

双循环视角下中国省区隐含能贸易及其对能耗双控的影响研究

罗鹏飞¹, 姜钰卿¹, 兰志轩², 窦旭明³, 唐旭^{1,4*}

1 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249

2 昆仑数智科技有限责任公司, 北京 102200

3 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

4 中国石油大学(北京)中国油气产业发展研究中心, 北京 102249

* 通信作者, tangxu2001@163.com

收稿日期: 2023-02-10

国家自然科学基金(72174206)资助

摘要 在“双碳”战略目标下, 控制能源消费总量和强度至关重要, 摸清隐含能源流动有助于实现区域能耗双控差别化管理, 促进省区高质量协调发展。当前, 我国提出要加快形成以国内大循环为主体, 国内国际双循环相互促进的新发展格局。本研究通过将中国省际多区域投入产出模型与全球多区域投入产出模型相嵌套, 统筹国内国际两个大局, 核算中国省际能源足迹(石油、天然气和煤炭), 分析隐含能在地区间和国家-地区间的流向、分布和结构特征, 进而研究隐含能贸易对能源消费总量和强度的影响。结果表明: ①中国隐含能消费以煤炭为主, 各省区化石能源消费存在显著差异, 山东、广东、河南、江苏、浙江隐含能消费排全国前五, 西北地区隐含能消费量仅占全国总消费的5.12%。全国人均隐含能消费量高于世界平均水平, 省区人均隐含能消费量与人均国内生产总值显著相关。②在国际贸易隐含能流动中, 内陆省区隐含能流动以煤炭为主, 广东、上海和浙江等沿海地区以油气为主。美国、欧盟、日本、韩国以及俄罗斯是主要的隐含能贸易关系国。③在省区间隐含能流动中, 能源供需存在空间错位问题, 区域间隐含能流动主要从黄河中游地区、北方沿海地区流向东部和南部沿海地区。河北、山西、内蒙古和江苏是省际间主要的隐含能出口来源地, 浙江、广东、河南和重庆是主要的隐含能进口目的地。④与国际贸易相比, 省际贸易对省区能耗双控的影响较大且省区间存在异质性。隐含能贸易导致山西、宁夏和内蒙古等省区能源消费总量和强度显著提升, 北京、重庆和吉林等省区则显著降低, 甘肃、贵州、青海、河南和陕西等地区的能耗双控受国内国际贸易影响程度较小。

关键词 隐含能源; 嵌套型投入产出模型; 能耗双控; 双循环

Research into Chinese embodied energy trade and its impact on dual control of energy consumption under the perspective of dual circulation

LUO Pengfei¹, JIANG Yuqing¹, LAN Zhixuan², DOU Xuming³, TANG Xu^{1,4}

1 School of Economics and Management, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 罗鹏飞, 姜钰卿, 兰志轩, 窦旭明, 唐旭. 双循环视角下中国省区隐含能贸易及其对能耗双控的影响研究. 石油科学通报, 2023, 02: 234-246

LUO Pengfei, JIANG Yuqing, LAN Zhixuan, DOU Xuming, TANG Xu. Research into Chinese embodied energy trade and its impact on dual control of energy consumption under the perspective of dual circulation. Petroleum Science Bulletin, 2023, 02: 234-246. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.018

2 Kullun Digital Technology Co., Ltd, Beijing 102200, China

3 CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300459, China

4 China Oil and Gas Development Research Center, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Under the strategic goals of carbon peak and neutrality, controlling the total amount and intensity of energy consumption is crucial, and mapping the embodied energy flows could be helpful to realize the differentiated management of regional energy consumption dual control and facilitate high-quality coordinated regional development. In the meantime, China has proposed to accelerate the establishment of a “dual circulation” development pattern in which the domestic economic cycle plays a leading role while the international economic cycle remains its extension and supplement. This study accounts for the energy footprints (oil, gas, and coal) of Chinese provinces by nesting the Chinese inter-provincial multi-regional input-output model and the global multi-regional input-output models, keeping in mind both internal and international imperatives, and then analyzes the flow direction, distribution and structural characteristics of trade embodied energy between countries and regions. The results show that: (i) the consumption of embodied energy is dominated by coal in China. There are significant differences in fossil energy consumption among provinces, Shandong, Guangdong, Henan, Jiangsu and Zhejiang's embodied energy consumption ranked in the top five in China. The northwest region's embodied energy consumption accounts for only 5.12% of the country's total consumption. The national per capita consumption of embodied energy is higher than the world average. Provincial per capita embodied energy consumption is significantly correlated with per capita GDP. (ii) The international trade embodied energy flows in inland regions are dominated by coal, while that in the coastal regions such as Guangdong, Shanghai, and Zhejiang by oil and gas. The US, EU, Japan, Korea, and Russia are the main embodied energy trading partners. (iii) There is a spatial mismatch between energy supply and demand on the consumption side, mainly flowing from the middle reaches of the Yellow River and the northern coastal areas to the eastern and southern coastal areas. Hebei, Shanxi, Inner Mongolia and Jiangsu are the main inter-provincial sources of embodied energy exports, while Zhejiang, Guangdong, Henan and Chongqing are the main embodied energy import destinations. (iv) Compared with international trade, the impact of inter-provincial trade on the dual control of energy consumption in provinces is large and heterogeneous. Specifically, the embodied energy trade leads to a significant increase in total energy consumption and intensity in Shanxi, Ningxia and Inner Mongolia, while a significant decrease in Beijing, Chongqing and Jilin. However, domestic and international trade has less impact on dual control of energy consumption in Gansu, Guizhou, Qinghai, Henan, and Shaanxi.

Keywords embodied energy; nested input-output model; dual control of energy consumption; dual circulation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.018

0 引言

中国是全球最大的能源生产国、消费国，充足稳定的能源供应仍然是经济高质量发展的必要条件。“富煤、贫油、少气”的能源资源禀赋和现有的能源基础设施决定了我国以化石能源为主的能源消费结构还需持续较长一段时间。为解决环境资源约束，我国向世界郑重承诺“2030年前碳达峰，2060年前碳中和”（以下简称“双碳”），能耗双控是实现这一目标的关键支撑。当前，我国直接能源供需矛盾突出，油气资源短板长期存在，能耗双控可从源头改善化石能源路径依赖问题^[1]。伴随商品流动的能源在解决直接能源供需矛盾，理清间接能源消费结构等方面表现出巨大潜力^[2]。具体来说，在全球生产分工体系下，中国参与国内国际“双循环”的同时，隐含在商品和服务中的能源在进出口贸易中来回转移^[3]。考虑到贸易对能源消费的影响，从完全需求视角研究能源消耗问题，基于国际国内贸易体系分析隐含能流动，探究各地区隐含能结构，剖析隐含能贸易对能耗双控的影响

对顺利实现“双碳”目标，推进区域协调发展具有重要意义。因此，本文基于完全需求视角，统筹国内国际两个大局，系统核算国内国际隐含能流动规模，并分析贸易对各省区能源消费量和强度的影响，力求为解决区域发展“不平衡和不充分”问题，实施区域能耗双控差别化管理提供量化支撑，也对研究制定中国未来能源转型战略、能源安全战略，助力实现“双碳”目标具有重要的理论和现实意义。

“隐含能”被定义为产品或服务生命周期中直接和间接的总能耗。与直接能源消费不同的是，隐含能考虑与产品和服务相关的间接能源消费。贸易中的隐含能源，包括能源进出口，用于衡量贸易产品和服务对贸易国能源消耗的影响。通过隐含能流动核算，各省区能源消费可划分为直接能源消费和完全能源需求，其中直接能源消费指省区内对直接能源的消费总量，完全能源需求指省区最终需求引发的能源消费总量^[4]。尽管中国化石能源消费总量已经引起高度重视，但由于其疆域辽阔，各省区的能源消费存在较大差异。具体来说，各省区的经济发展、资源禀赋、产

