DOI:10.19511/j.cnki.jee.2019.02.004

山西省贸易隐含碳排放的空间-产业转移及其影响因素研究

——基于MRIO-SDA跨期方法

刘庆燕　方　恺　丛建辉*

摘要：国家减排目标的实现亟需省级地方政府加以分解落实。然而，省际间日益频繁的贸易活动使得各省区的消费碳排放与生产碳排放出现严重背离，可能影响各省区碳减排战略措施的制定与实施。本文选取典型的能源驱动型省份山西省为例，基于多区域投入产出模型，测算了2002-2012年山西省与国内其他省市间贸易隐含的碳排放；在此基础上，采用结构分解分析方法识别了影响山西省贸易隐含碳排放转移的因素。结果表明：2002-2012年，山西省贸易隐含碳排放转移规模不断扩大，且为贸易隐含碳排放的"净调出"省份；山西省贸易隐含碳排放的空间分布呈现出由集聚式向扩散式发展的趋势；各影响因素对山西省贸易隐含碳排放转移的作用程度存在显著差异，其中，产业部门碳排放强度效应对碳排放转移的减少发挥着至关重要的作用，需求规模效应显著地增加了碳排放转移，其他因素则既可减少也会促进碳排放转移。基于研究结果，本文从建立健全省际产业转移协调机制、继续推动产业转型升级、鼓励省市间低碳产品贸易等方面提出山西省绿色低碳转型的政策建议。

关键词：隐含碳排放；多区域投入产出；结构分解分析

一、引言

为应对以全球变暖为主要特征的气候变化问题，采取措施减少碳排放已成为世界各国的共识。贸易隐含碳排放以及与之相伴的碳排放转移等问题，成为国际气候谈判关注的焦点之一（Arce et al.，2016；彭水军等，2016；Caro et al.，2017）。中国政府近年来将应对气候变化作为

*刘庆燕，浙江大学公共管理学院，邮政编码：310058，电子信箱：2438353699@qq.com；方恺，浙江大学公共管理学院，邮政编码：310058，电子信箱：fangk@zju.edu.cn；丛建辉（通讯作者），山西大学经济与管理学院，邮政编码：030006，电子信箱：congjianhui@sxu.edu.cn。

感谢匿名审稿人的宝贵意见，文责自负。

一项重大战略举措，制定了国家自主贡献目标，亟需省级地方政府加以落实。然而各省区在资源禀赋、产业结构和经济社会发展水平等方面存在明显差异，加之愈加紧密的区域间经济贸易联系导致隐含碳排放的跨行政区域转移，使得各省区的消费碳排放与生产碳排放出现严重背离（Guo et al.，2012；潘元鸽等，2013；何熊浪、张泽义，2015），这势必会影响各省区碳减排战略措施的制定与实施。因此，厘清贸易隐含碳排放的基本状况、科学识别贸易隐含碳排放的影响因素，对各省区推进气候治理、完成国家减排目标具有重要作用。

隐含碳指的是产品从原料、生产、运输、消费到废弃整个生命周期内所排放的直接或间接的二氧化碳（Wiedmann et al.，2010）。随着区域间经济往来的密切发展和市场产业分工的专业化发展，某一地区生产产品需要从其他地区获取原材料或中间产品投入，而本地生产的产品也会销往其他地区用于最终消费，因此产品和服务活动中隐含的碳排放便随着区域间的贸易流动而发生空间上的转移，贸易隐含碳排放随之产生。在本文的研究中，贸易隐含碳排放分为调出和调入两类。所谓调出的贸易隐含碳排放和调入的贸易隐含碳排放，指的是某个省份对其他省市调出商品和从其他省市调入商品时隐含的碳排放量。

关于贸易隐含碳排放的研究，学者们初期主要以国家为研究对象，测算国际贸易隐含碳排放量并分析其变动趋势，在此基础上研究其影响因素（杜运苏、张为付，2012；孟渤等，2016；潘安，2018）。近年来，次国家级区域间的贸易隐含碳排放问题得到广泛关注。刘红光和范晓梅（2014）分析了我国八大区域间的贸易隐含碳排放；Chen等（2018）测算了京津冀地区与国内其他区域之间的隐含碳排放转移；路正南和李晓洁（2015）、Zhang等（2015）、王文治（2018）则考察了我国30省市间贸易隐含碳排放问题。此外，黄蕊等（2015）、黄蕊等（2017）和钟章奇等（2017）立足于单个省份或城市的视角，分别以北京、江苏和河南为例，对区域间贸易隐含碳排放转移及相关碳泄漏问题进行了研究，为各省市明确减排责任提供了重要参考。

山西省作为全国典型的能源驱动型省份和高能耗、高排放大省，其应对气候变化的举措很大程度上影响着国家自主贡献目标的实现程度。因此，在厘清山西省与国内其他省市间贸易隐含碳排放的“区域-产业”转移的基础上，识别影响其贸易隐含碳排放转移的关键因素，对于促进山西省乃至全国推进气候治理、完成减排目标和实现绿色低碳发展等都具有重大现实意义。需要说明的是，本文主要测算省际间贸易隐含碳排放，并不包括国际贸易中的隐含碳排放，主要原因在于：（1）相关研究已表明，国内贸易对山西省碳排放的影响远远大于国际贸易（Zhong et al.，2015）；（2）对山西省而言，后者涉及的国家和地区较多，数据收集难度较大，难以实现精准测算。

贸易隐含碳排放的核算方法主要分为两种（张琦峰等，2018）：一种是生命周期评价（LCA），用于核算某一产品或服务的碳足迹；另一种则是投入产出分析（IOA），基于投入产出

