

# 基于消费责任制的碳排放核算及全球环境压力

钟章奇<sup>1</sup>, 姜磊<sup>1,2</sup>, 何凌云<sup>3</sup>, 王铮<sup>4,5</sup>, 柏玲<sup>6</sup>

(1. 浙江财经大学经济学院, 杭州 310018; 2. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京 210016;  
3. 中国矿业大学管理学院, 徐州 221116; 4. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;  
5. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080; 6. 南昌大学经济管理学院, 南昌 330031)

**摘要:** 因区域间贸易而转移的碳排放对于全球各个国家或者地区的碳排放核算及其减排责任划分具有重要而深远的影响。通过构建多区域投入产出分析模型和基于扩展的STIRPAT模型, 本文核算了全球39个主要国家基于消费责任制的碳排放, 并在此基础上深入探讨了全球环境压力的影响因素问题。研究发现: 首先, 从以净流出为主的中国和俄罗斯来看, 尽管贸易给这些地区带来了大量的资源, 但随之会产生严重的区域生态环境问题。而对于美国和欧盟等地区来说, 这些国家或者地区通过全球贸易规避了大量的碳减排责任。此外, 在全球贸易中, 区域净流出的贸易隐含碳排放越小, 基于消费责任制核算的区域碳排放量就越大, 故而在全球减排目标分配中承担的减排任务也需相应地增加。全球贸易隐含碳排放净流出量较大的地区主要位于亚洲和东欧等地, 而净流出量最小的地区主要是以西欧和北美等高度发达的经济体为主。其次, 就基于消费责任制核算下的全球环境压力而言, 人口因素和富裕程度是导致全球环境压力不断增加的两个重要因素, 而提高生产技术水平以及逐渐提高清洁能源在总能源消费中的比重是推动全球节能减排、缓解全球环境压力的有效途径。

**关键词:** 贸易隐含碳; 投入产出分析; 环境压力; 能源结构; 全球

DOI: 10.11821/dlxb201803005

## 1 引言

近年来, 由CO<sub>2</sub>等温室气体排放导致的全球气候变化已成为世界各国或地区共同面临的生态环境问题。尤其是随着全球人口的迅猛增加和发展中国家工业化进程的持续加快, 人类活动对化石能源使用的需求还在不断增加, 由此产生的CO<sub>2</sub>等温室气体排放每年也以3.4%的速度增长<sup>[1]</sup>, 地球正面临着巨大的生态环境压力。因此, 为了积极应对和减缓全球气候变化, 准确地核算各地区碳排放并理清其影响因素, 将减排任务相对公平地分配到各个国家和地区, 从而积极推行全球节能减排已成为世界各国的共识<sup>[2-4]</sup>。

从区域碳排放核算的角度来看, 能源消耗及其CO<sub>2</sub>等温室气体排放主要存在以下3个来源<sup>[5]</sup>: ① 区域内的社会经济活动如化石燃料燃烧和工业活动等所导致的直接碳排放; ② 上游电力等能源企业提供给区域内的社会经济活动所需的电力等资源而导致的间接碳排放

收稿日期: 2017-03-30; 修订日期: 2017-09-15

**基金项目:** 浙江省社科规划课题(18NDJC149YB); 国家自然科学基金项目(71742001, 41761021); 教育部人文社会科学  
研究青年基金项目(17YJC790061) [Foundation: Zhejiang Provincial Social Science Planning Fund Program,  
No.18NDJC149YB; National Natural Science Foundation of China, No.71742001, No.41761021; Humanities  
and Social Science Research Program of the Ministry of Education, No.17YJC790061]

**作者简介:** 钟章奇(1985-), 男, 湖南岳阳人, 讲师, 博士, 研究方向为区域科学与经济政策模拟。E-mail: zzqi111@163.com

**通讯作者:** 姜磊(1983-), 男, 山东烟台人, 助理教授, 博士, 研究方向为环境经济与生态环境模拟。

E-mail: lei\_jiang@zufe.edu.cn

放;③区域外生产并提供给本地区消费的产品而导致的贸易隐含碳排放。长期以来,大多数文献主要关注于全球碳排放的第一和第二个来源及其相关影响因素的分析研究<sup>[6-10]</sup>。然而,针对第三个领域的相关问题研究还较少。换言之,就区域间贸易而转移的碳排放、基于消费责任制的区域碳排放核算及其影响因素分析等问题研究却较少涉及。事实上,在全球经济一体化发展过程中,贸易通过促使区域间能源、劳动力等资源的再分配,在推动全球经济发展的同时<sup>[11-12]</sup>,商品的生产者和消费者也会因贸易而出现地域的分离,导致区域碳排放随着贸易而发生空间上的转移,从而使得本地区的部分减排责任被转嫁给其他区域<sup>[4, 13-17]</sup>。这就会造成减排任务分配的不公平,进而不仅会影响全球减排效率,甚至可能会对全球各个国家或地区共同积极参与减排带来不利影响。为此,碳排放核算方法从生产者责任制到消费者责任制的转变逐渐受到学界的重视,并且考虑贸易隐含碳的区域减排政策得到了众多学者的广泛关注<sup>[4, 18-24]</sup>。

通过文献检索发现,目前针对贸易隐含碳排放并基于消费责任制核算的全球碳排放及其相关问题的研究大多只是估算两个国家间的贸易隐含碳排放,从而探讨了消费责任制核算下各区域的碳减排责任<sup>[25-30]</sup>。然而,从全球气候治理的角度来看,双边国家间的贸易隐含碳排放及其相关问题的分析显然难以全面地涵盖全球经济一体化背景下区域间贸易对全球碳排放核算及其减排责任划分的影响。从全球共同应对减排的角度来看,这可能不利于全面理清贸易在全球碳排放政策中的重要作用,也不利于更加公平且合理地制定全球减排政策以及分配减排任务<sup>[14-15]</sup>。此外,基于消费责任制核算的全球碳排放量也在逐年增加<sup>[31]</sup>,这已对全球生态环境造成了极大的压力,探索消费责任制核算下全球环境压力的主要影响因素就能为碳减排提供科学的决策依据。因此,从整体和综合的角度深入分析基于消费责任制核算的全球碳排放及其影响因素就显得尤为重要。当前学界针对这类问题的研究主要分为两个方面:一方面,部分学者侧重于核算某一年全球各个国家贸易隐含碳排放以及消费责任制下的碳排放量,进而探讨贸易对各地区减排责任的影响,并由此提出了有针对性的全球性减排政策措施<sup>[14-15, 17, 20, 32-33]</sup>;另一方面,部分学者则侧重于关注1995-2009年内全球各个国家或者地区贸易隐含碳排放的演化特征,并分析贸易对国家减排责任划分的影响<sup>[2, 34-38]</sup>。

总体来看,上述研究基于投入产出分析方法通过核算各个国家或者地区的贸易隐含碳排放,不仅有利于深入地了解贸易对区域碳排放核算的影响,同时也为公平且合理的分配减排责任以及理解碳排放转移在全球气候治理中的作用提供了重要的理论基础。然而,在全球贸易隐含碳排放的实证研究中,在以下两个方面仍然较少涉及:①长期以来,全球贸易隐含碳排放呈现何种变化特征?其对全球各个国家或者地区的碳排放核算影响如何?进一步来说,基于消费责任制核算的全球碳排放又呈现何种时空演化格局,基于消费责任制核算对区域减排责任划分又有何种影响?这些问题在以往的研究中均还未能得到关注。②单一的投入产出研究方法使得鲜有文献基于消费责任制核算的全球碳排放影响因素开展相关研究。而事实上,理清碳排放的影响因素对于制定有针对性的全球生态环境政策具有十分重要的意义。

鉴于此,通过构建多区域投入产出分析模型和基于扩展的STIRPAT模型,本文拟以全球39个主要国家为研究对象<sup>①</sup>,重点探讨以下两个重要问题:①1995-2011年全球贸易

① 39个国家包括:澳大利亚、奥地利、比利时、保加利亚、巴西、加拿大、中国、塞浦路斯、捷克、德国、丹麦、西班牙、爱沙尼亚、芬兰、法国、英国、希腊、匈牙利、印度尼西亚、印度、爱尔兰、意大利、日本、韩国、立陶宛、卢森堡、拉脱维亚、墨西哥、马耳他、荷兰、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、俄罗斯、斯洛文尼亚、斯洛伐克、瑞士、土耳其和美国。之所以选择这39个国家的主要原因除了基础数据易获取之外,Peters等<sup>[14]</sup>以及Xu等<sup>[31]</sup>均研究发现这些国家的贸易隐含碳排放占全球贸易隐含碳排放总量的比例长期以来维持在90%以上。



