

引用格式: 李晖, 姜文磊, 唐志鹏. 全球贸易隐含碳净流动网络构建及社团发现分析[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1027-1039. [Li H, Jiang W L, Tang Z P. Net embodied carbon flow network in global trade and community finding analysis[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1027-1039.] DOI: 10.18402/resci.2020.06.02

全球贸易隐含碳净流动网络构建及社团发现分析

李 晖¹, 姜文磊¹, 唐志鹏²

(1. 青岛大学经济学院, 青岛266061; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京100101)

摘 要:采用Eora数据库和MRIO多区域投入产出模型对2000年与2015年189个国家(地区)的国(区)内需求隐含碳排放量、出口隐含碳排放量和进口隐含碳排放量进行测算;在此基础上构建全球贸易隐含碳净流动网络,基于网络视角对全球贸易隐含碳流动及社团划分问题进行全局分析,揭示不同国家(地区)在全球贸易隐含碳流动网络中的地位及关系演变趋势。研究发现:①贸易隐含碳净流出是中国、印度、伊朗、哈萨克斯坦、阿尔及利亚、南非等发展中国家碳排放快速增长的关键原因之一,隐含碳净进口则对美国、日本、德国、英国、法国等发达国家的碳排放量下降贡献了重要力量;②虽然美国、日本、法国等国家的隐含碳净进口总量趋于下降,但是从中国、印度等主要隐含碳净进口地流入的隐含碳排放量却一直在增长,净进口来源地呈现集中趋势;③2000年与2015年全球隐含碳净流动网络均包含4个主要社团,社团核心由中国、俄罗斯、沙特阿拉伯、伊拉克转变为中国、印度、俄罗斯和沙特阿拉伯,其中中国和印度的社团核心地位加强,主导的社团规模不断扩大,俄罗斯和沙特阿拉伯的社团辐射能力则有所减弱。由于处于同一社团的各贸易国(地区)的隐含碳流动更为密切,因此,社团内部成员国可作为国际应对气候变化的重点支持对象。

关键词:贸易隐含碳;多区域投入产出(MRIO)模型;投入产出技术;网络分析;社团发现算法

DOI :10.18402/resci.2020.06.02

1 引言

根据《联合国气候变化框架公约》的定义,隐含碳是指商品由原料的取得、制造加工、运输,到成为消费者手中所购买的商品,这段过程所排放的二氧化碳^[1]。伴随着全球贸易的不断加深,各个国家在中间产品及最终产品进出口方面往来日益密切,隐藏于产品和服务进出口背后的贸易隐含碳问题成为近年来学术界讨论的热点问题之一^[2-6]。目前,关于贸易隐含碳集中讨论的两个关键问题^[7-11]:一是贸易隐含碳核算问题,也就是核算各个国家在进口与出口贸易过程中的隐含碳排放量究竟是多少?二是在总量测算的基础上,进一步深入分析地域之间的隐含碳流动问题,即伴随着进出口贸易隐含碳从产品和服务的生产地究竟流向了哪里?国家(地区)间到底谁替谁承担了排放责任,以及承担了

多少?

在贸易隐含碳流动方面,一些文献从双边视角切入对中国、美国、日本、欧盟等世界主要国家(地区)的进口和出口产品含碳量及其国别流向问题展开研究,并为探究各国之间的碳排放责任提供了重要支撑^[12-16]。尽管基于两国(地区)之间的进出口贸易隐含碳分析是进行全球贸易隐含碳流动研究的基础,但全球贸易隐含碳流动问题的讨论却不仅仅局限于双边国家之间。随着全球经济一体化的深入发展,贸易隐含碳也随之在全球各个国家之间交错流动,形成了一个错综复杂的多边关系网络。双边角度的研究反映了全球贸易隐含碳的局部流向关系,却不能回答不同国家在全球贸易隐含碳流动网络中的地位及关系演变等问题。深入剖析全球贸易隐含碳网络的结构与演变特征,对于充分认清

收稿日期:2019-07-26 修订日期:2020-05-10

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41661144023);青岛市博士后应用研究项目(2016038)。

作者简介:李晖,女,山东青岛人,副教授,主要从事投入产出技术与资源环境经济研究。E-mail: lihui@amss.ac.cn

通讯作者:唐志鹏,男,四川成都人,副研究员,主要从事区域经济和区域可持续发展研究。E-mail: tangzp@igsnnr.ac.cn

各个国家在全球贸易隐含碳排放中的作用,厘清全球隐含碳排放责任问题具有重要的现实意义,借助网络分析方法对全球贸易隐含碳流动问题进行全局分析是极为必要的。

社会网络分析是对网络中个体之间关系进行定量研究的一种方法,是从全局和多边的角度对网络结构与属性进行研究的有力工具^[17],目前该方法已被广泛应用于经济学、社会学、国际贸易等领域^[18-21]。在贸易隐含碳研究方面,部分文献基于网络分析视角对主要经济体隐含碳转移路径和网络规模变化进行了讨论^[22,23],但对贸易隐含碳网络中诸多经济体连接的紧密程度及社团划分演变等网络结构问题的研究仍然需要补充。

社团结构是复杂网络普遍存在的重要结构特征之一。由于边在网络中的分布多数是不均匀的,它们常常会在某一些结点组成的子集合内部连接紧密,而在子集合与子集合之间的连接相对稀疏,这种由于边的不均匀分布造成的网络潜在结构关系就是社团结构。社团划分研究就是利用网络图拓扑结构的特性找寻其中蕴含的社团结构,揭示网络隐藏结构规律。近年来,该方法在全球贸易网络、一带一路贸易网络及世界高端制造业网络的结构分析中受到诸多学者的青睐^[24-26]。利用社团发现算法研究全球贸易隐含碳流动问题对整个网络复杂的关系进行梳理,有效识别各个国家(地区)所在的社团,对于深入挖掘不同国家(地区)在全球贸易隐含碳流动网络中的地位与亲疏联系具有重要作用,然而目前较少有文献对全球贸易隐含碳流动网络的社团构成、特征及演化问题进行讨论。

鉴于此,本文拟立足全球范围,采用Eora数据库公布的最新的世界投入产出表和环境数据,测算2000年与2015年世界上189个国家(地区)之间的贸易隐含碳流动情况,在此基础上构建全球贸易隐含碳流动网络,对全球贸易隐含碳流动网络的特征属性与社团结构进行研究,揭示中国及世界各个国家(地区)在网络中的地位变化及社团演变特征。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 多区域投入产出模型

投入产出分析方法是诺贝尔经济学奖获得者

列昂惕夫^[27]于1936年创建的,该方法的主要优势在于可以详细反映国民经济各产业部门之间错综复杂的经济关联关系。20世纪50年代,Chenery和Moses先后独立地将投入产出分析方法的研究范围由单一区域扩展到多个区域,提出了多区域投入-产出模型(Multi-Regional Input-Output Model, MRIO模型)^[28]。多区域投入-产出模型有利于全面、系统地反映各个国家(地区)之间的贸易及经济联系,是目前进行全球价值链、污染排放及能源消耗等问题研究的主要工具之一。

假定多区域投入-产出表共包含 R 个国家(地区),每个国家(地区)分为 N 个产业部门。令 Z^{ST} 表示第 S 个国家(地区)对第 T 个国家(地区)各产业部门的中间投入矩阵,它是一个 $N \times N$ 维矩阵($S, T=1, 2, \dots, R$); Y^{ST} 表示第 S 个国家(地区)对第 T 个国家(地区)各产业部门的 $N \times 1$ 维最终需求矩阵; X^S 表示第 S 个国家(地区)的总产出列向量, \hat{X}^S 表示由第 S 个国家(地区)各部门总产出构成的对角阵;令 $A^{ST} = Z^{ST} \cdot (\hat{X}^T)^{-1}$ 表示第 T 个国家(地区)各部门生产单位产品对第 S 个国家(地区)各部门产品的直接消耗系数矩阵; A^{SS} 和 Y^{SS} 分别表示第 S 个国家(地区)的国(区)内直接消耗系数矩阵和最终需求列向量。