表来测算各地区各产业部门最终需求引致的碳排放，该方法广泛适用于国际、省际、市际等不同尺度，主要分为单区域投入产出（Single Region Input-Output，SRIO）和多区域投入产出（Multi-Regional Input-Output，MRIO）两大类型（刘巧玲、王奇，2016；Leontief，1936；Wiedmann，2009）。由于IOA方法不仅能体现不同区域、不同部门间的贸易联系，还能够区分来自不同区域产品生产技术的差异，因而被广泛使用。此外，相关学者还运用双边贸易总量（EEBT）、产品土地利用矩阵（PLUM）和可计算一般均衡（CGE）等方法测算贸易隐含碳排放（Dolter & Victor, 2016；Peng et al.，2016；张友国, 2016）。相比而言，由于蕴含经济结构与区域关联的信息，MRIO模型将完全消费的概念纳入其中，可获得由最终需求所引起的各地区各产业部门之间的流动信息，因此使用MRIO模型优势巨大。

在贸易隐含碳排放规模测算的基础上，进一步识别影响因素是学者们关注的另一焦点议题。相关分析方法主要包括两类：一类是指数分解方法（IDA），主要包括IPAT、STIRPAT和LMDI等方法，尤以LMDI方法居多（李艳梅、付加锋，2010；李珊珊、罗良文，2012；庞军、张浚哲，2014），该方法对数据要求低，主要是基于各产业部门的时间序列数据，因此被广泛运用。另一类是结构分解分析（SDA）方法（Xu & Dietzenbacher, 2014；汤维祺等，2016；张忠杰，2017），该方法在投入产出表数据的基础上，可以展示出部门、技术和需求之间的关联，进而反映间接需求的影响，因此SDA方法相较于IDA方法更宜于与IOA结合。学者们在SDA研究中通常将影响贸易隐含碳排放的因素归结为：碳排放强度、中间投入产出结构（生产技术）、贸易结构、最终需求产品结构、经济规模、人口规模、最终消费（贸易量）等（钟章奇等，2017；郑林昌等，2017）。

总的来说，当前贸易隐含碳排放的研究大都集中在国际、国家和次国家级等宏观区域层面，对省市等小尺度区域的研究则处于起步阶段，另外，对特定省市贸易隐含碳排放的跨期分析研究相对较少，MRIO模型更多的是对单一年份隐含碳排放进行测算（Tukker et al.，2018）。此外，尽管学者们对影响因素的分解有多种方式，但鲜有研究将碳排放的“地理空间分布”因素考虑在内。而在区域气候治理中，厘清区域贸易隐含碳排放的空间分布来源，对针对性地制定碳减排政策具有重要的指导意义。为此，本研究在已有研究基础上，主要从三方面进行了改进与创新：一是研究视角，立足于“产业间贸易与资源环境”关联的视角，将山西省的低碳发展与区域发展诉求相结合，在碳减排约束下探讨山西省与其他省市间的贸易隐含碳排放问题，并提出山西省推进气候治理、破解“资源诅咒”、实现绿色低碳转型发展的政策建议；二是研究时段，基于2002年、2007年和2012年区域间投入产出表，从单一年份的截面数据扩展到了多年份的面板数据，旨在对山西省与其他省份间的贸易隐含碳排放进行跨期分析；三是因素分析，注重将产品的“来源地分布效应”考虑在内，与山西省贸易隐含碳排放的空间分析相对应，从而使得本文的影响因素分解更具有针对性。

二、方法模型及数据处理

(一)方法与模型

1. 隐含碳排放测算模型

投入产出模型最早由美国经济学家Leontief(1936)提出,主要用于测度经济体系内各个部门在投入与产出方面的相互依存关系。开放经济体中,MRIO模型能够通过区分各研究区域的生产结构、技术和消费,明确地显示出区域间不同产业部门的商品和服务流动。假定经济体中共有 z 个区域,每个区域都有 n 个部门,r 地区和 s 地区为其中任意两个区域。在MRIO模型框架下,根据行向平衡关系,有:

$$X=[I-(I-M)A^{rs}]^{-1}(I-M)Y^{rs} \tag{1}$$

其中,X 为 $z\times1$ 维列向量,表示总产出;I 为单位矩阵;M 为进口系数,且 $M=IM/(X+IM-EX)$;A为 $z\times z$ 维矩阵,其元素 A^{rs} 为 $n\times n$ 维区域间直接消耗系数矩阵,表示 s 地区产出需要由 r 地区投入的产品比例;$[I-(I-M)A]^{-1}$ 为剔除进口后的Leontief逆矩阵,表示 s 地区单位最终产品对投入部门的完全需求,包括直接需求和间接需求;Y^{rs} 为区域间贸易系数矩阵,表示最终需求中的省际贸易部分。

为测度省际贸易隐含碳排放,需要在MRIO模型的基础上引入直接碳排放系数矩阵 EF,其元素 ef_{ij} 为每个地区每个投入产出部门的直接碳排放系数,即各投入产出部门碳排放量与各部门总产出的比值。EF^{rs} 为各区域碳排放系数矩阵组成的行向量,$\widehat{EF^{rs}}$ 是 EF^{rs} 的对角矩阵,代表各省区各产业部门的单位产出碳排放。因此省区之间碳排放转移矩阵为:

$$T^{rs}=EF^{rs}[I-(I-M)A^{rs}]^{-1}(I-M)Y^{rs}=L\times(I-M)Y^{rs} \tag{2}$$

其中,$B=EF^{rs}[I-(I-M)A^{rs}]^{-1}$ 为完全碳排放系数,包括单位产出的直接碳排放和间接碳排放;调出的贸易隐含碳排放为 $T_r^e=\sum_{s=1,s\neq r}^{z}T^{rs}$,调入的贸易隐含碳排放为 $T_r^i=\sum_{i=1,i\neq r}^{z}T^{ir}$,净调出的贸易隐含碳排放(碳平衡)为 $T_r^b=\sum_{s=1,s\neq r}^{z}T^{rs}-\sum_{i=1,i\neq r}^{z}T^{ir}$。