于 $r$ 地区生产并消费的产品; $f_{rt}$ 表示在区域贸易中 $r$ 国家或地区和 $t$ 国家或地区之间产生的产品需求。进一步,根据(1)式,可得:

$$E_r = F_r(I - A_{rr})^{-1} \left( Y_{rr} + \sum_t f_{rt} \right) \quad (2)$$

式中: $E_r$ 表示区域 $r$ 内由经济生产活动而产生的碳排放; $F_r$ 表示 $r$ 地区的各部门单位产出的碳排放。根据全球多区域间投入产出表可知,各地区间的中间需求系数可表示为:

$$Z_t = \begin{bmatrix} Z_t^{1,1} & \cdots & Z_t^{1,n} & \cdots & Z_t^{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_t^{n,1} & \cdots & Z_t^{n,n} & \cdots & Z_t^{n,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_t^{N,1} & \cdots & Z_t^{N,n} & \cdots & Z_t^{N,N} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $Z_t^{rs}$ 表示 $t$ 时期区域 $r$ 对区域 $s$ 的中间投入量;而 $Z_{ij,t}^{rs}$ 则为 $t$ 时期对于 $r, s \in N, j \in J$ ,由区域 $r$ 中的 $i$ 部门给区域 $s$ 中的 $j$ 部门的中间投入量,故中间投入系数 $a_{ij,t}^{rs} = z_{ij,t}^{rs} / x_{j,t}^s$ ,  $x_{j,t}^s$ 为 $t$ 时期区域 $s$ 部门 $j$ 的总产出。 $N$ 表示全球多区域投入产出表中的区域个数,根据本文的数据来源可知: $N=39, J=35$ 。此外,本文构造一个跟 $Z_t$ 具有相同结构的投入矩阵 $A_t$ :

$$A_t = \begin{bmatrix} A_t^{1,1} & \cdots & A_t^{1,n} & \cdots & A_t^{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_t^{n,1} & \cdots & A_t^{n,n} & \cdots & A_t^{n,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_t^{N,1} & \cdots & A_t^{N,n} & \cdots & A_t^{N,N} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $A_t^{rs}$ 为 $t$ 时期区域 $r$ 对区域 $s$ 的中间投入量,且 $r, s \in N$ 。根据多区域投入产出表,可得到各地区的最终需求矩阵:

$$F_t = \begin{bmatrix} f_t^{1,1} & \cdots & f_t^{1,n} & \cdots & f_t^{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_t^{n,1} & \cdots & f_t^{n,n} & \cdots & f_t^{n,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_t^{N,1} & \cdots & f_t^{N,n} & \cdots & f_t^{N,N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $f_t^{rs}$ 为 $t$ 时期区域 $s$ 对区域 $r$ 的最终需求,且 $r, s \in N$ 。而根据投入产出表的行列平衡原理可知:

$$x_t^r = \sum_{s=1}^N Z_t^{rs} u + \sum_{s=1}^N f_t^{rs} \quad (6)$$

式中: $x_t^r$ 为 $t$ 时期区域 $r$ 的产出; $u$ 为一个由1构成的具有跟中间需求系数( $Z$ )同等结构的矢量矩阵。对于所有地区而言,可将上式子写成: $x_t = Z_t u + F_t u$ , 同样还有: $x_t = A_t x_t + F_t u$ , 故可得到 $Z_t u = A_t x_t$ , 且 $x_t = (I - A_t)^{-1} F_t u$ , 此时 $M_t \equiv (I - A_t)^{-1}$ 。 $M_t$ 为里昂惕夫逆矩阵; $I$ 为单位矩阵; $A_t$ 为中间投入矩阵。

此外,各地区单位最终产品所产生的直接和间接碳排放矩阵为:

$$V_t = \begin{bmatrix} (w_t^1)' M_t^{1,1} & \cdots & (w_t^1)' M_t^{1,n} & \cdots & (w_t^1)' M_t^{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (w_t^n)' M_t^{n,1} & \cdots & (w_t^n)' M_t^{n,n} & \cdots & (w_t^n)' M_t^{n,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (w_t^N)' M_t^{N,1} & \cdots & (w_t^N)' M_t^{N,n} & \cdots & (w_t^N)' M_t^{N,N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $M_t^{rs}$  为  $t$  期区域  $r$  对区域  $s$  的中间投入的里昂惕夫逆矩阵, 且  $r, s \in N$ 。区域  $r$  直接碳排放系数为  $w_{i,t}^r = e_{i,t}^r / x_{i,t}^r$ , 即部门  $i$  的碳排放与其产出的比值 (t/万元)。根据式 (7), 故  $(v_t^{rs})' = (w_t^r)' M_t^{rs}$ ,  $v_t^{rs}$  为区域  $s$  单位最终产品中在区域  $r$  部门  $i$  中所产生的直接和间接的碳排放量。因此, 区域  $r$  与区域  $s$  间的贸易隐含碳 (EEP) 为:

$$EEP_{r-s,t} = \left[ \sum_{k=1}^N (v_t^{kr})' \right] f_t^{rs} + (v_t^{rs})' \left( \sum_{k=1}^N f_t^{sk} \right), \quad s \neq r, \quad s, k \in N \quad (8)$$

式中:  $EEP_{r-s,t}$  为  $t$  时期区域  $r$  与区域  $s$  间的贸易隐含碳排放, 第一项为最终需求消费中由于区域  $r$  与区域  $s$  间贸易带来的碳排放;  $k$  为全球多区域投入产出表中的区域个数。实际上, 对于区域  $r$  来说, 其最终需求消费部分是由全球其他地区 (包含区域  $r$ ) 提供的, 这其中的区域间贸易必然会带来贸易隐含碳排放, 故在式 (8) 中,  $\sum_{k=1}^N v^{kr}$  为生产区域  $r$  一单位的最终产品生产过程中所有的碳排放,  $f_t^{rs}$  为区域  $s$  对区域  $r$  最终需求。第二项为中间投入部分由于区域  $r$  和区域  $s$  之间贸易带来的碳排放。  $v^{rs}$  为生产一单位的  $s (s \neq r)$  地区的最终消费产品的生产需要从区域  $r$  调入的中间投入所产生的碳排放量,  $\sum_{k=1}^N f_t^{sk}$  为  $s (s \neq r)$  地区生产的所有最终需求。

进一步, 区域  $r$  的流出贸易隐含碳排放 (EEE) 和流入贸易隐含碳排放 (EEI) 分别表示如下:

$$EEE_{r,t} = \sum_{s \neq r}^N EEP_{r-s,t} = \left[ \sum_{k=1}^N (v_t^{kr})' \right] \left( \sum_{s \neq r}^N f_t^{rs} \right) + \sum_{s \neq r}^N \left[ (v_t^{rs})' \left( \sum_{k=1}^N f_t^{rk} \right) \right] \quad (9)$$

$$EEI_{r,t} = \sum_{s \neq r}^N EEP_{s-r,t} = \sum_{s \neq r}^N \left[ \sum_{k=1}^N (v_t^{ks})' \right] f_t^{sr} + \left[ \sum_{s \neq r}^N (v_t^{sr})' \right] \left( \sum_{k=1}^N f_t^{rk} \right) \quad (10)$$

对任意区域  $r$  而言, 其贸易隐含碳排放总量和贸易隐含碳排放净流出分别为:

$$EET_{r,t} = EEI_{r,t} + EEE_{r,t} \quad (11)$$

$$E_{r,t}^{BEET} = EEE_{r,t} - EEI_{r,t} \quad (12)$$

式中:  $EET_{r,t}$  和  $E_{r,t}^{BEET}$  表示  $t$  时期区域  $r$  的贸易隐含碳排放总量和贸易隐含碳排放净流出量。