由此,多区域投入-产出模型的行向平衡关系式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} A^{AA} & A^{AB} & \dots & A^{AR} \\ A^{BA} & A^{BB} & \dots & A^{BR} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{RA} & A^{RB} & \dots & A^{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^A \\ X^B \\ \vdots \\ X^R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y^{AA} + Y^{AB} + \dots + Y^{AR} \\ Y^{BA} + Y^{BB} + \dots + Y^{BR} \\ \vdots \\ Y^{RA} + Y^{RB} + \dots + Y^{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^A \\ X^B \\ \vdots \\ X^R \end{bmatrix} \quad (1)$$

将(1)式展开,整理可得:

$$X^S = (I - A^{SS})^{-1} \left[\sum_{\substack{T=1 \\ T \neq S}}^R (A^{ST} X^T + Y^{ST}) + Y^{SS} \right] \quad (S, T=1, 2, \dots, R) \quad (2)$$

2.1.2 国际贸易隐含碳排放及流动测算

令 E^S 表示第 S 个国家(地区)的碳排放系数,它是由第 S 个国家(地区) N 个产业部门单位产出的碳排放量为元素构成的行向量, \hat{E}^S 为 E^S 的对角化矩阵, $\mu = (1, 1, \dots, 1)$ 表示 $1 \times N$ 维的求和行向量。由此可得为满足第 T 个国家(地区)中间投入和最终需

2020年6月

求所引起的第 S 个国家(地区)的隐含碳排放总量 C^{ST} 为:

$$C^{ST} = \mu \hat{E}^S (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{SS})^{-1} (\mathbf{A}^{ST} \mathbf{X}^T + \mathbf{Y}^{ST}) \quad (3)$$

基于以上计算,可以得到第 S 个国家(地区)国(区)内需求隐含碳排放量 C_S^{DOM} 、出口隐含碳排放量 C_S^{EX} 、进口隐含碳排放量 C_S^{IM} 计算公式分别为:

$$C_S^{DOM} = \mu \hat{E}^S (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{SS})^{-1} \mathbf{Y}^{SS}, C_S^{EX} = \sum_{\substack{T=1 \\ T \neq S}}^R C^{ST}, C_S^{IM} = \sum_{\substack{T=1 \\ T \neq S}}^R C^{TS} \quad (4)$$

式中:国(区)内需求隐含碳排放量 C_S^{DOM} 与出口隐含碳排放量 C_S^{EX} 之和体现了第 S 个国家(地区)的境内碳排放总量,即为该国(地区)生产侧碳排放量;国(区)内需求隐含碳排放量 C_S^{DOM} 与进口隐含碳排放量 C_S^{IM} 之和则为该国(地区)消费侧碳排放量。

$$\Delta^{ST} = C^{ST} - C^{TS} \quad (5)$$

如果 $\Delta^{ST} > 0$ 成立,说明从第 S 个国家(地区)到第 T 个国家(地区)出口隐含碳大于第 T 个国家(地区)到第 S 个国家(地区)出口隐含碳,也就是从第 S 个国家(地区)到第 T 个国家(地区)存在碳转移现象,反之亦然。

2.1.3 贸易隐含碳流动网络构建

网络图的构建主要依靠3个关键部分:点、边和权重。在国际贸易隐含碳网络的构建过程中,以各个国家(地区)为结点,因此每个年份的网络均包含189个结点,用 $v_s (s=1, 2, \dots, 189)$ 表示。边的连接条件是:若第 S 个国家(地区)到第 T 个国家(地区)的隐含碳净转移排放量大于0,则从点 S 到点 T 连接一条边 e_{st} ,方向从 S 指向 T ,所有的边构成的集合用 E 表示。各年份隐含碳排放网络中边 e_{st} 的权重 w_{st} 取值为 $|\Delta^{ST}|$,以此来反映全球贸易隐含碳网络中国家(地区)之间碳净流动量的多少。

定义网络图的邻接矩阵 $\mathbf{L} = (l_{st})_{R \times R}$ 为:

$$l_{st} = \begin{cases} 1, & \text{如果点 } S \text{ 到点 } T \text{ 之间存在边;} \\ 0, & \text{如果点 } S \text{ 到点 } T \text{ 之间不存在边。} \end{cases} \quad (6)$$

度是网络分析中的重要概念之一,由于本文构建的全球贸易隐含碳净流动网络为有向网络,因此点的度数分为入度和出度两部分。结点 S 的入度反映了从该点出发的连接边数之和,结点 S 的出度反

映了指向该点的连接边数之和,定义结点 S 的总度数为其出度和入度之和。度数体现了结点在网络中与其他结点的连接程度,结点的度数越大,说明该结点在网络中的连接越广泛。

$$od_s = \sum_{e_{st} \in E} l_{st}, id_s = \sum_{e_{ts} \in E} l_{ts}, d_s = od_s + id_s \quad (7)$$

式中: od_s 、 id_s 和 d_s 分别表示结点 S 的出度、入度和度数。

除了点与点之间的连接关系之外,为了将贸易隐含碳排放量体现在网络中,我们给出点权强度的定义,主要分为点的入权强度和出权强度。将从结点 S 指出的边的权重之和定义为结点 S 的出权强度 ok_s ,它反映了第 S 个国家(地区)在国际贸易中的隐含碳净输出总量。将指向结点 S 的边的权重之和定义为结点 S 的入权强度 ik_s ,它反映了第 S 个国家(地区)在国际贸易中的隐含碳净流入总量。

$$ok_s = \sum_{e_{st} \in E} w_{st}, ik_s = \sum_{e_{ts} \in E} w_{ts} \quad (8)$$

2.1.4 社团发现算法

社团结构是复杂网络普遍存在的拓扑特性之一,社团发现算法主要目的是:根据网络中结点连接的紧密程度将整个网络划分为若干个社团。利用社团发现算法对全球贸易隐含碳净流动网络进行社团探测,可以对该网络中国家(地区)联系的紧密程度进行分析,也就是处于同一社团内部的国家(地区)其贸易隐含碳流动联系更加紧密,而不同社团之间的国家(地区)其贸易隐含碳联系相对稀疏。模块度(Modularity)是 Newman^[29] 在2004年提出的主要用于刻画社团划分效果优劣的指标,是目前社团发现算法中进行社团划分最为流行的通用指标。针对有权图的模块度计算公式为:

$$Q = \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} \left(\frac{w_{ij}}{2m} - \frac{k_i k_j}{(2m)(2m)} \right) \delta(V_i, V_j) \quad (9)$$

式中: w_{ij} 表示点 i 和点 j 之间边的权重; m 表示网络中全部边权总和, $2m$ 表示整个网络图的点权强度(点权度是图论中的一个概念,它反映的是与顶点相关联的边的权重之和),因此, $w_{ij}/2m$ 表示所有被划分到同一个社团的边的平均权重。 k_i 和 k_j 分别表示与顶点 V_i 和 V_j 相邻边的权重之和。因此,

$k_i k_j / (2m)(2m)$ 表示在保持网络的度分布情况下对其边进行随机排列,即完全随机情况下被划分到同一个社团的边的平均权重。因为只考虑社团内部的连边,因此,定义 $\delta(V_i, V_j)$ 来判断顶点 V_i 和 V_j 是否属于同一个社团:若 V_i 和 V_j 在同一个社团,则 $\delta(V_i, V_j) = 1$; 否则 $\delta(V_i, V_j) = 0$ 。