2. 影响因素结构分解模型

在IOA基础上,SDA方法的内涵在于可以将贸易隐含碳排放的变动分解成几个基本因素的变动之和,测度在其他条件不变的情况下各基本因素对跨时期贸易隐含碳排放变化的影响效应。

利用SDA方法会产生不同的分解形式,主要分为四种:①保留交叉项;②不保留交叉项;③加权平均法;④两级分解法。相比而言,形式①中由于交叉影响的存在,无法明确地界定某个影响因素对研究对象的全部影响;形式②则由于涉及权重分配,因而存在权重不匹配的问

题；形式③存在的问题是计算量较大；形式④是形式③的近似解，具有误差小，计算量较少等优势，而且比较直观（Su & Ang, 2016），其内涵在于将从第0期（基准期）分解得到的各因素变化对因变量的影响效应和从第t期（计算期）分解得到的各因素变化对因变量的影响效应取平均值，进而得到各因素变化对因变量的影响效应值（谢锐等，2017）。综上，本文采用两级分解法对影响山西省贸易隐含碳排放的因素进行分解，在已有因素分解的基础上，特别将“产品来源地区分布效应”纳入其中。为使两级分解分析方法模型表达清晰，将公式（2）改写为：

$$T = EF \times L \times Y^d \tag{3}$$

其中，$T = T^{rs}$，$EF = EF^{rs}$，$Y^d = (I - M)Y^{rs}$。

将最终需求向量 Y^d 进一步表示为：

$$Y^d = P \times S \times F \tag{4}$$

其中，向量 P 的元素 p_{ij} 表示各产业部门提供的最终产品份额，反映的是最终需求的产品结构；向量 S 的元素 s_{ri} 表示的是省区 r 对省区 s 提供的第 i 种最终产品占省区 s 对该产品最终需求总量的比重，反映的是最终需求产品来源地；标量 F 表示的是省区的最终需求总量。需要说明的是，向量 P 和向量 S 的运算是两个向量元素的相乘。

因此，公式（3）可以进一步表示为：

$$T = EF \times L \times P \times S \times F \tag{5}$$

因此，第0期到第t期山西省贸易隐含碳排放的变化量为：

$$\Delta T = T(t) - T(0) = EF(t)L(t)P(t)S(t)F(t) - EF(0)L(0)P(0)S(0)F(0) \tag{6}$$

此外，依据 $L = (I - A^d)^{-1}$，A^d 为剔除进口的国内直接消耗系数，可以得到：

$$\Delta L = L(t) - L(0) = L(t)\Delta A^d L(0) \tag{7}$$

采用两级分解法对影响因素进行分解，可以得到：

$$\begin{aligned}\Delta T = {} & \tfrac{1}{2}\left[\Delta EFL(0)P(0)S(0)F(0) + \Delta EFL(t)P(t)S(t)F(t)\right] \\ & + \tfrac{1}{2}\left[EF(t)L(t)\Delta A^d L(0)P(0)S(0)F(0) + EF(0)L(0)\Delta A^d L(t)P(t)S(t)F(t)\right] \\ & + \tfrac{1}{2}\left[EF(t)L(t)\Delta PS(0)F(0) + EF(0)L(0)\Delta PS(t)F(t)\right] \\ & + \tfrac{1}{2}\left[EF(t)L(t)P(t)\Delta SF(0) + EF(0)L(0)P(0)\Delta SF(t)\right] \\ & + \tfrac{1}{2}\left[EF(t)L(t)P(t)S(t)\Delta F + EF(0)L(0)P(0)S(0)\Delta F\right]\end{aligned} \tag{8}$$

进一步简化为：

$$\Delta T = f(\Delta EF) + f(\Delta A^d) + f(\Delta P) + f(\Delta S) + f(\Delta F) \tag{9}$$

据此，可以将影响山西省贸易隐含碳排放的因素分解为五部分：其中，$f(\Delta EF)$ 表示产业部门碳强度效应；$f(\Delta A^d)$ 表示中间投入产出结构效应；$f(\Delta P)$ 表示产品结构效应；$f(\Delta S)$ 表示产品来源地分布效应；$f(\Delta F)$ 表示需求规模效应。

（二）数据来源及处理

本文分别采用石敏俊和张卓颖（2012）编制的2002年中国30省区市21部门MRIO表，刘卫东等（2012）编制的2007年中国30省区市30部门MRIO表和Mi等（2017）最新编制的2012年中国30省区市30部门MRIO表作为主要数据源，基于2002年30省区市21部门MRIO表的产业划分，将能源平衡表中的第5（批发、零售业和住宿、餐饮业）和第6（其他）产业部门合并，最终将MRIO表聚合为5个产业部门，分别是农业部门、工业部门、建筑业部门、运输业部门和服务业部门。尽管不同团队在编制MRIO表时所采用的模型和方法存在一些差异，但本文通过统一部门聚合标准、数据多源比对校准等手段尽可能降低了数据源不同对研究结果的影响。

一般而言，贸易隐含碳排放的核算首先基于各省市各产业部门的碳排放展开，然后运用得到的碳排放系数进行贸易隐含碳排放测度。然而由于各省市各部门的碳排放尚无权威官方统计数据，本文的数据处理主要包括以下步骤：

第一步，利用各省市2003年、2008年和2013年统计年鉴中各产业部门的能源消费数据，采用标准煤消费量核算各省市各部门的碳排放量；若无具体的能源消费数据则利用各省市2002年、2007年和2012年的能源平衡表数据进行核算，并根据《省级温室气体清单编制指南（试行）》的系数进行折标，将能源平衡表中的数据核算成标煤消费量。

第二步，将2002年、2007年和2012年各省市各部门的最终能源标煤消费量乘以标准煤的碳排放系数，据此计算2002年、2007年和2012年各省市各部门的碳排放量。值得注意的是，当前研究中，1吨标准煤完全燃烧产生的碳排放系数尚未统一，本文采用国家发改委能源研究所的推荐值0.67进行核算。

