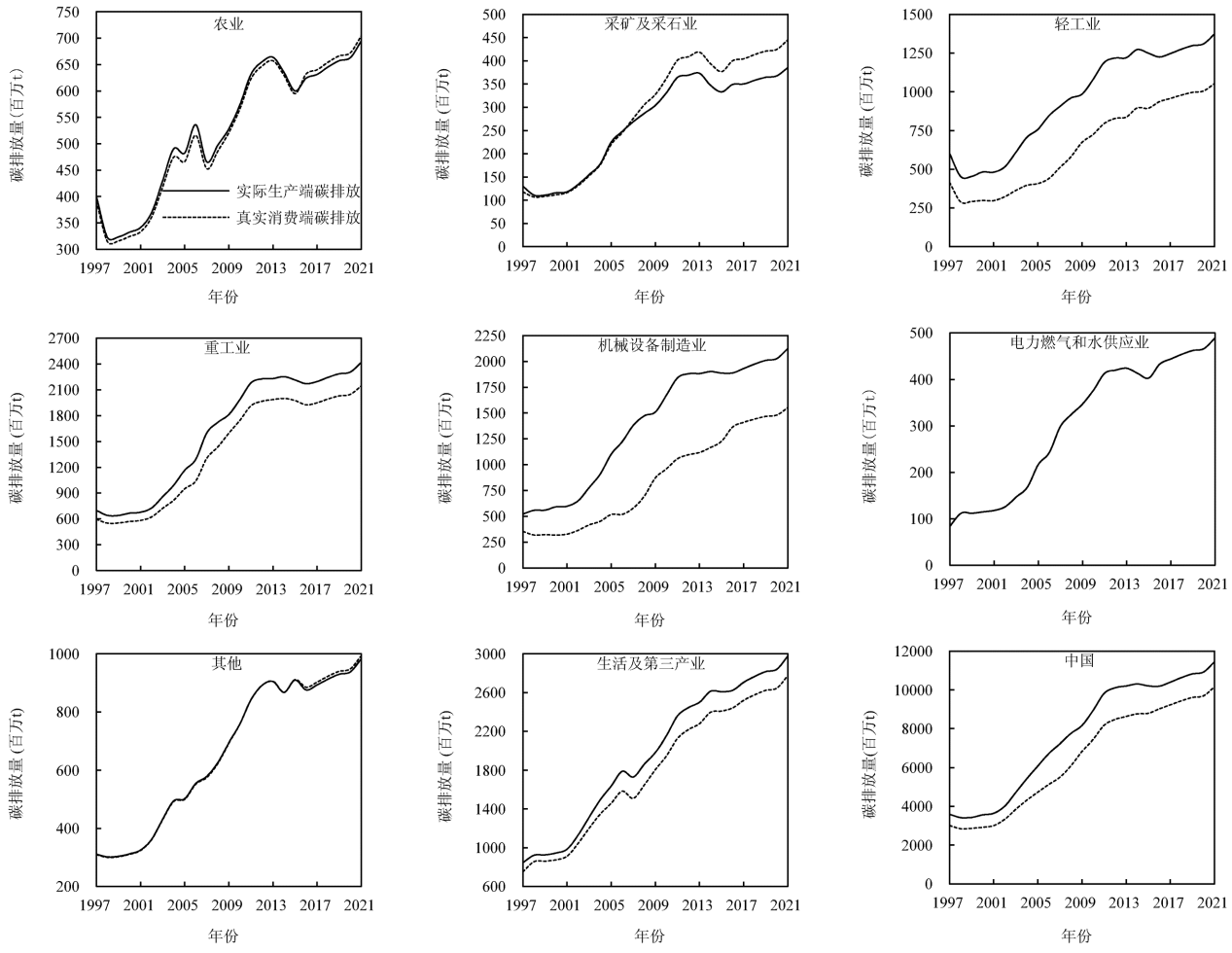
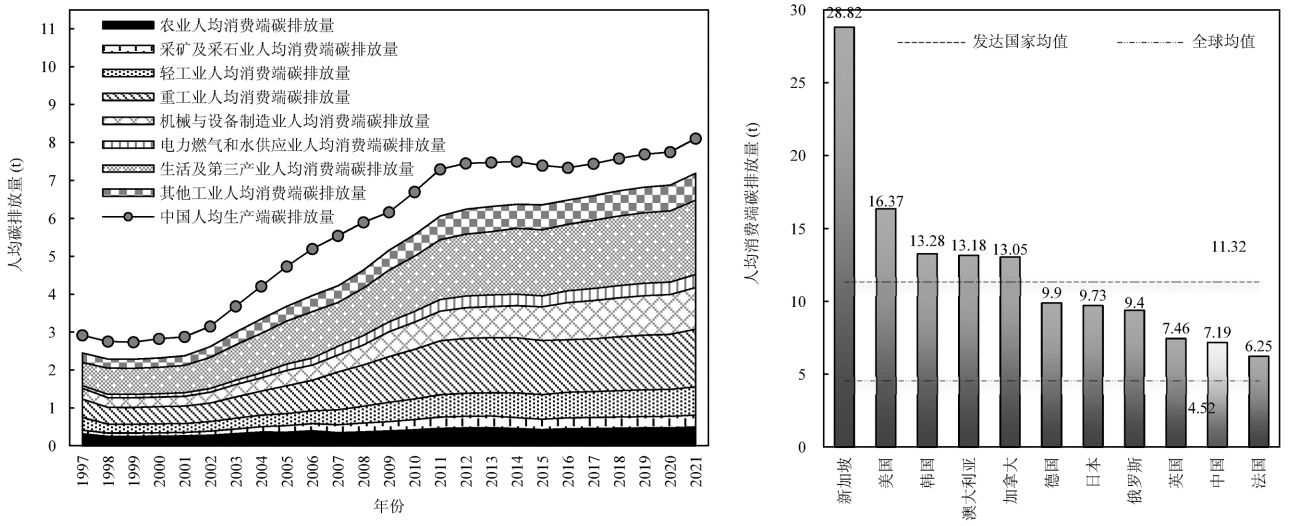