模块度 Q 的计算公式反映了每个社团内部边数与随机网络图边数的差值的期望值。依据模块度计算进行社团划分的基本思想是:对于某一社团结构,其社团内部连接的紧密程度必然会高于一个随机网络图的连接程度;因此模块度的计算结果越大,说明社团内部连接的紧密程度越明显,也就是网络的模块化结构越显著。模块度的计算结果一般在 $[-0.5, 1)$ 区间范围之内,数值越大代表社团划分效果越好。

基于模块度的概念,Newman^[30]在2004年提出了一种社团发现算法 Fast Newman 算法,该算法的优点在于:一是过程清晰,易于解释;二是算法计算速度快。其思想是通过对社团划分的可能空间进行搜索,得到最大化模块度的社团划分。

利用 Fast Newman 算法对全球贸易隐含碳净流动网络进行社团划分研究的具体操作步骤如下:

①初始化网络,将每个国家(地区)看作一个单独的社团,初始情况含有 R 个社团;

②计算将任意的两个国家合并后模块度 Q 值的变化情况,选取使 Q 值增加最大的两个社团进行合并;

③重复步骤②,直到所有的国家被包含在一个社团内;

④在上述合并过程中,形成了多种社团划分结果,其中使模块度 Q 值达到最大的社团划分结构,即为最终所求。

2.2 数据来源与处理

本文主要的数据来源为澳大利亚研究委员会(ARC)开发编制的 Eora 数据库,该数据库提供了全球多区域投入-产出表,目前公布的版本包含 1990—2015 年全球 189 个国家与地区(其中包含 175 个国家和 14 地区)^① 26 个产业部门的投入-产出数据、社会经济数据及环境卫星账户数据^[31]。其中间流量矩阵维度达到 4915×4915 ,详细反映了国家(地区)之间及其产业部门之间产品的流动情况(第 4915 行与列表示其他)。本文主要采用了 Eora 数据库中 2000 年与 2015 年的世界投入-产出数据,及其环境卫星账户中的二氧化碳排放数据,数据处理方法参考 Lenzen 等^[32]。

Eora 数据库主要优势在于:①目前单个国家普遍间隔 4~5 年才发布一次投入-产出表,Eora 数据库公布的为时序表,有效解决了各国投入-产出表时间间隔过大的不足,为演变趋势分析提供了丰富的数据。②各个国家的部门划分、统计口径具有一致性,为国家间比较分析提供了良好的框架。③ WIOD 与 EXIOBASE 数据库包含的国家(地区)数量均为 40 多个,且以欧盟国家居多,Eora 数据库包含全球 189 个国家(地区),涵盖范围更广。

① 本文讨论 189 个国家(地区)包含:阿富汗、阿尔巴尼亚、阿尔及利亚、安道尔、安哥拉、安提瓜、阿根廷、亚美尼亚、阿鲁巴、澳大利亚、奥地利、阿塞拜疆、巴哈马、巴林、孟加拉国、巴巴多斯、白俄罗斯、比利时、伯利兹、贝宁、百慕大群岛、不丹、玻利维亚、波斯尼亚和黑塞哥维那、博茨瓦纳、巴西、英属维尔京群岛、文莱、保加利亚、布基纳法索、布隆迪、柬埔寨、喀麦隆、加拿大、佛得角、开曼群岛、中非共和国、乍得、智利、中国、哥伦比亚、刚果、哥斯达黎加、克罗地亚、古巴、塞浦路斯、捷克共和国、科特迪瓦、朝鲜、民主刚果、丹麦、吉布提、多米尼加共和国、厄瓜多尔、埃及、萨尔瓦多、厄立特里亚、爱沙尼亚、埃塞俄比亚、斐济、芬兰、法国、法属波利尼西亚、加蓬、冈比亚、格鲁吉亚、德国、加纳、希腊、格陵兰、危地马拉、几内亚、圭亚那、海地、洪都拉斯、中国香港、匈牙利、冰岛、印度、印度尼西亚、伊朗、伊拉克、爱尔兰、以色列、意大利、牙买加、日本、约旦、哈萨克斯坦、肯尼亚、科威特、吉尔吉斯斯坦、老挝、拉脱维亚、黎巴嫩、莱索托、利比里亚、利比亚、列支敦士登、立陶宛、卢森堡、中国澳门特区、马达加斯加、马拉维、马来西亚、马尔代夫、马里、马耳他、毛里塔尼亚、毛里求斯、墨西哥、摩纳哥、蒙古、黑山、摩洛哥、莫桑比克、缅甸、纳米比亚、尼泊尔、荷兰、荷属安的列斯群岛、新喀里多尼亚、新西兰、尼加拉瓜、尼日尔、尼日利亚、挪威、加沙地带、阿曼、巴基斯坦、巴拿马、巴布亚新几内亚、巴拉圭、秘鲁、菲律宾、波兰、葡萄牙、卡塔尔、韩国、摩尔多瓦、罗马尼亚、俄罗斯、卢旺达、萨摩亚、圣马力诺、圣多美和普林西比、沙特阿拉伯、塞内加尔、塞尔维亚、塞舌尔、塞拉利昂、新加坡、斯洛伐克、斯洛文尼亚、索马里、南非、南苏丹、西班牙、斯里兰卡、苏丹、苏里南、斯威士兰、瑞典、瑞士、叙利亚、中国台湾、塔吉克斯坦、泰国、马其顿、多哥、特立尼达和多巴哥、突尼斯、土耳其、土库曼斯坦、前苏联、乌干达、乌克兰、阿拉伯联合酋长国、英国、坦桑尼亚、美国、乌拉圭、乌兹别克斯坦、瓦努阿图、委内瑞拉、越南、也门、赞比亚、津巴布韦。

2020年6月

3 结果与分析

3.1 世界主要国家(地区)贸易隐含碳排放量测算及结构分析

3.1.1 总量测算结果及分析

利用式(4)对世界189个国家(地区)的国(区)内需求隐含碳排放量、出口与进口贸易隐含碳排放量进行了详细测算。在此基础上对各国领土范围内的隐含碳排放量进行讨论,主要包含生产本国最终需求产品过程中的碳排放量以及在本国进行生产但是用于出口产品所造成的隐含碳排放量。在此将各年份测算得到的189个国家(地区)的境内隐含碳排放量进行排序,由于篇幅有限,仅列出前20位结果(表1)^②。

可以看出,2000年世界碳排放量排名前5的国家分别为:美国、中国、俄罗斯、日本和印度。到2015年排名前5位的依然是上述国家,但是排名发生了明显变化,排名依次为:中国、美国、印度、俄罗斯、日本。

具体来看,中国的碳排放量由2000年的3513.44 Mt增长为2015年的10624.32 Mt,增长幅度达2.02倍,超越美国成为世界上最大的碳排放国。这期间美国的碳排放量则有小幅下降,由5822.54 Mt下降为5163.84 Mt。2000年到2015年印度的碳排放量由1049.50 Mt提高到2440.88 Mt,增长了1.33倍,取代俄罗斯成为世界上碳排放量第3位的

国家,俄罗斯的碳排放量则由1670.18 Mt略微上涨为1760.58 Mt。日本的碳排放量变化不大,由2000年的1251.45 Mt变化为2015年的1252.88 Mt。除此之外,这段时期德国的碳排放量一直居于世界第6位,但其碳排放量略有下降,由856.74 Mt减少为777.91 Mt。从变化量来看,除中国和印度外,伊朗、沙特阿拉伯、印度尼西亚、巴西、韩国等国家在这段时期内的碳排放量均明显上涨。美国、乌克兰、英国、意大利、德国、法国、西班牙等国家的碳排放量则不同程度减少(表1)。

