

引用格式: 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(1): 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]. DOI: 10.18402/resci.2017.01.10

# 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

韦韬<sup>1,2</sup>, 彭水军<sup>2</sup>

(1. 湖北民族学院经济与管理学院, 恩施 445000; 2. 厦门大学经济学院, 厦门 361005)

**摘要:** 随着全球生产链的形成以及生产与消费活动的跨国界分隔, 国际贸易的快速发展对各国的能源消耗和碳排放会产生重要影响。本文运用 MRIO 模型测算了 1995-2009 年国际贸易中的隐含能源和碳排放。结果表明: ①研究期间中国除燃气和新能源外均属于隐含能源净出口国, 生产侧排放增加远超过消费侧排放增加, 且前者增加的 40% 是为了满足国外需求, 而消费侧排放增加仅 16% 来源于进口的增加; ②研究期间主要发达经济体生产侧能耗和碳排放几乎没有变化, 但消费侧能耗和碳排放却在逐渐增加, 属于隐含能源和碳排放净进口国; 新兴经济体的生产侧和消费侧能耗分别增加了 81.7% 和 81.3%, 且发达经济体消费引致的新兴经济体隐含能源和碳排放远大于后者消费引致的前者隐含能源和碳排放; ③主要发达经济体的人均消费侧能耗和碳排放都远高于新兴经济体, 而中国的人均消费侧能耗和碳排放水平都较低。

**关键词:** 隐含能源; 碳排放转移; 多区域投入产出模型; 消费者责任

DOI: 10.18402/resci.2017.01.10

## 1 引言

近年来, 不断深化的国际分工导致国际贸易的快速增长, 货物和服务的生产链不再仅限于一两个国家, 使生产与最终消费在空间上分隔, 从而一国可以通过进口碳密集型产品替代国内生产来减少其能耗和碳排放(本文仅指生产中使用燃料产生的 CO<sub>2</sub>)。因此, 在考察各国的排放责任时, 有必要考虑国际贸易引起的能耗和碳排放转移, 让进口国消费者承担部分责任。但在当前环境核算体系和多边减排框架下, 大多只关注一国领土范围内的生产侧能耗/排放(Production-based Energy/Emissions)的核算, 即一国的生产活动(不管为本国还是为外国的最终需求生产)所消耗的所有能源和产生的碳排放, 这种核算体系意味着出口国(生产国)应该对出口生产的能源使用对环境的影响和温室气体排放

负责(生产者责任); 相反, 消费侧能耗/排放(Consumption-based Energy/Emissions)则是核算一国最终需求引致消耗的所有能源和产生的碳排放(不管生产发生在国内还是国外)都应归为该国的环境责任(消费者责任), 该核算体系考虑到了全球生产链中使用的能源以及相关的碳排放, 认为应该分配这些环境因素到最终的消费者, 显然, 这对中国等出口大国在减排责任分担中更公平。而考察有关这些产品的环境隐含物的准确信息是科学讨论消费者责任和制定政策的基础<sup>[1]</sup>。

通常, 追踪产品消费在整个全球生产链中对环境的影响, 主要有两种方法: 一种是生命周期评估(LCA), 另一种是投入-产出分析(IOA)。LCA 常常从微观层面(产品、家庭或企业)进行考察, 但由于其庞大的数据要求, 此方法尚未广泛用于评估一国

收稿日期: 2016-08-01; 修订日期: 2016-10-24

基金项目: 国家社科基金重大项目(13&ZD167); 国家自科基金面上项目(71373218); 中央高校基本科研业务费专项资金(20720171001)。

作者简介: 韦韬, 女(壮族), 湖北恩施人, 博士生, 主要研究方向为国际贸易与气候变化。E-mail: weitao1114@163.com

通讯作者: 彭水军, E-mail: shuijun\_peng@xmu.edu.cn

2017年1月

消费对环境的影响。并且这种自下而上的方法不太适用于宏观经济层面的研究,譬如存在系统边界模糊以及由此产生的不一致性和重复计算问题。在国家和部门层面上,投入-产出方法把经济作为一个整体明确界定了系统边界,因此,能对贸易隐含要素的全球转移进行一致分析。该方法又包含单区域投入产出分析(Single Region Input-Output, SRIO)、双边贸易投入产出分析(Bilateral Trade Input-Output, BTIO)与多区域投入产出分析(Multi-Regional Input-Output, MRIO)三种模型框架,其关键区别在于采用的系统边界、技术假设和模型的复杂性不同。囿于数据的缺乏,早期研究多采用单区域投入产出模型研究一国贸易隐含能源和碳排放<sup>[2-5]</sup>,该模型将其他所有国家作为一个整体,没有区分中间产品来源地,并假设国内外采用相同生产技术;而双边投入产出模型按贸易伙伴进行分解,并采用不同的能耗及排放因子,从而放宽了“国内技术假设”<sup>[6,7]</sup>,但在这两种模型中,全部进口产品都被分配到最终消费,因此无法刻画出全球生产网络中各国各部门之间的产业关联和贸易多向反馈效应,导致测算结果不能准确反映一国最终消费对环境造成的影响。相反,多区域投入产出模型考虑了不同国家的技术和经济结构,全面刻画了各国各部门之间的完整生产链,并区分了进口产品的不同流向,因此,该模型已成为测算消费侧能耗和碳排放最有效的方法。且随着多国投入产出数据库的开发和完善,越来越多的学者运用多区域投入产出模型来测算隐含碳排放<sup>[8-11]</sup>。但全球碳排放的增加主要来自生产过程中能源的大量使用,因此有必要考察货物和服务生产过程中的直接和间接能源消耗,而目前国内在全球规模上应用多区域投入产出模型评估国际贸易隐含能源的相关研究很少。

为此,本文在国内外已有文献的基础上,基于世界投入产出数据库的数据(World Input-Output Database, WIOD)测算了国际贸易中隐含的能源和碳排放,相比前人研究,本文在四方面进行了扩展和深入分析:①从数学结构上比较了SRIO、BTIO与MRIO模型三者基于消费者角度测算环境隐含物的差异所在,并总结了各自的优劣势;②基于最终需求的视角,采用多区域投入产出模型测算了一组新

