

碳中和目标导向的省域消费端碳排放减排模式研究

——基于多区域投入产出模型

王宪恩¹ 赵思涵¹ 刘晓宇² 段海燕¹ 宋俊年¹¹

(1. 吉林大学 新能源与环境学院, 吉林 长春 130012;

2. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

【摘要】: 文章以多区域投入产出模型为基础, 研究了中国省级和行业层面基于消费端的碳排放及碳转移, 并解析了碳中和导向下的碳减排模式。结果表明: 23 个省份本地消费碳排放大于外地输入碳排放; 资本形成是碳排放最大贡献者; 能源生产和供应业以及非金属和金属业是碳转移的主要行业, 能源生产和供应业输出碳排放量最大的内蒙古主要输出给北方地区, 非金属和金属业输出碳排放量最大的河北主要输出给江苏等省份; 中国 30 个省份可以根据消费端碳排放的来源特征和净碳转移方向分为四类。在碳中和目标导向下, 本研究有助于倒逼各省份绿色发展和绿色低碳产品的输出, 绿色低碳也将是未来贸易市场趋向。

【关键词】: 消费端碳排放 区域贸易 碳排放转移 碳中和

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)05-043-08

《巴黎协定》提出在 2051—2100 年间, 全球达到碳中和。国家主席习近平在第七十五届联合国大会上指出, 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。但目前中国仍是世界上最大的 CO₂ 排放国, CO₂ 排放占世界温室气体排放总量的 28.5%^[1-2], 承诺在 2060 年实现碳中和将面临很大的减排压力。40 年内达到碳中和对中国来说, 挑战和机遇并存。我国以煤为主的能源格局要彻底改变, 国民经济也会受到全面的影响, 未来整个经济结构会发生天翻地覆的变化, 同时也需出台更严格的碳减排政策。

中国幅员辽阔, 各地区的资源禀赋分布不均, 经济发展水平以及人口规模差距较大, 导致各地区的碳排放量有较大差异^[3]。同时, 为了满足各地区的经济发展和消费需求, 区域间贸易不仅带来了产品和服务的流动, 也产生了大量的碳排放转移, 导致了区域间的“碳泄漏”问题^[4]。基于消费端的碳排放可以反映区域碳排放的责任归属, 识别参与碳转移的省份和行业, 有助于区域减排政策的制定和实施^[5], 从而明确碳中和导向下各省的压力, 倒逼绿色低碳输出, 减少对高排产品的需求, 并开发利用新能源, 促进各省份绿色发展。基于此, 本文运用多区域投入产出模型, 对中国 30 个省份(西藏及港澳台地区除外)27 个行业的贸易隐含碳排放进行核算, 并据此分析中国 30 个省份贸易背景下消费端的碳排放量以及隐含碳排放转移问题, 解析碳中和导向下各省消费端碳减排模式, 探讨各省份自身绿色发展, 促进实现国家 2060 年碳中和目标, 为政府在省份级的减排责任分配和减排方案设计提供依据。

作者简介: 王宪恩, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为环境管理与环境经济。E-mail:w xen@jlu.edu.cn

刘晓宇, 博士, 研究员, 研究方向为环境管理与环境经济。E-mail:liuxiaoyu@bnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目“‘污染排放—环境质量’同步耦合情景下行业企业初始排污权差异化配置模式与优化算法研究”(71773034); 国家社会科学基金项目“‘十三五’时期环境治理与经济发展方式转变相互协调机制研究”(15ZDA015)

1 文献综述

碳中和是指在计算碳排放总量的基础上,通过植树等方式对 CO₂ 进行吸收,以实现零碳排放的理念。目前国外关于碳中和的研究较多。Bumpus & Liverman^[6]从消费者角度分析了碳中和可能产生的结果和后果,并提出以市场替代资本积累来承担碳补偿的治理结构。Murray 等^[7]通过计量经济学方法计算了森林碳封存项目中的碳泄漏数量,并得出碳泄漏量主要取决于碳需求者非储备木材替代项目需求木材的能力。Richards & Stokes^[8]通过对近年固碳成本研究的回顾,分析了林业项目的成本和效益,表明农业用地转换森林的成本大小可能等于效益大小,政府可能需要采取数十亿美元的补贴或其他形式的激励,导致净收益极少。国内对碳中和的研究较少。曹淑艳等^[9]以农村生活能源系统为研究对象,构建了区域碳中和评估框架,结果表明,90%的农村具备零碳排放潜力,但潜力的实现依赖政策支持与激励。王志民等^[10]对焦山旅游区的碳源和碳汇进行了综合评估,并提出了焦山旅游区建设低碳景区的实现路径。目前在碳中和导向下对省域碳排放和碳减排的系统研究尚需要进一步探讨。

碳排放的核算方法主要分为两种:基于生产端的碳排放核算和基于消费端的碳排放核算^[11]。基于生产端的碳排放以生产者的角度核算碳排放,将产品和服务产生的碳排放归于生产者,而不考虑产品和服务在哪里使用或最终由谁使用^[12]。基于消费端的碳排放从消费者的角度出发,显示了支撑经济发展所需产品和服务所产生的隐含碳排放^[13],有利于从最终消费的视角揭示碳排放的来源。因此,对消费端碳排放的研究更有助于碳中和导向下各省的压力判断,并倒逼各省份绿色发展。