3.1.2 各个国家(地区)进出口隐含碳排放及隐含碳净流量分析

通过对比观察2000年与2015年的总量测算结果,可以发现这期间美国、英国、德国、法国等发达国家的境内碳排放量不同程度下降,而中国、印度、伊朗、沙特阿拉伯等发展中国家的境内碳排放量却显著提高,为了进一步观察出口和进口贸易隐含碳对不同国家(地区)碳排放量的影响作用,本文测算了189个国家(地区)的国(区)内需求隐含碳、出口隐含碳和进口隐含碳排放量,并依据隐含碳净流量进行排序(表2)。

由表2可以看出,除国(区)内需求隐含碳排放量不同程度增长之外,出口隐含碳增长是中国、印度、伊朗、哈萨克斯坦、阿尔及利亚、南非等发展中国家境内碳排放量快速增长的重要原因之一。从

表1 2000年与2015年世界189个国家与地区境内隐含碳排放总量测算前20位结果

Table 1 Top 20 countries of calculated total embodied carbon emissions in 189 countries (regions) of the world, 2000 and 2015 (Mt)

排名	2000年		2015年		排名	2000年		2015年	
	国家或地区	境内碳排放量	国家或地区	境内碳排放量		国家或地区	境内碳排放量	国家或地区	境内碳排放量
1	美国	5822.54	中国	10624.32	11	法国	397.44	沙特阿拉伯	496.03
2	中国	3513.44	美国	5163.84	12	乌克兰	387.84	巴西	485.29
3	俄罗斯	1670.18	印度	2440.88	13	墨西哥	376.57	墨西哥	471.49
4	日本	1251.45	俄罗斯	1760.58	14	澳大利亚	343.95	澳大利亚	444.87
5	印度	1049.50	日本	1252.88	15	伊朗	338.27	南非	416.68
6	德国	856.74	德国	777.91	16	巴西	332.01	英国	397.45
7	加拿大	550.71	伊朗	631.52	17	南非	318.50	土耳其	355.75
8	英国	546.73	韩国	617.27	18	波兰	313.28	意大利	352.13
9	韩国	475.24	加拿大	555.36	19	西班牙	310.17	法国	327.33
10	意大利	459.03	印度尼西亚	502.53	20	印度尼西亚	291.14	波兰	294.37

② 因篇幅有限,感兴趣的读者可与作者联系索取其余数据。

表2 2000年与2015年全球贸易隐含碳净流出前15位国家(地区)的国(区)内需求、出口、进口隐含碳排放量测算结果

Table 2 Results of embodied carbon emissions induced by domestic demand, export, and import in top 15 net carbon outflow countries (regions), 2000 and 2015

排名	2000年					2015年				
	国家或地区	国(区)内需求 隐含碳排放	出口隐含 碳排放	进口隐含 碳排放	净流出	国家或地区	国(区)内需求 隐含碳排放	出口隐含 碳排放	进口隐含 碳排放	净流出
1	中国	2594.95	918.49	153.04	765.46	中国	8313.74	2310.58	597.18	1713.40
2	俄罗斯	1026.71	643.46	161.21	482.25	印度	1908.35	532.53	189.20	343.32
3	乌克兰	202.94	184.91	21.40	163.51	俄罗斯	1238.12	522.46	182.65	339.81
4	印度	854.40	195.10	57.94	137.16	中国台湾	114.58	164.22	42.54	121.68
5	沙特阿拉伯	138.26	121.78	39.35	82.44	南非	282.17	134.51	55.74	78.77
6	南非	216.08	102.42	29.44	72.98	阿尔及利亚	58.25	89.39	14.77	74.62
7	尼日利亚	18.77	71.98	6.14	65.84	哈萨克斯坦	165.55	101.72	35.81	65.92
8	印度尼西亚	183.73	107.41	48.87	58.54	沙特阿拉伯	343.91	152.12	86.34	65.78
9	加拿大	309.80	240.91	182.37	58.53	伊朗	510.91	120.62	68.11	52.50
10	白俄罗斯	0.06	57.41	0.52	56.90	印度尼西亚	368.51	134.01	96.57	37.44
11	中国台湾	97.75	132.45	82.03	50.42	阿曼	31.57	46.68	12.24	34.44
12	伊拉克	29.18	55.21	6.03	49.18	卡塔尔	53.21	32.83	7.72	25.11
13	阿尔及利亚	25.10	56.49	7.31	49.17	伊拉克	115.80	44.35	19.94	24.40
14	伊朗	271.69	66.58	23.55	43.03	乌克兰	138.60	89.85	66.77	23.08
15	哈萨克斯坦	76.58	59.86	29.18	30.68	巴基斯坦	140.89	33.81	12.52	21.30

隐含碳净流动角度来看,他们全部属于贸易隐含碳净流出国。这说明伴随着商品的进出口贸易流动,这些国家潜在的替其他国家(地区)承担了一部分碳排放责任。

具体来看,2000—2015年全球贸易隐含碳净流出量排名靠前的国家主要包含中国、俄罗斯与印度。这期间中国一直稳居世界隐含碳净出口量首位,其隐含碳净流出量由765.46 Mt上涨为1713.40 Mt,占全球贸易隐含碳净流动总量的比重由30.54%提高为51.21%。伴随着俄罗斯出口隐含碳排放量的不断下降,其隐含碳净出口量由2000年的482.25 Mt减少为2015年的339.81 Mt,目前俄罗斯已由世界第2大隐含碳净出口国转变为第3位。印度与中国情况类似,其隐含碳净流出量由2000年的137.16 Mt上升为2015年的343.32 Mt,截至2015年印度已成为全球隐含碳净流出量排名第2位的国家。排在其后的国家(地区)还有:中国台湾、南非、阿尔及利亚、哈萨克斯坦、沙特阿拉伯、伊朗等国家(地区),但是这些国家(地区)的隐含碳净流出量相对不大。

与上述国家(地区)情况截然不同的是,2000—2015年进口隐含碳对美国、日本、德国、英国等一些发达国家碳排放总量的下降贡献了重要力量。从

隐含碳净流入角度来看(表3),美国、日本、德国、英国、法国一直是世界上主要的隐含碳净进口国,其隐含碳净进口量分别由2000年的470.92 Mt、399.95 Mt、204.16 Mt、138.25 Mt和177.55 Mt变化为2015年的453.81 Mt、338.31 Mt、229.16 Mt、201.45 Mt和168.84 Mt。除此之外,中国香港、新加坡、意大利、西班牙、荷兰等国家(地区)也是主要的隐含碳净流入地。另外,从增长幅度来看,近些年中国香港和韩国的隐含碳净流入量显著上升。

通过以上分析发现,2000—2015年中国、印度等主要隐含碳净出口国的隐含碳净流出量存在大幅度增长,但全球主要隐含碳净进口国的净流入量却变化不大,其中美国、日本、法国等国家的隐含碳净流入量还明显下降。

3.2 全球贸易隐含碳净流动网络构建与分析

3.2.1 全球贸易隐含碳净流动网络度数与点权强度分析

为详细分析各国家(地区)之间的隐含碳净流动情况,借助社会网络分析方法构建全球贸易隐含碳净流动网络,进一步对世界各国(地区)之间隐含碳净流动的连接关系进行可视化分析。

2020年6月

表3 2000年与2015年全球贸易隐含碳净流入前15位国家(地区)的国(区)内需求、出口、进口隐含碳排放量测算结果

Table 3 Results of embodied carbon emissions induced by domestic demand, export, and import in top 15 net carbon inflow countries (regions), 2000 and 2015

(Mt)