因此, 在区域贸易中, 区域  $r$  内因经济消费活动而产生的碳排放为:

$$E_{r,t}^{cons} = E_{r,t} - E_{r,t}^{BEET} \quad (13)$$

式中:  $E_{r,t}^{cons}$  表示  $t$  时期区域  $r$  内因经济消费活动而产生的碳排放;  $E_{r,t}$  为  $t$  时期区域  $r$  内因经济生产活动而产生的碳排放, 其根据式 (2) 计算得到。显然, 从式 (13) 中不难得出, 若  $E_{r,t}^{BEET} > 0$ , 则基于消费责任制核算的区域碳排放量就会相对减小, 从而可能导致其减排压力与责任就会相应降低; 若  $E_{r,t}^{BEET} < 0$ , 则基于消费责任制核算的区域碳排放量就会相对增大, 从而可能导致其减排压力与责任就会相应增加。

## 2.2 STIRPAT 模型与变量选择

由于 CO<sub>2</sub> 等温室气体会对全球环境造成严重影响, 因此, 在核算基于消费责任制的全球各个国家或者地区的碳排放后, 本文继续探讨基于消费责任制核算下的碳排放对全球环境产生压力的问题。为此, 本文引入 York 等<sup>[42]</sup>提出的 STIRPAT 模型 (Stochastic impacts by regression on population, affluence and technology, STIRPAT) 作为本文的理论分析框架来进行相关的研究与分析。由于 STIRPAT 模型能够保持在其他影响因素固定不变的情况下, 分析外生自变量即外生影响因素对因变量的影响作用, 因此 STIRPAT 模型

已经被学术界广泛地应用于分析生态环境压力、人口增长和经济发展等问题的实证研究中<sup>[43-47]</sup>。STIRPAT模型的一般形式如下:

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (14)$$

进一步地, 将式(14)两边进行自然对数变换处理, 因此, 式(14)可以改写为如下形式:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln e \quad (15)$$

式中:  $I$ 、 $P$ 、 $A$ 和 $T$ 分别表示环境压力指标、人口因素、社会富裕度和技术水平;  $a$ 是常数项;  $b$ 、 $c$ 和 $d$ 是待估计的系数;  $e$ 为随机干扰项。本文采用基于消费责任制核算的全球各个国家或者地区的碳排放表征环境压力变量( $I$ ), 碳排放量越大, 对环境造成的压力就越大。

通过模型(15)可知, STIRPAT理论模型主要包含3个影响全球环境的重要因素, 即人口因素( $P$ )、社会富裕度( $A$ )和技术水平( $T$ )。人口因素( $P$ )是造成环境压力增大的最主要原因。这是因为: 就全球总体而言, 人口的不断增加直接导致了对各种资源需求的增加, 从而加剧了生态环境的破坏, 对环境造成了极大的压力<sup>[48]</sup>。就碳排放而言, 人口增加对区域外产品的需求也在不断的增加, 由此加剧了贸易隐含碳的大量转移<sup>[49]</sup>, 大量含碳产品的生产和消费对环境造成了巨大的压力。因此, 可以预期人口因素与环境压力指标成正比。其中, 人口因素变量采用各个国家或地区的人口数量。

此外, 社会富裕度( $A$ )是引发碳排放增加, 导致全球环境恶化的又一个重要原因。这是因为随着全球经济一体化进程的加快, 世界各国的经济发展水平均有了显著的提高, 尤其是发展中国家如中国和印度等, 更是成为了世界经济增长的重要引擎。随着世界各国经济水平不断提高, 各个地区对高能耗、高含碳工业产品的需求量也在持续的增加<sup>[14-15]</sup>。全球化石能源消费量持续的增加必然导致全球能源贸易量的激增。此外, 随着社会富裕程度的提高, 本地居民或者企业对本区域及区域外工业品的强劲需求也带来了工业化规模的扩大。而工业是能源消费的最主要部门, 因此富裕的生活水平就会导致区域外能源的大量消耗<sup>[50]</sup>。因此, 可以预期社会富裕程度与环境压力指标成正比关系。其中, 各个国家或地区的社会富裕度变量采用人均GDP来衡量。

技术进步是减少碳排放, 改善环境质量, 缓解由人类活动对环境造成压力最重要的途径之一<sup>[51-52]</sup>。而对于技术水平( $T$ )的衡量, 当前的研究中大多采用如专利申请量或者科技经费支出占财政支出比重来作为衡量技术水平变量的指标<sup>[53-54]</sup>。尽管这种衡量方式能够直观且简洁地刻画技术指标, 但是专利技术和科技经费投入并非全部与节能减排直接相关。而能源强度可以很好地反映一个国家和地区的节能减排技术水平<sup>[46, 55]</sup>。此外, 清洁能源技术对生态环境压力起到的积极改善作用<sup>[56-57]</sup>。由于单一的技术指标可能难以全面地体现技术水平对区域生态环境的影响<sup>[58-59]</sup>, 采用多个技术指标来进行衡量不仅可以较好地描述技术水平的影响, 同时估算这些技术指标的影响也能为相关利益主体制定相应的减排政策提供基础理论依据。对此, 基于数据的可获取性考虑, 本文采用能源强度和清洁能源比重两种指标全面刻画技术水平对全球环境压力的影响。

另外, 如上述所言, 工业是最大的能源消耗部门以及最大的碳排放部门。对发展中国家如中国、印度等而言, 其正处在工业化快速发展阶段。这主要存在两方面需求: 一方面是本国对工业化持续发展的需求, 通过走工业化道路来实现经济增长的目标, 同时也服务于本国经济; 另一方面, 主要是来自于其他国家或者地区对该国工业品的需求。例如, 美国向中国进口大量的工业产品导致了中国的工业化水平不断地提高。一般来说,

工业比重较高的国家通常具有很高的碳排放。因此，本文采用第二产业占比来反映工业化水平，预期工业化与环境压力指标成正比关系。根据上述分析，STIRPAT 理论模型 (15) 可进一步扩展为如下形式：

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d_1 \ln T_1 + d_2 \ln T_2 + d_3 \ln T_3 + \ln e \tag{16}$$

式中： $T_1$ 、 $T_2$ 和 $T_3$ 分别表示能源效率、清洁能源比重和第二产业占比； $d_1$ 、 $d_2$ 和 $d_3$ 为待估计的系数。其他变量同式 (15) 一致。

2.3 数据来源及说明

本文需要全球多区域投入产出数据、分区域分部门的碳排放数据。需要着重强调的是，目前能够获取的最新且最全的全球多区域投入产出表数据来源于世界投入产出数据库 ([http://www.wiod.org/new\\_site/home.htm](http://www.wiod.org/new_site/home.htm))，它包含从 1995-2011 年全球 39 个主要国家的 35 个产业部门的投入产出、碳排放以及能源使用等数据，因此本文中具体研究的对象共有 39 个，时间跨度为 1995-2011 年。此外，本文中能源结构采用可替代能源和核能占能源使用总量的百分比表示，能源强度采用 GDP 单位能源消耗表征，区域经济发展水平采用人均 GDP 表示，这些数据均主要来源于世界银行数据库 (<http://data.worldbank.org.cn/>)。而各个国家或者地区的第二产业比重来源于世界投入产出数据库。最后，为了剔除经济数据中价格因素的影响，本文中涉及的经济数据均折算成 1995 年美元不变价。最后，本文所涉及到的数据变量的描述性统计如表 2 所示。

表 2 STIRPAT 模型中涉及的数据描述性统计  
Tab. 2 Descriptive statistics for variables involved in the STIRPAT model

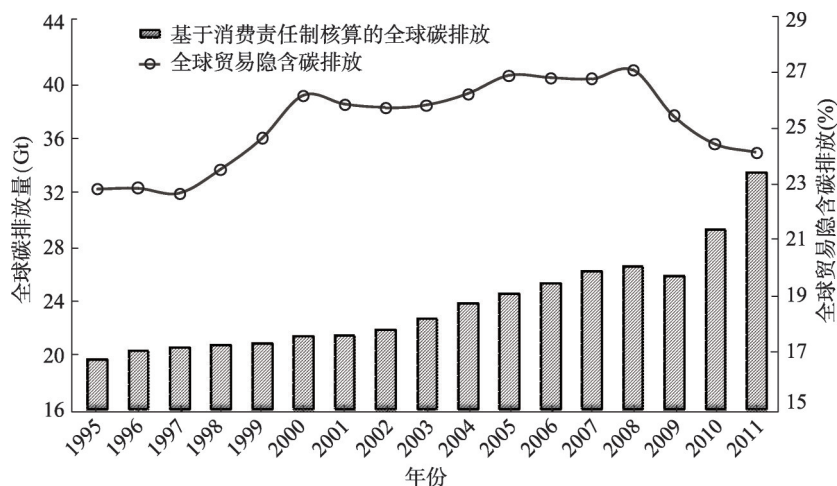
名称	变量名	均值	标准差	最小值	最大值
全球环境压力	<i>lnCarbon</i>	11.61	1.79	4.74	16.03
人口数量	<i>lnPOP</i>	16.77	1.91	12.82	21.02
人均 GDP	<i>lnGDP</i>	8.92	1.69	3.84	11.36
能源强度	<i>lnEI</i>	-2.04	0.36	-2.76	-1.07
能源结构	<i>lnES</i>	1.63	1.95	-9.21	3.93
工业化水平	<i>lnSEC</i>	-0.87	0.23	-1.96	-0.38