业结构、贸易规模和模式对其能源消费的影响各有不同^[5-8]。与此同时,不同国家以及各中国地区间的隐含能流动,尤其是国际省际进出口中的能源流动也逐渐受到关注^[9-11]。已有研究指出发达国家通过国际贸易引发了新兴经济体的能源消耗增长^[12-13]。其中,中国作为新兴经济体和世界第一大出口国^[14],大量“中国制造”产品走向世界,促使其成为能源净输出国^[15-16]。

具体来看,已有研究多采用投入产出模型来进行隐含能研究。根据研究尺度或投入产出表类型,可进一步划分为两类:一是基于单区域投入产出的隐含能研究,重点关注一个国家或区域内各行业或部门的隐含能流动^[17-21];二是基于多区域投入产出表展开研究,侧重于对多个国家或区域间的能源利用关联进行分析^[22-26]。以中国为研究对象,前期研究大多采用多区域投入产出分析,关注国家整体隐含能贸易及行业间能源流动问题^[27-32]。随着中国多区域投入产出表的陆续发布,围绕中国省区层面的多区域隐含能转移研究逐渐成为热点^[11]。同时,也有学者以主要经济区为研究对象,对京津冀、长三角等地区间的隐含能源流动进行充分讨论^[33]。

截止目前,具体到中国各省区的隐含能分析,已有研究大多基于中国多区域投入产出表,对各省区间能源流动展开分析,不能清晰刻画省区与国外的能源关联图景。因此,省区与世界其它国家贸易隐含能流动亟需更全面、深入的分析。与此同时,已有研究大多从国家层面讨论直接能源消费及能耗双控问题,并逐步形成化石能源消费总量居高不下,消费强度较大的共识。但缺乏从区域层面进一步分析隐含能贸易对省区能源消费量和强度的影响,从隐含能贸易视角描绘地区间、国家-地区间能源流动关联及其对能耗双控的影响研究亟待展开。

为了弥补已有研究的不足,本论文在中国多区域投入产出模型与世界投入产出模型的基础上,构建嵌套型投入产出模型,系统刻画中国各省区消费侧化石能源消费规模、强度和结构,分析中国经济“双循环”过程中省区隐含能流动,关注隐含能贸易对能源消费总量和强度的影响。主要贡献体现在以下三个方面:第一,区别于传统的直接能源消费及强度分析,本研究从完全需求视角出发,深刻剖析中国各省区隐含能消费规模、流动路径及隐含能贸易对能耗双控的影响,丰富了研究视角;第二,系统分析中国各省区与世界主要经济体间的贸易关系,通过构建嵌套型投入产出模型将中国30个省区与世界48个国家(地区)相关联,拓展了建模思路;第三,建立的能源消费总量和

强度变化指标可推广至其他矿产资源、环境影响研究,具有广泛的应用性。

1 模型与数据来源

1.1 模型构建

1.1.1 嵌套型多区域投入产出模型

投入产出分析最早是由Wassily Leontief在20世纪30年代末提出并发展起来的。其中,环境扩展型投入产出分析已广泛应用于研究贸易中的资源、环境足迹^[34-37]。目前基于投入产出分析的隐含能测算大多使用中国多区域投入产出表(MRIO),其国际贸易部分未区分进口来源地与出口目的地,因此尚未对各省区国际贸易的影响进行细化研究,无法追踪每个省区如何与世界其它国家进行贸易。因此,本研究将2015年的中国MRIO与EXIOBASE(v3.6)的世界MRIO模型进行嵌套,将各省区的国际贸易关联至世界各国、部门层面,最终构建了78地区(中国30个省区和世界48个经济体或区域集合,西藏自治区不包含在内)30部门的嵌套型投入产出模型^[38]。

具体来说,根据省级国际贸易数据测算各省区国际贸易比例,进而将世界多区域投入产出表内中国的进出口贸易矩阵分解至省区部门级贸易矩阵。值得注意的是,在进行省区部门级进出口分配之前,我们采用双比例平衡法分别对进口、出口进行总量调平,保证嵌套后投入产出表内中国省区进出口总量与世界投入产出表内中国进出口量保持一致。其中,由于省区国际贸易数据无法区分中间商品和最终商品贸易,因此采用相同进口(出口)比例处理中国省区中间需求和最终需求的国际进口(出口)。以中美贸易中间需求出口为例,分配算法如式(1)所示:

$$M_{i,j,MRIO}^{CHN-USA} = \frac{M_{CHN-USA}^{i,j}}{48 \sum_{k=1}^{48} M_{k(CHN-World)}^{i,j}} \cdot M_{CHN}^{i,j} \quad (1)$$

其中, $M_{i,j,MRIO}^{CHN-USA}$ 表示嵌套后中国省区 j 部门 i 出口至美国的产出或服务, $M_{CHN-USA}^{i,j}$ 表示根据省区国际贸易数据得出的中国省区 j 部门 i 出口至美国的产出和服务, $\sum_{k=1}^{48} M_{k(CHN-World)}^{i,j}$ 表示根据省区国际贸易数据得出的中国省区 j 部门 i 出口至国外的贸易总量, $M_{CHN}^{i,j}$ 表示经过总量调平后的中国省区 j 部门 i 的出口总量。

中国省区部门级的进口分配算法与出口做法类似。此外,对初始投入矩阵而言,需对中国MRIO表中初

始投入部分与世界MRIO表中中国的初始投入总和进行总量调平。

图1为中国省区 r 、 s 与国家 g 嵌套型投入产出模型的简化示意图。其中， Z 表示中间交易矩阵； Y 表示最终需求矩阵； V 表示初始投入矩阵，也称为增加值； X 表示总产出矩阵。

1.1.2 环境扩展的投入产出模型

本研究基于环境扩展的投入产出模型，追踪产品在全球供应链跨区域流动过程中的能源消费，定量分析中国各省区贸易隐含石油、隐含天然气和隐含煤的消费规模及结构。

根据传统投入产出模型的平衡关系，总产出与最终需求的关系可表示为：

$$X = (I - A)^{-1}Y = L(Y^{rr} + Y^{rs} + Y^{rg}) \quad (2)$$

其中， A 表示直接消耗系数矩阵； I 表示单位阵； L 表示里昂惕夫逆矩阵； Y 表示最终需求矩阵，包括 r 地区本地最终需求 Y^{rr} 、 r 省区出口至 s 省区的最终需求 Y^{rs} （省际调出）以及 r 省区出口至国家 g 的最终需求 Y^{rg} （国际出口）。

直接消耗系数矩阵 A 可进一步表示为分块矩阵，如下：

$$A = \begin{bmatrix} A^{rr} & A^{rs} & A^{rg} \\ A^{sr} & A^{ss} & A^{sg} \\ A^{gr} & A^{gs} & A^{gg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ii}^{rr} & a_{ij}^{rr} & \dots & a_{ii}^{rg} & a_{ij}^{rg} \\ a_{ji}^{rr} & a_{jj}^{rr} & \dots & a_{ji}^{rg} & a_{jj}^{rg} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{ii}^{sr} & a_{ij}^{sr} & \dots & a_{ii}^{sg} & a_{ij}^{sg} \\ a_{jr}^{sr} & a_{jj}^{sr} & \dots & a_{ji}^{sg} & a_{jj}^{sg} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中，元素 a_{ij}^{rs} 表示区域 s 部门 j 单位产出消费的地区部门 i 的直接产品投入； r 、 s 和 g 代表78个地区， i 和 j 表示30个产业部门。