兴经济体国家的贸易隐含能源和碳排放,揭示出发达经济体通过国际贸易转移了大量能耗和碳排放到新兴经济体的事实;③除了从总量、消费结构来验证新兴经济体存在“国内生产、国外消费”格局从而应改善传统的基于生产的环境资源核算原则之外,进一步分析了三组经济体的人均能耗和碳排放水平;④运用WIOD数据库的数据进行分析,克服了以往研究在运用多区域投入产出方法分析时数据的非连续性和非一致性,有利于趋势分析。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 多区域投入产出模型的构建与分解

为了刻画出SRIO、BTIO与MRIO模型在测算消费侧能耗和碳排放上的差异<sup>[12]</sup>,本文假设世界包含 $n$ 个国家(地区),每个国家有 $k$ 个部门,各部门的产品可以直接消费或作为中间投入,各国出口中间产品和最终产品,则 $n$ 国生产和贸易系统可以写成一个分块矩阵形式的MRIO模型:

$$X = AX + Y \quad (1)$$

式中 $X$ 为总产出矩阵; $X_{ir}$ 为 $i$ 国直接或间接满足 $r$ 国需求的部门产出矩阵,则向量 $X_i = \sum_r X_{ir}$ 为 $i$ 国的总产出; $A$ 为中间投入系数矩阵; $A_{ii}$ 为 $i$ 国单位产出对 $i$ 国中间产品的需求矩阵; $A_{ir}$ 为 $r$ 国单位产出对 $i$ 国中间产品的需求矩阵,反应了出口国 $i$ 与进口国 $r$ 之间的行业间贸易; $Y$ 为最终需求矩阵; $Y_{ii}$ 为 $i$ 国对 $i$ 国产品的最终需求矩阵; $Y_{ir}$ 为 $r$ 国对 $i$ 国产品的最终需求矩阵,则向量 $Y_i = \sum_r Y_{ir}$ 为 $i$ 国对最终产品的总需求。

以国家1为例来说明一国生产侧和消费侧能耗的测算方法,令 $F_i$ 为 $i$ 国的能源强度(或碳排放强度,本文以能源为例)矩阵,则国家1的生产侧能耗矩阵 $EP$ 可以写成:

$$\begin{aligned} EP_1 &= F_1 X_1 = F_1 (X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n}) \\ &= F_1 L_{11} [Y_{11} + \sum_{i \neq 1} (Y_{1i} + A_{1i} X_i)] \\ &= F_1 L_{11} (Y_{11} + \sum_{i \neq 1} E_{1i}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $L_{ii} = (I - A_{ii})^{-1}$ 为 $i$ 国的里昂惕夫逆矩阵; $E_{1i}$ 为国家1对国家 $i$ 的出口(包含最终产品和中间产品)矩阵。由公式(2)可以看出,采用三种模型测算一国的生产侧能耗的结果相同,因此若只需测算一国

的生产侧能耗,可以选用更直观易懂的SRIO模型。

类似地,由公式(1)可以推出MRIO模型中国家1的消费侧能耗矩阵  $EC_1^{MRIO}$  为:

$$EC_1^{MRIO} = \sum_i F_i X_{i1} = F_1 L_{11} Y_{11} + \sum_{i \neq 1} F_i L_{ii} (Y_{i1} + A_{i1} X_{i1}) + F_1 L_{11} \sum_{i \neq 1} A_{i1} X_{i1} + \sum_{i \neq 1} F_i L_{ii} \sum_{r \neq i} A_{ir} X_{r1} \quad (3)$$

式中右边的第一项表示国家1消费国产最终产品消耗的能源;第二项表示国家1消费从国家2至*n*直接进口的产品所消耗的能源;第三项表示国家1的进口引起中间产品再出口到国家2至*n*消耗的能源,即“反馈性出口效应”;第四项表示国家1的最终需求引起国家2至*n*之间的相互出口所消耗的能源,即“间接贸易效应”,后两种效应恰好反映出了各国各部门之间的相互联系。

基于SRIO模型评估消费侧能耗,学者们一般采用生产侧能耗减去出口隐含能源,再加上进口隐含能源得到。后两者之差即表示*i*国通过产品提供给外国消费的那部分能源,称为贸易隐含能源/碳排放余额(Balance of Energy/Emissions Embodied in Trade, BEET)。此时,国家1的出口隐含能源矩阵  $EEE$  与进口隐含能源矩阵  $E EI$  可以分别表示为:

$$EEE_1^{SRIO} = F_1 L_{11} \sum_{i \neq 1} E_{i1} = F_1 L_{11} \sum_{i \neq 1} (Y_{i1} + A_{i1} X_{i1}) \quad (4)$$

$$E EI_1^{SRIO} = F_1 L_{11} \sum_{i \neq 1} E_{i1} = F_1 L_{11} \sum_{i \neq 1} (Y_{i1} + A_{i1} X_{i1}) \quad (5)$$

类似地,采用BTIO模型测算的国家1的出口隐含能源与SRIO模型的测算结果相同,而进口隐含能源矩阵  $E EI$  可以表示为:

$$E EI_1^{BTIO} = \sum_{i \neq 1} F_i L_{ii} E_{i1} = \sum_{i \neq 1} F_i L_{ii} (Y_{i1} + A_{i1} X_{i1}) \quad (6)$$

由公式(2)、公式(4)-公式(6)可以推出利用SRIO和BTIO模型估计的国家1的消费侧能耗矩阵  $EC$  为:

$$EC_1^{SRIO} = EP_1 - EEE_1^{SRIO} + E EI_1^{SRIO} = F_1 L_{11} Y_{11} + F_1 L_{11} \sum_{i \neq 1} (Y_{i1} + A_{i1} X_{i1}) \quad (7)$$

$$EC_1^{BTIO} = EP_1 - EEE_1^{BTIO} + E EI_1^{BTIO} = F_1 L_{11} Y_{11} + \sum_{i \neq 1} F_i L_{ii} (Y_{i1} + A_{i1} X_{i1}) \quad (8)$$