图 2 1997~2021 年中国及各行业生产端与消费端碳排放对比

Fig.2 Comparison of production-based and consumption-based carbon emissions in China and by industry, 1997~2021

从图 2 中可以看出,中国 6 大工业行业生产端和消费端碳排放趋势表现出相似的特征,即 2011 年之前明显上升,2011 年后趋于平缓.1997~2021 年,生活及第三产业碳排放始终呈现生产端大于消费端的特征,且二者均呈高速上升趋势,增长速率分别达 5.39%、5.6%.从全国层面看,1997 年以来中国生产端碳排放量始终大于消费端,且两者差距持续扩大.2021 年中国消费端碳排放为 101.56 亿 t,比生产端碳排放少 12.89 亿 t,差距接近英国和法国年碳排放量总和的 2 倍[34].对比图 1 与图 2 可知,我国生产端与消费端碳排放的总量差异由各行业隐含碳的净出口量构成.轻工业、重工业和机械设备制造业是隐含碳净出口的绝对主体,三者年均净出口量分别为 3.01 亿 t、2.07 亿 t 和 5.39 亿 t,合计贡献了全国净出口总量的 87%.三个行业的生产端碳排放持续高于消费端,是造成我国碳排放责任被高估的主要因素.

1997~2021 年中国生产端和消费端的人均碳排放变化趋势基本一致(图 3(a)),其中 1997~2011 年处于高速上升阶段,2011 年之后趋于平缓.从行业来看,重工业(占比 21%)、机械设备制造业(13%)以及生活及第三产业消费(28%)是过去 25a 人均消费端碳排放的三大主要来源,平均占比达到 62%.2021 年,中国人均消费端碳排放为 7.19t,比 1997 年增长了 3 倍.与其他国家的对比显示(图 3(b))[35],2021 年中国的人均消费端碳排放水平普遍低于主要发达国家,仅为新加坡的 25%、美国的 44%,也低于韩国、德国和日本的人均水平.这种差异既源于发达国家高水平的消费模式,又与中国承担大量隐含碳出口的国际贸易地位密切相关,同时还受到各国能源结构清洁化程度不同的影响[2,35].目前,中国人均消费端碳排放量比生产端碳排放偏低 0.91t,这意味着当前中国 11.26%的碳排放责任是通过国际贸易转嫁而来,中国作为“世界工厂”事实上承担了部分本应归属于发达消费国(地区)的碳排放责任.