第三步，将2002年、2007年和2012年各省市各部门的碳排放量除以MRIO表中各省市各部门的总产出，即可得到各省市各部门的单位产值碳排放，也即碳排放系数。

三、实证分析

（一）山西省贸易隐含碳排放测算及变化分析

基于前述贸易隐含碳排放测算模型，得到山西省整体层面的贸易隐含碳排放量，并从时间和空间两个维度进行变化分析，在此基础上，进一步细化分析产业部门层面的贸易隐含碳排放。

1. 山西省整体贸易隐含碳排放的变化分析

2002–2012年，山西省与国内其他省市间贸易隐含碳排放转移规模持续增大。其中，2002年、2007年和2012年山西省调出的贸易隐含碳排放总量分别为5820.12万吨、9037.50万吨和14322.47万吨；从国内其他省市调入的隐含碳排放总量分别为1015.13万吨、4162.86万吨和10321.77万吨。综合贸易隐含碳排放的调出量和调入量，可以发现，山西省为贸易隐含碳排放的“净调出”省份，表明山西省在与国内其他省市的贸易联系中，输出了较多的能源资源及

相关产品和服务。具体来说山西省与国内其他省市间的贸易隐含碳排放转移，可以发现，2002-2012年，山西省调出到河北省的隐含碳排放最多，2002年、2007年和2012年分别调出1582.68万吨、1325.33万吨和1555.84万吨，而调出到海南省和青海省的隐含碳排放则相对较少。对于调入隐含碳排放来说，山西省从河北省调入的最多，2002年、2007年和2012年的调入量分别为214.01万吨、760.97万吨和1967.39万吨，从海南省则调入了最少的隐含碳排放。

2002-2012年山西省贸易隐含碳排放转移的空间分布格局显著变化。具体来说：2002年山西省贸易隐含碳排放的调出地主要集中在山西省周边省份；调出较少的省份则主要集中在西北和西南地区。2007年随着区域经济的迅速发展，调出地分布发生显著变化，环渤海、长三角和广东省成为主要集中地；调出隐含碳排放较少的省份则尚未有明显的变化。2012年山西省调出贸易隐含碳排放的地区分布在2007年的基础上进一步扩散，主要集中在环渤海、山西省周边省份、长三角、中部省份和珠三角等区域；调出隐含碳排放较少的省份分布则保持相对稳定。

2002年，山西省贸易隐含碳排放的调入地地理集聚效应显著，主要集中在周边邻近省份和环渤海地区；而调入的隐含碳排放较少的地区主要是西北和西南地区。2007年与2002年相比，山西省调入贸易隐含碳排放的地区分布逐步扩散，山西省周边省份、环渤海、东北和珠三角成为主要调入地，而调入的贸易隐含碳排放相对较少的地区则主要是西北和中南部等省份。2012年山西省贸易隐含碳排放调入地的空间分布格局在2007年的基础上尚未有本质性的变化，主要调入地集中在周边省份、环渤海地区等；从西北、西南地区调入的隐含碳排放则较少。

综上，2002-2012年，随着经济的发展，山西省与各省市间的贸易隐含碳排放转移规模逐步增大，调出量与调入量均持续增加，且保持了较大增幅。此外，在省际间贸易隐含碳排放转移规模和空间分布格局中，山西省与河北省的隐含碳转移规模最大，这一方面是由于空间上的地理集聚效应，另一方面说明河北省作为京津冀地区重要的工业基地，所需的能源主要来自山西省。

2. 山西省分部门贸易隐含碳排放的变化分析

2002-2012年，山西省各产业部门的贸易隐含碳排放转移情况如表1所示。

表1　山西省各产业部门贸易隐含碳排放转移量情况　（单位：万吨）

年份	农业部门		工业部门		建筑业部门		运输业部门		服务部门	
	调入	调出	调入	调出	调入	调出	调入	调出	调入	调出
2002年	27.34	218.02	709.83	5349.98	1.61	3.87	166.91	136.09	109.44	112.63
2007年	100.2	95.76	3698.15	8457.95	1.22	2.82	250.4	398.96	826.81	82.01
2012年	181.77	118.18	9170.24	12509.39	1.92	4.58	674.14	1331.01	293.78	359.31

由表1可以发现：2002-2012年山西省各产业部门与国内其他省市各产业部门间的贸易隐含碳排放转移存在显著差异。其中，山西省农业部门、建筑业部门和服务业部门调出的贸易隐含碳排放呈现出先减少后增加的态势，而工业部门和运输业部门调出的碳排放则逐年增加。另外，在各产业部门碳排放变化增幅方面，建筑业部门调出的碳排放变化幅度最小，工业

部门调出的碳排放变化则表现出较大增幅，调出了绝大部分贸易隐含碳排放，推动了山西省整体贸易隐含碳排放调出量的增加。

对调入贸易隐含碳排放来说，山西省农业部门、工业部门、运输业部门调入的贸易隐含碳排放均逐年增加。另外，在各产业部门碳排放变化增幅方面其中，农业部门的增长幅度较小，工业部门的增长幅度最大；建筑业部门的变化幅度较小且相对稳定；服务业部门调入的贸易隐含碳排放则是先上升后下降；工业部门净调出的贸易隐含碳排放较大，完全抵消了其他产业部门净调入的碳排放，使得山西省整体为贸易隐含碳排放的净调出省份。由此可以看出：山西省在省际贸易隐含碳排放联系中是“净调出”省份，在向国内其他经济发达地区和资源短缺省份输出能源资源及相关产品和服务的同时，也为后者承担了部分碳排放压力，尤其是工业部门承担了较重责任。这也意味着，与其他省市相比，山西省在碳密集型产品上具有一定的比较优势。