在国际贸易背景下,消费端碳排放的研究主要集中在国家层面。赵玉焕和王淦^[14]对 1995—2009 年期间中日贸易隐含碳进行了测算,结果表明,中国对日本的出口隐含碳变化受多种因素影响,其中规模效应促使了隐含碳的增长,技术效应促使了隐含碳的减少。Li & Hewitt^[15]重点研究了 2004 年中英贸易碳排放量,结果指出英国通过贸易减少了 11%的碳排放量,但是英国减少的碳排放量远低于中国碳排放的增加量。钟章奇等^[16]对 1995—2011 年期间全球 39 个主要国家进行了基于消费责任制的碳排放核算及全球环境压力分析,他们的研究发现,碳排放净流出以中国和俄罗斯为主,虽然贸易带来了大量的资源,但随之会产生严重的区域生态环境问题。庞军等^[17]测算了中国、美国、日本以及欧盟基于生产端和消费端的碳排放量,结果表明,2007 年中国生产端碳排放高出消费端 15%以上,而美国、日本以及欧洲等发达国家和地区的生产端碳排放比消费端低 5%左右。马述忠和黄东升^[18]也得到类似的结论,他们基于多区域投入产出(MRIO)模型对全球 55 个国家和地区的消费端碳排放进行了跨国比较研究,结果发现,生产端和消费端的碳排放核算量之间存在巨大的鸿沟,从生产端的核算方法使得发达国家的碳排放量被严重低估。

近几年一些研究分析了中国区域碳排放量及区域内的隐含碳转移。姚亮等^[19]对中国 8 个区域进行基于多区域投入产出的区域居民消费碳排放的数量、构成、分布及转移进行了分析,结果表明,碳足迹呈现出区域差异明显、间接排放大于直接排放、城乡差距过大等特征。Meng 等^[20]基于 MRIO 模型研究了 2002 年和 2007 年中国区域间 CO₂ 排放和转移情况,指出东部沿海地区是最大碳输入区域,西北地区是最大的碳输出区域。Liu 等^[21]以生产为基础分析了 2002 年和 2007 年中国 8 个地区的碳排放量以及以消费为基础区域间贸易所产生的区域碳排放,结果表明,东北和西北地区以生产为基础的碳排放量远远大于以消费为基础的碳排放量。相比之下,目前只有少数研究对中国省份级层面的碳排放以及隐含碳排放转移进行了分析。崔盼盼等^[22]对中国省域隐含碳排放及其驱动机理的时空演变进行了分析,研究表明,中国各省隐含碳排放特征及其驱动机制存在差异,未来减排侧重点应有所不同。石敏俊等^[23]定量测算了各省份的消费端碳排放和省份间的碳排放转移,结果表明,碳排放量较大的省份多数为经济大省,主要分布在北方地区。Feng 等^[24]分析了中国各省通过贸易外包的 CO₂ 排放量,在高度发达的沿海省份,高达 80%的与消费有关的碳排放来自中国中西部欠发达省份。张红丽等^[25]基于多区域投入产出模型分析了京津冀经济活动隐含的碳排放转移,结果表明,2012 年京津冀对其他区域的 CO₂ 排放转移比其他区域对京津冀的 CO₂ 排放转移高出 4351 万吨。

中国地域广袤,各省份经济发展水平、人口密度、产业结构、居民生活方式等方面存在较大差异。为了满足省份经济发展和消费需求,区域间贸易不仅导致了产品和服务的流动,也产生了基于消费端的碳转移。但是目前对中国消费端碳排放的分析大多局限于区域间碳排放总量的研究,或针对某一地区、某一行业进行分析,对中国各省份、各行业间的系统研究尚需要进一步探讨。对各省份、各行业间消费端碳排放的分析不仅能明确解释省份、行业 CO₂ 排放量以及贸易对隐含碳排放的影响,还能更好地从消费的角度说明各省份、各行业应该承担的减排责任^[26]。此外,通过多区域投入产出模型对减排模式的研究,以及碳中

和目标导向下倒逼各省份的绿色发展也是需要进一步研究的问题。基于此，我们根据 2012 年多区域投入产出数据，构建了中国 30 个省份 27 个行业消费端碳排放量估算模型，并分析了中国 30 个省份基于消费端的碳排放和贸易碳排放转移问题，以期为中国碳中和目标实现和减排方案设计提供依据。