在传统投入产出模型的基础上，进一步引入资源环境账户中的能源消费量 F 和能源消费强度 f ($f = F / X$)，则有：

$$E = f(I - A)^{-1}Y = fL(Y^{rr} + Y^{rs} + Y^{rg}) \quad (4)$$

其中， E 表示消费侧能源消费量，也称隐含能消费。

1.1.3 隐含能贸易对能耗总量和强度的影响测算

一个经济体的最终需求可以通过复杂的全球贸易网络直接或间接消耗另一个经济体的能源。区别于直接能源消费评价指标，本部分从完全需求视角出发，关注隐含能贸易对能源消费总量和强度的影响。以能源消费总量为例，省际贸易对能源消费总量的影响是指省区间隐含能净出口除以本省区能源消费总量，用来表征省际贸易对其能耗总量的影响。同理，国际贸易对能源消费总量的影响指省区出口至其他国家的隐含能净出口除以本省区能源消费总量，用来表征国际贸易对其能耗总量的影响。

其中，省区隐含能消费总量是指本地提供的能源消费和贸易隐含能净进口之和。计算公式为：

$$Q^* = \frac{E_c^* - E_i^*}{E_c} \quad (5)$$

式中， Q^* 表示省区贸易对能耗总量的影响程度； E_c^* 为隐含能的省区外调出量； E_i^* 为隐含能的省区外调入量；

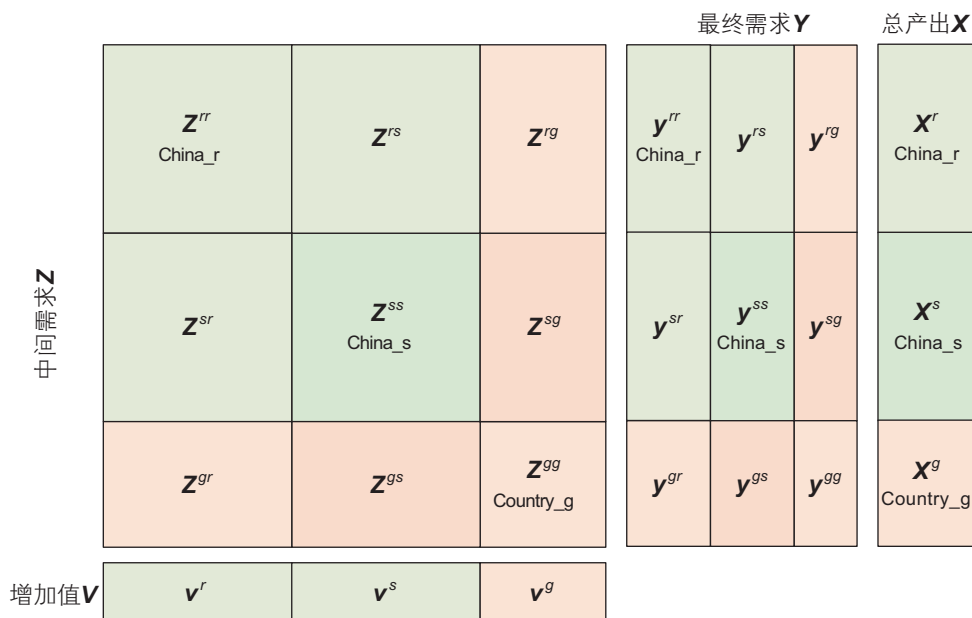


图1 嵌套型多区域投入产出模型
Fig. 1 Nested multi - region input-output model

E_c 为省区隐含能消费总量。若 Q^* 为正,反映出本省区通过贸易方式为其它省区提供隐含能,这意味着省际贸易提高其能源消费总量,能耗指标增大;反之,则对其能源消费压力具有缓解作用,能耗指标减小。

$$Q^{**} = \frac{E_c^{**} - E_i^{**}}{E_c} \quad (6)$$

式中, Q^{**} 为国际贸易对能耗总量的影响程度; E_c^{**} 为隐含能的国外出口量; E_i^{**} 为隐含能的国外进口量。若 Q^{**} 为正,反映出本省区国际贸易带来的隐含能净流出加重了省区能源压力,能耗指标增大;反之,则缓解能源压力,能耗指标减小。

同理,关于隐含能贸易对能源消费强度的影响,即隐含能净出口与总产出的比值。具体测算与贸易对能耗总量影响的测算方法类似。

1.2 数据来源

世界多区域投入产出表和中国多区域投入产出表是构建嵌套型投入产出模型的基础。本研究通过各省区国际贸易数据将中国碳核算数据库(CEADS)的中国多区域投入产出数据^[39]和EXIOBASE(v3.6)数据库的世界多区域投入产出数据进行整合^[40]。EXIOBASE数据库提供了49个经济体(27个欧盟成员国^①、17个欧盟以外的经济体^②以及5个其他区域^③)和163个部门的贸易数据以及各经济体能源消费卫星账户;CEADS数据库提供中国多区域投入产出表,涵盖31个省份(不包括台湾、香港和澳门)和42个社会经济部门。目前,最新版EXIOBASE数据库提供2015年

世界多区域投入产出表,中国多区域投入产出表更新至2017年。考虑到数据一致性原则,本文选择对2015年世界投入产出表和中国多区域投入产出表进行嵌套。由于世界多区域投入产出表与中国多区域投入产出表部门数量不一致,为了避免数据分解导致的潜在误差,因此通过部门合并的方式得到30个部门。对于各省区进出口部分,通过中国海关数据库提供的各省区行业贸易数据,将中国多区域投入产出表嵌入到世界多区域投入产出表中。此外,由于EXIOBASE数据库提供的是中国整体的能源消费数据,未提供中国各省区行业层面的能源消费数据,因此本研究按照CEADS数据库提供的各省区行业能源消费比例将中国整体能源消费量分配至中国各地区和部门。

2 结果与分析

2.1 中国省区隐含能消费格局

通过核算省级层面隐含能消费总量,中国各省区隐含能消费规模呈现较大差异。对于国内总产值或人口较大的地区,其隐含能消费量相对较高(图2)。较高的隐含能消费可能源于较高的本地消费量(河北、山东),也可能源于活跃的省区贸易或国际贸易(浙江),或是两者的共同作用结果(河南、广东、江苏)。各省区中,按照隐含能消费由大到小排列,山东隐含能消费总量达2.80亿吨标煤,占全国消费总量的8.28%;广东、河南、江苏、浙江隐含能消费分别占全国隐含能消费的6.80%、5.60%、5.42%和5.30%。分区域来

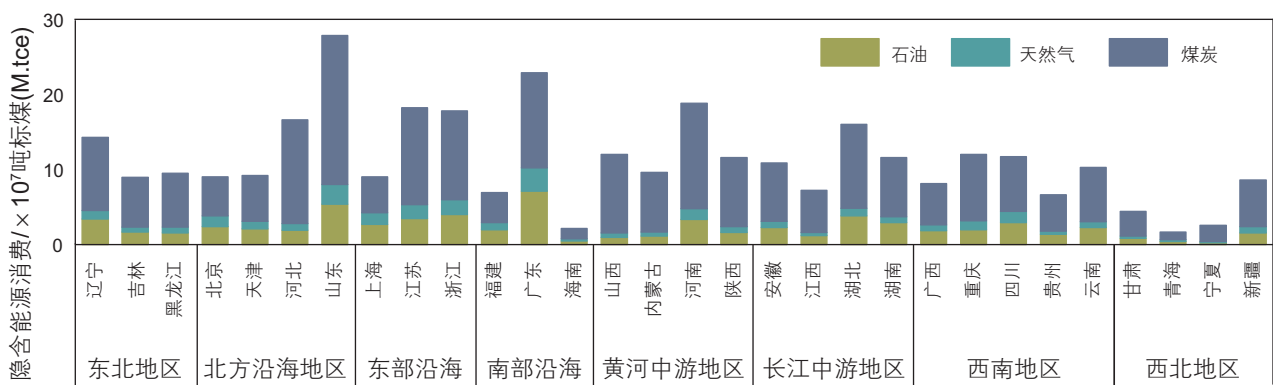


图2 中国各省区的隐含能消费结构

Fig. 2 Embodied energy consumption structure of Chinese provinces

① 具体包括:奥地利、比利时、保加利亚、塞浦路斯、捷克共和国、德国、丹麦、爱沙尼亚、西班牙、芬兰、法国、希腊、克罗地亚、匈牙利、爱尔兰、意大利、立陶宛、卢森堡、拉脱维亚、马耳他、荷兰、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、瑞典、斯洛文尼亚和斯洛伐克。

