中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 11 期: 1633 ~ 1642
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

中美贸易中的隐含碳排放转移研究

刘竹[1*], 孟靖[2,3], 邓铸[1], 路平[1], 关大博[1], 张强[1], 贺克斌[2], 宫鹏[1]

1. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084;
2. 清华大学环境学院, 北京 100084;
3. The Bartlett School of Construction and Project Management, University of College London, London WC1E 7HB, UK
* 通讯作者, E-mail: zhuliu@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2019-08-23; 收修改稿日期: 2020-04-04; 接受日期: 2020-05-29; 网络版发表日期: 2020-08-10
国家自然科学基金项目(批准号: 71874097、41921005)、北京市自然科学基金项目(编号: JQ19032)和求是基金会资助

摘要 中美贸易对中美两国国家发展和世界政治经济格局的意义十分重大. 自2018年以来, 美国政府以美中贸易逆差为由向中国出口商品征收额外关税. 然而, 中美贸易中的环境成本差异以及排放转移问题尚未被广泛重视. 本研究通过构建二氧化碳排放清单和多区域投入产出模型, 定量化估计了中美贸易中的隐含碳排放, 并从具体行业层面分析了中美两国产品的单位排放强度和单位经济价值差异. 研究发现, 美国对华出口高附加值产品、进口高耗能和高污染产品, 造成了中国中美贸易的环境成本逆差, 增加了中国额外的环境污染和减排成本. 2017年, 中国为满足美国消费而生产的对美出口产品造成的二氧化碳排放达2.88亿吨, 同期美国对华出口产品的隐含碳排放为0.46亿吨, 相当于美国每年向中国净转移了2.42亿吨二氧化碳排放, 约占美国碳排放总量的5%. 综合考虑相关经济收益, 中国对美出口产品的碳排放强度为0.92千克/美元(人民币:美元=6.8:1), 而美国对华出口产品的碳排放强度仅为0.53千克/美元, 中国出口产品比美国出口产品的碳排放强度高74%, 表明在获得相同经济价值的基础上, 中国平均要比美国多付出约一倍的环境成本和减排代价. 研究认为, 中美贸易的环境成本逆差造成了中国高于自身经济收益的环境代价. 从缩小中美贸易的环境成本逆差的角度来讲, 中国应积极促进产业进一步升级, 增加创新和研发投入, 从而增加出口单位产品的附加价值, 降低生产出口产品的环境代价.

关键词 碳排放, 隐含碳排放, 排放转移

1 研究背景

全球贸易深刻影响着世界格局. 在全球贸易背景下, 产品的生产、组装、运输和销售跨越多个部门和地区, 势必造成经济收益、环境和劳动力成本等在时空分布上的显著差异(Gereffi和Frederick, 2010). 在全球产业链中, 前端制造业中的原材料开采和初级制造过程, 往往聚集了更多的劳动力和资源投入, 造成更多环境污染的同时, 经济收益却相对较低. 而发达国家和地区, 通过利用资本和技术等优势, 将前端制造业"外包"至较不发达地区, 从而形成对较不发达地区的污染物转移. 同时, 处于产业链前端的制造业落后

中文引用格式: 刘竹, 孟靖, 邓铸, 路平, 关大博, 张强, 贺克斌, 宫鹏. 2020. 中美贸易中的隐含碳排放转移研究. 中国科学: 地球科学, 50(11): 1633–1642, doi: 10.1360/SSTe-2019-0190
英文引用格式: Liu Z, Meng J, Deng Z, Lu P, Guan D, Zhang Q, He K, Gong P. 2020. Embodied carbon emissions in China-US trade. Science China Earth Sciences, 63(10): 1577–1586, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9635-x

© 2020 《中国科学》杂志社

地区, 亦会被劳动和资源密集型的生产模式“锁定”, 成为发达地区的“污染物避难所”, 造成发展中国家和地区经济社会发展的严峻挑战(Zhang等, 2017).

自改革开放以来, 在劳动力成本优势和资本投入的推动下, 中国已成为全球贸易的重要组分(Guan等, 2009). 2017年, 中国货物贸易进出口总值27.79万亿元人民币, 出口15.33万亿元, 在全球出口中占比12.77%, 为全球第一. 2018年, 中国出口总量占GDP总额的18%(国家统计局, 2019), 出口已成为中国重要的经济支柱. 然而, 中国在逐渐发展为世界制造业中心的同时, 也聚集了全球主要的资源密集型产业, 造成了中国自身极大的环境压力. 发达国家通过将初级制造业和产品前端污染密集的初级生产和制造外包到中国等发展中国家的模式, 减少或避免了本国的环境代价, 增加了中国等发展中国家的环境成本. 当前, 中国生产了全球50%的水泥、钢铁、煤等初级工业原料, 成为了全球重要的制造业中心; 同时, 由此造成额外的环境污染和治理成本成为了中国实现可持续发展目标进程中急需解决的难题(Guan等, 2014; Jiang等, 2015; Meng等, 2016). 应对气候变化、削减二氧化碳排放已成为各国政府当前重要的发展目标. 中国是世界上人口最多的国家和最大的发展中国家, 也是世界上最大的能源消费国和二氧化碳排放国. 为应对气候变化、承担全球减排责任, 中国政府制定了在2030年碳排放强度(每单位GDP的碳排放量)比2005年降低60%的相对减排指标, 并承诺在2030年左右实现二氧化碳排放总量的峰值(国家发展和改革委员会, 2015). 中国在全球低碳发展中做出了重要贡献.