由公式(7)、公式(8)比较可知,BTIO模型比基

于SRIO模型估计的消费侧能耗与进口隐含能源更准确。因此接下来比较基于BTIO与MRIO两类模型所估计的消费侧能耗差异,由公式(3)、公式(8)有:

$$EC_1^{BTIO} - EC_1^{MRIO} = \sum_{i \neq 1} F_i L_{ii} A_{i1} (X_{i1} - X_{i1}) - F_1 L_{11} \sum_{i \neq 1} A_{i1} X_{i1} - \sum_{i \neq 1} F_i L_{ii} \sum_{r \neq i} A_{ir} X_{r1} \quad (9)$$

由公式(7)和公式(8)可以看出,采用SRIO和BTIO模型测算一国消费侧能耗最大的优势在于数据要求低,前者只需要国内投入产出数据、贸易和能源数据即可,后者需要补充贸易伙伴国的投入产出数据和双边贸易数据。但二者的缺点在公式(9)中也非常明显,第一,BTIO模型无法考察“反馈性出口效应”和“间接贸易效应”(即公式(9)第二、三项),从而BTIO模型会低估一国的消费侧能耗;第二,如第一项所示,从国外进口的中间产品,其实只有  $X_{i1}$  部分是服务于国内的最终需求,在MRIO模型中完整刻画了这一点,而在BTIO模型中,整个  $X_{i1}$  部分的中间产品进口全部作为服务于国内的最终需求,忽略了其有一部分是用于生产最终产品服务于国外的最终需求,从而BTIO又高估了一国的消费侧能耗。综上,BTIO和MRIO模型的差异大小取决于这两方面效果孰高孰低。

## 2.2 数据来源与处理

本文所需的多区域投入产出表、能源数据和CO<sub>2</sub>排放数据均来源于WIOD数据库<sup>[13]</sup>,该数据库包含40个国家(地区)和一个世界剩余地区(Rest of the World, RoW)的世界投入产出表序列(WIOTs)及环境卫星账户,每个国家(地区)有35个部门,数据年份覆盖1995-2009年。同时,为了简化,本文把WIOD环境账户26小类能源商品按其特性分成煤、原油与原料、石油产品、燃气、新能源与废物、电力与热力六大类。且本文所用数据均平减为2002年的可比价格。各国人口数据来源于联合国历年的《人口统计年鉴》<sup>[14]</sup>,中国台湾地区的人口数据来源于《中国统计年鉴》<sup>[15]</sup>。

## 3 实证结果分析

### 3.1 中国对外贸易中的隐含能源与碳排放转移

#### 3.1.1 中国对外贸易中的隐含能源变化趋势

表1显示了1995-2009年中国不同能源的四种

2017年1月

隐含能源计算结果<sup>1)</sup>。研究期间中国生产侧与消费侧总能耗均呈快速增长趋势,15年间分别增长了1681Mt标煤(149.3%)和1258Mt标煤(134.7%)。其中,生产侧与消费侧耗煤增长了1002Mt标煤(131.2%)和665Mt标煤(109.4%),生产侧与消费侧耗石油产品增长了178Mt标煤(116.8%)和147Mt标煤(108.9%),生产侧与消费侧耗燃气增长了86Mt标煤(284.4%)和126Mt标煤(348.1%),生产侧与消费侧耗电力与热力增长了392Mt标煤(242.1%)和293Mt标煤(210.8%)。很明显,研究期间生产侧能耗与消费侧能耗增幅最大的均表现在燃气和电力与热力两类能源。从生产侧与消费侧能耗结构来看,其消耗都主要集中在煤、石油产品、电力与热力三类能源,生产侧能耗中三者总值平均占比95%左右,研究期间该比值稍有下降(约1%);消费侧能耗中三者总值平均占比92%左右,研究期间该比值下降了约4%,降幅大于生产侧能耗中的比值,说明15年间中国服务国内外最终需求的隐含能源结构几乎未发生变化,而中国最终需求消耗的隐含能源结构有所优化。

从中国进出口隐含能源数据来看,1995-2009年二者的增长幅度远高于生产侧与消费侧能耗的增长,中国出(进)口隐含能源15年间分别增长了668Mt标煤(245Mt标煤)。中国各类生产侧能耗中服务外需(即本文的出口隐含能源)的比重均呈上升趋势,尤其是2001年之后,增幅明显增大,且均于2008年达到各自的峰值后稍有下降。其中,服务外需比重最大的是燃气,从1995年的25.6%上升至2008年的最高值42.2%,其次是原油与原料,比重最小的是新能源与废物。相反,各类消费侧能耗中进口隐含能源的比重呈现出明显不同的特征,其中比重最大的是新能源与废物,研究期间比重增长了近30%(56.5%至86.2%),其次是燃气,比重从37.7%增至57.0%,超过国内对燃气最终需求的一半,进口隐含能源比重最小的是煤,最高仅占国内最终需求的4.8%(2008年)。此外,中国的煤、原油与原料、石油产品、电力与热力属于净出口隐含能源,而燃气、新能源与废物属于净进口隐含能源。

### 3.1.2 中国对外贸易中的碳排放转移变化趋势

图1显示了1995-2009年中国对外贸易中碳排

表1 1995-2009年中国的贸易隐含能源

Table 1 China's energy embodied in international trade from 1995 to 2009		(Mt 标煤)							
年份		1995	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009
煤	生产侧能耗	764	769	770	767	974	1 295	1 535	1 767
	消费侧能耗	608	620	640	634	762	944	1 086	1 273
	出口隐含能源	166	160	146	156	243	386	490	549
	进口隐含能源	10	12	15	23	31	35	41	55
石油产品	生产侧能耗	153	166	193	207	241	286	307	331
	消费侧能耗	135	149	180	194	216	248	265	282
	出口隐含能源	34	34	37	45	67	86	97	125
	进口隐含能源	16	18	24	32	42	49	55	76
燃气	生产侧能耗	30	33	33	39	48	71	98	117
	消费侧能耗	36	40	48	61	78	99	122	162
	出口隐含能源	8	9	8	10	15	25	35	40
	进口隐含能源	14	15	22	31	45	53	59	85
电力与热力	生产侧能耗	162	178	193	231	293	384	491	554
	消费侧能耗	139	154	175	209	252	300	366	433
	出口隐含能源	38	41	41	53	83	130	175	192
	进口隐含能源	15	16	23	31	41	46	51	70