② 具体包括:英国、美国、日本、中国、加拿大、韩国、巴西、印度、墨西哥、俄罗斯、澳大利亚、瑞士、土耳其、中国台湾、挪威、印尼和南非。

③ 具体包括:亚洲及太平洋地区、美洲其它地区、欧洲其它地区、非洲其它地区和中东地区。

看，西北地区隐含能消费仅占全国消费总量的 5.12%，其本地消费量低且省际、国际贸易不活跃。

图 3 展示各省区人均隐含能消费量及人均 GDP，可以看出：对于人均国内总产值较大的省区，其人均隐含能消费较大，表明化石能源消费仍然是我国经济增长的基本要素与动力来源，经济增长与能源消费尚未完全脱钩。其中，天津(6.52 tce^①)、北京(4.20 tce)、内蒙古(4.03 tce)和重庆(4.00 tce)人均隐含能消费排全国前四。另外，全国人均隐含能消费为 2.49 tce，高于世界人均隐含能消费量(1.81 tce)。分区域来看，中国人均隐含能消费较低的地区包括：南部沿海地区、长江中游地区和西南地区，天津市(6.52 tce)的人均隐含能消费位居全国首位，四川省(1.46 tce)人均隐含能消费最低。

2.2 经济外循环中的隐含能流动

中国各省区与世界主要经济体贸易导致的商品和服务的跨区域转移将导致大量隐含能的流动。量化中国省区与世界主要经济体间的隐含能为剖析资源供应和消费过程中存在的问题提供了新的视角。鉴于此，图 4a 展示中国各省区与世界主要经济体间的隐含能流动总体情况，图 4b、c、d 按照能源种类分别展示隐含石油、天然气和煤炭的流动情况。

对于中国经济外循环过程中的隐含能流动，不同省区隐含能流动规模存在较大差异，这主要取决于省区能源强度和贸易量的大小。广东、山东和江苏的隐含能流动规模排全国前三，广西、重庆、四川、云南等西部地区隐含能流动规模较小。关于隐含能贸易关系国，美国、欧盟、日本是多数省区的隐含能出口国，而俄罗斯和韩国是主要的隐含能进口国(图 4a)。从出

口端来看，广东(62.96 M.tce^②)、江苏(58.89 M.tce)和山东(50.15 M.tce)隐含能出口量排全国前三，其隐含能出口量之和占全国隐含能出口总量的 28.65%；从进口端来看，广东(51.36 M.tce)、山东(36.36 M.tce)和上海(26.16 M.tce)是主要的隐含能进口地。综合隐含能进口和出口量，仅北京、吉林、广西、重庆和云南为隐含能净进口地区，其余省区均为隐含能净出口地区。其中，北京隐含能净进口量为 9.38 M.tce，河北、江苏和内蒙古隐含能净出口量排全国前三，净出口总量达 41.85 M.tce，占全国隐含能净出口量的 44.08%。

关于贸易隐含能源结构，多数省区贸易隐含能以煤炭为主，上海、浙江、福建、广东等沿海地区隐含能贸易以隐含石油、天然气为主。图 4b 展示各省区与其它主要国家之间的隐含石油流动情况。对隐含石油出口而言，广东(27.44 M.tce)、上海(17.48 M.tce)和浙江(10.73 M.tce)隐含石油出口量占全国隐含石油出口总量的 41.76%，主要出口至美国、欧盟和日本；对隐含石油进口而言，广东(22.19 M.tce)、山东(13.66 M.tce)和上海(11.46 M.tce)是主要的进口目的地，韩国、欧盟和日本是各省区主要的隐含石油进口来源地。图 4c 显示广东、山东和浙江的隐含天然气进口量较大，占全国隐含天然气进口总量的 13.50%、11.90%和 7.16%。俄罗斯出口至各省区的隐含天然气总量为 32.50 M.tce，超过中国隐含天然气进口总量的五分之一。图 4d 显示中国各省区隐含煤流动以出口为主，主要出口至美国、欧盟、日本和韩国。其中，河北(44.26 M.tce)、江苏(42.81 M.tce)和内蒙古(36.10 M.tce)是我国主要的隐含煤净流出省区，净出口总量占中国整体隐含煤出口的 32.03%。而浙江(59.59 M.tce)和重庆(56.50 M.tce)是主要的隐含煤净流入

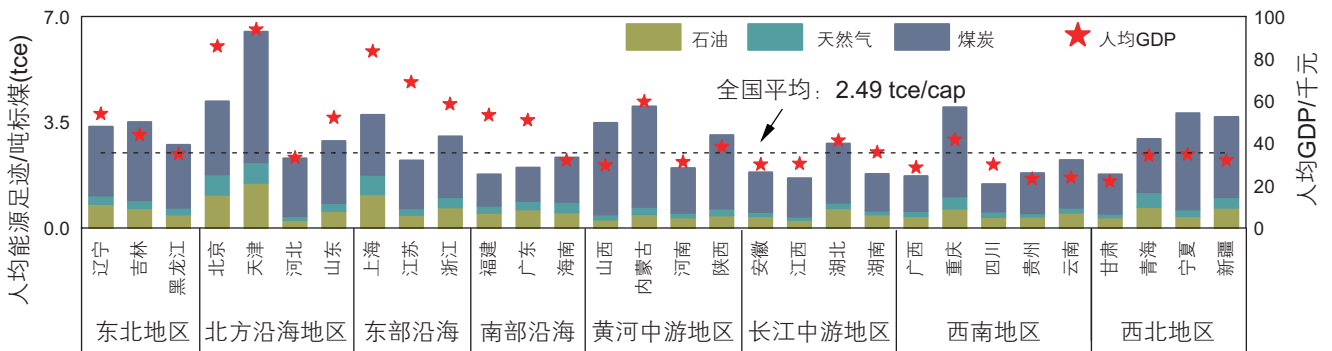


图 3 中国各省区人均隐含能消费量及其能源结构

Fig. 3 Embodied energy consumption per capita and its energy structure in Chinese provinces