2 方法与数据

2.1 模型方法

投入产出分析 (IOA) 最初由 Leontief 提出，现已被广泛应用于计算经济活动对环境产生的影响^[27]。将单区域环境投入产出分析扩展为多区域投入产出分析，可用于分析不同区域部门之间在各种环境变化方面的关系。基于多区域投入产出模型 (MRIO) 核算各个地区的贸易隐含碳排放，不仅有助于深入了解贸易对碳排放的影响，明确碳中和导向下各省的压力，促进减排责任合理分配，也为各省消费端碳减排模式分析和国家 2060 年碳中和目标的实现提供了重要理论基础。本文采用多区域投入产出模型，分析中国各省份基于消费端的碳排放和区域贸易导致的碳转移。假设 MRIO 模型中有 m 个区域，每一区域包含 n 个部门，则 MRIO 模型可表示为：

$$\begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1m} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{m1} & A^{m2} & \dots & A^{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y^{11} & Y^{12} & \dots & Y^{1m} \\ Y^{21} & Y^{22} & \dots & Y^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y^{m1} & Y^{m2} & \dots & Y^{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： X^s 是一个 $n \times 1$ 的矩阵，表示区域 s ($s=1, 2, \dots, m$) 的部门总产出； A^{rs} 是消耗系数矩阵，表示从区域 r 输入到 s 的单位产出的行业需求系数， A^{rs} 的计算方法是 $a_{ij}^{rs} = z_{ij}^r / x_j^s$ ， z_{ij}^r ($i, j=1, \dots, n$) 表示从区域 r 的部门 i 到区域 s 的部门 j 的投入； x_j^s 表示部门 j 在区域 s 的总投入； Y^{rs} 是一个 $n \times 1$ 的矩阵，表示区域 r 到 s 的最终需求，当 $r=s$ 时， Y^{rs} 表示本地消费。MRIO 模型可以表示为：

$$\begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} = \left(I - \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1m} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{m1} & A^{m2} & \dots & A^{mm} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} Y^{11} & Y^{12} & \dots & Y^{1m} \\ Y^{21} & Y^{22} & \dots & Y^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y^{m1} & Y^{m2} & \dots & Y^{mm} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} L^{11} & L^{12} & \dots & L^{1m} \\ L^{21} & L^{22} & \dots & L^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L^{m1} & L^{m2} & \dots & L^{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y^{11} & Y^{12} & \dots & Y^{1m} \\ Y^{21} & Y^{22} & \dots & Y^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y^{m1} & Y^{m2} & \dots & Y^{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： I 为单位矩阵， Lrs 是一个 $n \times n$ 的矩阵，称为 Leontief 逆矩阵，表示区域 r 为了满足区域 s 一个单位最终需求的产出。

通过多区域投入产出模型，基于消费端的碳排放可以表示为：

$$\begin{bmatrix} C^{11} & C^{12} & \dots & C^{1m} \\ C^{21} & C^{22} & \dots & C^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C^{m1} & C^{m2} & \dots & C^{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{E}^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{E}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \hat{E}^m \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} L^{11} & L^{12} & \dots & L^{1m} \\ L^{21} & L^{22} & \dots & L^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L^{m1} & L^{m2} & \dots & L^{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y^{11} & Y^{12} & \dots & Y^{1m} \\ Y^{21} & Y^{22} & \dots & Y^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y^{m1} & Y^{m2} & \dots & Y^{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： C^{rs} 为 $n \times n$ 的矩阵，表示区域 s 通过消费区域 r 生产的产品和服务产生的碳排放（即区域 r 到区域 s 的 CO_2 排放转移）。当 $r=s$ 时， C^{rs} 表示区域 s 消费本地的产品和服务产生的碳排放。 E^r 表示区域 r 的直接碳排放强度，是一个 $n \times 1$ 的矩阵，等于每个部门的 CO_2 排放量除以该部门的总产出。 \hat{E}^r 表示 E^r 的对角矩阵。

2.2 数据来源

本研究使用的中国多区域投入产出数据选择由Mi等^[28]编制的2012年区域间投入产出表，由于多区域投入产出表每5年更新一次，该数据是中国最新的多区域投入产出数据，提供了30个省份30个行业之间的贸易流量，已被众多学者广泛运用^[29]。中国没有正式公布每年的 CO_2 排放数据，本研究选用由中国碳核算数据库(CEADs)依据IPCC行业碳排放核算方法编制的各省份碳排放清单^[30]，该排放清单包括17种化石燃料燃烧产生的能源碳排放和生产水泥产生的过程碳排放，并使用更新的碳排放系数^[31](更符合中国能源含碳量)测算了45个行业的碳排放量。为了保持数据一致性，我们将碳排放清单整理为27个行业，将多区域投入产出表整合为30个区域27个行业。此外，2012年中国30个省份人口和GDP数据源自《中国统计年鉴》。

为了便于分析，我们将27个行业合并为6个行业，分别为能源生产和供应业、非金属和金属业、石油化工业、制造业、矿业和其他行业，如表1所示。

表1 27个行业与6个行业的对应关系

6个行业	27个行业
矿业	煤炭开采和洗选业，石油和天然气开采业，金属矿采选业，非金属矿及其他矿采选业
制造业	食品制造及烟草加工业，纺织业，纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业，木材加工和家具制造业，造纸印刷及文教体育用品制造业，通用、专用设备制造业，交通运输设备制造业，电气机械及器材制造业，通信设备、计算机及其他电子设备制造业，仪器仪表及文化办公用机械制造业，其他制造业
石油化工业	石油加工、炼焦及核燃料加工业，化学工业
非金属和金属业	非金属矿物制品业，金属冶炼及压延加工业，金属制品业
能源生产和供应业	电力、热力的生产和供应业，燃气及水的生产和供应业
其他行业	农林牧渔业，建筑业，交通运输及仓储业，批发零售业和住宿餐饮业，其他服务业