（二）山西省贸易隐含碳排放影响因素分解分析

在2002年、2007年和2012年山西省整体及分部门贸易隐含碳排放测算及变化分析的基础上，进一步研判山西省整体和分部门贸易隐含碳排放转移的主要影响因素。

1. 山西省整体贸易隐含碳排放转移的影响因素分解

2002–2007年和2007–2012年两个时间段，山西省在五种影响因素作用下的总效应使得贸易隐含碳排放调出总量分别减少和增加（图1），而贸易隐含碳排放调入总量则呈现出增加（图2）。

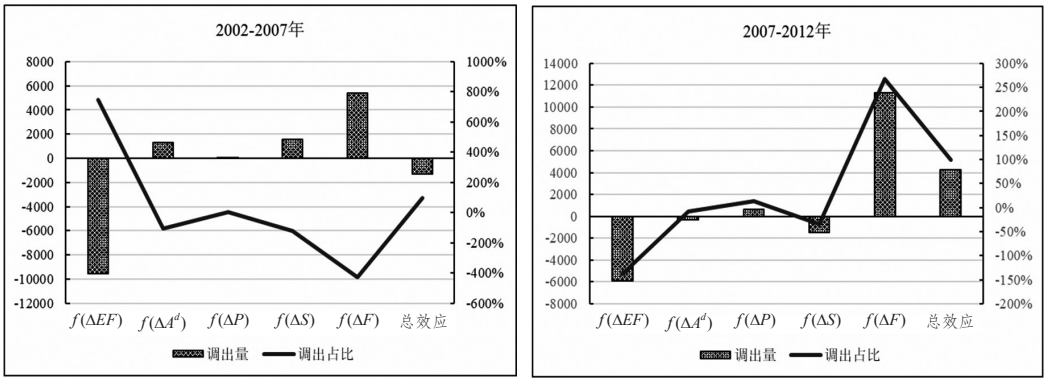

图1　2002–2012年山西省贸易隐含碳排放调出量变化影响因素分解（单位：万吨）

由图1可知：对山西省调出的贸易隐含碳排放来说，产业部门碳排放强度效应很大程度上减少了碳排放的调出量，对调出量的减少发挥着关键性的作用；中间投入产出结构效应、产品结构效应和产品来源地分布效应则对山西省贸易隐含碳排放调出量的影响不确定，2002–2007年，三种效应下，山西省调出的碳排放均增加，2007–2012年，三种效应则分别使得山西省调出的碳排放减少、增加和减少，需要强调的是，在这三种效应中，产品来源地分布效应对山西省调出的贸易隐含碳排放影响显著，分别增加和减少了1750万吨和1800万吨碳排

放；需求规模效应对调出量的影响也较为显著，尤其是2007-2012年，促使山西省调出了11000万吨碳排放。可以看出，产业部门碳强度效应和需求规模效应是影响山西省贸易隐含碳排放调出量变化的决定性因素，总效应的贡献程度很大程度上是这两个因素之间的“此消彼长”。

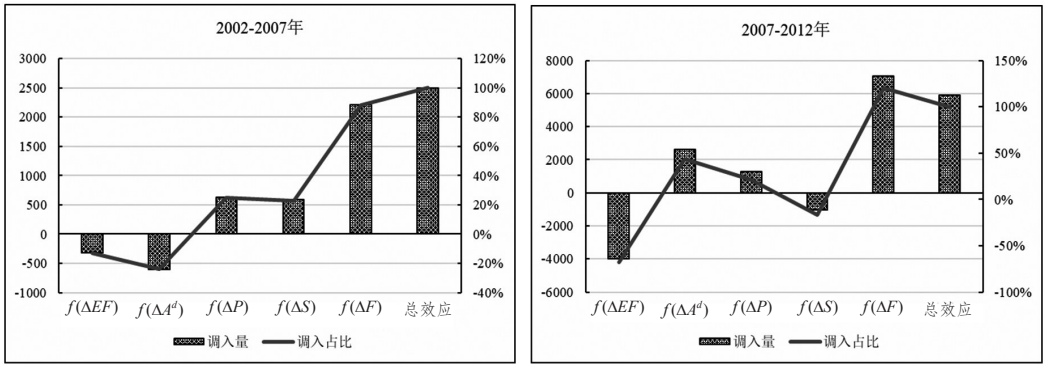

图2　2002-2012年山西省贸易隐含碳排放调入量变化影响因素分解（单位：万吨）

由图2可知：对调入到山西省的贸易隐含碳排放来说，产业部门碳排放强度的下降减少了调入的贸易隐含碳排放，且作用程度在逐渐增强，表明为减少碳排放，各省市一直致力于降低产品生产的碳排放强度；另外，中间投入产出结构效应、产品结构效应和产品来源地分布效应对碳排放调入量的影响效应不确定，2002-2007年，三种效应下，调入到山西省的碳排放分别减少、增加和增加，2007-2012年，三种效应则分别使得调入到山西省的碳排放增加、增加和减少。可以看出，三种效应中，产品来源地分布效应对调入到山西省的贸易隐含碳排放的影响程度最小；需求规模效应促进了调入到山西省的贸易隐含碳排放增多，作用程度最为显著，且2007-2012年与2002-2007年相比，最终需求规模效应促使调入的隐含碳排放增多，表明省市间贸易联系的增强促使山西省贸易隐含碳排放转移的增多。

2. 山西省分部门贸易隐含碳排放的影响因素分解

在山西省整体贸易隐含碳排放因素分解的基础上，进一步对各产业部门影响因素进行分解，结果显示，2002-2007年和2007-2012两个时间段，山西省在五种影响因素作用下，各产业部门调出和调入的贸易隐含碳排放呈现出较大差异（如表2和表3）。