3 结果分析与讨论

3.1 全球贸易隐含碳排放的核算

基于式 (11) 和 (13)，本文估算了全球贸易隐含碳排放以及基于消费责任制核算的全球碳排放量，结果如图 1 所示。

总体来看，1995-2011 年基于消费责任制核算的全球碳排放量增长显著，其中 2011 年排放量 (33.53 Gt) 比 1995 年 (19.72 Gt) 增加了约 70%，这说明当前应对全球气候变化的碳减排任务仍然异常艰巨。随着 2016 年底具有法律约束力的全球温室气体减排文本——《巴黎气候变化协定》正式生效实施，从全球气候治理的角度来看，加快推动全球各个国家或者地区共同参与碳减排就显得尤为重要。1995-2011 年全球贸易隐含碳排放呈现逐年增加的趋势 (年均增长率近 5%)，即 CO<sub>2</sub> 排放量由 1995 年的 4.51 Gt 增长到 2011 年的 8.10 Gt，这表明在全球经济一体化的背景下，全球经济产业贸易联系可能正在加快全球碳排放的区域转移，商品的生产者与消费者间的地理分离趋势也在逐渐加大。值得注意的是，1995-2011 年全球贸易隐含碳排放量占其消费责任制下碳排放量的比例呈现出先



注: 图中全球贸易隐含碳排放是根据其计算值与基于消费责任制核算的全球碳排放的比得到。

图1 1995-2011年全球贸易隐含碳排放及基于消费责任制核算的全球碳排放量

Fig. 1 Global carbon emissions embodied in trade and the total global consumption-based carbon emissions from 1995 to 2011

上升,后维持一个相对稳定阶段,再逐渐下降的趋势,这表明近年来随着全球经济的迅速发展,贸易隐含碳对全球减排政策的影响可能开始弱化。

此外,研究还发现,1995-2011年基于消费责任制核算的全球碳排放量和全球贸易隐含碳排放量在2001年和2009年均呈现下降现象(图1)。这两次明显的拐点分别出现在2000年和2008年。究其原因来看,这可能是由全球经济产业贸易的显著变化所导致<sup>[60-61]</sup>。具体来说,2001年全球经济进入衰退,2001年世界贸易量比2000年下降了约11%<sup>[62]</sup>。同样地,2008年全球金融危机的爆发造成了全球贸易放缓,据世界贸易组织WTO研究显示,2009年世界贸易量比2008年下降了约9%<sup>[63]</sup>。

### 3.2 基于消费责任制的全球碳排放核算

理论计算显示,在全球贸易中,区域净流出的贸易隐含碳排放量越小,基于消费责任制核算的区域碳排放量就会越大,故而在全球减排目标分配中承担的减排任务也需相应增加。在1995-2011年间(图2),全球贸易隐含碳排放净流出量较大的地区主要位于亚洲和东欧等地。就单个国家来说,碳排放净流出量最大且为正的国家和地区是俄罗斯,其贸易隐含碳排放流出量由1995年的 $1.52 \times 10^5$  Mt增加到2011年的 $2.97 \times 10^5$  Mt,增长了近95%,其次是印度尼西亚和中国。而全球贸易隐含碳排放净最小的地区主要是以西欧和北美等高度发达的经济体(图2)。具体到单一国家而言,碳排放净流出量最小且为负的国家是美国,其2011年的碳排放净流出量绝对值( $-1.62 \times 10^5$  Mt)比1995年( $-4.60 \times 10^4$  Mt)增加了近4倍,年均增长率近15%,其次是欧盟和日本。

此外,如图2所示,对某些经济高度发达的国家如加拿大和澳大利亚来说,其贸易隐含碳排放净流出量的演化特征尤为值得关注。具体来看,在1995-2011年间,澳大利亚的贸易隐含碳排放净流出量逐渐从正流出量变为负流出量,且净流出量的绝对值较大,而加拿大的隐含碳排放净流出量逐渐从较小的负流出量变为较大的正流出量。究其原因来看,这可能与本国产品的贸易出口结构有关<sup>[29]</sup>,如对于澳大利亚来说,其早期的对外贸易产品多为高含碳的能源产品<sup>[64]</sup>。对于加拿大而言,这主要是由于其本身自然资源丰富,且近年来随着全球经济的迅猛发展,区域外对本国化石能源的大量需求导致其贸易隐含碳排放流出量迅速增多<sup>[65]</sup>。

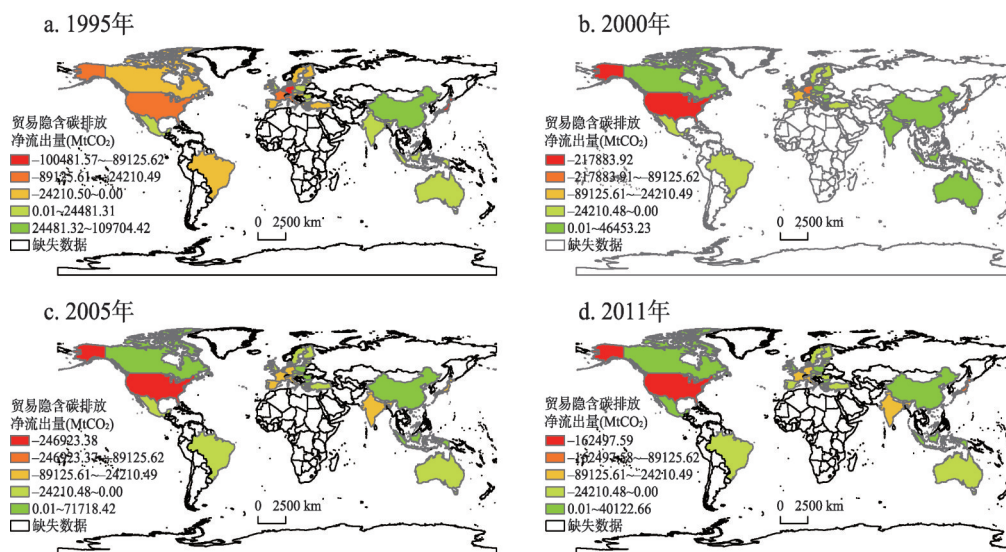


图2 1995-2011年全球各个国家或者地区的贸易隐含碳排放净流出量

Fig. 2 Net outflow of global carbon emissions embodied in trade for 39 countries from 1995 to 2011

总体来看,上述研究结果表明,长期以来,中国和俄罗斯均是最主要的碳排放净流出地区。随着全球贸易联系日益紧密,尽管贸易推动了本区域经济发展,但因美国、欧盟等发达经济体在生产与消费过程中对各种资源产品有着巨大的需求量,区域间贸易也导致了大量的碳排放转移。因而在全球减排责任划分方案中,对于中国和俄罗斯来说,基于消费责任制核算的区域碳减排方案显然更为公平且合理。

整体上,从1995-2011年来看(图3),基于消费责任制核算的全球碳排放主要集中在美国、中国、印度和俄罗斯等大国。进一步地计算显示,自1995年以来,基于消费责任制核算下这4个国家的碳排放量占全球碳排放总量的比例高达45%以上,并且年均增长率维持在5%左右。因此,着重降低这4个国家的碳排放量会极大地有利于推动全球减排目标的实现。而在基于消费责任制核算下,以英国、法国和德国为主的欧盟国家的碳排放量长期以来均处于较低水平(图3),因此,在具有法律约束力的全球碳减排目标下,这些国家所面临的减排压力相对较小。此外,依据全球各个地区贸易隐含碳排放净流出量与基于消费责任制核算的碳排放的现状特征,Davis等<sup>[19]</sup>对全球113个主要国家或者地区进行了分类归纳与总结,如下:

(1) 平均  $E_r^{BEET} > 5 \times 10^4$  Mt, 则为高净流出地区; 平均  $E_r^{BEET} \in (0, 5 \times 10^4$  Mt), 则为中净流出地区; 平均  $E_r^{BEET} \in (-5 \times 10^4$  Mt, 0), 则为低净流出地区; 平均  $E_r^{BEET} < -5 \times 10^4$  Mt, 则为极低净流出地区。

(2)  $E_r^{CONS} > 10^6$  Mt, 则为高碳排放地区;  $E_r^{CONS} \in (5 \times 10^5$  Mt,  $1 \times 10^6$  Mt), 则为中碳排放地区;  $E_r^{CONS} < 5 \times 10^5$  Mt, 则为低碳排放地区。

在将德国、法国等欧洲国家合并为一个欧盟地区的基础上,即可将全球39个主要国家划分为13个国家或者地区。根据上述的归纳与总结,本文进一步可得到表3。

从表3中可以得出两点启示:① 基于消费责任制核算下,中国、美国、印度和俄罗斯等国家的碳排放量非常高,但从其贸易隐含碳排放净流出量来看,中国和俄罗斯的相对高且为正,而印度和美国则相对较低且为负。从以净流出为主的中国和俄罗斯来看,

作为主要的碳排放量流出国，尽管贸易给这些国家带来了大量的资源，带动了经济发展，但其存在的问题也不容忽视，即在这一过程中也随之带来了更多的减排责任，在全球减排中面临着较大的减排压力，给区域经济发展以及本地区的生态环境均可能带来了一定程度的不利影响。固然，区域经济发展所产生的强劲内部需求是导致其贸易隐含碳排放不断增加的主要原因，但也如Weber等<sup>[48]</sup>所言，其内部能源技术落后以及本区域巨大的消费需求对区域贸易隐含碳排放的重要影响也不容忽视。

② 对于美国欧盟等国家或地区而言，长期以来，这些国家或者地区通过贸易转嫁了大量的区域减排责任，从而一定程度上减轻了碳减排对经济发展所产生的不利影响。面对全球贸易隐含碳排放对全球环境所造成的严重影响，这些发达经济体（国家）应该主动地开展技术转移或者资金援助等方式，以帮助提高其他国家或地区的生产技术水平，这样不仅有利于减低贸易对自身碳排放核算及其减排责任的影响，同时也有利于进一步推动全球减排。这一点尤为值得引起相关利益主体的高度重视。

3.3 STIRPAT 模型估计结果分析

分析完基于消费责任制核算的全球碳排放之后，基于扩展的STIRPAT理论模型，本文进一步对基于消费责任制核算下全球环境压力的影响因素进行了分析。在模型估计之

表3 全球主要国家或地区的贸易隐含碳净流出量和基于消费责任制核算的碳排放分类

Tab. 3 Classification of net outflow of global carbon emissions embodied in trade and the total global consumption-based carbon emissions

国家	贸易隐含碳排放 净流出量	基于消费责任制 核算的碳排放
澳大利亚	中	低
欧盟	中	低
巴西	中	低
加拿大	中	低
中国	高	高
印度	低	高
印度尼西亚	中	低
日本	中	中
韩国	中	中
墨西哥	中	低
俄罗斯	高	高
土耳其	低	低
美国	极低	高

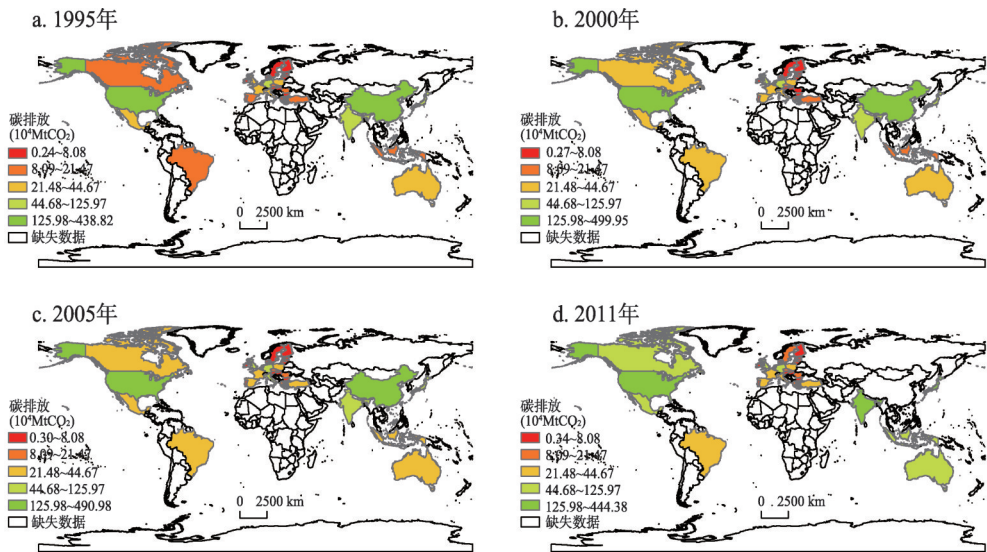


图3 1995-2011年全球主要国家或者地区的基于消费责任制核算的碳排放

Fig. 3 Total global consumption-based carbon emissions for 39 countries from 1995 to 2011

前, 本文对数据进行了多种统计检验, 包括平稳性检验、正态性分析和相关性分析等。通过这些检验结果可知, 样本数据非常适合于STIRPAT模型的建立和估计。模型估计结果如表4所示。本文首先采用混合最小二乘方法 (Pooled Least Squares, PLS) 对STIRPAT模型进行估计, 结果如表4第二列所示。可以发现, 人口、富裕水平和能源强度变量均显著为正, 说明人口增长、富裕水平提高和能源强度的提高均可以显著地增加基于消费责任制核算的全球碳排放总量, 从而说明了这3个因素是造成全球环境压力增加的主要影响因素。但是, 能源结构变量和第二产业比重变量在统计上均不显著。

表4 静态面板数据模型估计结果  
Tab. 4 Results of static panel data models

变量	PLS 模型	固定效应模型	随机效应模型	双固定效应模型
lnPOP	0.935*** (0.015)	3.084*** (0.457)	0.945*** (0.037)	2.023*** (0.231)
lnGDP	0.311*** (0.017)	0.014 (0.056)	0.212*** (0.035)	0.054** (0.027)
lnEI	0.388*** (0.076)	-0.909*** (0.161)	-0.380*** (0.128)	-0.120 (0.107)
lnES	-0.007 (0.015)	-0.003 (0.033)	0.030 (0.024)	-0.010 (0.014)
lnSEC	-0.181 (0.121)	-0.414 (0.356)	-0.428** (0.222)	-0.140 (0.154)
常数项	-6.196*** (0.385)	-42.449*** (7.609)	-7.321*** (0.829)	-23.079*** (3.970)
R <sup>2</sup>	0.8738	0.8039	0.8497	0.8600

注: 圆括号内为标准误差; \*\*、\*和'分别表示 1%、5%和 10%显著。

然而, 混合最小二乘模型未能包含各个国家特殊的且不随时间变化而变化的变量, 如果不控制这些国家个体之间的差异因素可能会对估计结果造成偏误。因此, 本文对控制了个体固定效应、时间效应以及双固定效应的STIRPAT模型分别进行估计, 回归估计结果如表4的第三、四和五列所示。由估计结果可以发现, 固定效应模型和随机效应模型的估计结果相差较大, 尤其是人口变量。因此, 需要对这两个模型进行Hausman检验。检验结果可知, 应该选择双固定效应模型。

由表4第五列的双固定效应模型结果可知, 在所有的变量中, 只有人口变量和富裕水平变量显著, 其他变量均不显著。从弹性系数来看, 人口变量的弹性系数竟然高达2.023, 说明人口每增加1%, 碳排放量就提高2.023%, 很显然, 人口变量弹性系数过大。然而, 富裕水平的弹性系数仅仅为0.054, 说明人均GDP每提高1%, 碳排放仅仅提高0.054%, 显然估计的弹性太小。从上述这两个变量估计的弹性系数可以看出, 双固定效应模型的估计结果夸大了人口变量, 而低估了富裕水平对碳排放的影响。这是因为, 双固定效应模型仍然忽略了很多因素, 从而造成了估计上的偏误。例如, 有一些影响因素如区域贸易结构等难以用变量来表示, 并且这些因素在前一期对碳排放造成了很大的影响。此外, 碳排放前后期之间存在较大的相关性, 换言之, 可能存在时间上的滞后效应。并且, 就本文中核算的碳排放数据来看, 也是呈现逐年增长的趋势。此外, 静态面板模型还可能存在潜在的内生性问题, 故此, 本文转而考虑动态面板数据模型来解决上述问题<sup>[66-67]</sup>, 模型估计结果如表5所示。