3 实证结果与分析

3.1 省域消费端碳排放特征及原因分析

根据产品和服务的来源不同，基于消费端的碳排放分为本地消费碳排放(消费本地产品和服务产生的碳排放)和外地输入碳排放(消费外地输入到本地的产品和服务产生的碳排放)，见图1。中国30个省份中，23个省份本地消费碳排放大于外地输入碳排放(I类区)，说明这些地区更加依赖本地的产品和服务。I类区中山东、湖北、四川、山西、福建、宁夏的本地消费碳排放占比均超过70%，其中，湖北本地消费碳排放占比最大，达到了83%。I类区中其他地区本地消费碳排放与外地输入碳排放占比相差较小。2012年，有7个省份的外地输入碳排放大于本地消费碳排放(II类区)，包括北京、上海、天津、陕西、重庆、海南和安徽，其中，北京的输入碳排放占比最大，达到了86%。中国京津地区和沿海地区等高度发达地区为了满足其经济发展的需要，从经济较不发达但能源丰富的省份进口大量能源，所以造成了外地输入碳排放量较大。北京的输入碳排放中，18%来自河北，17%来自内蒙古，而这两个省份的碳排放强度分别为205克/千元和216克/千元，相较北京的碳排放强度(94克/千元)高得多。北京从河北和内蒙古输入了大量钢铁与能源产品，也就导致了北京较高的输入碳排放。I类区生产能力较强，高排产业较发达，应该注重本地产品的清洁生产和绿色能源发展，降低本地消费产生的碳排放。而II类区的消费端碳排放主要由区域间贸易产生，说明这些地区在很大程度上依赖于其他地区的产品和服务，因此，要降低这7个省份的碳排放量，不仅要减少本地消费碳排放，更要从碳排放的来源地区进行减排，减少高碳强度产品的输入，转而选择低碳排放强度的产品来源，倒逼碳排放来源地区绿色低碳产品的输出，从而减少高排产品的生产，促进碳中和目标的实现。

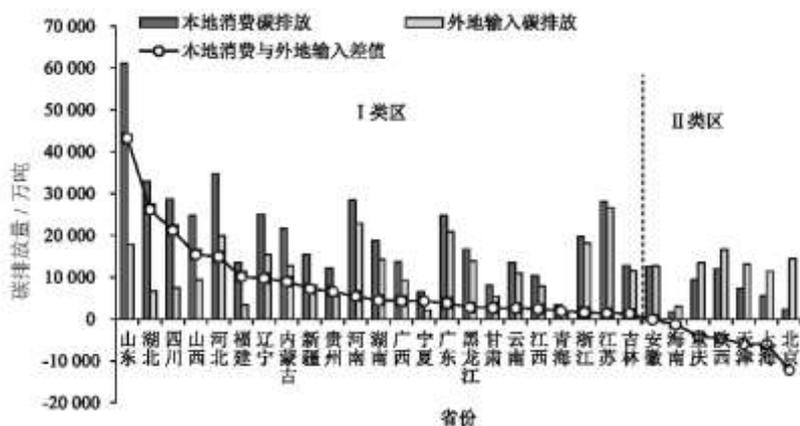


图1 本地与输入消费碳排放

从最终需求来看，中国各省份基于消费的碳排放可以分为四类来源，包括农村居民消费、城市居民消费、政府消费和资本形成，其中资本形成导致的碳排放量最大。图2为2012年中国30个省份四类最终需求导致的CO₂排放量。资本形成平均占比为64%，在30个省份中，除了上海(49%)以外，其他地区超过50%以上的碳排放来自资本形成，其中天津占比最大(74%)。随着中国经济的快速发展和城镇化进程的不断深入，中国城市化率已由1949年的10.64%增长到2016年的57.35%，导致基础设施建设的要求不断提高，需要使用大量的能源和碳密集型材料(如钢铁和水泥)，这是资本形成产生大量碳排放的重要原因。此外，城市居民消费对碳排放也有很大影响，2012年平均占比为21%，上海的占比最大为39%，其次是广东(36%)和北京(29%)。与此相比，农村居民消费碳排放的比例较小，平均占比仅为7%。2012年，中国有一半以上的人口居住在城市，而且城市居民消费的碳排放强度普遍高于农村居民，因此导致城市居民比农村居民产生更多的消费端碳排放。此外，政府消费对碳排放的贡献相对较小，平均占比为8%。

3.2 区域间贸易碳转移特征分析

图 3 显示了 2012 年中国 30 个省份碳排放转移情况。从图 3 中可以看出，各省份由区域贸易导致的输出和输入碳排放存在较大差异。输出碳排放最大的省份是内蒙古(35535 万吨)，其次是河北(34739 万吨)和江苏(25956 万吨)。从输入端来看，江苏的碳排放最大(26643 万吨)，其次是河南(22918 万吨)和广东(20906 万吨)。在 30 个省份中，青海的输出碳排放(948 万吨)和输入碳排放(1515 万吨)均为最小，说明区域贸易对青海省碳排放转移的影响较小。由于各区域产业结构不同，区域贸易导致的行业碳转移也存在空间异质性。