由表2可以看出：对山西省农业部门来说，中间投入产出结构效应对其影响程度最为显著，另外产业部门碳强度效应和产品来源地分布效应对该部门的作用程度在增大。其中，产品来源地区分布效应由正向的促进作用转变为负向的抑制作用。碳排放强度效应显著地减少了工业部门调出的碳排放，中间投入产出结构效应和产品来源地分布效应对工业部门的影响则由正向转变为负向，显著地减少了该部门调出的隐含碳排放；对建筑业部门来说，产业部门碳排放强度效应、中间投入产出结构效应和产品来源地分布效应的增强使得该部门调出的

碳排放在2007-2012年间减少;对于运输业部门而言,产业部门碳强度效应和产品来源地分布效应对调出的贸易隐含碳排放的影响由正向转变为负向,而中间投入产出结构效应则相反,增加了该部门调出的隐含碳排放;对服务业部门来说,尽管中间投入产出结构效应对该部门的作用方向保持一致,但却促使该部门调出了大量隐含碳,表明该部门技术水平的提升还有很大的空间,产品来源地区分布效应则使得该部门调出的隐含碳减少。

表2　2002-2012年各产业部门贸易隐含碳排放调出量变化因素分解　(单位:万吨)

阶段	效应 部门	$f(\Delta EF)$ 调出量	$f(\Delta A^d)$ 调出量	$f(\Delta P)$ 调出量	$f(\Delta S)$ 调出量	$f(\Delta F)$ 调出量	总效应 调出量
2002-2007年	农业	↓-113.6	↓-1147.49	↓-11.37	↑3.93	↑136.28	↓-1132.25
	工业	↓-9450.7	↑2471.3	↓-41.16	↑1566.43	↑5032.9	↓-421.22
	建筑业	↓-3.84	↓-5.59	↑0.08	↓-0.15	↑2.73	↓-6.77
	运输业	↑65.89	↓-197.31	↑5.7	↑19.51	↑175.46	↑69.26
	服务业	↓-33.86	↑204.86	↑3.86	↓-36.73	↑77.72	↑215.85
2007-2012年	农业	↓-56.5	↓-123.69	↑5.66	↓-20.1	↑108.57	↓-86.06
	工业	↓-5525.34	↓-3404.72	↑585.5	↓-1369.37	↑10308.74	↑594.82
	建筑业	↓-0.45	↓-92.58	↑0.16	↓-0.5	↑3.56	↓-89.81
	运输业	↓-320.98	↑578.82	↑12.95	↓-34.15	↑712.16	↑948.79
	服务业	↑10.99	↑2706.11	↑5.59	↓-30.24	↑171.56	↑2864.01

表3　2002-2012年各产业部门贸易隐含碳排放调入量变化因素分解　(单位:万吨)

阶段	效应 部门	$f(\Delta EF)$ 调入量	$f(\Delta A^d)$ 调入量	$f(\Delta P)$ 调入量	$f(\Delta S)$ 调入量	$f(\Delta F)$ 调入量	总效应 调入量
2002-2007年	农业	↓-4.36	↑84.51	↓-0.09	↑18.85	↑55.65	↑154.57
	工业	↓-389.31	↑1816.48	↑628.62	↑640.86	↑1793.32	↑4489.96
	建筑业	↓-0.37	↓-4.02	↑0.13	↓-0.62	↑1.79	↓-3.09
	运输业	↑81.62	↓-1689.68	↓-10.69	↓-4.37	↑224.98	↓-1398.14
	服务业	↓-10.11	↓-804.54	↑4.92	↓-69.11	↑131.22	↓-747.62
2007-2012年	农业	↓-44.15	↓-396.81	↑23.83	↓-33.45	↑147.99	↓-302.6
	工业	↓-3764.18	↑2911.97	↑1142.06	↓-904.91	↑6251.45	↑5636.39
	建筑业	↓-0.42	↓-6.25	↑0.23	↓-0.38	↑1.71	↓-5.12
	运输业	↓-159.71	↑36.06	↑78.91	↓-23.66	↑440.36	↑371.96
	服务业	↓-34.26	↑53.74	↑13.02	↓-47.88	↑195.28	↑179.91

由表3可知:对山西省农业部门来说,随着农业部门技术水平的提升,中间投入产出结构效应对该部门调入的碳排放的影响由促进作用转为抑制作用,产品来源地区分布效应也由正向转变为负向,减少了该部门隐含碳排放的调入量;对工业部门来说,产业部门碳强度效应显著地减少了该部门调入的贸易隐含碳排放,且影响程度逐渐增大,产品来源地分布效应也由增加碳排放的调入转变为显著减少了碳排放的调入;对建筑业部门来说,产业部门碳强度效

应、中间投入产出结构效应和产品来源地分布效应均使得该部门调入的碳排放减少，其中，中间投入产出结构效应的影响程度在扩大，减少了调入的碳排放，一定程度上反映出随着技术水平的提升，该部门的碳减排能力提升；对运输业部门来说，产业部门碳强度效应减少了大量隐含碳排放的调入，中间投入产出结构效应对碳排放的影响由抑制作用转变为促进作用，产品来源地分布效应则减少了该部门隐含碳排放的调入；对服务业部门来说，产业部门碳强度效应对碳排放调入量的抑制作用增加，中间投入产出结构效应则由抑制作用转为促进作用，产品来源地分布效应对该部门的影响为负向的抑制作用，而最终需求规模效应的促进作用也进一步增大，调入了更多碳排放。

四、结论与政策建议

阐明山西省与国内其他省市间贸易隐含碳排放的转移格局与机制，识别影响山西省贸易隐含碳排放转移的关键因素，对促进山西省转型发展乃至全国碳减排工作都具有重要意义。本文基于MRIO-SDA方法对山西省2002-2012年的贸易隐含碳排放的“区域-产业”转移进行了测算与分析，在此基础上，对2002-2007年和2007-2012年两阶段贸易隐含碳排放转移的影响因素进行了分解分析，主要结论如下：