(a) 1997~2021 年中国人均消费端碳排放与生产端对比　　(b) 2021 年中国人均消费端碳排放与主要国家对比

图 3　中国人均消费端碳排放与生产端及世界主要国家对比

Fig.3　Comparison of China’s per capita consumption−based carbon emissions with its production−based emissions and those of the world’s major countries

2.3　1997~2021 年中国消费端碳排放影响因素分析

为分析能源结构、能源强度、消费规模、人口规模 4 方面要素对不同时期中国消费端碳排放变化的影响,本研究按照中国 5a 规划的时间节点,将研究时段划分为“十五”(2001~2005 年)、“十一五”(2006~2010 年)、“十二五”(2011~2015 年)和“十三五”(2016~2020 年)4 个时段(表 3),考虑到 1997~2000 年、2021 年不属于完整的 5a 规划周期,因此这里对 1997~2000 年及 2021 年不做单独分析.研究结果表明,尽管不同时期消费端碳排放变化的驱动因素存在显著差异,但消费规模效应和能源强度效应始终是影响碳排放的主导因素.“十五”期间,除能源结构效应对消费端碳排放产生负向影响外,能源强度、消费规模和人口规模均为正向促进因素.“十一五”期

间,我国首次将单位 GDP 能耗降低 20%列为约束性指标,能源强度效应开始转为负向因素,但与此同时能源结构效应转为正向,表明能源结构中高碳能源占比有所上升.“十二五”和“十三五”期间,随着节能减排政策深入实施和清洁能源快速发展,能源结构效应和能源强度效应均对碳排放增长产生负向影响,特别是“十三五”期间,能源结构效应和强度效应的抑制作用大幅增强,两者对消费端碳排放减少的贡献率为 187.72%,大幅抵消了消费规模增长带来的影响.

由表 3 可知,1997~2021 年间中国消费端碳排放增加了 71.42 亿 t,其中能源结构效应、能源强度效应、消费规模效应和人口规模效应的贡献率分别为−6.96%、−63.40%、159.31%和 11.04%.整体而言,消费规模扩张是过去 25a 驱动中国消费端碳排放增长的主要因素.根据中国统计年鉴,1997~2021 年中国最终消费支出增长了约 12 倍,远高于同期人口规模(约增长 14%)与能源效率(约提升 87%)的变化幅度.消费规模的快速扩张产生了较大的碳排放增量.与此同时,能源利用效率提升与能源结构的改善有效地抵消了部分碳排放增量,使消费端的碳排放增长得以控制.此外,人口规模对碳排放的贡献相对有限,随着我国人口在 2022 年达到峰值,其对碳排放的影响预计将进一步减弱.根据林毅夫等[36]的研究预测,2025~2035 年中国 GDP 的年均增长率预计将稳定在 4.7%,2036~2050 年将维持在 4%左右.随着经济发展,未来中国居民消费水平必将持续增长.因此,仅依靠能源利用效率提升抵消碳排放增长的路径将面临较大挑战.应将政策关注点延伸至消费端,倡导绿色低碳消费模式,这对实现碳中和目标具有重要意义.

表 3 不同时期中国消费端碳排放变化归因分析

Table 3 Attribution analysis of changes in China’s consumption−based carbon emissions across different periods

年份	时期	各因素贡献率				变化量ΔCC (百万 t)
		能源结构效应 ΔCC_m(%)	能源强度效应 ΔCC_s(%)	消费规模效应 ΔCC_g(%)	人口规模效应 ΔCC_p(%)	
2001~2005	“十五”	−20.65	24.45	89.96	6.24	1814.66
2006~2010	“十一五”	30.68	−46.60	110.42	5.50	2702.50
2011~2015	“十二五”	−13.41	−124.12	218.14	19.39	1349.23
2016~2020	“十三五”	−42.81	−144.91	266.64	21.07	900.58
1997~2021	整个研究期	−6.96	−63.40	159.31	11.04	7141.76

采用蒙特卡洛模拟法和单因素扰动法对 LMDI 模型的不确定性和敏感性进行分析.不确定性分析的结果显示,1997~2021 年能源结构效应对我国消费端碳排放变化的贡献率为(−6.96%±7.78%),能源强度效应为(−63.40%±8.56%),消费规模效应为(159.31%±11.70%),人口规模效应为(11.04%±0.67%).除了能源结构效应的不确定性较大之外,其他因素的标准差相对较小,表明计算结果具有较高的可靠性.根据刘竹等[18]的研究,能源结构效应不确定性较大可能与我国能源结构快速转型、能源统计口径调整等因素有关.敏感性分析结果显示,消费端碳排放数据的扰动对分解结果影响最为显著,主要影响能源结构效应和消费规模效应,标准差分别为 5.45%和 7.38%;而实际最终消费的扰动主要影响能源强度效应和消费规模效应(标准差为 7.10%);能源消费数据的扰动主要影响能源结构效应和能源强度效应(标准差为 4.76%);人口数据质量最高,其扰动影响微弱.四类数据的扰动影响均较为有限,表明本研究的驱动因素分解结果具有稳健性.