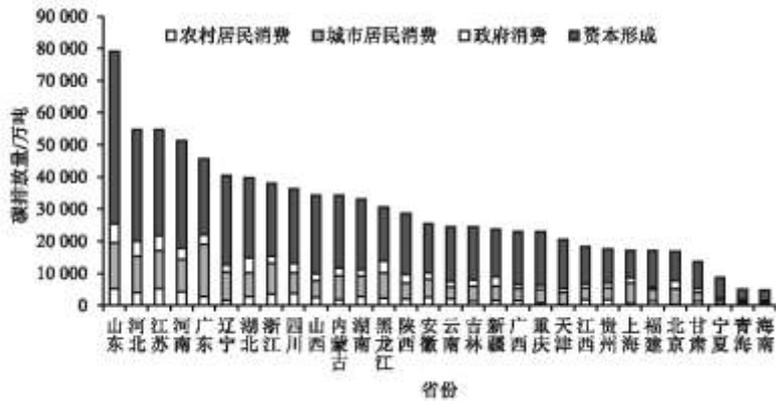


图 2 最终需求消费碳排放

从部门层面来看，能源生产和供应业以及非金属和金属业是碳转移的主要行业，平均占比分别为 48%和 24%。中国 30 个省份中，有 29 个省份能源生产和供应业与非金属、金属工业部门产生的碳排放量加和占比大于 65%，青海占比最低，仍为 63.58%。

能源生产和供应业输出碳排放量最大的是内蒙古(25002 万吨)，其次是山西(14382 万吨)和安徽(11661 万吨)等地区。内蒙古和山西的能源生产和供应业碳排放主要输出给山东、河北和北京等地区，对北方地区碳排放影响较大。北京的能源生产和供应业主要来自内蒙古(23%)和山西(13%)。山西的碳排放强度比内蒙古高 65 克/千元，也就是说，北京从山西输入等量能源产品将产生较内蒙古更多的碳排放。在碳中和目标导向下，高碳排放产品的市场竞争力将减弱，变得越来越不受欢迎。山西以火力发电为主，2020 年 1—2 月份，山西省内供热机组连续 30 天按保供最小方式运行的情况下，仍出现了 6.6 亿千瓦时的弃电量，弃电率远高于全国平均水平。据报道，山西目前仅一家盈利的火电企业，而这家企业业绩报表里的利润并不是全部来自火电，光伏与火电联产是其主要赚钱方式。内蒙古是中国最早的风电发源地之一，大规模、高增速的新建风电装机量使内蒙古新能源发电飞速发展，目前风电装机占电网统调装机量的 26.26%，光伏装机占 9.96%，水电装机占 3.01%。按照内蒙古自治区发改委发布的《关于 2019—2021 年自治区级重大项目滚动实施计划》，2019—2021 年，内蒙古将重点建设风电项目共计 23 个，总建设规模 1265.51 万千瓦，也就是内蒙古风电装机容量在这 3 年内净增长 44%。同时，内蒙古目前的风电电价上网电价为 0.28 元/千瓦时，即使加上 0.10~0.12 元/千瓦时的过网费用，仍有一定的竞争空间。这意味着，将有越来越多的省份选择从内蒙古输入能源产品，而不是山西。

非金属和金属业输出碳排放量最大的是河北(18052 万吨)和辽宁(7783 万吨)，主要输出给江苏(1919 万吨)、河南(1611 万吨)、北京(1300 万吨)、山东(1178 万吨)、浙江(1163 万吨)、山西(1020 万吨)和天津(984 万吨)，河北对这 7 个省份的输出占河北输出总量的 51%。河北非金属和金属业输出碳排放量最大(18052 万吨)。中国多年来一直是世界上最大的钢铁生产国，中国的钢铁主要产自河北，河北的钢铁产量在中国 30 个省份中排名第一^[32]。河北向国外和中国各地特别是向发达的东部省份出口大量钢材，用于建筑、机械、车辆、铁路和基础设施的建设，也就造成了河北非金属和金属业巨大的碳排放输出。北京输入的非金属、金属工业产品主要来源于河北(38%)和辽宁(9%)。河北钢铁输出碳排放强度为 205 克/千元，而辽宁仅为 163 克/千元。在碳中和目标导向下，辽宁的非金属和金属工业产品将变得更受欢迎。北京等省份应该更倾向于选择碳排放强度更低的产品和服

务，北京将非金属和金属业产品来源由河北转向辽宁，也会导致北京基于消费端的碳排放量大幅度下降。未来各省份会更多地引进绿色低碳产品，倒逼碳排放强度较高的省份发展绿色产品，从而通过市场资源再分配达到碳中和，促进实现绿色发展，实现国家 2060 年碳中和目标的目的。