① 吨标煤
② 百万吨标煤

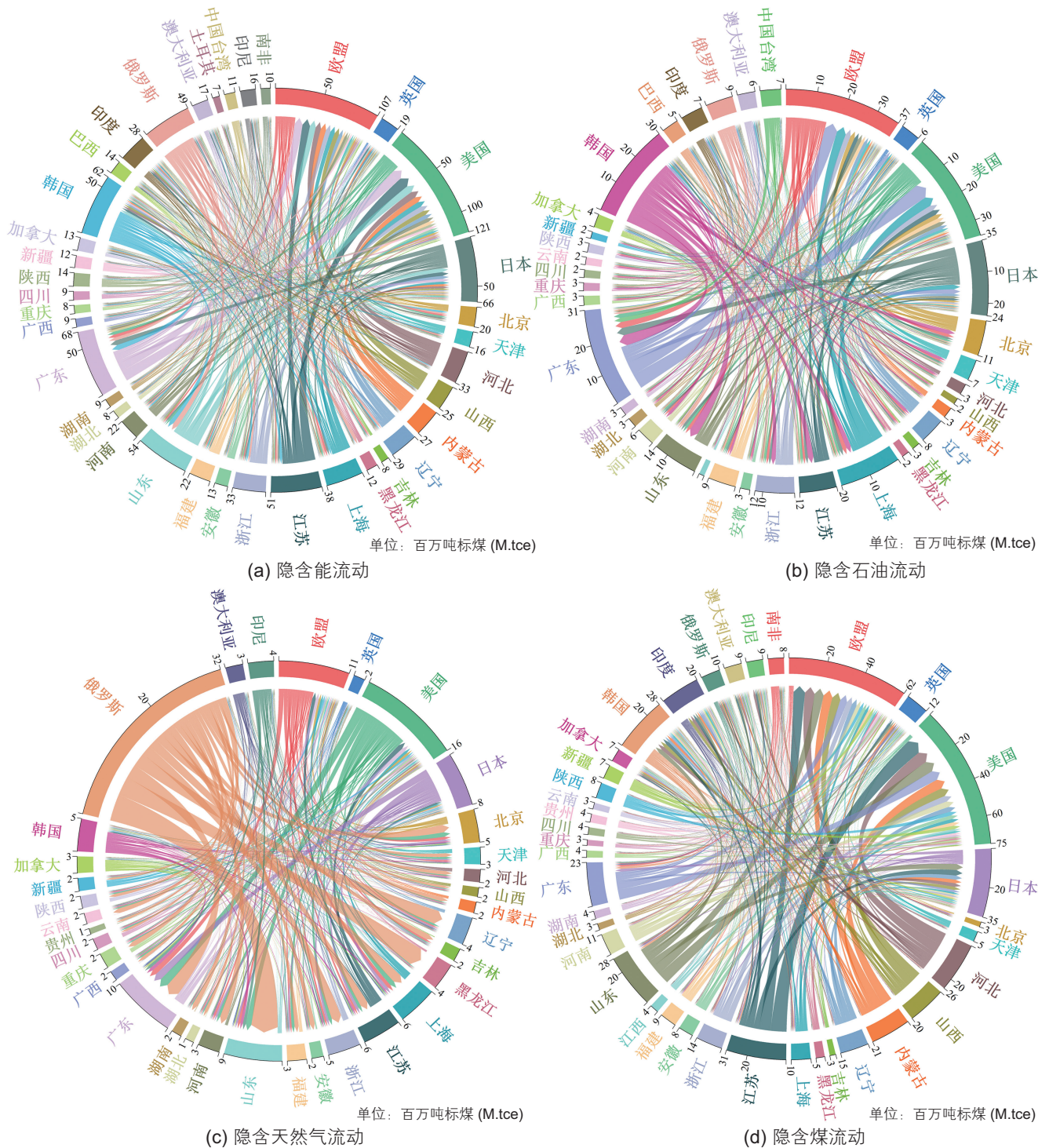


图4 中国省区与世界主要经济体间的隐含能流动
Fig. 4 Embodied energy flows between Chinese provinces and other economies

入省区。

2.3 经济内循环中的隐含能流动

中国省区间隐含能流动情况如图5所示,可以看出,省区间能源生产消费存在空间错位情况,河北、山西、内蒙古和江苏是省际间主要的隐含能出口

来源地,浙江、广东、河南和重庆是主要的隐含能进口目的地。其中,山西到湖北的隐含能净流量为12.43 M.tce、河北到浙江的净流量为9.71 M.tce、内蒙古到湖北、浙江和重庆的净流量分别为9.17 M.tce、8.80 M.tce和7.99 M.tce。区域间隐含能流动主要从黄河中游地区(山西、内蒙古)、北方沿海地区(河北、

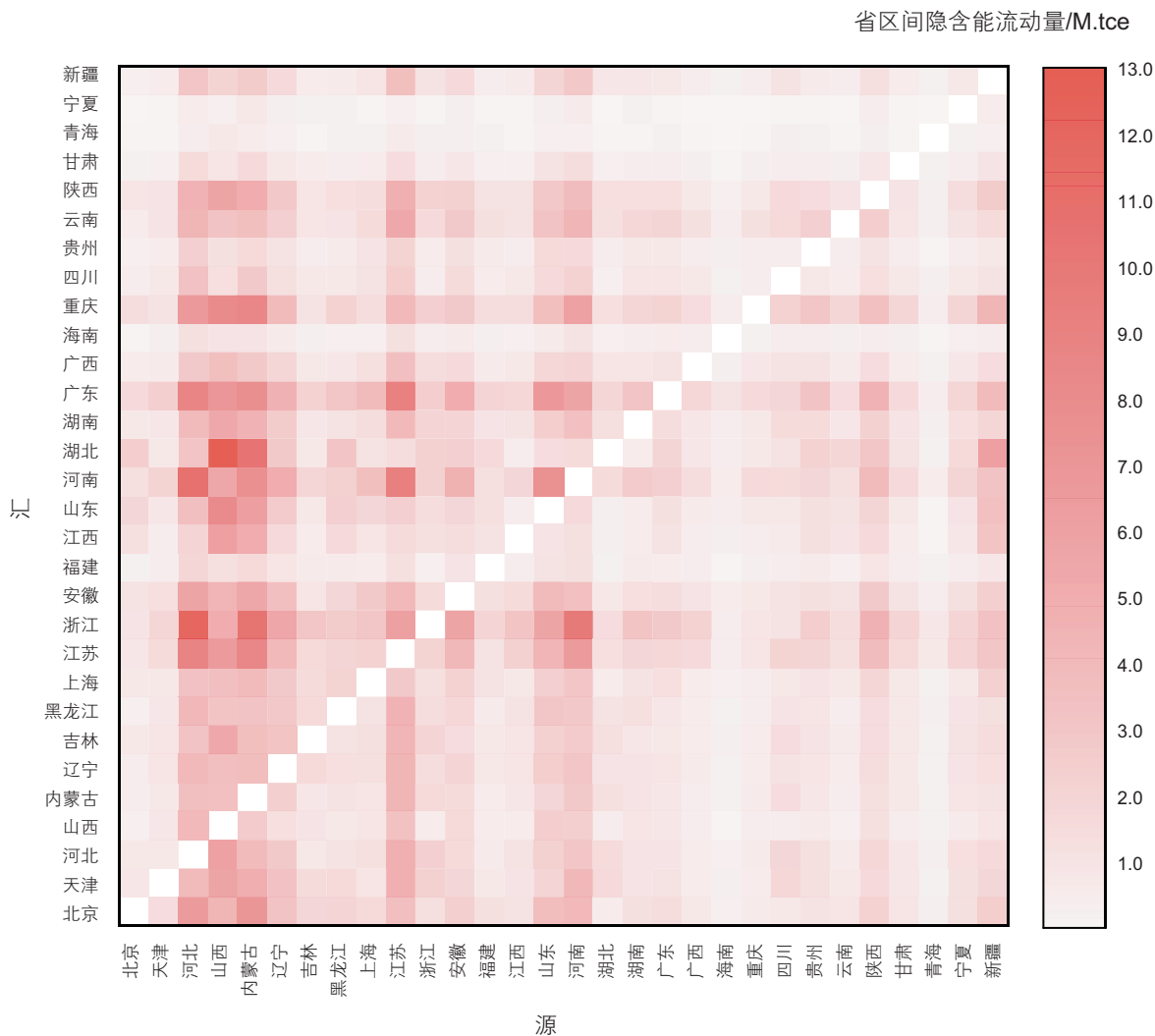


图5 省区间隐含能流动情况
Fig. 5 Embodied energy flows between regions in China

山东)流向东部沿海地区(江苏、浙江)和南部沿海地区(广东)。

分能源种类来看,中国省区间隐含石油、天然气和煤的流动量和流动路径存在很大差异。具体而言,隐含煤具有绝对的统治地位,占省区间隐含能流动总量的78.07%,隐含石油和隐含天然气占隐含能总量的比重分别为16.37%和5.56%。具体而言,省区间隐含煤贸易总量达11.30亿吨标煤,在中国能源消费中起着重要作用。其中,贸易量较大的省区主要集中在东部沿海地区、南部沿海地区、东北地区以及黄河中游地区。综合省区间输入输出量,上海到广州、安徽和河南的净流动量较大,其数值分别为2.02 M.tce、1.64 M.tce和1.38 M.tce,如表1所示。