3 讨论

3.1 中国的碳排放责任可能被明显高估

本研究表明,1997 年以来满足中国真实消费需求的碳排放量仅占生产端碳排放总量的 84.42%,向发达国家(地区)提供产品和服务导致的碳排放净出口量累计达到 298.71 亿 t.美国、日本等发达国家作为中国隐含碳出口的主要目的地,通过进口中国的碳密集型产品有效降低了其国内的碳排放规模.本研究表明,通过与中国开展贸易,2021 年美国、日本碳排放量分别降低了 3.6 亿 t 和 0.79 亿 t.“十一五”以来,尽管中国在降低碳排放强度、优化产业结构、提升生产效率等方面持续发力,促使隐含碳排放出

口增速明显放缓,但国际普遍采用的生产端碳排放责任体系仍然导致中国碳排放责任明显偏高[37-40].责任分配机制的不合理无疑会对全球减排合作产生负面影响,一方面使得发达国家(地区)缺乏主动减排的内在动力,另一方面则加重了发展中国家的减排负担,导致全球减排成本分担失衡[1].因此,国际社会应建立更公平的碳排放责任分配机制,让所有消费者共同承担碳减排责任.同时,中国也需要在碳减排国际合作中积极争取自身权益,推动建立基于消费视角的碳核算体系,促进全球碳排放责任的公平分配.

3.2　中国节能减排需要关注消费规模增长的影响

本研究发现,消费规模已经成为影响中国碳排放态势的最主要因素,对碳排放增长的贡献率从“十五”时期的 89.96%大幅跃升至“十三五”时期的266.64%,如何应对消费规模增长导致的碳排放扩张已经成为中国碳减排面临的重大挑战.当前,中国的碳减排政策主要聚焦于能源效率提升和清洁能源替代方面,对消费规模增长这一关键要素的引导和关注相对不足.例如,2022 年中国食物总体损耗浪费率高达 22.7%,浪费总量达 4.6 亿 t[41];若完全避免此类浪费,理论上可减少约 1.27 亿 t 二氧化碳当量排放,相当于当年中国粮食生产碳排放总量的 20%[42].然而,中国食物浪费管控缺乏强制性约束,长期依赖宣传、教育等柔性措施,导致中国食物浪费率始终居高不下.因此,需通过绿色消费引导、资源浪费强制管控、技术升级迭代等多种方式,在满足居民正常合理消费需求的前提下尽可能减少消费端碳排放.未来可在以下方面协同推进:(1)完善绿色消费政策体系.本研究发现,1997~2021 年中国生活及第三产业消费端碳排放增长了近 4 倍,是目前中国最大的碳排放行业,有效降低生活及第三产业碳排放规模对减少中国碳排放总量具有重要作用.因此,建议加大“光盘行动”等反浪费措施的强制性管控力度,并利用数字技术优化消费品库存管理,从源头减少无效碳排放.其次,在保障居民生活水平的前提下,积极倡导居民从“拥有型”消费(如私人车辆)向“服务型”消费(共享交通、公共交通)转型,降低碳排放强度.(2)在国际贸易中争取公平的碳责任认定.当前中国 11.26%的碳排放责任是通过国际贸易转嫁而来,中国承担了部分本应属于其他国家(地区)的碳排放责任.因此,我国应积极倡导将“消费端责任”原则纳入国际气候协议,要求发达国家(地区)为其消费驱动产生的碳排放提供额外的资金与技术补偿,从而为中国争取公平的发展空间,并使全球减排成本分担更为合理.(3)建立消费端碳排放核算机制.当前我国碳排放核算主要基于生产端,对消费端的影响考虑不足,建议将消费端碳排放核算机制纳入现有政策体系,进一步提升我国碳排放核算的完整性和科学性,为绿色低碳转型提供支撑.具体而言,优先推动在“温室气体产品碳足迹量化要求和指南”等国家标准中纳入消费端碳排放核算要求,引导企业核算并披露产品最终消费环节的碳排放量;其次,在长三角、粤港澳大湾区等出口导向型地区开展试点,建立重点出口产品的消费端碳排放数据库;最后,推动消费端核算结果与欧盟碳边境调节机制等国际政策的衔接互认,帮助中国企业在国际贸易中争取公平待遇.