注:由于原油与原料、新能源与废物两类能源占比较小,本文省略了二者的结果,有兴趣的读者可以找作者索取。

1) 本文测算结果均采用MRIO模型计算得到,且本文采用的进出口隐含能源指标与基于SRIO模型测算的传统的进出口隐含能源指标含义不同,关于二者差异更详细的讨论可参考彭水军等的文章<sup>[6]</sup>。

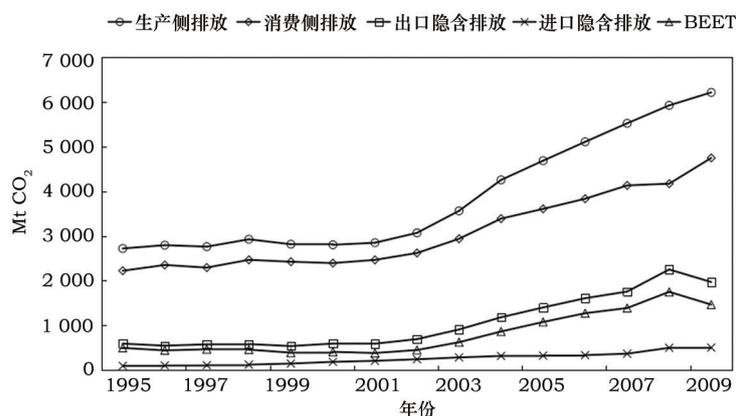


图1 1995-2009年中国对外贸易中的碳排放转移

Figure 1 EET estimates for China from 1995 to 2009

放(Embodied Emissions in Trade, EET)的估计量,15年间中国生产侧排放增长了3492Mt(128.3%),消费侧排放增长了2523Mt(113.5%),很明显,中国加入WTO后二者的平均增速(10.2%与8.5%)远高于前一阶段(0.8%与1.8%),且二者差距在2002年以前始终维持在450Mt左右,2002年之后这一差距迅速扩大,2008年达到峰值1752Mt;类似的,中国出口隐含排放<sup>1)</sup>在15年间增长了1378Mt(232.1%),且这一增长全部发生在2001-2009年间,1995-2000年间的出口隐含排放反而稍有下降;研究期间进口隐含排放增长了409Mt(428.1%),不同的是,进口隐含排在2001年之前的平均增速(13.9%)高于后一阶段(11.7%),最终导致中国贸易隐含碳排放余额(BEET)在2001年之后以18.3%的平均增速快速增长。总体上,中国生产的CO<sub>2</sub>增加远超过消费的CO<sub>2</sub>增加,且生产的大部分增加是为了满足更大部分国外需求的增加(占比40%),相反,消费的CO<sub>2</sub>增加只有16%的比例是由进口增加来满足的。

接下来,笔者比较了不同研究对中国贸易碳排放水平的估计结果,表2列举了几个代表年份相关研究对中国生产侧、消费侧、出口隐含、进口隐含和隐含碳排放余额(BEET)的估计。发现不同研究报告的结果存在明显差异,即使是作为“参照”的生产侧排放(按照本文模型部分推导可知,采用SRIO、BTIO与MRIO模型测算一国的生产侧排放会得到相同结果),说明不同的模型考虑了不同的排放范

围和数据来源。如表2所示,如中国在2005年的生产侧排放,7项研究估计的最大值和最小值间相差1250Mt(4449Mt和5699Mt,本文为4686Mt)。

对于消费侧排放、出(进)口隐含排放的估计差异更大,表明其计算中需要更大的数据密集性和更多的假设。中国2005年消费侧排放在3459Mt和5560Mt之间;对于中国出口隐含碳排放的大小,在分配国家减排目标的背景下,这个量就显得特别重要,因为作为世界上最大的碳排放国,承担具有法律约束力的减排目标压力非常大。对比两项均采用MRIO模型和2005年数据的研究,Nakano等估计中国的出口隐含碳排放为794Mt(占生产侧排放的17.6%)<sup>[9]</sup>,而Wiebe等估计是前者的两倍多,为1734Mt<sup>[11]</sup>。这两项研究中使用了相同的数据——OECD投入-产出表和国际能源署(IEA)的能源和排放数据,但汇总水平不同,前者只有41个区域和17个生产部门,而后者分别有55个区域和有48个生产部门。

采用SRIO模型估计的中国出口隐含排放量更高。仍然以2005年为例,Yan等<sup>[17]</sup>采用SRIO方法报告了一个偏低的估计为1180Mt,其假设世界其余国家使用美国的碳强度因子并使用购买力平价(PPP)进行汇率调整,而Lin等估计为3357Mt<sup>[7]</sup>。如表2中所示,这些估计之间显示出2倍的差异并不罕见,原因是在多区域投入产出模型下,区分了进口和国产投入产品的最终需求归属,在SRIO和BTIO模型下

1)本文基于MRIO模型测算的进出口隐含排放这一指标与基于SRIO模型的传统进出口隐含排放指标含义不同,而关于二者差异更详细的讨论可参考彭水军在《经济研究》网站上的工作论文(WP737)<sup>[10]</sup>。