省区间隐含石油和隐含天然气的流动量分别为2.37和0.80亿吨标煤。其中,对于隐含石油流动而

言,上海、辽宁和江苏是主要的隐含石油出口来源地,广东、河南和浙江是主要的隐含石油进口目的地;对于隐含天然气流动而言,北京和新疆是主要的隐含天然气出口来源地,长江中游地区(湖北、江西)、南部沿海地区(广东)和北方沿海地区(山东)是主要的隐含天然气进口目的地。

2.4 隐含能贸易对能耗双控的影响分析

基于省区间隐含能流动及省区与世界其它经济体隐含能流动情况,按照国内贸易和国际贸易对各省区能耗双控的影响展开研究,进一步分析各省区能源消费总量和强度的内在差异。

2.4.1 省际贸易对能耗双控的影响

图6展示中国各省区隐含能贸易对其能源消费总量和强度的影响程度。以原点为中心,将图6划分为

表 1 2015年中国省际间隐含能净流动情况

Table 1 Net embodied energy flows between regions in China in 2015

隐含石油流动			隐含天然气流动			隐含煤流动		
排名	流向	流量/M.tce	排名	流向	流量/M.tce	排名	流向	流量/M.tce
1	上海→广东	2.02	1	北京→湖北	1.49	1	山西→湖北	12.00
2	上海→安徽	1.64	2	北京→山东	0.82	2	河北→浙江	9.76
3	上海→河南	1.38	3	北京→江西	0.73	3	内蒙古→湖北	9.14
4	辽宁→广东	1.32	4	北京→重庆	0.67	4	内蒙古→浙江	8.81
5	上海→浙江	1.26	5	新疆→浙江	0.61	5	内蒙古→重庆	7.85
6	江苏→广东	0.97	6	新疆→湖北	0.52	6	山西→重庆	7.54
7	辽宁→安徽	0.96	7	新疆→江苏	0.50	7	河北→河南	7.45
8	辽宁→河南	0.92	8	新疆→广东	0.47	8	河北→广东	7.16
9	辽宁→浙江	0.91	9	江苏→广东	0.46	9	河南→浙江	6.99
10	上海→江苏	0.89	10	北京→广东	0.40	10	内蒙古→北京	6.61

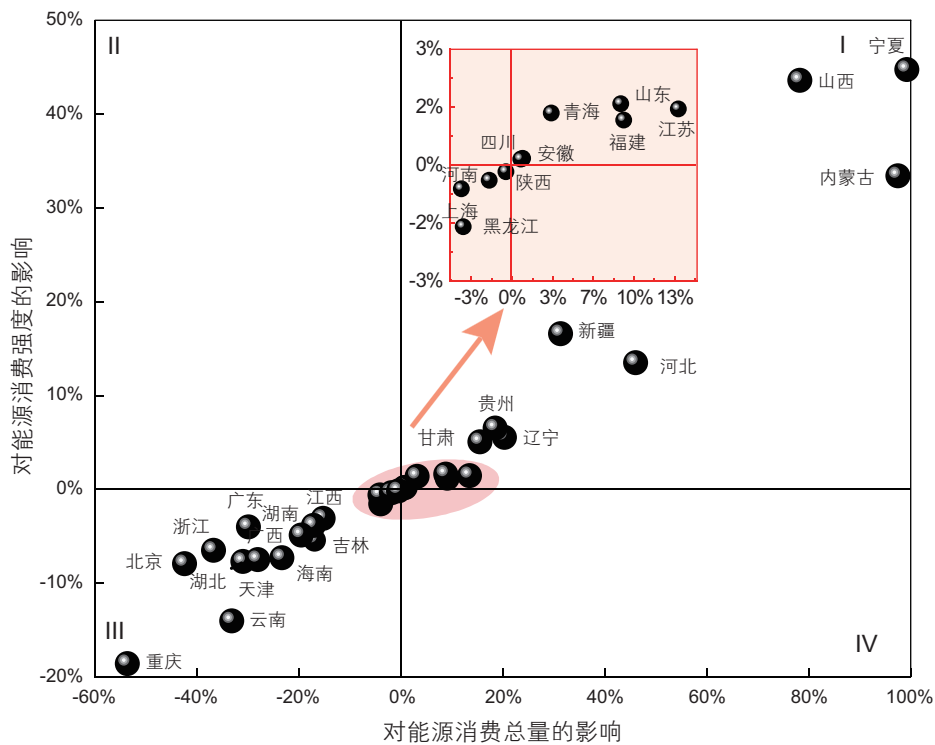


图 6 省际贸易对能耗双控的影响

Fig. 6 Impact of domestic trade on energy consumption and intensity

四个象限。其中，对于第一象限的省区，省际贸易对其能源消费总量和强度的影响均为正，即隐含能贸易对其能耗具有增加作用，因此可称之为“双增”省区；

对于第三象限的省区，省际贸易对其能源消费总量和强度的影响均为负，即隐含能贸易对其能耗具有减小作用，因此可称之为“双减”省区。距离原点越近，

表明贸易对其能耗双控的影响越小。整体而言，“双增”省区与“双减”省区在数量上基本持平且多数省区位于原点附近，贸易对其能源消费总量的影响不超过 $\pm 20\%$ ，对能源消费强度的影响不超过 $\pm 10\%$ 。在“双增”省区中，省际贸易对具备能源资源禀赋(内蒙古、宁夏、山西和新疆)和工业发达(河北)省区的影响更大，这意味着省际贸易是上述省区能源消费总量和强度高的关键原因。在“双减”省区中，各省区通过省际贸易进口高耗能产品进而降低本地能源消费总量和强度，其中又以重庆和云南的“双减”作用更强。

2.4.2 国际贸易对能耗双控的影响

图7展示各省区国际贸易对其能源消费总量和强度的影响程度。整体而言，只有北京、吉林、广西、重庆和云南五个省区属于“双减”省区(位于第三象限)，其余省区均属于“双增”省区(第一象限)。国际贸易对多数省区能耗双控的影响为正向作用，意味着这些省区通过国际贸易出口了大量高耗能产品，加重本地资源使用压力。其中，与省际贸易影响类似，能源资源禀赋较好的省区和工业发达省区受到的影响最大。国际贸易同样增加其能源消费总量和强度，这些省区在推进能耗双控工作过程中，仍需注重国际贸易

产生的影响。此外，国际贸易对江苏省能源消费总量的影响达 21.06%，而能源强度变化仅为 2.27%，国际贸易对二者的影响差异较大。这表明江苏省隐含能出口量较大但单位贸易产品的能耗较低，这与其以轻工业为主，外贸增速较高的经济特征有较大关联。此外，在“双减”省区中，北京通过国际贸易极大降低了其能源消费总量和强度。

相比之下，国际贸易对各省区能源消费总量和强度的影响程度均小于省际贸易对其影响，省区能耗双控工作需重视省际贸易对其能耗指标的影响。综合国际国内贸易对各省区能源双控的影响，中国各省区大致可分为三大类：第一类省区包括：山西、宁夏、内蒙古、新疆和河北等“双增”省区，这类省区的特征为通过国内国际贸易为其它地区、国家提供了大量高耗能产品，本地完全能源消费总量(强度)小于本地能源直接消耗总量(强度)。其中，山西、宁夏和内蒙古受到的影响最大；第二类省区包括：北京、重庆、吉林、云南和广西等“双减”省区，该类省区的特征为通过国内国际进口降低本地能源使用压力，本地完全能源消耗总量(强度)大于本地能源直接消费总量(强度)，其经济结构偏向与第二产业和第三产业；第三类