量化贸易过程中的隐含碳排放转移成为学术界和公众广泛关注的议题. 利用环境拓展的投入产出方法(environmental extended input-output analysis, EEIOA)量化贸易过程中的隐含碳排放转移(Ahmad和Wyckoff, 2003; Weber和Matthews, 2007; Su和Ang, 2014), 即通过区分贸易过程中的最终消费端和生产端, 从而定量地划分碳排放的实际产生地和驱动碳排放产生的最终消费地(Wiebe等, 2012a). 以中美贸易为例, 中国因生产出口至美国消费的产品所产生的碳排放, 由于该产品通过贸易最终在美国消费, 美国是该产品排放产生的最终驱动因素, 其产生的碳排放即视为中美贸易中的隐含排放. 因此, 出口至美国消费的中国产品在中国领土上产生的碳排放, 在消费视角下应被划分为归属于美国排放责任的隐含排放, 而隐含排放亦可视为发达国家向发展中国家的排放转移. 在相关研究中, 环境拓展的投入产出方法与多区域间投入产出模型(multi regional input-output analysis, MRIO)的复合多区域模型在计量间接隐含碳排放领域获得广泛运用(Mi等, 2017; Chen等, 2018). 该方法已被用于针对全球贸易隐含碳排放开展量化分析, 如Davis和Caldeira(2010)、Peters和Hertwich(2008)、Peters等(2012a)以及Meng等(2018). 研究发现, 贸易是全球碳排放和环境变化的重要驱动因素, 并且由于发达国家与发展中国家在发展阶段、资源禀赋、技术水平等方面的差异, 发达国家普遍通过向发展中国家外包制造业造成发达国家向发展中国家的污染物转移, 已经形成“污染物避难所”效应. 其中, 中国作为发达国家与发展中国家贸易的主要贡献者, 也是贸易隐含排放和相关环境影响的主要承担者. 前期的相关研究发现, 自1997年开始, 发达国家消费中国出口产品贡献的二氧化碳排放量占中国排放比例的10%以上, 在2007年达到17亿吨二氧化碳(占中国当年总排放的25%)(Davis和Caldeira, 2010). 陈锡康(1982)、刘红光等(2011)、李善同等(2016)较早的发展了投入产出的相关运用, 并开展了国际和区域贸易中的隐含环境影响的分析和研究. Yang等(2014)、邓荣荣和陈鸣(2014)、詹晶和叶静(2014)等学者曾测算了中美贸易间的隐含能源或隐含碳排放. 但是, 对近年来备受关注的, 在贸易碳排放视角下中美贸易的环境成本逆差的研究仍然较为缺乏.

中美贸易是全球最大的双边国家贸易. 2018年以来, 中美贸易关系趋于紧张, 美国政府以削减美中贸易逆差为由单方面向中国对美出口商品增加关税. 在这一关键的时代背景下, 定量化分析中美贸易间的环境成本对综合评价中美贸易关系具有重要意义. 中美间贸易是否有显著的环境成本逆差? 中美贸易隐含碳排放不平等的可能原因是什么? 如何应对中美贸易对中国可持续发展造成的挑战? 这一系列问题既是当前研究的空白, 又是当前在中美贸易争端局势下的重要现实议题.

为此, 本研究在前期研究的多区域投入产出模型开发和中国区域二氧化碳排放核算的基础上, 基于全球贸易数据库GTAP发展了全球贸易隐含碳排放核算模型, 定量化研究中美贸易间的隐含碳排放.

2　研究方法及数据

2.1　基于投入产出方法的贸易隐含碳排放核算

基于投入产出方法，通过追溯国际产业链可以核算贸易中的包括二氧化碳在内的隐含环境成本. 其中列昂提夫发明的投入产出矩阵以及环境拓展的投入产出方法，在定量化描述经济活动的环境影响中被广泛运用. 通过将单区域的投入产出矩阵扩展到多个区域，环境扩展多区域投入产出矩阵可追踪和描述伴随跨区域的环境影响，比如因为双边或者多边贸易造成的环境影响的转移. 众多学者对投入产出模型的构建做出了相应贡献，本研究根据全球贸易分析(global trade analysis project，GTAP)模型构建了全球57个部门的2004年、2007年、2011年和2014年的多区域投入产出表，量化分析了140个国家和地区间贸易的隐含碳排放转移. 对一个国家来说，存在

$$\mathbf{X}^{\mathrm{r}}=\mathbf{Z}^{\mathrm{r}}+\mathbf{y}^{\mathrm{r}}+\sum_{\mathrm{s}}\mathbf{e}^{\mathrm{rs}}-\sum_{\mathrm{s}}\mathbf{e}^{\mathrm{sr}}, \tag{1}$$