（1）贸易联系的增强加速了省际间贸易隐含碳排放转移，导致山西省及其各产业部门调出与调入的贸易隐含碳排放均有不同程度增加；工业部门较大的贸易隐含碳排放净调出量，是山西省为“净调出省”的主要原因所在，表明山西省作为典型的能源驱动型省份，在向省外输出相关产品的同时，也承担了较多本应由外省承担的碳排放任务。

（2）山西省贸易隐含碳排放转移的空间分布格局的地理集聚效应逐渐减弱，由集聚式向扩散式发展，呈现出由“点”到“片”再到“面”的空间演化趋势，影响范围从邻近省份逐步扩散至环渤海、长三角、珠三角和中部地区省份。

（3）各影响因素对山西省贸易隐含碳排放转移的贡献程度存在明显差异。其中，产业部门碳强度效应和需求规模效应成为关键性因素，前者对贸易隐含碳排放的影响主要发挥抑制作用，而后者则主要为促进作用；中间投入产出结构效应、产品结构效应和产品来源地分布效应在某些年份某些省份和部门间能促进碳排放转移，而在其他情况下又会抑制碳排放转移；对各产业部门来说，中间投入产出结构效应的影响也尤为显著。

结合本文研究结论，对山西省未来发展提出以下建议：

第一，建立健全省际产业转移协调机制，严格审核产业转移项目。立足于山西省能源资源丰富、要素成本较低等优势，首先要选择与其他省市间贸易隐含碳排放转移较少的产业部门（如运输业、建筑业和服务业）作为融入区域协同发展的切入点，同时要对承接的其他地区的产业转移项目进行严格审核，提高高碳排放项目的准入门槛。

第二，继续推动产业转型升级，提升产业部门技术效率。进一步优化山西省与其他省市间的贸易产业结构，利用山西省的劳动力、土地等资源优势，发展培育服务业外包产业和高技术产业。鉴于产业部门碳强度效应对省际间贸易隐含碳排放转移具有抑制作用，山西省应继续强化节能减排指标的考核与落实，提升各地区各产业部门的生产技术水平，提升能源资源利用率，充分发挥碳排放强度效应对减少隐含碳排放转移的作用。

第三，优化贸易产品结构，鼓励省市间低碳产品贸易。在山西省与国内其他省市各产业部门的贸易隐含碳排放联系中，工业部门调入与调出的隐含碳排放均占据总量的绝大部分，而工业部门产品大多具有高碳排放的特点。因此，要积极优化省际间贸易产品结构，减少高碳排放部门产品的贸易比重，大力鼓励低碳排放部门产品和服务的贸易流动。同时，还需建立跨省市、跨部门的区域协同减排治理机制，为分解落实国家自主贡献目标提供制度保障。

参考文献：

[1] 杜运苏，张为付. 中国出口贸易隐含碳排放增长及其驱动因素研究[J]. 国际贸易问题，2012，(3)：97–107.

[2] 何雄浪，张泽义. 经济活动空间分布的探究:技术溢出、环境污染与贸易自由化[J]. 地理科学，2015，35(2)：161–167.

[3] 黄蕊，王铮，钟章奇，孙翊，刘昌新，陆玉麒. 区域贸易隐含碳排放和SO_2排放的投入产出分析——以江苏为例[J]. 自然资源学报，2017，32(5)：854–863.

[4] 黄蕊，钟章奇，孙翊，刘昌新，刘丽. 区域分部门贸易的隐含碳排放——以北京为例[J]. 地理研究，2015，34(5)：933–943.

[5] 李珊珊，罗良文. FDI行业结构对中国对外贸易隐含碳排放的影响——基于指数因素分解的实证分析[J]. 资源科学，2012，34(5)：855–863.

[6] 李艳梅，付加锋. 中国出口贸易中隐含碳排放增长的结构分解分析[J]. 中国人口·资源与环境，2010，20(8)：53–57.

[7] 刘红光，范晓梅. 中国区域间隐含碳排放转移[J]. 生态学报，2014，34(11)：3016–3024.

[8] 刘巧玲，王奇. 我国省际贸易隐含污染核算方法的比较研究[J]. 统计研究，2016，33(10)：12–20.

[9] 刘卫东，陈杰，唐志鹏，刘红光，韩丹，李方一. 中国2007年30省区(市)区域间投入产出表编制理论与实践[M]. 北京：中国统计出版社，2012.

[10] 路正南，李晓洁. 基于区域间贸易矩阵的中国各省区碳排放转移研究[J]. 统计与决策，2015，(1)：126–129.

[11] 孟渤，格林·皮特斯，王直. 追溯全球价值链里的中国二氧化碳排放[J]. 环境经济研究，2016，(1)：10–25.

[12] 潘安. 全球价值链视角下的中美贸易隐含碳研究[J]. 统计研究，2018，35(1)：53–64.

[13] 潘元鸽，潘文卿，吴添. 中国地区间贸易隐含CO_2测算[J]. 统计研究，2013，30(9)：21–28.

[14] 庞军，张浚哲. 中欧贸易隐含碳排放及其影响因素——基于MRIO模型和LMDI方法的分析[J]. 国际经贸探索，2014，11：51–65.

[15] 彭水军，张文城，卫瑞. 碳排放的国家责任核算方案[J]. 经济研究，2016，51(3)：137–150.

[16] 石敏俊，张卓颖. 中国省区间投入产出模型与区际经济联系[M]. 北京：科学出版社，2012.

[17] 汤维祺，周夷，孙可哿. 中国省际贸易隐含碳流向与地区经济发展模式研究[J]. 环境经济研究，2016，1（1）：26-42.

[18] 王文治. 中国省域间碳排放的转移测度与责任分担[J]. 环境经济研究，2018，3（1）：19-36.

[19] 谢锐，王振国，张彬彬. 中国碳排放增长驱动因素及其关键路径研究[J]. 中国管理科学，2017，（10）：122-132.