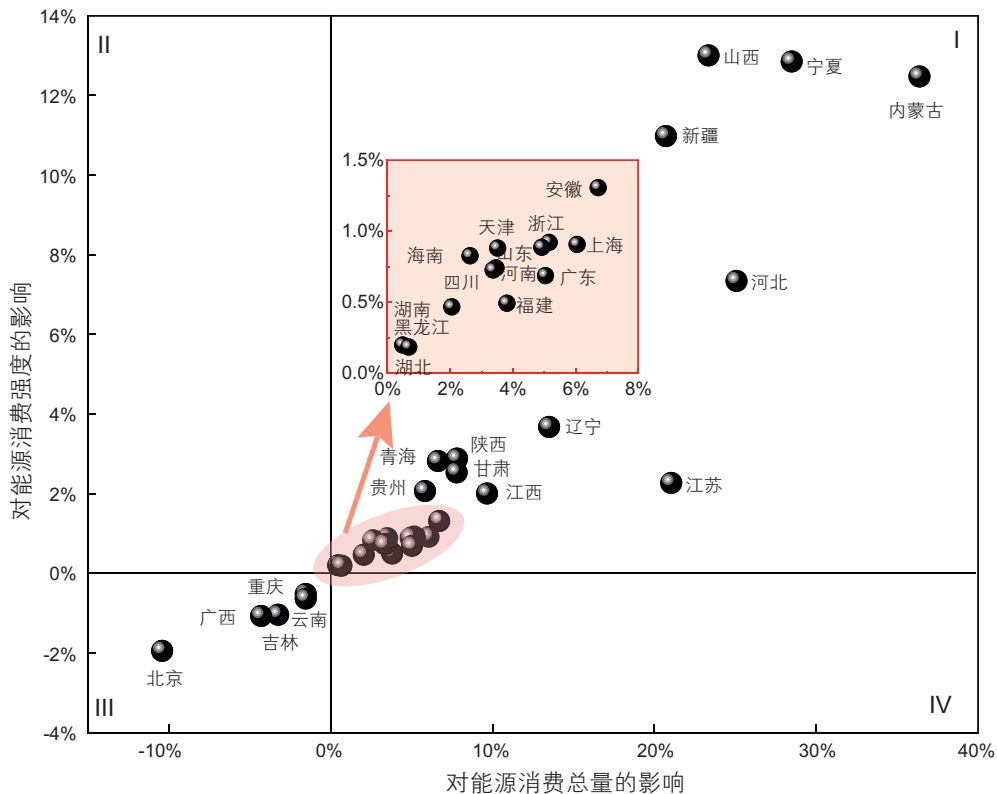


图7 国际贸易对能耗双控的影响

Fig. 7 Impact of international trade on energy consumption and intensity

省区的能耗双控受国内国际贸易影响程度较小, 主要包括: 甘肃、贵州、青海、河南和陕西等省区, 这类省区国内国际贸易导致能源消费总量(强度)的变化不超过 $\pm 10\%$ ($\pm 3\%$), 直接能源消费总量(强度)与完全能源消费总量(强度)基本维持平衡。

3 结论与建议

本文通过构建嵌套型投入产出模型, 对中国经济双循环中各省区隐含能消费规模、结构进行量化研究, 分析省区间、省区与世界主要经济体间的隐含能流动, 进一步讨论隐含能贸易对省区能源消费总量和强度的影响。综上研究, 本文得出以下主要结论: (1) 中国省区化石能源消费特征存在异质性, 国内总产值或人口较大的省区隐含能消费总量相对较高。同时, 人均隐含能消费量与省区人均国内生产总值显著相关。(2) 经济外循环过程中, 内陆省区隐含能流动以煤炭为主, 广东、上海和浙江等沿海地区以油气为主。美国、欧盟、日本、韩国以及俄罗斯是主要的隐含能贸易关系国。(3) 经济内循环过程中, 省区消费侧能源供需存在空间错位问题, 区域间隐含能流动主要从黄河中游地区、北方沿海地区流向东部和南部沿海地区。(4) 省际贸易对省区能耗双控的影响较大且省区间存在异质性。完全需求视角下, 隐含能贸易导致山西、宁夏和内蒙古等省区能源消费总量和强度显著提升, 而北京、重庆和吉林等省区则显著降低。

基于以上结论, 提出如下建议: (1) 从隐含能消费规模和结构角度看, 隐含煤具有绝对的统治地位, 隐含煤对能源转型和减污降碳有很大影响。因此, 对于人均隐含煤消费较大的省区, 如: 天津、内蒙古、宁夏和山西, 严格能耗强度控制, 着重提高能源利用效

率, 加快化石能源退出步伐, 大力发展可再生能源。同时, 在保障社会经济发展的前提下, 合理限制煤制品、煤化工产品消费规模, 加速对煤化工企业进行提质增效减排改造。(2) 从国际贸易的利益来看, 隐含能进口可有效降低本地能源使用压力和能耗指标。要想如期实现“碳中和”目标, 除了技术创新、能源转型、产业结构升级等路径外, 优化省区国际贸易结构同样是可选择的路径之一。具体来说, 对于隐含能出口较大省区, 如: 上海、广东、河北、江苏等省区, 需实施贸易管制, 减少高能耗产品和服务出口。同时, 以系统观念为指导, 统筹推进能源与环保协同管控, 研究制定行业节能降碳实施办法, 适当扩大高能耗产品和服务进口, 降低国内能源直接使用压力。(3) 从省际贸易角度来看, 部分省区能源生产消费错位严重, 能源转型政策需“因地制宜”。针对当前我国省区间隐含能流动的空间格局, 需进一步考虑各省区能源资源禀赋和消费需求, 统筹推进能耗双控工作和区域协调发展。其中, 黄河中游地区、北方沿海地区以及南部沿海地区能源供需空间错配问题突出, 有必要在保障山西、内蒙古和河南等黄河中游地区能源供给能力的同时, 协同推进广东、浙江等沿海地区本地能源深度开发利用, 充分发挥需求侧拉动作用, 优化省区间隐含能流动格局。(4) 从能耗双控差别化管理出发, 省际贸易隐含能流动对省区能源消费总量和强度影响较大且省区间存在异质性, 需重点关注两类省区。一是针对山西、宁夏和黑龙江等“双增”省区, 综合考虑其隐含能净出口角色, 从隐含能供给源降低能源消费强度, 着力提升能源利用效率, 发展节能降耗技术, 优化隐含能贸易结构; 二是北京、重庆和吉林等“双减”省区, 考虑到隐含能净进口角色, 需从需求侧引导能源要素合理流动和高效配置, 鼓励从高效率能源供应省区进口产品, 倒逼产业结构调整。

参考文献

- [1] 范英, 衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界, 2021, 37(08): 95-105. [FAN Y, YI B W. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. Journal of Management World, 2021, 37(08): 95-105.]
- [2] CHEN J, ZHOU W, YANG H. Is embodied energy a better starting point for solving energy security issues?—Based on an overview of embodied energy-related research[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 1-22.
- [3] SHEPARD J U, PRATSON L F. Hybrid input-output analysis of embodied energy security[J]. Applied energy, 2020, 279: 1-17.
- [4] 申俊, 孙涵, 成金华. 中国城镇居民完全能源消费的空间计量分析[J]. 资源科学, 2016, 38(03): 439-449. [SHEN J, SUN H, CHENG J H. Spatial econometric analysis of the total energy consumption of urban residents in China[J]. Resources Science, 2016, 38(3): 0439-0449].
- [5] 张忠杰, 邓光耀, 颜为民. 全球视角下中国隐含能贸易的核算和结构分解分析[J]. 生态经济, 2017, 33(07): 31-36. [ZHANG Z J, DENG G Y, YAN W M. Accounting and structure decomposition analysis of the China's embodied energy trade: based on global