3.3　研究结果可靠性分析

本研究结果表明,1997~2021 年期间中国始终处于隐含碳排放的净出口状态,这一结论与刘竹等[18]的研究结论一致.此外,本研究发现 2013 年我国消费端碳排放净出口总量为 16 亿 t,与沈群等[7]的 19 亿 t 计算结果相近.并且本研究关于我国碳排放的主要净出口行业和流向与赵丹阳等[38]的研究结论相同,表明本研究计算结果是相对可靠的.与既有研究相比,本研究的时间跨度更长,捕捉到了中国不同发展阶段的碳排放变化特征.但本研究仍存在一些局限,需要在未来研究过程中进一步改进和完善.首先,数据来源存在一定局限性.本研究采用 PRIMAPHIST 数据库进行计算,尽管该数据库在碳排放研究领域被广泛使用,但由于全球数据库难以完全匹配中国本地化统计口径,其对中国的生产端碳排放核算存在一定程度的系统性误差.但这种误差主要影响隐含碳转移规模的精确量化,并不会改变本研究的核心结论.其次,MRIO 模型本身的技术假设有一定局限性.例如,该模型假设出口到不同市场的产品具有相同的碳排放强度,而现实中出口至不同地区的产品在技术含量上可能存在较大差异,可能导致中国向发达国家(地区)出口的某些高技术含量产品隐含碳量有所高估,并低估了向发展中国家出口的某些初级产品的隐含碳量;同时,模型假设中间投入与总产出始终保持固定比例,未能充分考虑规模经济效

应和生产技术变化带来的影响,可能低估了中国因技术进步和能效提升而降低的碳排放强度.最后,LMDI 分解法也存在一定局限性.LMDI 分解法假设各驱动因素之间相互独立,但实际情况中这些因素之间存在一定程度的共线性问题,导致分解结果可能存在一定误差.未来研究可尝试结合机器学习解释方法(如 SHAP、LIME)和因果推断工具(如因果森林),进一步量化驱动因素间的交互影响.

4 结论

4.1 1997~2021 年中国始终处于隐含碳排放的净出口状态,轻工业、重工业和机械设备制造业是中国隐含碳排放净出口的主要行业,美国、日本和中国香港是主要出口目的地.

4.2 1997~2021 年中国消费端碳排放规模持续增加,2021 年达到 101.56 亿 t,但比生产端碳排放少 12.89 亿 t;从人均变化看,2021 年中国满足一个人生产生活平均需要 7.19t 的碳排放量,比实际生产端碳排放少 11.26%.

4.3 消费规模和能源效率是决定中国消费端碳排放变化的主要因素,其中消费规模增加对 1997~2021 年消费端碳排放增长的贡献率为 159.31%,而能源效率提升对消费端碳排放下降的贡献率为 63.40%.此外,能源结构调整和人口规模变化对消费端碳排放增长也分别贡献了-6.96%和 11.04%.

参考文献:

[1] IPCC. AR6synthesis report: climate change 2023 [R]. Interlaken, Switzerland: IPCC, 2023.

[2] International Energy Agency (IEA). Global energy review 2025 [R]. Paris: IEA, 2025.

[3] U.S. Energy Information Administration (EIA). International energy outlook 2023 [R]. Washington, DC: EIA, 2023.

[4] Stockholm Environment Institute (SEI). Consumption-based emissions: a new frontier for EU climate policy [R]. Stockholm, Sweden: SEI, 2024.

[5] 中国科学院.消费端碳排放研究报告(2024) [R]. 上海:中国科学院上海高等研究院, 2024.
Chinese Academy of Sciences. Consumption-based carbon emissions report(2024)[R]. Shanghai: Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2024.

[6] Makarov I, Alataş S. Production-and consumption-based emissions in carbon exporters and importers: A large panel data analysis for the EKC hypothesis [J]. Applied Energy, 2024,363:123063.