排名	2000年					2015年				
	国家或地区	国(区)内需求 隐含碳排放	出口隐含 碳排放	进口隐含 碳排放	净流入	国家或地区	国(区)内需求 隐含碳排放	出口隐含 碳排放	进口隐含 碳排放	净流入
1	美国	5147.23	675.31	1146.24	470.92	美国	4398.57	765.27	1219.08	453.81
2	日本	1084.76	166.69	566.64	399.95	中国香港	24.15	20.74	383.12	362.38
3	德国	552.53	304.22	508.38	204.16	日本	967.92	284.96	623.27	338.31
4	法国	269.61	127.84	305.39	177.55	德国	413.19	364.72	593.88	229.16
5	中国香港	29.75	9.82	178.39	168.57	英国	279.86	117.59	319.04	201.45
6	英国	407.77	138.96	277.21	138.25	新加坡	21.76	26.60	225.32	198.72
7	意大利	329.54	129.48	232.75	103.27	法国	206.80	120.53	289.37	168.84
8	新加坡	23.17	23.25	117.92	94.67	荷兰	85.77	79.29	212.66	133.37
9	西班牙	223.62	86.55	171.59	85.04	意大利	226.94	125.19	244.30	119.11
10	荷兰	86.30	84.16	162.87	78.72	比利时	36.06	60.80	160.18	99.39
11	比利时	53.29	68.60	132.16	63.55	韩国	344.76	272.51	369.97	97.46
12	墨西哥	298.09	78.49	125.34	46.85	西班牙	173.36	88.14	184.51	96.38
13	土耳其	185.88	36.46	81.43	44.97	土耳其	309.19	46.56	118.76	72.20
14	希腊	83.47	10.27	54.81	44.54	圭亚那	2.93	0.02	67.37	67.35
15	瑞士	22.80	22.07	54.81	32.74	瑞士	17.31	22.86	75.19	52.33

通过计算发现,本文构建的2000年、2015年全球隐含碳净流动网络分别包含17711条、17721条边,图中大量的边连接使得图看起来相当复杂,不利于观察重点信息。因此,在进行可视化处理之前,首先依据边权累积分布图对全球贸易隐含碳净流动网络中的边进行筛选^[33]。

具体做法如下:按照边的权重即隐含碳净出口量对网络中的所有边进行从大到小排列,计算每条边的权重占有所有边的总权重的比重。以边的数量作为横坐标 x ,对应的纵坐标为权重最大的 x 条边占

所有边总权重的比重,绘制网络图的边权累积分布图。以2015年全球贸易隐含碳净流动网络为例,通过观察其边权累积分布图(图1)可以看出,在累积分布大于0.95的位置,横坐标边数的增加对网络图权重增加的边际效用逐步递减。此时对应的横坐标(边的数量)为886,也就是说边权最大的886条边,贡献了网络中所有权重之和的95%,而其余的16385条边的权重较小,其权重总和仅占全部边权重的5%。因此,最终我们在网络可视化处理时,仅显示其边权最大的前886条边,由于权重最大的886

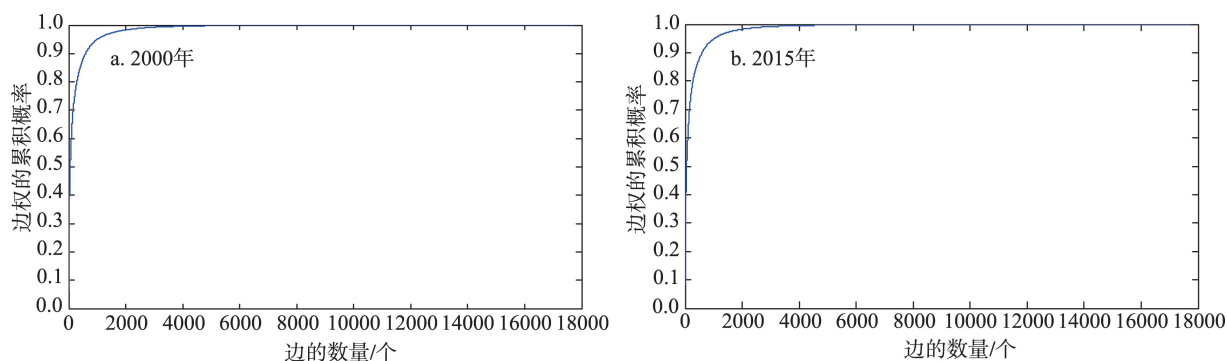


图1 2000年与2015年全球贸易隐含碳净流动网络的边权累积分布图

Figure 1 Cumulative distribution of edge weight of net embodied carbon flow network in global trade, 2000 and 2015

条边占全部边数量17721的5%,因此我们将筛选后的网络记为TOP5%网络。对2000年全球贸易隐含碳净流动网络进行计算,我们得到了同样的结果。

综上,通过筛选得到的TOP5%网络在不影响原有网络结构的基础上将原有复杂、庞大且难以分析的网络变得更加清晰和易于分析,有利于突出网络关键信息,并且具有较好的可视效果。在此基础上,借助软件Gephi进行可视化分析,并且依据点权出度的大小对图中结点的大小进行了调整,图中结点的直径越大代表着该国家(地区)的点权出度越高,也就是其隐含碳净流出量越大。同时用图中箭线的粗细表示边的权重大小,用以体现国家(地区)间的隐含碳净流动量,如图2所示。

由图2可以看出,2000年与2015年网络图中最大的结点(也就是全球最大的隐含碳净流出地)为中国大陆地区,由箭线指向可以看出其主要的隐含碳净出口对象为美国、日本、中国香港、德国等。2000—2015年在TOP5%网络中,中国大陆地区的出度和点权出度分别由25.00和799.87增长为42.00和1802.52,结点的度数和点权强度分别体现了该结点连接的广度和强度,这意味着中国大陆地区隐含碳净出口的范围和绝对数量都在扩大。不仅是美国、日本、德国等少数几个发达经济体,中国大陆对越来越多的国家(地区)都存在不可忽视的隐含碳净出口现象。

2000年全球第2大隐含碳净流出国俄罗斯的隐

含碳净出口主要流向了日本、德国、法国、芬兰、美国等。随着时间的推移俄罗斯在网络中连接的出度和点权出度分别由25.00和585.00下降为23.00和391.55。2015年除中国之外,俄罗斯对德国、日本、法国、美国、土耳其等的隐含碳净出口量均不同程度减少。印度也是网络中变化较大的结点之一,2000—2015年印度的隐含碳净流出对象由12个扩大为22个,这期间印度对其隐含碳主要净出口地美国、阿联酋、德国、英国、新加坡、意大利等的隐含碳净出口量均明显上涨。

从隐含碳净进口角度来看,2000—2015年美国、日本、德国、英国等在网络中的结点入度均有所下降,目前美国的隐含碳净进口主要来自中国大陆、印度、加拿大、中国台湾等国家(地区),日本的隐含碳净进口地主要为中国大陆、俄罗斯、沙特阿拉伯等,德国主要来源为中国大陆、俄罗斯、印度等,英国主要来源为中国大陆、美国、印度等。虽然这些国家的隐含碳净进口来源地数量有所减少,但是他们从中国、印度等国家流入的隐含碳排放量却一直在增长,美国、日本、德国、英国等国家出现隐含碳净流入更加集中在中国、印度等国家的趋势。