本文采用动态面板估计方法STIRPAT模型重新进行了估计, 首先对因变量采用滞后

一期方法，结果如表5中的第二列所示。由结果可知，碳排放变量滞后一期的系数高度显著，表示碳排放的滞后一期对未来有促进作用，换言之，碳排放随着时间在逐渐增加。从碳排放的影响因素来看，除了第二产业比重之外，其他变量均高度显著。但是，AR（1）和AR（2）的概率值均远远小于1%，说明采用的工具变量并非有效。同样，本文继续对因变量滞后两期，结果如第三列所示。可以发现结果与滞后一期的结果十分类似，工具变量选择也并非有效。然后，采用滞后三期的因变量进行估计，由AR（1）和AR（2）的检验结果可知，至少在10%的显著性水平下无法拒绝工具变量有效的原假设，说明工具变量的选择非常有效。此外，由Sargan检验结果可知，模型不存在过度识别约束的问题。从模型的系数来看，各个变量的弹性系数均在合理的范围之内，从而说明采用动态面板数据模型是最为合适的模型。

从碳排放的3个滞后项的系数来看，随着滞后期的增加，弹性系数在逐渐减小，说明滞后期数越长，对碳排放影响就越小，结论非常符合时间滞后效应。由此可见，碳排放呈现逐渐增长的态势。

再来分析人口变量，其弹性系数为0.736，说明人口每增加1%，碳排放就提高0.736%，弹性系数很高，说明人口因素是影响全球碳排放的重要因素之一。目前，全球人口数量仍然不断地增加，尤其是发展中国家，人口数量增长更快，资源产品的需求量和消耗量迅速增加，从而促使碳排放量的猛增，进而对环境造成了极大的压力。由人口导致的碳排放增加目前来说是一个非常重要的现实问题。显然，这不仅涉及到全球碳消费的公平问题，同时也涉及到富裕水平对全球各个国家或者地区碳排放核算的影响。

另外，从回归结果来看（表5），富裕水平变量的弹性系数为0.194，说明人均GDP提高1%，碳排放增加在0.2%左右。目前，以中国、印度为代表的发展中国家，国民收入水平、居民生活得到了极大的提高与改善，但也导致了大量的区域碳排放转移问题，从而对本地区的环境产生了巨大的压力。为此，国际社会要求发展中国家减排的呼声愈发强烈。需要强调的是，这又回到了区域碳消费公平的问题。发达国家经历了高碳消费时代并进入了低碳生活方式，转而要求发展中国家加大减排力度，这引发了公平性的讨论。此外，发达国家的低碳生活依赖于进口发展中国家的工业产品，从而将碳减排责任通过区域间贸易转嫁到发展中国家。因此，如果要实现全球减排的目标，发达国家更需要积极地帮助发展中国家改善技术，减少全球碳排放。

表5 动态面板数据模型估计结果  
Tab. 5 Results of dynamic panel data models

变量	动态面板模型 (lag=1)	动态面板模型 (lag=2)	动态面板模型 (lag=3)
L1. lnCarbon	0.190*** (0.015)	0.162*** (0.017)	0.151*** (0.017)
L2. lnCarbon		0.103*** (0.013)	0.092*** (0.014)
L3. lnCarbon			0.059*** (0.011)
lnPOP	0.826*** (0.040)	0.728*** (0.042)	0.736*** (0.046)
lnGDP	0.229*** (0.032)	0.146*** (0.037)	0.194*** (0.037)
lnEI	0.410*** (0.102)	0.447*** (0.096)	0.357*** (0.077)
lnES	-0.035*** (0.010)	-0.031*** (0.010)	-0.027*** (0.007)
lnSEC	0.136 (0.194)	0.184 (0.179)	0.536** (0.276)
常数项	-5.093*** (0.998)	-3.508*** (0.807)	-4.384*** (0.759)
AR(1) [概率值]	-3.7279 [0.0002]	-2.2566 [0.0240]	0.8887 [0.9030]
AR(2) [概率值]	3.1027 [0.0019]	-2.7480 [0.0060]	-0.1219 [0.3742]
Sargan [概率值]	19.6209 [1.0000]	19.4810 [1.0000]	21.6974 [1.0000]

注：圆括号内为标准误差，方括号内为概率值；\*\*\*、\*\*和\*分别表示1%，5%和10%显著。

表示技术进步变量的能源强度变量显著为正,弹性系数为0.357,说明能源强度高,碳排放量越大,技术进步是影响碳排放的重要因素。就目前来说,发展中国家的能源强度远高于发达国家的水平,这也直接反映出了发展中国家技术水平落后的事实。因此,在全球节能减排的目标之下,发达国家有义务与责任为发展中国家提供技术转移,有效地提高发展中国家的技术水平,大幅度地改善能源利用效率,从而完成区域碳减排目标。此外,能源结构变量显著为负,说明清洁能源占总能源消费比重越高,碳排放就会降低,这也非常符合预期。但能源结构主要依赖于本国能源禀赋储量,很难在较短的时间内得到改善,这一点可能还需要引起各利益主体的重视。

最后,第二产业比重显著为正,表明工业化水平的提高显著地增加了碳排放。对于发展中国家来说,例如中国和印度,正在依靠大力发展工业化道路来促进本国经济的增长以及提高人民的生活水平。目前,发展中国家已经成为拉动全球经济增长的重要引擎。工业化的快速发展,消耗了大量的区域外生产的产品以及能源,由此产生的碳排放对环境也造成了极大的压力。此外,在能源过度消耗以及工业化快速发展的背景下,能源短缺也成为了发展中国家工业化发展的瓶颈。例如,中国和印度大量地依靠能源进口来维持本国工业的发展。因此,实现高质量的工业化并解决能源短缺问题,从而推动工业技术水平的提高是解决问题的关键要素。

## 4 结论与政策启示

以全球39个主要国家为例,通过构建多区域投入产出分析模型和基于扩展的STIRPAT模型,本文核算了全球39个主要国家的基于消费责任制的碳排放,并在此基础上深入探讨了全球环境压力的影响因素问题,主要结论为:

(1) 1995-2011年全球贸易隐含碳排放和基于消费责任制核算下的全球碳排放均呈现出增长趋势。随着全球经济的迅速发展,某些经济发达且资源丰富的地区如加拿大等也逐渐成为贸易隐含碳排放的净流出地。这说明当前在全球减排责任划分中,贸易产生的影响仍然不容忽视。同时中国和俄罗斯承担了更多的减排责任,而富裕地区消费了更多的全球资源却规避了大量的减排责任。此外,在全球贸易中,区域净流出的贸易隐含碳排放越小,基于消费责任制核算的区域碳排放量就会越大,故而在全球减排目标分配中承担的减排任务也需相应增加。在1995-2011年间,全球贸易隐含碳排放净流出量较大的地区主要位于亚洲和东欧等地,全球贸易隐含碳排放净最小的地区主要是以西欧和北美等高度发达的经济体为主。

(2) 就基于消费责任制核算下的全球环境压力而言,人口变量的弹性系数为0.736,这说明人口因素是推动基于消费责任制核算的全球碳排放不断增加的主要因素之一。富裕水平变量的弹性系数为0.194,这表明区域收入水平的上升会提高碳排放量。能源强度变量和工业化水平变量的弹性系数分别为0.357和0.536,这说明区域能源强度和工业化水平越高,碳排放量越大。而能源结构变量显著且为负(弹性系数为-0.027),这表明清洁能源占总能源消费比重越高,碳排放量就会越低。

针对研究的结果,本文得到了以下三方面的政策启示:

(1) 从以净流出为主的中国和俄罗斯来看,尽管贸易给这些地区带来了大量的资源,换取了经济的快速发展,但随之产生了严重的区域生态环境问题。对于美国和欧盟等地区,这些国家或者地区通过贸易规避了大量的碳减排责任。面对贸易隐含碳排放对