[7] 沈 群,段宏波,唐 韵,等.公正创新的消费端碳排放核算研究 [J]. 中国科学:地球科学, 2024,54(9):3051-3062.
Shen Q, Duan H B, Tang Y, et al. A justice and innovative way ahead of consumption-based emission accounting approach [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2024,54(9):3051-3062.

[8] 罗 芳,郭 艺,魏文栋.长江经济带碳排放与经济增长的脱钩关系——基于生产侧和消费侧视角 [J]. 中国环境科学, 2020,40(3):1364-1373.
Luo F, Guo Y, Wei W D. Decoupling analysis between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt——production and consumption perspectives [J]. China Environmental Science, 2020,40(3):1364-1373.

[9] Meng B, Liu Y, Gao Y, et al. Developing countries' responsibilities for CO_2 emissions in value chains are larger and growing faster than those of developed countries [J]. One Earth, 2023,6(2):167-181.

[10] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2009,43(16):6414-6420.

[11] Yan B, Dietzenbacher E, Los B. Where to buy your imports? The potential of international trade to reduce global CO_2 emissions [J]. Energy Economics, 2025,149:108798.

[12] Davis S J, Caldeira K. Consumption-based accounting of CO_2 emissions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010,107(12):5687-5692.

[13] Tachega M A, Chen Y, Wang J, et al. CO_2 emissions inequality in Africa: Regional analysis and strategies for climate justice [J]. Energy, 2025,320:135180.

[14] Wu L, Zhou Y, Qian H, et al. Global actions under the Paris agreement: Tracing the carbon leakage flow and pursuing countermeasures [J]. Energy Economics, 2022,106:105804.

[15] Zheng H, Zhang Z, Wei W, et al. Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition [J]. Environmental Research Letters, 2020,15(7):074001.

[16] 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.

[17] 杨 军,贾 倩,丛建辉,等.基于"收支-责益"双平衡视角的中国省域碳补偿机制研究 [J]. 资源科学, 2024,46(7):1265-1283.
Yang J, Jia Q, Cong J H, et al. Provincial carbon compensation mechanism in China based on the "revenue and expenditure-responsibility and benefit" dual balance perspective [J]. Resources Science, 2024,46(7):1265-1283.

[18] 刘 竹,窦新宇,于 颖,等.中国在全球贸易中的隐含碳排放转移研究 [J]. 计量经济学报, 2023,3(4):1225-1242.
Liu Z, Dou X Y, Yu Y, et al. China's embodied carbon transfer in global trade [J]. China Journal of Econometrics, 2023,3(4):1225-1242.

[19] 李姗姗,费 翔,董洪光,等.基于 LMDI 和 LEAP 模型的山西省碳排放影响因素及预测 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4052-4063.
Li S S, Fei X, Dong H G, et al. Analysis of carbon emission influencing factors and forecast in Shanxi Province based on LMDI and LEAP model [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4052-4063.

[20] 王巧玲,李双成.云南省碳排放时空演变特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):528-537.

Wang Q L, Li S C. Dynamics of carbon emissions in Yunnan Province: Spatiotemporal characteristics and influencing factors [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):528−537.

[21] 韩梦瑶,孙紫荻.低碳全球化下中国进出口贸易的隐含碳演变趋势及调控优化策略 [J]. 区域经济评论, 2025,(1):144−155.
Han M Y, Sun Z D. Evolution characteristics and regulation optimization of China's cross−boder trade network under low−carbon globalization [J]. Regional Economic Review, 2025,(1):144−155.

[22] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(2):141−155.

[23] 李永源,张　伟,蒋洪强,等.基于 MRIO 模型的中国对外贸易隐含大气污染转移研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(2):889−896.
Li Y Y, Zhang W, Jiang H Q, et al. Transfers of air pollutant emissions embodied in China's foreign trade based on MRIO model [J]. China Environmental Science, 2019,39(2):889−896.

[24] 何国华,赵　勇,李雯晴,等.1990~2021 年中国消费水量演变特征及影响因素分析 [J]. 水利学报, 2025,56(5):624−633.
He G H, Zhao Y, Li W Q, et al. Analysis of the evolution characteristics and influencing factors of water consumption in China from 1990 to 2021 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025,56(5): 624−633.

[25] Yu Y, Feng K, Hubacek K. China's unequal ecological exchange [J]. Ecological Indicators, 2014,47:156−163.

[26] 张红霞,夏　明.对投入产出模型性质的理论思考 [J]. 经济理论与经济管理, 2022,42(5):78−94.
Zhang H X, Xia M. On the theoretic properties of input−output model [J]. Economic Theory and Business Management, 2022,42(5):78−94.