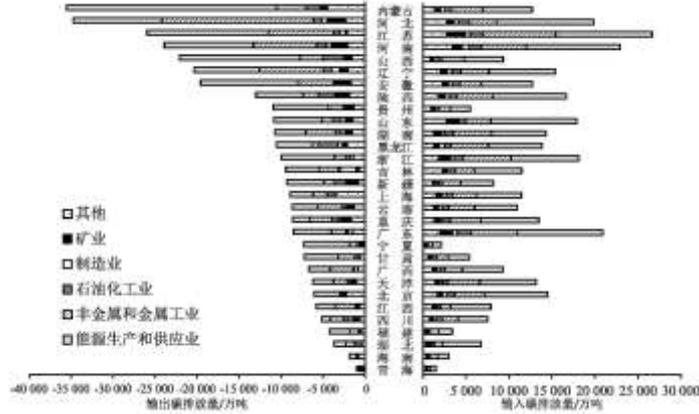


图 3 输入与输出碳排放量

由图 4 可知，2012 年中国 30 个省份净输出碳排放，有 11 个省份属于净输出型地区，有 19 个省份属于净输入型地区。内蒙古 (22844 万吨)、河北 (14891 万吨) 和山西 (12778 万吨) 是净输出最大的省份，合计占净输出碳排放总量的 65.0%，这些地区是能源丰富、工业能力强的能源生产型省份，它们向外输出大量产品和服务以支持其他地区的经济发展。净输入量较大的省份是广东 (12406 万吨)、北京 (8451 万吨)、浙江 (8140 万吨)、山东 (7044 万吨) 和天津 (6948 万吨)，这些省份大多都位于中国东部经济高度发达地区，GDP 在全国排名靠前，人口密度也很高，需要依靠区域贸易输入大量外地产品和服务供本地区消费。由于资源分布和产业结构不同，各地区净输出碳排放类型存在较大差异。内蒙古、山西、安徽、贵州和宁夏等地的净输出碳排放主要来自能源生产和供应业，而河北、辽宁和河南的净输出碳排放主要来自非金属和金属业。对净输入和净输出省份的划分，有助于倒逼输出省份进行绿色发展，并有利于区域减排模式的分析和减排政策的制定和实施。

3.3 减排模式分析

结合基于消费端碳排放的主要来源和净碳转移方向，2012 年中国 30 个省份可以划分为四类。A 类：外地输入—净输入型地区 (北京、天津、上海、重庆等)；B 类：外地输入—净输出型地区 (安徽)；C 类：本地消费—净输出型地区 (内蒙古、山西、河北等)；D 类：本地消费—净输入型地区 (山东、广东等)，如图 5 所示。

A 类：外地输入—净输入型地区碳减排模式分析。

北京经济发达，通过省际贸易出口了服务业等高附加值但低排放的商品，以很少的碳排放为代价获得了较高的经济利益。同时，为了满足其经济发展的需要，北京需要从其他地区输入了大量低附加值和高碳排放的产品，例如电力和金属，是高度依赖省际贸易的典型地区。北京等 A 类地区应该重点考虑输入产品来源，在不影响社会经济发展和产业结构的条件下将产品输入来源由高排放强度地区转变成低排放强度地区。因此，在碳中和目标导向下，输出省份为了使产品更受欢迎，将会加大自身绿色发展，大力发展绿色低碳产品的输出也将是未来贸易市场趋向。

B 类：外地输入—净输出型地区碳减排模式分析。

安徽是唯一一个碳排放主要来源于外地输入，同时也是净输出型的 B 类地区。安徽将生产的产品和服务大部分通过省际贸易供应到其他地区，并从其他地区输入产品和服务，省际贸易对安徽的碳排放量具有较大影响。安徽自身的绿色发展将影响其他地区的减排，而其他地区的产品输入又将对安徽自身的减排起决定性作用。因此，在碳中和目标导向下，安徽既要利用丰富的新能源发展绿色产业，节能减排，又要加大低碳产品的引入，使中国这个第一大碳排放国在 2030 年达峰，在 2060 年实现碳中和。

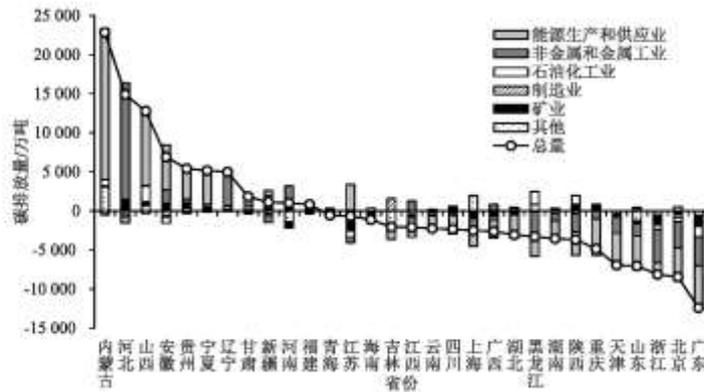


图 4 2012 年中国 30 个省份净输出碳排放

C 类：本地消费—净输出型地区碳减排模式分析。

内蒙古、山西和河北等 C 类地区自然资源禀赋，出口了大量碳密集型产品(例如电力、钢铁和水泥)。随着国家 2060 年碳中和目标的制定，将会倒逼这些能源省份开发利用清洁能源，提高能源利用率以降低碳强度，使自身产品更加低碳环保，具有竞争力。