表2 文献中关于中国贸易隐含碳排放的估计结果比较

		Table 2 EET estimates from the literature for China					(Mt CO <sub>2</sub> )
	作者	模型	生产侧排放	消费侧排放	出口隐含排放	进口隐含排放	BEET
1997年	Ahmad 等 <sup>[18]</sup>	MRIO	3 068	2 708	463(15.1)	102(3.3)	360
	Li 等 <sup>[6]</sup>	BTIO	3 219	2 871	513(15.9)	165(5.1)	348
	Su 等 <sup>[19]</sup>	MRIO	3 259	2 831	-	-	428
	Weber 等 <sup>[3]</sup>	SRIO	3 210	3 330	580(18.1)	700(21.8)	-120
	Yan 等 <sup>[17]</sup>	SRIO	3 133	2 957	314(10.0)	138(4.4)	176
2001年	Li 等 <sup>[6]</sup>	BTIO	2 454	2 271	623(25.4)	440(17.9)	183
	Peters 等 <sup>[20]</sup>	MRIO	3 289	2 704	803(24.4)	217(6.6)	585
	Yan 等 <sup>[17]</sup>	SRIO	3 108	2 908	380(12.2)	180(5.8)	200
2005年	Weber 等 <sup>[3]</sup>	SRIO	5 030	5 560	1 670(33.2)	2 200(43.7)	-530
	Lin 等 <sup>[7]</sup>	SRIO	5 458	4 434	3 357(61.5)	2 333(42.7)	1 024
	Li 等 <sup>[6]</sup>	BTIO	5 699	5 039	1 760(30.9)	1 100(19.3)	660
	Bruckner 等 <sup>[8]</sup>	MRIO	4 449	3 459	1 357(30.5)	366(8.2)	990
	Nakano 等 <sup>[9]</sup>	MRIO	4 508	3 921	794(17.6)	207(4.6)	587
	Wiebe 等 <sup>[11]</sup>	MRIO	5 090	3 665	1 734(34.1)	309(6.1)	1425
	Yan 等 <sup>[17]</sup>	SRIO	5 429	4 699	1 180(21.7)	450(8.3)	730
2007年	Li 等 <sup>[6]</sup>	BTIO	6 672	5 829	2 493(37.4)	1 650(24.7)	843
	Yan 等 <sup>[17]</sup>	SRIO	6 499	5 362	1 725(26.5)	588(9.0)	1 137

注:出(进)口隐含排放列括号内数值分别表示出(进)口隐含碳排放占生产侧排放的比例;BEET表示对外贸易隐含碳排放余额;\*表示历年结果从该作者文献的图中近似计算而得。

出口隐含碳排放的估计,无法区分出口的中间产品最终到底是由国内还是国外消费而引起的,即模型中所述的“反馈性出口效应”和“间接贸易效应”。

对于中国的进口隐含排放,特别是随着消费和工业的增长,中国对中间产品和原材料的进口需求上升,如表2,对该指标的估计有很大不同,Weber等与Lin等采用SRIO模型和进口替代假设对中国2005年进口隐含排放的估计量均超过2200Mt(超过生产侧排放的40%)<sup>[3,7]</sup>。Li等采用包含36个区域的BTIO模型估计中国2005年的进口隐含排放为1100Mt<sup>[6]</sup>;而采用多区域投入产出模型的研究估计量要小得多:207到366Mt,本文估计结果为325Mt。

### 3.2 新兴经济体国家的贸易隐含能源与碳排放转移

#### 3.2.1 新兴经济体国家的贸易隐含能源分析

表3显示了1995-2009年单个新兴经济体国家和他们作为一个整体、28个发达经济体与8个发展中经济体和RoW区域(后文简称发展中经济体)的生产侧与消费侧能耗,其中,全球(BRIC、发达经济体与发展中经济体加总)生产侧能耗等于全球消费侧能耗,且世界出口隐含能源等于世界进口隐含能源。1995年在BRIC国家,中国和俄罗斯是最大的

生产和消费能源国,研究期间俄罗斯的生产侧和消费侧能耗几乎没有发生变化,中国生产侧和消费侧能耗分别增加了149.3%和134.7%。总体而言,BRIC国家生产侧和消费侧能耗分别增加了81.7%和81.3%,而在发达经济体,消费侧能耗增加(8.7%和571Mt标煤)远超过生产侧能耗增加(5.1%和312Mt标煤)。

进一步,结合图2发现发达经济体消费侧能耗的增加有很大部分来自对BRIC国家隐含能源进口的增加,其在15年间增加了一倍,1995年BRIC国家出口隐含能源的76.7%是为发达经济体服务的,这一数字在研究期间虽有所下降,但至2009年仍超过62%。且自BRIC国家出口到发达经济体的隐含能源占BRIC生产侧能耗份额从1995年的17.2%增加到2008年的20.0%,这意味着,至2008年发达经济体应该承担1/5的BRIC生产侧能耗;而BRIC国家从发达经济体进口的隐含能源在1995年(66Mt标煤)仅占其消费侧能耗(2168Mt标煤)的3.1%,2008年该份额最高也只有5.6%。这些数据表明,新兴经济体出口的各类隐含能源主要是为发达经济体服务的,而进口的各类隐含能源却主要来源于发展中

表3 1995-2009年新兴经济体国家贸易隐含能源

		Table 3 Embodied energy in international trade of BRIC from 1995 to 2009					(Mt标煤)	
		中国	印度	巴西	俄罗斯	BRIC	发达经济体	发展中经济体
1995年	生产侧能耗	1 126	359	181	974	2 640	6 073	2 489
	消费侧能耗	934	334	190	710	2 168	6 580	2 453
	出口隐含能源	250	52	22	294	593	400	507
	进口隐含能源	58	27	31	30	121	907	472
2001年	生产侧能耗	1 270	457	220	914	2 861	6 544	2 826
	消费侧能耗	1 123	424	218	542	2 308	7 334	2 589
	出口隐含能源	270	76	39	398	743	444	792
	进口隐含能源	123	43	38	26	190	1 234	555
2005年	生产侧能耗	2 072	540	258	983	3 853	6 735	3 327
	消费侧能耗	1 626	545	239	641	3 051	7 824	3 039
	出口隐含能源	638	97	57	386	1 107	524	1 003
	进口隐含能源	192	103	37	44	305	1 614	715
2009年	生产侧能耗	2 807	732	294	964	4 798	6 385	3 554
	消费侧能耗	2 192	728	303	709	3 932	7 151	3 654
	出口隐含能源	918	112	47	317	1 276	649	839
	进口隐含能源	303	108	56	62	411	1 415	940

注:新兴经济体国家包含巴西、俄罗斯、印度和中国,记为BRIC;发展中经济体是除了新兴经济体四国的其他发展中国家和RoW加总。

经济体。

此外,图3显示了BRIC单个国家与三组经济体的5类人均生产侧和消费侧能耗,发达经济体5类人均生产侧能耗都显著低于人均消费侧能耗;发展中经济体除煤之外的其他四类人均生产侧能耗都稍高于人均消费侧能耗。BRIC作为一个整体,与发达经济体相反,5类能源的人均生产侧都高于人均消费侧能耗。其中,中国的燃气、新能源与废物的人均生产侧小于消费侧能耗;俄罗斯除新能源与废