3.2.2 世界各国(地区)隐含碳净流动网络社团演变分析

根据社团发现算法的计算,各年份的隐含碳净流动TOP5%网络均被划分成了四大社团,结果如图3所示。为了方便讨论,我们围绕全球主要隐含碳

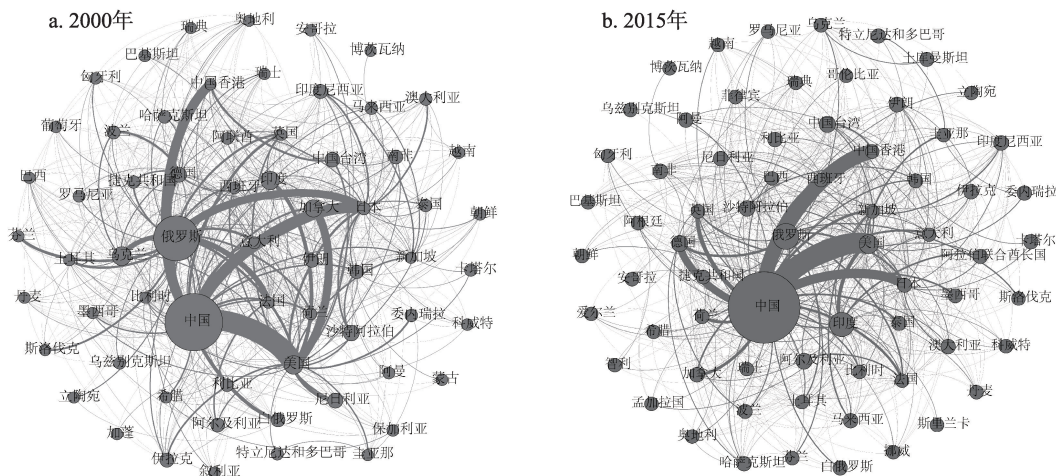


图2 2000年与2015年全球贸易隐含碳净流动TOP5%网络图

Figure 2 Top 5% network of net embodied carbon flow in global trade, 2000 and 2015

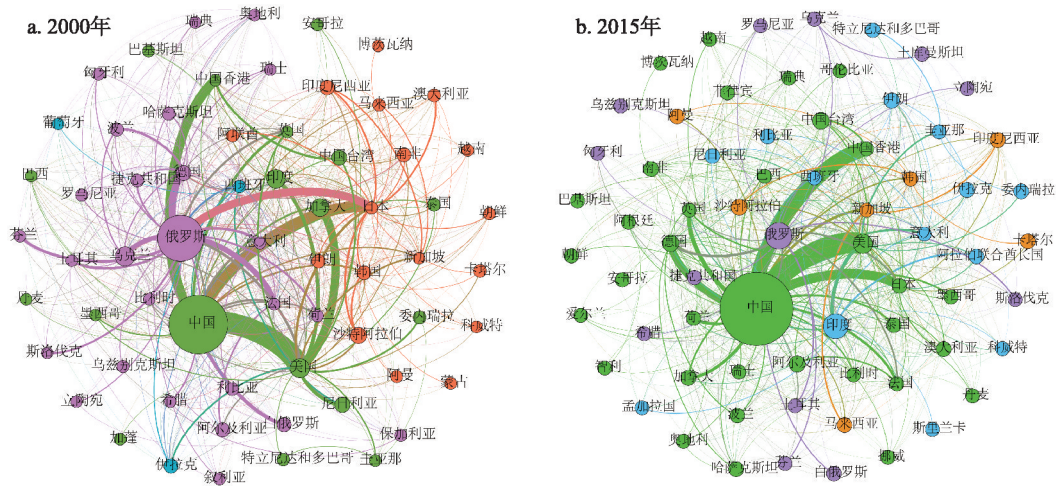


图3 2000年与2015年全球贸易隐含碳净流动TOP5%网络社团结果

Figure 3 Community detection results of top 5% net embodied carbon flow network in global trade, 2000 and 2015

净流出地,将各个社团中最大的结点定义为社团核心,社团核心是结点在网络中隐含碳净流出主导地位的体现。

从社团核心变化来看,2000年全球贸易隐含碳净流动网络可以被划分为以中国、俄罗斯、沙特阿拉伯、伊拉克为核心的四大社团。由主要国家隐含碳净出口结果可知,2000—2015年中国和俄罗斯一直是全球最主要的隐含碳净流出地,因此这期间中国和俄罗斯始终保持在网络中的核心位置。随着时间的推移部分社团核心发生了变化,这期间伊拉克隐含碳净出口排放量不断下降,并且在网络中的连接减弱,因此核心地位逐渐淡化。印度与一些国家(地区)之间的贸易隐含碳流动连接显著加强,网

络核心地位凸显,并从以中国为核心的社团脱离,成为新的社团核心。2015年全球贸易隐含碳净流动网络社团构成历经重组,最终形成以中国、俄罗斯、印度、沙特阿拉伯为核心的新四大社团。

从社团规模来看,随着中国在全球贸易隐含碳净流动网络中连接广度与强度的不断增强,2000—2015年以中国为核心的社团规模持续扩大,由图3可以看出,中国所在社团的成员由2000年的18个国家(地区)快速增长为2015年的34个国家(地区),逐步演变为网络第一大社团。由表4可知,这期间俄罗斯在隐含碳净流动网络中的结点出度与点权出度分别由25.00和585.00下降为23.00和391.55,说明其隐含碳净出口总量和隐含碳净出口

表4 2000年与2015年世界隐含碳净流动网络结点度数与点权强度测算结果

Table 4 Results of vertex degree and weight intensity of the world net embodied carbon flow network, 2000 and 2015

2000年						2015年					
国家	出度	入度	国家(地区)	点权出度	点权入度	国家	出度	入度	国家(地区)	点权出度	点权入度
美国	9.00	23.00	中国	799.87	34.42	中国	42.00	5.00	中国	1802.52	89.12
俄罗斯	25.00	3.00	美国	147.44	618.36	俄罗斯	23.00	3.00	美国	205.75	659.57
中国	25.00	2.00	俄罗斯	585.00	102.75	印度	22.00	3.00	俄罗斯	391.55	51.74
日本	2.00	19.00	日本	16.58	416.53	美国	11.00	14.00	德国	101.36	330.53
德国	7.00	12.00	德国	68.11	272.27	德国	8.00	9.00	日本	42.77	381.08
印度	12.00	1.00	法国	8.29	185.84	日本	2.00	13.00	印度	381.86	38.54
韩国	5.00	8.00	印度	153.30	16.14	韩国	2.00	9.00	中国香港	0.84	363.23
西班牙	2.00	10.00	中国香港	0.39	168.96	新加坡	0.00	10.00	英国	12.44	213.89
乌克兰	11.00	0.00	乌克兰	165.01	1.51	西班牙	0.00	8.00	新加坡	1.13	199.85
意大利	1.00	10.00	英国	11.30	149.55	意大利	0.00	7.00	法国	11.12	179.96

对象均有所减少。与之相对应的是以俄罗斯为核心的社团也呈现萎缩趋势,该社团组成由2000年的26个国家(地区)减少至2015年的13个国家(地区),由原先规模最大的社团转变为第3位。随着印度隐含碳净流出对象及其隐含碳净出口量的扩大,以印度为代表的社团规模超过俄罗斯所在社团,成为网络第2大社团。除此之外,沙特阿拉伯、韩国和新加坡等国家构成的社团由原先的14个成员缩减为7个成员,社团规模也明显缩小。

从社团构成与变迁角度来看,这10多年的时间里中国大陆、美国、英国、加拿大、中国香港、中国台湾等国家(地区)的贸易隐含碳往来一直较为密切,因此一直处于同一社团。对比2000年与2015年的社团划分结果,可以发现日本、德国、澳大利亚、法国、荷兰等国家逐渐脱离原有社团,加入以中国为核心的社团。结合隐含碳净流动测算结果来看,中国大陆已经逐渐成为上述国家(地区)隐含碳净进口的最大来源地,另一方面这些国家(地区)从中国净进口的隐含碳排放量也在逐年上升。目前中国在全球贸易隐含碳净流动网络中的辐射作用不断加强,尤其是与西欧的英国、法国、德国等,东南亚的越南、泰国等国家的贸易隐含碳流动进一步加强。