- perspective[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(07): 31–36.]
- [6] Liu H, Xi Y, Guo J, et al. Energy embodied in the international trade of China: An energy input–output analysis[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(8): 3957–3964.
- [7] 薛庆, 刘明明, 程承, 等. 中国天然气进口规模与结构仿真研究[J]. *石油科学通报*, 2021, 6(02): 315–328. [XUE Q, LIU M M, CHENG C, et al. Simulation study on the scale and structure of China’s natural gas import[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(02): 315–328.]
- [8] 刘祥霞, 黄兴年. 中国进出口贸易中的隐含能估算和环境分析——基于修正的投入产出法[J]. *统计与信息论坛*, 2015, 30(02): 54–59. [LIU X X, HUANG X N. Accounting embodied energy and environmental analysis in China’s import and export: Based on the correction method of Input-Output[J]. *Statistics & Information Forum*, 2015, 30(02): 54–59.]
- [9] 冯翠洋, 唐旭, 金艺, 等. 中国隐含石油出口变动的产业间路径分解研究[J]. *石油科学通报*, 2017, 2(04): 546–556. [FENG C Y, TANG X, JIN Y, et al. Inter-industry path decomposition of embodied oil export changes in China. [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(04): 546–556.]
- [10] 刘会政, 李雪珊. 我国对外贸易隐含能的测算及分析——基于MRIO模型的实证研究[J]. *国际商务(对外经济贸易大学学报)*, 2017(02): 38–48. [LIU H Z, LI X S. Measurement and analysis on embodied energy in China’s foreign trade: Empirical analysis based on MRIO model[J]. *International Business*, 2017(02): 38–48.]
- [11] 郭珊, 韩梦瑶, 杨玉浦. 中国省际隐含能源流动及能效冗余解析[J]. *资源科学*, 2021, 43(04): 733–744. [GUO S, HAN M Y, YANG Y P. Multiregional embodied energy flows and energy efficiency redundancy in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 733–744.]
- [12] DAVIS S J, CALDEIRA K. Consumption-based accounting of CO₂ emissions[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2010, 107(12): 5687–5692.
- [13] PETERS G P, MINX J C, WEBER C L, et al. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2011, 108(21): 8903–8908.
- [14] WTO. World trade statistical review 2022[R]. Switzerland: World Trade Organization, 2022.
- [15] 夏权智, 吴小芳, 罗京. 中国中间品和最终品贸易中的隐含能源[J]. *环境经济研究*, 2020, 5(03): 133–151. [XIA Q Z, WU X F, LUO J. Energy embodied in China’s intermediate and final goods trade[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2020, 5(03): 133–151.]
- [16] 郭朝先, 胡雨朦. 全球生产分工体系下隐含能源跨境转移研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(12): 26–35. [GUO C X, HU Y M. Research on the cross-border transfer of embodied energy under global production division system[J]. *China population, resources and environment*, 2019, 29(12): 26–35.]
- [17] LIU Z, GENG Y, LINDNER S, et al. Embodied energy use in China’s industrial sectors[J]. *Energy policy*, 2012, 49: 751–758.
- [18] YANG J, CHEN B. Integrated evaluation of embodied energy, greenhouse gas emission and economic performance of a typical wind farm in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27: 559–568.
- [19] 李虹, 王帅. 中国行业隐含能源消费及其强度的变动与影响因素[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(05): 47–57. [LI H, WANG S. Changes and influencing factors of embodied energy consumption and intensity in China’s industries[J]. *China population, resources and environment*, 2021, 31(05): 47–57.]
- [20] 高鹏, 岳书敬. 中国产业部门全要素隐含能源效率的测度研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2020, 37(11): 61–80. [GAO P, YUE S J. Measurement of total-factor embodied energy efficiency of China’s industry sectors[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2020, 37(11): 61–80.]
- [21] 谢建国, 姜珮珊. 中国进出口贸易隐含能源消耗的测算与分解——基于投入产出模型的分析[J]. *经济学(季刊)*, 2014, 13(04): 1365–1392. [XIE J G, JIANG P S. Embodied energy in international trade of China: Calculation and decomposition[J]. *China Economic Quarterly*, 2014, 13(04): 1365–1392.]
- [22] 刘增明, 黄晓勇, 李梦洋. 中间产品国际贸易内涵能源的核算与国际比较[J]. *管理世界*, 2021, 37(12): 109–128. [LIU Z M, HUANG X Y, LI M Y. Accounting and international comparison of energy embodied in international intermediate trade[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(12): 109–128.]
- [23] 崔连标, 韩建宇, 孙加森. 全球化背景下的国际贸易隐含能源研究[J]. *国际贸易问题*, 2014(05): 113–123. [CUI L B, HAN J Y, SUN J S. Study on embodied energy in international trade against globalization[J]. *Journal of International Trade*, 2014(05): 113–123.]
- [24] 靳天赐, 朱俏俏, 李征帛. 基于多区域投入产出模型的新疆家庭能源足迹研究[J]. *煤炭经济研究*, 2022, 42(08): 4–12. [JIN T C, ZHU Q Q, LI Z B. Household energy footprint in Xinjiang based on multi-regional input-output model[J]. *Coal Economic Research*, 2022, 42(08): 4–12.]
- [25] LAM K L, KENWAY S J, LANE J L, et al. Energy intensity and embodied energy flow in Australia: An input-output analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 357–368.
- [26] JIANG M, BEHRENS P, WANG T, et al. Provincial and sector-level material footprints in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(52): 26 484–26 490.
- [27] MOREAU V, VUILLE F. Decoupling energy use and economic growth: Counter evidence from structural effects and embodied energy

- in trade[J]. *Applied energy*, 2018, 215: 54–62.
- [28] CHEN B, LI J S, WU X F, et al. Global energy flows embodied in international trade: A combination of environmentally extended input-output analysis and complex network analysis[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 98–107.
- [29] 王雪成, 唐旭, 张宝生, 等. 中国隐含能出口的结构优化研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(05): 1172–1183. [WANG X C, TANG X, ZHANG B S, et al. Structure optimization of China's embodied energy exports[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2017, 37(05): 1172–1183.]
- [30] 章辉, 蒋瑛. 基于方法改进后的中国对外贸易隐含能测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(10): 94–102. [ZHANG H, JIANG Y. Embodied energy calculation of China's foreign trade based on the improved method[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(10): 94–102.]
- [31] 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, 39(01): 94–104. [WEI T, PENG S J. Embodied energy and carbon emissions transferred in international trade using a MRIO model[J]. *Resources Science*, 2017, 39(1): 94–104.]
- [32] 齐晔, 李惠民, 徐明. 中国进出口贸易中的隐含能估算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008(03): 69–75. [QI Y, LI H M, XU M. Accounting embodied energy in import and export in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2008(03): 69–75.]
- [33] 洪思扬, 王红瑞, 梁俊芬, 等. 京津冀地区水—能源利用效率与资源压力核算[J]. *水资源保护*, 2021, 37(05): 102–111. [HONG S Y, WANG H R, LIANG J F, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(05): 102–111.]
- [34] LIU B, ZHENG X, ZHANG Q, et al. Drivers of global metal footprint during 1995–2013[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120467.
- [35] YANG L, WANG Y, WANG R, et al. Environmental-social-economic footprints of consumption and trade in the Asia-Pacific region[J]. *Nature communications*, 2020, 11(1): 1–9.
- [36] JIANG Y, TANG X, ZHAO X, et al. Mitigation strategies of air pollution: Case studies of China and the United States from a consumption perspective[J]. *Environmental Science & Policy*, 2022, 128: 24–34.
- [37] LUO P, TANG X, DOU X, et al. Uncovering the socioeconomic impacts of China's power system decarbonization[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 99: 107015.
- [38] 姜钰卿, 唐旭, 任凯鹏, 等. 基于双层嵌套SDA的中国减污降碳驱动因素研究[J]. *系统工程理论与实践*. 2022, 42(12): 3294–3304. [JIANG Y Y, TANG X, REN K P, et al. Research on the drivers of pollution and carbon reduction in China based on double-layer nested SDA[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2022, 42(12): 3294–3304.]
- [39] 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): 1–14.
- [40] STADLER K, WOOD R, BULAVSKAYA T, et al. EXIOBASE 3: Developing a time series of detailed environmentally extended multi-regional input - output tables[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(3): 502–515.

(编辑 付娟娟)