物(2005-2009年)外其他四类能源的人均生产侧均远大于人均消费侧能耗;印度的石油产品、电力与热力的人均生产侧能耗在2002年后变成小于人均消费侧,而人均生产侧燃气一直小于人均消费侧;巴西的煤与燃气的人均生产侧亦一直小于人均消费侧,石油产品和电力与热力的人均生产侧在2000年以后逐渐低于人均消费侧。但从总体来看,当前发达经济体人均生产侧与消费侧能耗仍然普遍高于新兴经济体和发展中经济体。

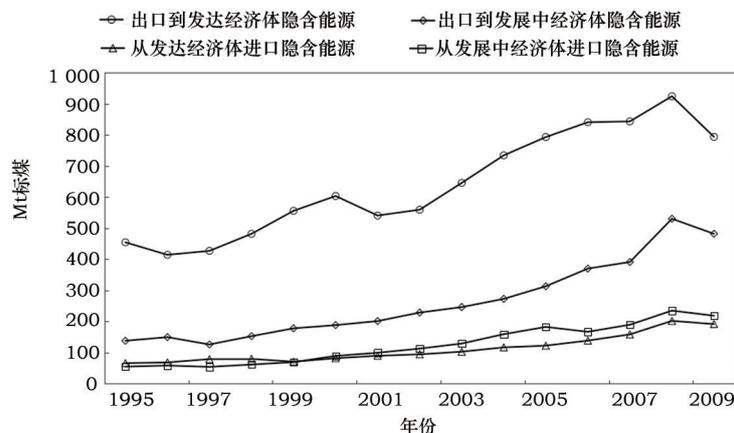


图2 BRIC与发达经济体、发展中经济体之间贸易的隐含能源

Figure 2 Embodied energy between BRIC with developed and developing economies

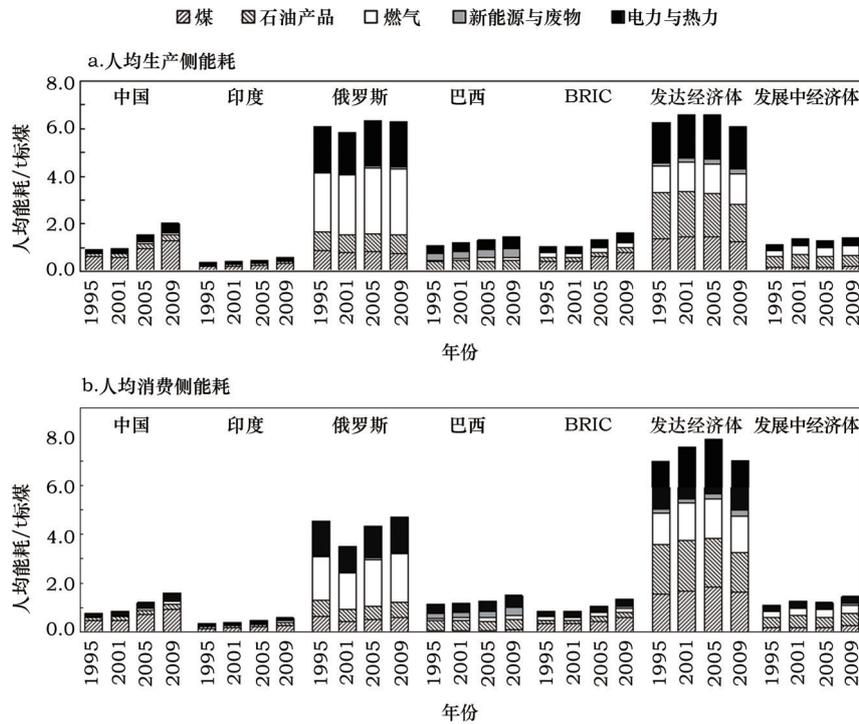


图3 人均生产侧能耗与消费侧能耗

Figure 3 Embodied energy production and consumption per capita

3.2.2 新兴经济体国家的碳排放转移分析

表4显示了BRIC国家、发达经济体及发展中经济体在1995-2009年的贸易碳排放余额。1995年在BRIC国家,中国和俄罗斯是最大的碳生产和消

费国,研究期间BRIC国家生产侧和消费侧排放分别增加了4351Mt(86.5%)和3432Mt(83.4%),这些增加主要来源于中国和印度,且印度的两项碳排放逐渐超过了俄罗斯,其次来源于巴西。在发达经济

表4 1995-2009年新兴经济体国家贸易转移排放

		Table 4 EET estimates for BRIC from 1995 to 2009						(Mt CO <sub>2</sub> )
		中国	印度	巴西	俄罗斯	BRIC	发达经济体	发展中经济体
1995年	生产侧排放	2 722	721	175	1 412	5 030	9 590	4 336
	消费侧排放	2 224	655	205	1 033	4 117	10 555	4 284
	出口隐含排放	594	113	21	435	1 120	683	883
	进口隐含排放	96	48	52	55	207	1 647	831
2000年	生产侧排放	2 805	891	222	1 371	5 288	10 283	4 849
	消费侧排放	2 395	797	248	710	4 151	11 803	4 467
	出口隐含排放	595	166	35	697	1 428	732	1 312
	进口隐含排放	185	72	62	36	290	2 251	931
2005年	生产侧排放	4 686	1 085	242	1 460	7 473	10 359	5 746
	消费侧排放	3 608	1 065	251	942	5 865	12 465	5 247
	出口隐含排放	1 403	198	55	596	2 123	858	1 752
	进口隐含排放	325	177	64	77	515	2 965	1 253
2009年	生产侧排放	6 214	1 503	252	1 412	9 381	9 506	5 991
	消费侧排放	4 747	1 456	306	1 040	7 550	11 079	6 250
	出口隐含排放	1 972	235	43	482	2 508	1 054	1 431
	进口隐含排放	505	188	97	111	676	2 626	1 690