[27] 周晓艳,张雪莹,吴炫匡,等.中国城市工业贸易隐含碳排放转移网络结构及影响机制 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3472−3483.
Zhou X Y. Zhang X Y. Wu X K, et al. Structure and mechanism of China's inter−city industrial trade embodied carbon emission transfer network [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3472−3483.

[28] 吴乐英,赵义义,苗长虹,等.基于多区域投入产出的黄河流域贸易隐含碳排放时空格局及结构分解 [J]. 生态学报, 2024,44(19):8737−8750.
Wu L Y, Zhao Y Y, Miao C H, et al. Spatial−temporal pattern and structural decomposition of trade−embodied carbon emissions in the Yellow River Basin based on multi−regional input−output analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(19):8737−8750.

[29] 李　娜.制造业服务化对出口贸易隐含碳排放影响研究 [D]. 北京:中国社会科学院大学, 2022.
Li N. Research on the impact of manufacturing serviceization on embedded carbon emissions in export trade [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Social Sciences, 2022.

[30] Kaya Yoichi. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: interpretation of proposed scenarios [R]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC, 1989.

[31] 陈靖松,张建军,李金龙,等.京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子 [J]. 生态学报, 2024,44(6):2270−2283.
Chen J S, Zhang J J, Li J L, et al. Spatio−temporal pattern of carbon emissions and its driving factors in the Beijing−Tianjin−Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6):2270−2283.

[32] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. Energy Policy, 2005,33(7):867−871.

[33] Ang B W, Choi K H. Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: a refined Divisia index method [J]. The Energy Journal, 1997,18(3):59−73.

[34] International Energy Agency (IEA). Global energy review: CO_2 emissions in 2021 [R]. Paris: IEA, 2022.

[35] Global Carbon Budget (2024); Population based on various sources (2024) – with major processing by Our World in Data [DB/OL]. (2024−11−21)[2025−08−24]. https://ourworldindata.org.

[36] 林毅夫,文永恒,顾艳伟.中国经济增长潜力展望:2020~2035、2035~2050 [J]. 金融论坛, 2022,27(6):3−15.
Lin Y F, Wen Y H, Gu Y W. Prospect of China's economic growth potential: 2020~2035、2035~2050 [J]. Journal of Modern Finance, 2022,27(6):3−15.

[37] Fang G, Huang M, Zhang W, et al. Exploring global embodied carbon emissions transfer network—An analysis based on national responsibility [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024,202:123284.

[38] 赵丹阳,佟连军,苗长虹.中国碳转移的空间格局演变及其驱动力 [J]. 地理学报, 2025,80(5):1244−1260.
Zhao D Y, Tong L J, Miao C H. Spatial pattern evolution and driving forces of China's carbon transfer [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(5):1244−1260

[39] Meng J, Huo J W, Zhang Z K, et al. The narrowing gap in developed and developing country emission intensities reduces global trade's carbon leakage [J]. Nature Communications, 2023,14:3775.

[40] 霍经纬,田成诗.“双碳”目标下中国国际贸易中隐含碳排放、水资源使用研究 [J]. 生态经济, 2025,41(8):87−93,144.
Huo J W, Tian C S. Research on implied carbon emissions and implied water resource utilization in China's international trade under the dual carbon goals [J]. Ecological Economy, 2025,41(8):87−93,144.

[41] 农业农村部食物与营养发展研究所.2023 年中国食物与营养发展报告 [R]. 北京:中国农业与科学技术出版社, 2023.
Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China food and nutrition development report 2022 [R]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2023.

[42] 胡永浩,胡南燕,武拉平.2022 年中国粮食损失浪费的资源环境效应评估 [J]. 干旱区资源与环境, 2024,38(9):12−19.
Hu Y H, Hu N Y, Wu L P. Assessment of the resource and environmental effects of China's grain loss and waste in 2022 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(9):12−19.

致谢： 本研究的 LMDI 模型不确定性和敏感性分析工作由南方科技大学 2024 级博士研究生欧志刚协助完成,在此表示感谢.

作者简介： 李雯晴(1996−),女,河南濮阳人,中国水利水电科学研究院博士研究生,主要从事国际贸易伴生的隐含资源环境要素流动研究.发表论文 10 余篇.liwenqing@edu.iwhr.com.