[20] 张琦峰，方恺，徐明，刘庆燕. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报，2018，33（04）：696-708.

[21] 张友国. 中国区域间碳排放转移：EEBT与MRIO方法的比较[J]. 重庆理工大学学报(社会科学)，2016，30（7）：17-27.

[22] 张忠杰. 中国多区域隐含碳贸易的核算和结构分解分析[J]. 统计与决策，2017，（13）：125-129.

[23] 郑林昌，齐蒙，付加锋，赵丹阳. 河北省贸易隐含二氧化碳排放及其影响因素研究[J]. 气候变化研究进展，2017，13（2）：157-164.

[24] 钟章奇，吴乐英，陈志建，何凌云. 区域碳排放转移的演变特征与结构分解及减排对策分析——以河南省为例[J]. 地理科学，2017，37（5）：773-782.

[25] Arce, G., L. A. L ó pez, and D. Guan. Carbon Emissions Embodied in International Trade: The Post-China Era[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1063-1072.

[26] Caro, D., F. M. Pulselli, S. Borghesi, and S. Bastianoni. Mapping the International Flows of GHG Emissions within a More Feasible Consumption-based Framework[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 147: 142-151.

[27] Chen, M., S. Wu, Y. Lei, and S. Li. Study on Embodied CO_2 Transfer between the Jing-Jin-Ji Region and Other Regions in China: A Quantification Using an Interregional Input-output Model[J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2018, 25: 14068-14082.

[28] Dolter, B. and P. A. Victor. Casting a Long Shadow: Demand-based Accounting of Canada's Greenhouse Gas Emissions Responsibility[J]. Ecological Economics, 2016, 127: 156-164.

[29] Guo, J, Z. Zhang, and L. Meng. China's Provincial CO_2 Emissions Embodied in International and Interprovincial Trade[J]. Energy Policy, 2012, 42(3): 486-497.

[30] Leontief, W. W. Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States[J]. Review of Economics & Statistics, 1936, 18(3): 105-125.

[31] Mi, Z., J. Meng, D. Guan, Y. Shan, M. Song, Y. M. Wei, Z. Liu, and K. Hubacek. Chinese CO_2 Emission Flows Have Reversed since the Global Financial Crisis[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1712.

[32] Peng, S., W. Zhang, and C. Sun. 'Environmental Load Displacement' from the North to the South: A Consumption-based Perspective with a Focus on China[J]. Ecological Economics, 2016, 128: 147-158.

[33] Su, B. and B. W. Ang. Multi-regional Comparisons of Emission Performance: The Structural Decomposition Analysis Approach[J]. Ecological Indicators, 2016, (67): 78-87.

[34] Tukker, A., S. Giljum, and R. Wood. Recent Progress in Assessment of Resource Efficiency and Environmental Impacts Embodied in Trade: An Introduction to Tthis Special Issue[J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, (3): 1-13.

[35] Wiedmann, T. A. Review of Recent Multi-region Input-output Models Used for Consumption-based Emission and Resource Accounting[J]. Ecological Economics, 2009, 69(2): 211-222.

[36] Wiedmann, T., R. Wood, J. C. Minx, M. Lenzen, D. Guan, and R. Harris. A Carbon Footprint Time Series of the UK-results from a Multi-region Input-output Model[J]. Economic Systems Research, 2010, 22(1): 19-42.

[37] Xu, Y. and E. Dietzenbacher. A Structural Decomposition Analysis of the Emissions Embodied in Trade[J]. Ecological Economics, 2014, 101: 10-20.

[38] Zhang, Z., R. Huang, Q. Tang, X. Cong, and Z. Wang. China's Provincial CO_2 Emissions Embodied in

Trade with Implications for Regional Climate Policy[J]. Frontiers of Earth Science, 2015, 9(1): 77–90.

The Spatial–Industrial Transfer of Carbon Emissions Embodied in Inter–provincial Trade and the Influencing Factors for Shanxi Province: A MRIO–SDA Study

Liu Qingyan[a], Fang Kai[a] and Cong Jianhui[b]

(a: School of Public Affairs, Zhejiang University;

b: School of Economics and Management, Shanxi University)

Abstract: Provincial governments play an important role in decomposing and implementing national carbon reduction targets. However, the carbon emissions embodied in inter–provincial trade lead to large differences between the consumption–based and production–based carbon emissions of each province, which seriously affect the policy making of carbon emission reductions in various provinces. In this paper, Shanxi Province is selected as a typical energy resource–driven province, where a multi–regional input–output model is developed to calculate the transfer of carbon emissions embodied in inter–provincial trade between Shanxi Province and other Chinese provinces in 2002, 2007 and 2012. Structural decomposition analysis method is employed to identify the contributing factors affecting the carbon emissions embodied in inter–provincial trade of Shanxi Province. The results show that from 2002 to 2012, the transfer of carbon emissions embodied in inter–provincial trade of Shanxi Province grows continuously, and it is as a whole has been a "net exporter" in inter–provincial trade. The geographical distribution of the carbon emissions embodied in trade in Shanxi Province shows a trend from agglomeration to diffusion. Various influencing factors on the transfer of carbon emissions embodied in inter–provincial trade of Shanxi Province present significant differences. Among them, the contributions of the carbon intensity of industrial sectors with respect to the reduction of carbon emissions transfer plays a crucial role, demand scale significantly increases the carbon transfer and other factors can reduce or promote carbon emissions. Based on the research results, this paper puts forward policy suggestions on green and low–carbon transformation of Shanxi Province from the aspects of establishing and perfecting coordination mechanism of inter–provincial industrial transfer, continuing to promote industrial transformation and upgrading, and encouraging inter–provincial trade of low–carbon products.

Keywords: Embodied Carbon Emissions; Multi–Regional Input–Output; Structural Decomposition Analysis

JEL Classification: F18

（责任编辑：卢　玲）