由图3的社团划分结果可以看出,与2000年相比,2015年德国、法国、荷兰、意大利等一些国家逐渐脱离俄罗斯社团,说明以俄罗斯为核心的社团与西欧国家的隐含碳净出口联系正在减弱。目前俄罗斯主要与中亚的乌兹别克斯坦、土克曼斯坦,中东欧的捷克、匈牙利、白俄罗斯等部分国家之间存在显著的贸易隐含碳净流动关系。印度离开以中国为核心的社团,成为新的社团主导,除意大利、西班牙之外,与印度贸易隐含碳净流动往来密切的国家主要集中在西亚中东地区的阿联酋、伊朗、伊拉克以及南亚的孟加拉国、斯里兰卡等。目前沙特阿拉伯、韩国、卡塔尔以及东南亚的新加坡、马来西亚、印度尼西亚等国家之间的贸易隐含碳净流动联系紧密,2000—2015年日本、澳大利亚、越南等国家脱离沙特阿拉伯为核心的社团,加入以中国为核心的社团,除此之外沙特阿拉伯社团其他成员基本稳定。

4 结论与启示

4.1 结论

本文利用MRIO模型对2000年与2015年189个国家(地区)的国(区)内需求隐含碳、出口隐含碳、进口隐含碳进行了测算,在此基础上采用社会网络分析方法构建世界贸易隐含碳净流动网络,从多边角度对不同国家(地区)之间的隐含碳净流动与社团划分等问题进行了分析,主要结论为:

(1)2000—2015年中印等发展中国家(地区)的境内碳排放量明显上涨,而美英德法等发达国家的碳排放量则不同程度减少。从隐含碳净流动角度来看,中印等发展中国家均处于隐含碳净流出地位,出口隐含碳的快速增长是其境内碳排放量升高的重要原因之一。美日德英等则一直是世界上主要的隐含碳净进口国,隐含碳净进口为其碳排放总量的下降贡献了关键力量。

(2)这期间中印在全球贸易隐含碳净流动网络中的结点度数和点权强度均不断增大,两者隐含碳净出口的范围和绝对数量扩大最为明显。各年份网络中的最大结点,也就是全球最大的隐含碳净出口国一直为中国大陆,另外印度逐渐超过俄罗斯成为网络中的第2大隐含碳净出口国。美日法等国家在网络中的结点入度和点权入度却有所下降,体现出其隐含碳净进口总量和来源地数量的减少,但他们从中印等主要隐含碳净进口地流入的隐含碳排放量却在增长,净进口来源地呈现集中趋势。

(3)2000年与2015年全球隐含碳净流动网络均包含4个主要社团,这期间社团核心发生了明显变化,由最初的中国、俄罗斯、沙特阿拉伯、伊拉克转变为中国、印度、俄罗斯和沙特阿拉伯。中国在全球贸易隐含碳净流动网络中的核心地位最为突出,除了与美国、英国、加拿大、中国香港、中国台湾等国家(地区)的贸易隐含碳往来一直较为密切之外,日本、德国、澳大利亚、法国、荷兰等国家也脱离原有社团,加入以中国为核心的社团,该社团规模不断扩大,逐渐演变为第1大社团。印度与意大利、西班牙及西亚中东部分国家之间的贸易隐含碳流动连接显著加强,社团核心地位凸显,俄罗斯的社团核心地位则逐渐减弱。

2020年6月

4.2 启示

发展低碳经济,应对气候变化,是全球面对的严峻问题。发达国家通过从发展中国家进口高污染高能耗贸易产品,出口低污染低耗能贸易产品,来达到规避本国碳排放责任的目的,已是不争的事实。结合全球贸易隐含碳净流动网络及社团结构分析的相关结论,本文总结得出以下几点启示:

(1)在全球贸易隐含碳净流动网络中,处于隐含碳净进口地位的美国、日本、德国等发达国家普遍拥有先进的技术发展水平,与发展中国家相比,生产同种产品所耗费的资源更少。因此,发达国家在进口高污染产品时,应给予出口国充分的技术及环保支持。由于处于同一社团的各贸易国(地区)的隐含碳流动更为密切,因此,社团内部成员国可作为国际应对气候变化的重点支持对象。

(2)社团核心是全球贸易隐含碳净流动网络中的关键结点,对于控制和降低全球贸易隐含碳排放具有重要作用。中国、印度、俄罗斯及沙特阿拉伯等国家作为全球贸易隐含碳净流动网络中的社团核心,应主动发挥带头作用,积极提升出口产品的能源利用率,努力降低高耗能产品的单位含碳量。

(3)中国目前已为全球贡献了超过一半的隐含碳输出量,中国不仅是全球最大的隐含碳净出口国,同时也是美国、日本、德国、英国、法国等诸多国家贸易隐含碳净进口的最大来源地。为避免世界消费中国排放的现实格局进一步扩大,中国需严格限制高能耗产品出口数量,提高低碳产品出口所占比例。同时,加大研发投入,提升出口产品的技术含量和附加值,切实推进中国出口产品由资源、劳动力优势向技术优势的转变。

参考文献(References):

[1] Odum H T. Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making[M]. New York: John & Wiley, 1996.

[2] 李惠民. 中国国际贸易隐含碳文献比较研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 46-54. [Li H M. A comparative analysis on carbon emissions embodied in China's international trade[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5): 46-54.]

[3] 张中华, 赵玉焕, Su Bin. 国际贸易隐含碳研究现状与展望: 基于1994-2017年文献计量分析[J]. 工业技术经济, 2019, 38(3): 52-65. [Zhang Z H, Zhao Y H, Su B. Current situation and pros-

pect on embodied carbon in international trade: A perspective from bibliometrics based on literature during 1994-2017[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2019, 38(3): 52-65.]

- [4] 韩中, 陈耀辉, 时云. 国际最终需求视角下消费碳排放的测算与分解[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(7): 115-130. [Han Z, Chen Y H, Shi Y. To measure and decompose consumption-based carbon emission from the perspective of international final demand [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2018, 35(7): 115-130.]
- [5] Ma S Z, Chen Y. Estimation of China's embodied CO₂ emissions during 2000-2009[J]. China & World Economy, 2011, 19(6): 109-126.
- [6] 吕延方, 崔兴华, 王冬. 全球价值链参与度与贸易隐含碳[J]. 数量经济技术经济研究, 2019, 36(2): 46-66. [Lv Y F, Cui X H, Wang D. GVC participation and carbon embodied in international trade: Nonlinear analysis based on GMRIO and PSTR model[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2019, 36(2): 46-66.]
- [7] Tukker A, Bulavskaya T, Giljum S, et al. Environmental and resource footprints in a global context: Europe's structural deficit in resource endowments[J]. Global Environmental Change, 2016, 40(9): 171-181.
- [8] Wang Q, Zhou Y L. Imbalance of carbon emissions embodied in the US-Japan trade: Temporal change and driving factors[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117780.
- [9] 姚秋蕙, 韩梦瑶, 刘卫东. “一带一路”沿线地区隐含碳流动研究[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2210-2222. [Yao Q H, Han M Y, Liu W D. Tracking embodied carbon flows in the Belt and Road regions[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(11): 2210-2222.]
- [10] 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.]
- [11] 孟凡鑫, 苏美蓉, 胡元超, 等. 中国及“一带一路”沿线典型国家贸易隐含碳转移研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 18-26. [Meng F X, Su M R, Hu Y C, et al. Embodied carbon in trade of China and typical countries along the 'Belt and Road' [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(4): 18-26.]
- [12] 李清如. 中日对“一带一路”沿线国家贸易隐含碳的测算及影响因素分析[J]. 现代日本经济, 2017, 36(4): 69-84. [Li Q R. The embodied carbon in trade of China and Japan with countries along the Belt and Road and their determinants[J]. Contemporary Economy of Japan, 2017, 36(4): 69-84.]
- [13] 刘俊伶, 王克, 邹骥. 中国贸易隐含碳净出口的流向及原因分析