体,1995-2008年间消费侧排放增加了1687MtCO<sub>2</sub>,而生产侧排放仅增加了600MtCO<sub>2</sub>。从BRIC国家的贸易转移排放来看,发达和发展中经济体的进出口隐含排放均在增加,但很明显,发达经济体的隐含排放一直处于净进口状态,且差距一直在扩大,而发展中经济体于2008年从隐含排放净出口状态变成了净进口状态,进一步说明BRIC国家承担了大量的隐含排放净出口。

从图4显示的各经济体人均生产侧和消费侧排放可以发现,发达经济体人均碳生产(1995年约10.38t)显著低于其人均碳消费(从1995年的11.42t增加至2007年的12.63t);发展中经济体人均碳生产(从1995年的2.08t增加至2007年的2.58t)稍高于人均碳消费(从1995年的2.05t增加至2007年的2.48t);在BRIC国家,除巴西外,其他三国的人均碳生产都高于人均碳消费,尤其表现在俄罗斯和中国;中国人均生产侧与消费侧排放差距在1995-2002年间几乎没有变化,2002年之后差距逐渐扩大(2008年达到最大值1.32t),迄今为止俄罗斯的人均生产侧碳排放量最大。总体说来,当前发达经济体人均碳生产与消费仍然普遍高于发展中经济体和新兴经济体,从生产者责任转换为消费者责任加重了发达经济体国家的人均责任,同时改善了新兴经济体国家的人均责任。

#### 4 结论与政策启示

本文的主要研究结论及政策含义如下:

(1)1995-2009年中国不同能源的生产侧与消费侧能耗均呈快速增长趋势,二者增幅最大的能源均表现在燃气(284.4%与242.1%)和电力与热力(248.1%与210.8%)。且生产侧与消费侧能耗都主

要集中在煤、石油产品、电力与热力三类能源,三者总值平均占比95%与92%左右,研究期间前者下降幅度大于后者,说明15年间中国服务国内外最终需求的产品能源结构几乎未发生变化,而中国最终需求消耗的产品能源结构有所优化。1995-2009年中国不同能源出口与进口隐含能源的增长幅度远高于生产侧与消费侧能耗的增长,除燃气、新能源与废物两类能源外,中国其他能源均属于隐含能源净出口国。且中国对清洁能源(尤其是新能源)的需求目前为止依然主要靠进口,因此中国应大力开发和运用新能源技术,逐渐替代传统化石能源为主的能源结构现状以降低生产过程中的能耗和碳排放。

(2)研究期间中国生产侧与消费侧排放分别增长了3492Mt和2523Mt,而中国加入WTO后二者的平均增速大大提高,从而二者的差距在2002年之后迅速扩大;中国出口隐含排在15年间增长了1378Mt,且这一增长全部发生在2001-2009年间;进口隐含排放增长了409Mt。总体而言,中国生产侧排放增加远超过消费侧排放增加,且前者很大一部分增加是为了满足更大部分国外需求的增加(占比40%),相反,后者的增加仅16%的比例是来源于进口的增加。进一步,笔者比较了本文与其他文献对中国贸易碳排放水平的估计结果,发现采用不同的模型估计得到结果差异非常大,即使采用相同的模型,如果模型中考虑了不同的碳排放范围、数据来源或数据汇总程度不同,都可能导致不同的估计结果,而这些估计量对于中国设置具体的排放目标影响非常大。

(3)笔者分析了一组新兴经济体、发达经济体与发展中经济体之间的贸易隐含能源和碳排放。

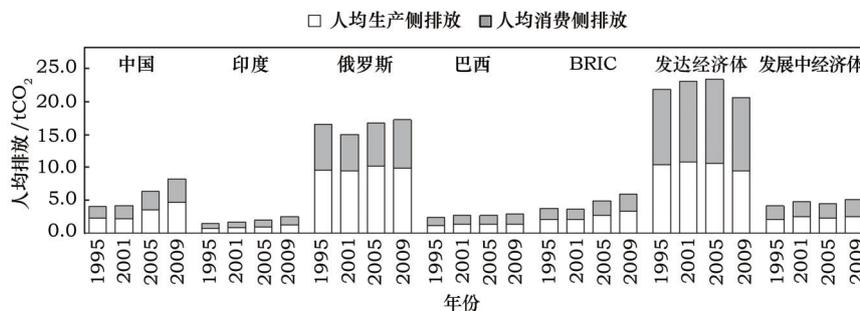


图4 人均生产侧排放与消费侧排放

Figure 4 Embodied carbon production and consumption per capita

2017年1月

考虑到货币产出(如GDP)的不断增加,研究期间发达经济体几乎可以稳定其国内的生产侧能耗和碳排放,基于消费侧测算的能耗和碳排放却在逐渐增加,即发达经济体服务外需而出口引致的碳排放远小于其从国外进口节约的碳排放,属于碳排放净进口国。结果还表明在新兴经济体国家很大一部分生产侧排放的增长与发达经济体消费的产品有关。能源密集生产阶段的外包似乎已成为发达经济体为了达到其生产能耗和碳排放减少的一个主要战略,而发达经济体需求的增加是新兴经济体不断增长的生产侧能耗和碳排放的一个重要驱动力,发达经济体通过国际贸易大量消耗国外产品来掩盖其能源消耗与碳排放不降反升的真实情形。

(4)气候变化是历史排放导致的环境问题、每个自然人排放权益均等应该是解释气候公平的原点,也是界定各国排放责任的起点。为此,本文进一步考察了三组国家的人均能耗与碳排放数据,结果表明,发达经济体5类人均生产侧能耗都显著低于其人均消费侧能耗;发展中经济体除煤之外的其他4种人均生产侧能耗都稍高于人均消费侧能耗。新兴经济体国家作为一个整体5类能源的人均生产侧能耗都高于人均消费侧能耗,中国除燃气外人均生产侧均大于消费侧能耗。从碳排放来看,当前发达经济体人均碳生产与消费仍然普遍高于发展中经济体,因此,在现阶段就让发展中经济体不顾经济发展权益接受绝对减排约束是不公平的,且发达经济体应该改变其通过转嫁国内能耗和碳排放来实现的高消费和高福利的消费模式,从而推进全球减排与全球经济的协调发展。