D 类：本地消费—净输入型地区碳减排模式分析。

山东、广东等 D 类地区具有强大的生产能力，是中国重要的制造业基地。这些地区产业结构相对单一，对来自其他地区的高科技电子产品、金融服务以及碳密集型产品有强烈的需求，所以 D 类区也需要考虑输入产品来源，以减少高碳排放产品的输入。同时这些地区生产制造业较为发达，也应加强自身绿色发展，降低本地消费带来的碳排放。

4 结论与政策建议

本研究基于多区域投入产出模型，研究了 2012 年中国 30 个省份的消费端碳排放以及区域贸易背景下省份间、行业间的碳转移情况。研究结果表明：

(1) 中国 30 个省份中，23 个省份的本地消费碳排放大于外地输入碳排放，湖北的本地消费碳排放占比最大，达到了 83%。7 个省份的外地输入碳排放大于本地消费碳排放，北京的外地输入碳排放占比最大，为 86%。

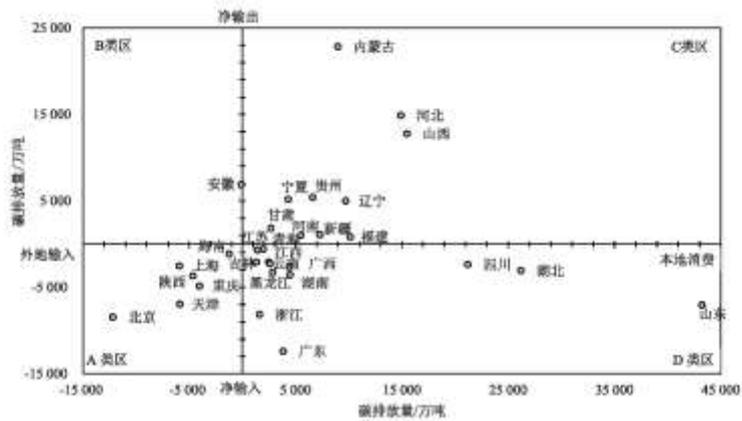


图 5 2012 年中国 30 个省份分类

(2) 资本形成是消费端碳排放的最大贡献者，平均占比为 64%。基础设施建设需要大量的能源和碳密集型材料，这是资本形成碳排放量大的主要原因。此外，城市居民消费对碳排放也有很大影响，平均占比为 21%。政府消费和农村居民消费对碳排放的贡献相对较小，平均占比分别为 8% 和 7%。

(3) 由区域贸易导致的输出和输入碳排放存在较大差异。输出碳排放较大的省份是内蒙古、河北和江苏，输入碳排放较大的省份是江苏、河南和广东。青海的输出碳排放和输入碳排放均为最小，说明区域贸易对青海碳排放转移的影响较小。能源生产和供应业以及非金属和金属业是碳转移的主要行业，平均占比分别为 48% 和 24%。能源生产和供应业输出碳排放量最大的是内蒙古和山西，主要输出给山东、河北和北京等北方地区；非金属和金属业输出碳排放量最大的是河北和辽宁，主要输出给江苏和河南等省份。

(4) 结合基于消费端碳排放的主要来源和净碳转移方向，中国 30 个省份可以划分为四类：经济较发达的北京、天津、上海、重庆等 A 类地区（外地输入—净输入型地区）；生产产品供应到其他地区，并从其他地区输入产品的安徽 B 类地区（外地输入—净输出型地区）；自然资源禀赋的内蒙古、山西、河北等 C 类地区（本地消费—净输出型地区）；生产能力较强的山东、广东等 D 类地区（本地消费—净输入型地区）。

根据以上实证结果和讨论，我们提出以下政策建议：首先，随着中国经济的快速发展和城镇化的不断深入，短时间内资本形成导致的碳排放也会不断增加，但是中国政府需要采取有效措施防止资本形成导致的碳排放过快增长。其次，应根据各省份贸易碳转移特征制定适宜的减排政策，在保持区域贸易的同时减少碳排放。对于外地输入—净输入型省份，应该重点考虑输入产品来源，在不影响社会经济发展和产业结构的条件下将产品输入来源由高排放强度地区转变成低排放强度地区；对于外地输入—净输出型省份，既要发展绿色产业，又要加大低碳产品的引入，从自身和输入来源两方面减排；对于本地消费—净输出型省份，应将减排重点放在开发利用清洁能源上，提高能源利用率以降低碳排放强度，使自身产品更加低碳环保具有竞争力；对于本地消费—净输入型省份，需要考虑输入产品来源，以减少高碳排放产品的输入，同时提高自身能源清洁度，降低本地消费带来的碳排放。在碳中和目标导向下，倒逼碳排放输出省份自身的绿色发展，并加大绿色低碳产品的输出，促进国家 2030 年达峰和 2060 年碳中和目标实现。

参考文献：

[1] 韦韬, 彭水军. 基于多区域投入产出模型的国际贸易隐含能源及碳排放转移研究[J]. 资源科学, 2017(1): 94-104.