全球环境的影响, 这些国家或者地区应该主动开展技术转移或者资金援助等, 以帮助提高其他地区的能源技术水平, 这样不仅有利于降低贸易对自身碳排放核算及其减排责任的影响, 同时也有利于推动全球减排目标的实现。

(2) 就碳排放对全球环境产生的压力而言, 人口因素和富裕程度是导致全球碳排放逐年增长的两个重要因素。目前, 全球人口数量不断增加, 尤其是新兴国家如中国和印度, 巨大的人口规模导致对区域内外各种资源需求猛增, 从而一定程度上推动全球碳排放的增加。此外, 这些新兴国家在近几年里经济发展十分迅猛, 收入水平有了明显的提高, 随之而来的是居民生活水平的极大改善, 由此对区域外高能耗和高碳排放的产品和服务的需求也不断提高。例如, 私人汽车的猛增引发对区域内外化石能源的大量消耗, 进而排放各种温室气体。因此, 对于这些新兴国家而言, 政府还需努力提高民众的环境保护意识, 鼓励“低碳生活”, 努力减少对化石能源的依赖, 从而有效降低区域碳排放量。

(3) 技术进步是节能减排、有效地改善环境质量和缓解环境压力的重要途径。总体来看, 一方面, 发展中国家能源效率远远低于发达国家, 单位碳排放量水平很高, 这也使得发展中国家背负了更多的减排责任。另一方面, 绝大多数发达国家都是碳净流入国, 将本应该属于自己的全球碳减排责任转嫁到了发展中国家。对此, 出于保护地球环境的目的, 在节能技术方面, 发达国家应该承担更多的国际义务, 将本国先进的技术通过实物资本如机器设备转移到技术水平落后的发展中国家, 或者通过知识外溢手段例如传授先进的管理经验, 来改善发展中国家管理水平低下所导致的高能耗和高污染排放。此外, 能源结构也是影响碳排放的重要因素。例如, 中国作为最大的碳排放量国家, 碳排放总量居高不下的原因就是煤炭为主的能源消费结构。因此, 逐渐提高清洁能源在能源消费中的比重是节能减排、缓解全球环境压力的另一个重要途径。

## 参考文献(References)

- [1] Wachsmuth D, Cohen D A, Angelo H. Expand the frontiers of urban sustainability. *Nature*, 2016, 536(7617): 391-393.
- [2] Kagawa S, Suh S, Hubacek K, et al. CO<sub>2</sub> emission clusters within global supply chain networks: Implications for climate change mitigation. *Global Environmental Change*, 2015, 35: 486-496.
- [3] Peng Shuijun, Zhang Wencheng, Wei Rui. National carbon emission responsibility. *Economic Research Journal*, 2016, 3: 137-150. [彭水军, 张文城, 卫瑞. 碳排放的国家责任核算方案. *经济研究*, 2016, 3: 137-150.]
- [4] Tang Zhipeng, Liu Weidong, Gong Piping. Measuring of Chinese regional carbon emission spatial effects induced by exports based on Chinese multi-regional input-output table during 1997-2007. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1403-1413. [唐志鹏, 刘卫东, 公丕萍. 出口对中国区域碳排放影响的空间效应测度: 基于1997-2007年区域间投入产出表的实证分析. *地理学报*, 2014, 69(10): 1403-1413.]
- [5] WRI/WBCSD, World resources institute, world business council for sustainable development. The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard (revised edition). <http://www.ghgprotocol.org/2009>.
- [6] Wiedmann T, Minx J. A definition of carbon footprint. *Ecological Economics Research Trends*, 2008, 1: 1-11.
- [7] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global trade-linked analysis. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(16): 6414-6420.
- [8] Seto K C, Güneralp B, Hutya L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [9] Nejat P, Jomehzadeh F, Taheri M M, et al. A global review of energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO<sub>2</sub> emitting countries). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43: 843-862.
- [10] Schandl H, Hatfield-Dodds S, Wiedmann T, et al. Decoupling global environmental pressure and economic growth: Scenarios for energy use, materials use and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 132: 45-56.

- [11] Lin B, Sun C. Evaluating carbon dioxide emissions in international trade of China. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 613-621.
- [12] Chen G, Wiedmann T, Wang Y, et al. Transnational city carbon footprint networks-exploring carbon links between Australian and Chinese cities. *Applied Energy*. 2016, 184(12): 1082-1092.
- [13] Weber C L, Matthews H S. Embodied environmental emissions in U.S. international trade, 1997-2004. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(14): 4875-4881.
- [14] Peters G P, Hertwich E G. CO<sub>2</sub> embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(5): 1401-1407.
- [15] Peters G P, Hertwich E G. Post-Kyoto greenhouse gas inventories: Production versus consumption. *Climatic Change*, 2008, 86(1/2): 51-66.
- [16] Scott K, Barrett J. An integration of net imported emissions into climate change targets. *Environmental Science and Policy*, 2015, 52(10): 150-157.
- [17] Arce G, López L A, Guan D. Carbon emissions embodied in international trade: The post-China era. *Applied Energy*, 2016, 184(12): 1063-1072.
- [18] Li Fangyi, Liu Weidong, Tang Zhipeng. Study on inter-regional transfer of embodied pollution in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(6): 791-801. [李方一, 刘卫东, 唐志鹏. 中国区域间隐含污染转移研究. *地理学报*, 2013, 68(6): 791-801.]
- [19] Davis S J, Caldeira K. Consumption-based accounting of CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(12): 5687-5692.
- [20] Chen G Q, Chen Z M. Greenhouse gas emissions and natural resources use by the world economy: Ecological input-output modeling. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2362-2376.
- [21] Feng K, Davis S J, Sun L, et al. Outsourcing CO<sub>2</sub> within China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(28): 11654-11659.
- [22] Hu Y, Lin J, Cui S, et al. Measuring urban carbon footprint from carbon flows in the global supply chain. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(12): 6154-6163.
- [23] Yang Z, Wei T, Moore J C, et al. A new consumption-based accounting model for greenhouse gases from 1948 to 2012. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133(10): 368-377.
- [24] Shi Minjun, Wang Yan, Zhang Zhuoying, et al. Regional carbon footprint and inter-regional transfer of carbon emissions in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1327-1338. [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. *地理学报*, 2012, 67(10): 1327-1338.]
- [25] Shui B, Harriss R C. The role of CO<sub>2</sub> embodiment in US-China trade. *Energy Policy*, 2006, 34: 4063-4068.
- [26] Ackerman F, Ishikawa M, Suga M. The carbon content of Japan-US trade. *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4455-4462.
- [27] Guo J, Zou L L, Wei Y M. Impact of inter-sectoral trade on national and global CO<sub>2</sub> emissions: An empirical analysis of China and U.S. *Energy Policy*, 2010, 38(3): 1389-1397.
- [28] Du H, Guo J, Mao G, et al. CO<sub>2</sub> emissions embodied in China-US trade: Input-output analysis based on the emergy/dollar ratio. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 5980-5987.
- [29] Wu R, Geng Y, Dong H, et al. Changes of CO<sub>2</sub> emissions embodied in China-Japan trade: Drivers and implications. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(1): 4151-4158.
- [30] Jayanthakumaran K, Liu Y. Bi-lateral CO<sub>2</sub> emissions embodied in Australia-China trade. *Energy Policy*, 2016, 92(5): 205-213.
- [31] Xu Y, Dietzenbacher E. A structural decomposition analysis of the emissions embodied in trade. *Ecological Economics*, 2014, 101(5): 10-20.
- [32] Ahmad N, Wyckoff A. Carbon dioxide emissions embodied in international trade of goods. Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD, Paris, 2003.
- [33] Chen Z M, Chen G Q, Chen B. Embodied carbon dioxide emissions of the world economy: A systems input-output simulation for 2004. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2(1): 1827-1840.
- [34] Peters G P, Minx J C, Weber C L, et al. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(21): 8903-8908.
- [35] Wiebe K S, Bruckner M, Giljum S, et al. Calculating energy-related CO<sub>2</sub> emissions embodied in international trade using a global input-output model. *Economic Systems Research*, 2012, 24(2): 113-139.
- [36] Wiebe K S, Bruckner M, Giljum S, et al. Carbon and materials embodied in the international trade of emerging