- [J]. 资源科学, 2014, 36(5): 979-987. [Liu J L, Wang K, Zou J. Analysis of the net flow of carbon emissions embodied in trade of China[J]. Resources Science, 2014, 36(5): 979-987.]
- [14] 吴开尧, 杨廷干. 国际贸易碳转移的全球图景和时间演变[J]. 统计研究, 2016, 33(2): 43-50. [Wu K Y, Yang T G. Global picture and time evolution of international trade carbon transfer[J]. Statistical Research, 2016, 33(2): 43-50.]
- [15] 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. [Pan A. Embodied carbon in China-US trade from perspective of global value chain[J]. Statistical Research, 2018, 35(1): 53-64.]
- [16] 张兵兵, 李祎雯. 新附加值贸易视角下中日贸易隐含碳排放的再测算[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 250-261. [Zhang B B, Li Y W. Re-calculation of carbon emissions embodied in China-Japan trade based on the new value-added trade method[J]. Resources Science, 2018, 40(2): 250-261.]
- [17] 刘军. 整体网分析讲义: UCINET软件实用指南[M]. 上海: 格致出版社, 2009. [Liu J. Lectures on Whole Network Approach: A Practical Guide to UCINET[M]. Shanghai: Truth & Wisdom Press and Shanghai People's Publishing House, 2009.]
- [18] 姚秋蕙, 韩梦瑶, 刘卫东. 全球服装贸易网络演化研究[J]. 经济地理, 2018, 38(4): 26-36. [Yao Q H, Han M Y, Liu W D. Evolution of global apparel trade network[J]. Economic Geography, 2018, 38(4): 26-36.]
- [19] 潘峰华, 赖志勇, 葛岳静. 经贸视角下中国周边地缘环境分析: 基于社会网络分析方法[J]. 地理研究, 2015, 34(4): 775-786. [Pan F H, Lai Z Y, Ge Y J. The surrounding geopolitical environment of China: A social network analysis based on trade data[J]. Geographical Research, 2015, 34(4): 775-786.]
- [20] 邹嘉龄, 刘卫东. 2001-2013年中国与“一带一路”沿线国家贸易网络分析[J]. 地理科学, 2016, 36(11): 1629-1636. [Zou J L, Liu W D. Trade network of China and countries along “Belt and Road initiative” areas from 2001 to 2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(11): 1629-1636.]
- [21] 郑智, 刘卫东, 宋周莺, 等. “一带一路”生产网络及中国参与程度[J]. 地理科学进展, 2019, 38(7): 951-962. [Zheng Z, Liu W D, Song Z Y, et al. The Belt and Road production networks and China's participation[J]. Progress in Geography, 2019, 38(7): 951-962.]
- [22] 杜培林, 王爱国. 全球碳转移格局与中国中转地位: 基于网络治理的实证分析[J]. 世界经济研究, 2018, (7): 95-107. [Du P L, Wang A G. The economic landscape of the world carbon transfer and China's midstream status: An empirical analysis based on network governance[J]. World Economy Studies, 2018, (7): 95-107.]
- [23] Duan Y, Jiang X M. Visualizing the change of embodied CO₂ emissions along global production chains[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 499-514.
- [24] 许和连, 孙天阳. TPP背景下世界高端制造业贸易格局演化研究: 基于复杂网络的社团分析[J]. 国际贸易问题, 2015, 46(8): 3-13. [Xu H L, Sun T Y. Evolution of world's high-end manufacturing trade pattern against background of TPP: A study based on community analysis of complex networks[J]. Journal of International Trade, 2015, 46(8): 3-13.]
- [25] 蒋小荣, 杨永春, 汪胜兰. 1985-2015年全球贸易网络格局的时空演化及对中国地缘战略的启示[J]. 地理研究, 2018, 37(3): 495-511. [Jiang X R, Yang Y C, Wang S L. Spatial and temporal patterns of evolution of global trade networks during 1985-2015 and its enlightenment to China's geostrategy[J]. Geographical Research, 2018, 37(3): 495-511.]
- [26] Liu Z G, Wang T, Sonn J W, et al. The structure and evolution of trade relations between countries along the Belt and Road[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(9): 1233-1248.
- [27] Leontief W W. Quantitative input and output relations in the economic system of the United States[J]. The Review of Economics and Statistics, 1936, 18(3): 105-125.
- [28] 陈锡康, 杨翠红, 等. 投入产出技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Chen X K, Yang C H, et al. Input-Output Technique[M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [29] Newman M E J. Modularity and community structure in networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(23): 8577-8582.
- [30] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review, 2004, DOI: 10.1103/PhysRevE.69.026113.
- [31] 乔小勇, 李泽怡, 相楠. 中间品贸易隐含碳排放流向追溯及多区域投入产出数据库对比: 基于WIOD、Eora、EXIOBASE数据的研究[J]. 财贸经济, 2018, 41(1): 84-100. [Qiao X Y, Li Z Y, Xiang N. Tracing the embodied carbon in intermediate goods trade and a parallel comparison among multi-regional databases[J]. Finance & Trade Economics, 2018, 41(1): 84-100.]
- [32] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, et al. Building Eora: A global multi-regional input-output database at high country and sector resolution[J]. Economic Systems Research, 2013, 25(1): 20-49.
- [33] 安琪儿, 安海忠, 王朗. 中国产业间隐含能源流动网络分析[J]. 系统工程学报, 2014, 29(6): 754-762. [An Q E, An H Z, Wang L. Analysis of the embodied energy flow network between Chinese industries[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(6): 754-762.]

Net embodied carbon flow network in global trade and community finding analysis

LI Hui¹, JIANG Wenlei¹, TANG Zhipeng²

(1. School of Economics, Qingdao University, Qingdao 266061, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Using the Eora database and Multi-Regional Input-Output (MRIO) model, this study calculated the embodied carbon emissions induced by domestic demand, export, and import of 189 countries (regions) in the world in 2000 and 2015. Based on this, net flow networks of embodied carbon emissions in global trade were constructed, carbon emissions flow problem was analyzed globally from the network perspective, and the status and relationship evolution trend of different countries (regions) in the global trade embodied carbon network was revealed. It is found that the net export of embodied carbon emission in trade was one of the key reasons for the rapid growth of carbon emissions in China, India, Iran, Indonesia, Saudi Arabia, South Africa, and other developing countries (regions), while the net import of embodied carbon emission through trade contributed to the decline of carbon emissions in the United States, Japan, Germany, the United Kingdom, France, and other developed countries (regions). Although the total net imports of embodied carbon emission in the United States, Japan, France, and other countries (regions) tend to decline, the embodied carbon emissions they import from China, India, and other major embodied carbon net export places have been increasing, and the sources of net imports are concentrated. In 2000 and 2015, there are four major communities in the global net embodied carbon flow network. The core of community changes from China, Russia, Saudi Arabia and Iraq to China, India, Russia and Saudi Arabia. The core status of China and India is strengthened, the size of their leading communities has continued to expand, while the community radiation capacity of Russia and Saudi Arabia has been weakened. Community core plays an important role in controlling and reducing embodied carbon emissions in global trade. China, India and other core countries (regions) should strive to reduce the carbon content per unit of energy-intensive products. Because the embodied carbon flow of trading countries (regions) in the same community is closer, the member countries of the same community can be the key support object of international response to climate change.

Key words: embodied carbon emission in trade; Multi-Regional Input-Output (MRIO) model; Input-Output technology; network analysis; community finding algorithm