-
- [2]李晨, 丛睿, 邵桂兰. 基于 MRIO 模型与 LMDI 方法的中国水产品贸易隐含碳排放转移研究[J]. 资源科学, 2018(5): 1063-1072.
- [3]徐盈之, 郭进. 开放经济条件下国家碳排放责任比较研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(1): 55-63.
- [4]黄永明, 陈小飞. 中国贸易隐含污染转移研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018(10): 112-120.
- [5]Tian X, Chang M, Lin C, et al. China's carbon footprint: A regional perspective on the effect of transitions in consumption and production patterns[J]. Applied Energy, 2014, 123:19-28.
- [6]Bumpus A G, Liverman D M. Accumulation by decarbonization and the governance of carbon offsets[J]. Economic Geography, 2008, 84(2):127-155.
- [7]Murray B C, McCarl B A, Lee H C. Estimating leakage from forest carbon sequestration programs[J]. Land Economics, 2004, 80(1):109-124.
- [8]Richards K R, Stokes C. A review of forest carbon sequestration cost studies: A dozen years of research[J]. Climatic Change, 2004, 63(1-2):1-48.
- [9]曹淑艳, 霍婷婷, 王璐, 等. 农村家庭能源消费碳中和能力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(S3): 301-303.
- [10]王志民, 张新林, 邱小樱. 基于碳中和的旅游景区净碳排放估算与低碳景区建设——以镇江“焦山”风景区为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2016(4): 107-113.
- [11]Zhang B, Qiao H, Chen Z M, et al. Growth in embodied energy transfers via China's domestic trade: Evidence from multi-regional input-output analysis[J]. Applied Energy, 2016, 184:1093-1105.
- [12]Peters G P. From production-based to consumption-based national emission inventories[J]. Ecological Economics, 2008, 65(1):13-23.
- [13]Feng K S, Hubacek K, Sun L X, et al. Consumption-based CO₂ accounting of China's megacities: The case of Beijing, Tianjin, Shanghai and Chongqing[J]. Ecological Indicators, 2017, 47:26-31.
- [14]赵玉焕, 王淞. 基于技术异质性的中日贸易隐含碳测算及分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2014(1): 12-18, 26.
- [15]Li Y, Hewitt C N. The effect of trade between China and the UK on national and global carbon dioxide emissions[J]. Energy Policy, 2008, 36(6):1907-1914.
- [16]钟章奇, 姜磊, 何凌云, 等. 基于消费责任制的碳排放核算及全球环境压力[J]. 地理学报, 2018(3): 442-459.
- [17]庞军, 石媛昌, 谢希, 等. 基于 MRIO 模型的中美欧日贸易隐含碳特点对比分析[J]. 气候变化研究进展, 2015(3): 212-219.

-
- [18]马述忠, 黄东升. 基于MRIO模型的碳足迹跨国比较研究[J]. 浙江大学学报(人文社会科学版), 2011(4): 5-15.
- [19]姚亮, 刘晶茹, 王如松, 等. 基于多区域投入产出(MRIO)的中国区域居民消费碳足迹分析[J]. 环境科学学报, 2013(7): 2053-2058.
- [20]Meng B, Xue J J, Feng K S, et al. China's inter-regional spillover of carbon emissions and domestic supply chains[J]. Energy Policy, 2013, 61:1305-1321.
- [21]Liu L C, Liang Q M, Wang Q. Accounting for China's regional carbon emissions in 2002 and 2007: Production-based versus consumption-based principles[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103:384-392.
- [22]崔盼盼, 张艳平, 张丽君, 等. 中国省域隐含碳排放及其驱动机理时空演变分析[J]. 自然资源学报, 2018(5): 879-892.
- [23]石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J]. 地理学报, 2012(10): 1327-1338.
- [24]Feng K S, Davis S J, Sun L X, et al. Outsourcing CO₂ within China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(28):11654-11659.
- [25]张红丽, 沈镭, 李艳梅. 京津冀经济活动隐含的碳排放转移: 基于多区域投入产出模型的分析[J]. 资源科学, 2017(12): 2287-2298.
- [26]Jiang Y K, Cai W J, Wan L Y, et al. An index decomposition analysis of China's interregional embodied carbon flows[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88:289-296.
- [27]Meng J, Liu J F, Xu Y, et al. Tracing primary PM_{2.5} emissions via Chinese supply chains[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(5). DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054005.
- [28]Mi Z F, Meng J, Guan D B, et al. Chinese CO₂ emission flows have reversed since the global financial crisis[J]. Nature Communications, 2017(8):1-10.
- [29]Meng J, Zhang Z K, Mi Z F, et al. The role of intermediate trade in the change of carbon flows within China[J]. Energy Economics, 2018, 76:303-312.
- [30]Shan Y L, Guan D B, Zhang H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015[J]. Scientific Data, 2018(5):1-14.
- [31]Liu Z, Guan D B, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565):355-338.
- [32]Wang Z H, Yang Y T, Wang B. Carbon footprints and embodied CO₂ transfers among provinces in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82:1068-1078.