- economies. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4): 636-646.
- [37] Brizga J, Feng K, Hubacek K. Household carbon footprints in the Baltic States: A global multi-regional input-output analysis from 1995 to 2011. *Applied Energy*, 2017, 189: 780-788.
- [38] Zhang Xiaoping. Carbon dioxide emissions embodied in China's foreign trade. *Acta Geographica Sinica*. 2009, 64(2): 234-242. [张晓平. 中国对外贸易产生的CO<sub>2</sub>排放区位转移分析. *地理学报*, 2009, 64(2): 234-242.]
- [39] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics*, 2009, 69(2): 211-222.
- [40] Su B, Huang H C, Ang B W, et al. Input-output analysis of CO<sub>2</sub> emissions embodied in trade: The effects of sector aggregation. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 166-175.
- [41] Guo J, Zhang Z, Meng L. China's provincial CO<sub>2</sub> emissions embodied in international and interprovincial trade. *Energy Policy*, 2012, 42: 486-497.
- [42] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [43] Jiang Lei, Ji Minhe. China's energy stress based on the STIRPAT model: A spatial econometric perspective. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(9): 1072-1077. [姜磊, 季民河. 基于STIRPAT模型的中国能源压力分析: 基于空间计量经济学模型的视角. *地理科学*, 2011, 31(9): 1072-1077.]
- [44] Chen Zhijian, Wang Zheng. The differences of driving factors of local governments' pressure on carbon emission reduction in China based on STIRPAT model. *Resources Science*, 2012, 34(4): 718-724. [陈志建, 王铮. 中国地方政府碳减排压力驱动因素的省际差异: 基于STIRPAT模型. *资源科学*, 2012, 34(4): 718-724.]
- [45] Wang P, Wu W, Zhu B, et al. Examining the impact factors of energy-related CO<sub>2</sub> emissions using the STIRPAT model in Guangdong province, China. *Applied Energy*, 2013, 106: 65-71.
- [46] Huang Rui, Wang Zheng, Ding Guanqun, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu province based on STIRPAT model. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 781-789. [黄蕊, 王铮, 丁冠群, 等. 基于STIRPAT模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测. *地理研究*, 2016, 35(4): 781-789.]
- [47] Shahbaz M, Loganathan N, Muzaffar A T, et al. How urbanization affects CO<sub>2</sub> emissions in Malaysia? The application of STIRPAT model. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 83-93.
- [48] Gu Gaoxiang, Wang Zheng. A research on the trends of multi-country-section carbon emissions and energy uses driven by technology progress. *Urban and Environmental Studies*, 2014(1): 50-67. [顾高翔, 王铮. 技术进步推动下的多国多部门碳排放与能源使用趋势研究. *城市与环境研究*, 2014(1): 50-67.]
- [49] Zhong Z Q, He L Y, Wang Z. Geographic sources and the structural decomposition of emissions embodied in trade by Chinese megacities: The case of Beijing, Tianjin, Shanghai, and Chongqing. *Journal of Cleaner Production*. 2017, 158: 59-72.
- [50] Weber C L, Peters G P, Guan D, et al. The contribution of Chinese exports to climate change. *Energy Policy*, 2008, 36 (9): 3572-3577.
- [51] Dinda S. Environmental Kuznets curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 2004, 49(4): 431-455.
- [52] Bilgen S. Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 890-902.
- [53] Oltra V, Saint Jean M. Variety of technological trajectories in low emission vehicles (LEVs): A patent data analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(2): 201-213.
- [54] Li B, Duan Y, Luebke D, et al. Advances in CO<sub>2</sub> capture technology: A patent review. *Applied Energy*, 2013, 102: 1439-1447.
- [55] Jiang L, Folmer H, Ji M. The drivers of energy intensity in China: A spatial panel data approach. *China Economic Review*, 2014, 31(12): 351-360.
- [56] Liu Hongguang, Liu Weidong. Decomposition of energy-induced CO<sub>2</sub> emissions in industry of China. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 285-292. [刘红光, 刘卫东. 中国工业燃烧能源导致碳排放的因素分解. *地理科学进展*, 2009, 28(2): 285-292.]
- [57] Wu Leying, Wang Zheng, Xu Chengjing, et al. A CGE model for provincial carbon economy: A case study of Henan province. *Geographical Research*, 2016, 35(5): 941-952. [吴乐英, 王铮, 徐程瑾, 等. 省区碳经济分析的CGE模型及其应用: 以河南省为例. *地理研究*, 2016, 35(5): 941-952.]

- [58] Li L B, Hu J L. Ecological total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 2012, 46: 216-224.
- [59] Gregg D, Rolfe J. The value of environment across efficiency quantiles: A conditional regression quantiles analysis of rangelands beef production in north Eastern Australia. *Ecological Economics*, 2016, 128: 44-54.
- [60] Wu C, Huang X, Yang H, et al. Embodied carbon emissions of foreign trade under the global financial crisis: A case study of Jiangsu province, China. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 2015, 7(4): 1-19.
- [61] Tian J, Liao H, Wang C. Spatial-temporal variations of embodied carbon emission in global trade flows: 41 economies and 35 sectors. *Natural Hazards*, 2015, 78(2): 1-20.
- [62] Stone R W. Lending credibility: The International Monetary Fund and the Post-Communist Transition. Princeton University Press, 2002.
- [63] Hoekman B M, Kostecki M M. The political economy of the world trading system: The WTO and beyond. *Oup Catalogue*, 2009, 75(4): 760-763.
- [64] Chisholm R A. Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot. *Ecological Economics*, 2010, 69(10): 1973-1987.
- [65] Sato M. Product level embodied carbon flows in bilateral trade. *Ecological Economics*, 2014, 105: 106-117.
- [66] Arellano M, Bond S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *Review of Economic Studies*, 1991, 58: 277-297.
- [67] Blundell R, Bond S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, 1998, 87: 115-143.

## Global carbon emissions and its environmental impact analysis based on a consumption accounting principle

ZHONG Zhangqi<sup>1</sup>, JIANG Lei<sup>1,2</sup>, HE Lingyun<sup>3</sup>, WANG Zheng<sup>4,5</sup>, BAI Ling<sup>6</sup>

(1. School of Economics, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China; 2. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 4. Key Laboratory of Geographic Information Science, East China Normal University, Ministry of Education, Shanghai 200241, China; 5. Institute of Policy and Management, CAS, Beijing 100080, China; 6. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Embodied carbon emissions in international trade plays a crucial role in shaping regional commitments towards emission reduction in the context of global climate change and greenhouse gas emission policy. Based on the multi-region input-output analytical framework and the stochastic impacts by regression on population, affluence and technology (STIRPAT) model, this paper analyzes the embodiment of global emissions in trade, so as to explore the characteristics of global carbon emissions under a consumption accounting principle for 39 countries from 1995 to 2011, and investigates the determinants of the embodied emissions in global trade based on an extended STIRPAT model. One finding from this study is that some countries like China and Russia are characterized by the highest net outflow of embodied emissions in trade, while other regions in the world provide strong support for their economic growth through thick trade relationships, and more importantly, comparative advantages are also obtained by their industries associated with trades. Under the production-based accounting principle, these countries like China and Russia have also been accountable for a large volume of emissions embodied in global trade, and thus would face huge pressures to curtail carbon

emissions, which, in turn, may also impede the local economic development. Moreover, the lower the net carbon emissions embodied in regional trade, the higher the carbon emissions under a consumption accounting principle. Therefore, the relevant countries should bear greater emissions reduction responsibilities from the perspective of the production-based accounting principle in the context of global climate policy. Additionally, the analysis results show that a larger deal of net carbon emissions embodied in global trade are mainly from Asia and Eastern Europe, while a smaller amount of net carbon emissions embodied in global trade are primarily found in highly economically developed regions like Western Europe and Northern America. Another important finding is that, for environmental impact analysis regarding the corresponding influencing factors, the increase of carbon emissions embodied in global trade would be primarily caused by population and economic development level. For wealthy countries or regions such as the USA and the EU, via trade relations with their main trading partners, their environmental impacts, particularly carbon emissions associated with their consumption, may be transferred to other regions. On that basis, facing severe pressures to curb carbon emissions embodied in international trade in climate policy, these regions should take proactive initiatives like carrying out technology transfer and/or providing financial aid to improve notably other developing countries' production technology. In addition, in order to reduce the impact of trade on the emissions of global economies on global environment, the increase in the overall share of clean energy in the energy consumption structure and energy efficiency improvement should be also an effective policy option.

**Keywords:** emissions embodied in trade; input-output analysis; environmental impact; energy structure; global