## 参考文献(References):

- [1] Wiebe K S, Bruckner M, Giljum S, et al. Carbon and materials embodied in the international trade of emerging economies: A multi-regional input-output assessment of trends between 1995 and 2005[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4): 636-646.
- [2] 陈迎,潘家华,谢来辉. 中国外贸进出口商品中的内涵能源及其政策含义[J]. *经济研究*, 2008, (7): 11-25. [Chen Y, Pan J H, Xie L H. Energy embodied in goods of international trade in China: Calculation and policy implications[J]. *Economic Research Journal*, 2008, (7): 11-25.]
- [3] Weber C L, Peters G P, Guan D, et al. The contribution of Chinese exports to climate change[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(9): 3572-3577.
- [4] 张友国. 中国贸易含碳量及其影响因素-基于(进口)非竞争型投入-产出表的分析[J]. *经济学(季刊)*, 2010, (4): 1287-1310. [Zhang Y G. Carbon contents of the Chinese trade and their determinants: An analysis based on non-competitive (Import) input-output tables[J]. *China Economic Quarterly*, 2010, (4): 1287-1310.]
- [5] 闫云凤,赵忠秀. 中国对外贸易隐含碳的测度研究-基于碳排放责任界定的视角[J]. *国际贸易问题*, 2012, (1): 131-142. [Yan Y F, Zhao Z X. CO<sub>2</sub> emissions embodied in China's international trade: A perspective of allocating international responsibilities[J]. *Journal of International Trade*, 2012, (1): 131-142.]
- [6] Li H M, Qi Y. Carbon embodied in international trade of China and its emission responsibility[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2010, 8(2): 24-31.
- [7] Lin B Q, Sun C W. Evaluating carbon dioxide emissions in international trade of China[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 613-621.
- [8] Bruckner M, Giljum S, Lutz C, et al. Consumption-based CO<sub>2</sub> Emissions and Carbon Leakage: Results from the Global Resource Accounting Model GRAM[R]. Osnabrück: International Conference on Economic Modeling (Ecomod), 2010.
- [9] Nakano S, Okamura A, Sakurai N, et al. The Measurement of CO<sub>2</sub> Embodiments in International Trade: Evidence from the Harmonized Input- Output and Bilateral Trade Database[R]. Paris: OECD Science Technology & Industry Working Papers, 2009.
- [10] 彭水军,张文城,孙传旺. 中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究[J]. *经济研究*, 2015, (1): 168-182. [Peng S J, Zhang W C, Sun C W. China's production and consumption-based carbon emissions and their determinants[J]. *Economic Research Journal*, 2015, (1): 168-182.]
- [11] 马晶梅,王新影,贾红宇. 中日贸易隐含碳失衡研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(3): 523-533. [Ma J M, Wang X Y, Jia H Y. Imbalance in the carbon emissions embodied in Sino-Japan trade [J]. *Resources Science*, 2016, 38(3): 523-533.]
- [12] 张文城,彭水军. 南北国家的消费侧与生产侧资源环境负荷比较分析[J]. *世界经济*, 2014, (8): 126-150. [Zhang W C, Peng S J. Comparing consumption and production based environmental loads in north and south countries[J]. *The Journal of World Economy*, 2014, (8): 126-150.]
- [13] WIOD Project of European Commission. World Input- Output Data-base[EB/OL]. (2016-01-30)[2016-08-01]. <http://www.wiod.org/home>.
- [14] United Nations Statistical Commission. United Nations Demographic Yearbook[EB/OL]. (2016-10-30)[2016-08-01]. <http://www.un.org/esa/population/>

- unstats.un.org/unsd/demographic/products/dyb.
- [15] 中国统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. (2015-12-30)[2016-08-01]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>.
- [16] 彭水军, 韦韬, 曹毅. 全球生产链视角下外需对中国能源消耗的影响——基于MRIO模型的实证研究[J]. 吉林大学社会科学学报, 2016, (6): 51-61. [Peng S J, Wei T, Cao Y. Effects of foreign demand on energy of China from a global production chain perspective: An empirical analysis based on the MRIO model[J]. *Jilin University Journal Social Sciences Edition*, 2016, (6): 51-61.]
- [17] Yan Y F, Yang L K. China's foreign trade and climate change: A case study of CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 350-356.
- [18] Ahmad N, Wyckoff A. Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods[R]. Paris: OECD Science Technology & Industry Working Papers, 2003.
- [19] Su B, Ang B W. Input-output analysis of CO<sub>2</sub> emissions embodied in trade: A multi-region model for China[J]. *Applied Energy*, 2014, 114: 377-384.
- [20] Peters G P, Hertwich E G. Post-Kyoto greenhouse gas inventories: Production versus consumption[J]. *Climatic Change*, 2008, 86(1): 51-66.

## Embodied energy and carbon emissions transferred in international trade using a MRIO model

WEI Tao<sup>1,2</sup>, PENG Shuijun<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China;

2. School of Economics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** With the formation of global production chains as well as cross-border separated in production and consumption in the world, the rapid development of international trade has an important impact on both embodied energy and transfer emissions of trade. We estimated the different energy consumption and emissions embodied in international trade in 1995-2009 with the MRIO model. The results showed that: (1) China belongs to a net exporter of embodied energy in international trade except for new energy sources and gas during the study period; increase of production-based emissions far exceeds the consumption-based emissions in China, and 40% of the former is satisfied by the demands of foreign countries, then only 16% of consumption-based emissions increase is derived from the increase of imports; (2) The production-based energy and carbon emissions of the major developed economies were almost unchanged during the study period, but the consumption-based energy and carbon emissions were gradually increasing, then they were net importers of embodied energy and emissions in international trade; the production-based and consumption-based energy of emerging economies increased by 81.7% and 81.3% respectively, and the embodied energy and emissions of developed economies transferred into emerging economies is much greater than the embodied energy and emissions of emerging economies transferred into developed economies; (3) The per capita consumption-based embodied energy and emissions in developed economies are much higher than in emerging economies; while the per capita embodied energy and emissions are in a low level in China.

**Key words:** embodied energy; emissions transfer; MRIO Model; consumption-based responsibility