式中，$\mathbf{X}^{\mathrm{r}}$是r区域的行业总产出向量，$\mathbf{Z}^{\mathrm{r}}$是r区域中的生产过程中需要的本地以及进口中间投入，$\mathbf{y}^{\mathrm{r}}$是满足最终需求的本地生产和进口产品，并可具体分为居民家庭消费、政府消费和资本形成；$\mathbf{e}^{\mathrm{rs}}$是r区域向s区域的出口(r≠s)，$\mathbf{e}^{\mathrm{sr}}$是s区域从r区域的进口. 在双边贸易隐含排放(emissions embodied in bilateral trade, EEBT)方法中，去除掉满足中间生产和最终需求的进口产品后，r区域的总产出满足(Peters和Hertwich, 2008):

$$\mathbf{X}^{\mathrm{r}}=\mathbf{Z}^{\mathrm{rr}}+\mathbf{y}^{\mathrm{rr}}+\sum_{\mathrm{s}}\mathbf{e}^{\mathrm{rs}}; \tag{2}$$

而r区域的进口产品满足:

$$\mathbf{m}^{\mathrm{r}}=\sum_{\mathrm{s}}\mathbf{e}^{\mathrm{sr}}=\sum_{\mathrm{s}}\mathbf{Z}^{\mathrm{sr}}+\sum_{\mathrm{s}}\mathbf{y}^{\mathrm{sr}}. \tag{3}$$

生产单位最终消费产品所引起的直接和间接排放为

$$\mathbf{h}^{\mathrm{r}}=\mathbf{F}^{\mathrm{r}}(I-\mathbf{A}^{\mathrm{rr}})^{-1}, \tag{4}$$

式中，$\mathbf{F}^{\mathrm{r}}$是r区域的直接排放强度矢量，是由各部门的直接二氧化碳排放除以该部门的总产出得到(Lin等, 2014). 本文中的二氧化碳排放数据来自于全球贸易分析(GTAP)模型数据库(Aguiar等, 2016)，包含了各部门由于化石能源消费引起的碳排放. 根据Liu等(2015)对中国碳排放的研究，GTAP数据库中农业和工业的二氧化碳排放高估了9%，本文在计算过程中据此进行了调整. $\mathbf{L}=(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$是里昂惕夫逆矩阵，能够反映出单位最终需求产品在生产过程中需要的直接或者间接投入. $(\mathbf{I}-\mathbf{A}^{\mathrm{rr}})^{-1}$只包含了本地的生产供应链而不包含进口产品对于中间生产过程的投入.

r区域由于生产出口到s区域的产品引起的直接和间接排放为

$$\mathbf{T}^{\mathrm{rs}}=\mathbf{F}^{\mathrm{r}}(\mathbf{I}-\mathbf{A}^{\mathrm{rr}})^{-1}\mathbf{e}^{\mathrm{rs}}. \tag{5}$$

2.2　生产端的二氧化碳排放核算及数据

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐并被广泛使用的二氧化碳排放核算方法，一个区域在生产端的二氧化碳排放可由活动数据和相应的排放因子核算得到，例如能源消费过程的二氧化碳排放量$\mathbf{E}_{\mathrm{ff}}$由能源消费量**AD**和单位能源的二氧化碳排放因子**EF**核算得到(Eggleston等, 2006; Liu等, 2015)，如公式(6)所示.

$$\mathbf{E}_{\mathrm{ff}}=\mathbf{AD}\times\mathbf{EF}. \tag{6}$$

由于碳排放因子跟能源燃料的质量、属性以及燃烧时的效率有关，碳排放因子**EF**又可以进一步分解为燃料净热值**NCV**、单位热值含碳量**CC**和氧化率(燃烧效率)**O**:

$$\mathbf{EF}=\mathbf{NCV}\times\mathbf{CC}\times\mathbf{O}. \tag{7}$$

从而，化石能源碳排放量$\mathbf{E}_{\mathrm{ff}}$可以通过公式(8)估算:

$$\mathbf{E}_{\mathrm{ff}}=\mathbf{AD}\times\mathbf{CV}\times\mathbf{CC}\times\mathbf{O}. \tag{8}$$

水泥生产过程的二氧化碳排放核算的原理与化石能源消费碳排放类似，如公式(9)所示:

$$\mathbf{E}_{\mathrm{industrial}}=\mathbf{AD}\times\mathbf{EF}. \tag{9}$$

2.3　数据来源

本研究中的多区域投入产出表和贸易数据来自于全球贸易分析模型数据库(GTAP). 由于GTAP的最新数据为2014年，为了反映近几年中美贸易的隐含碳排放，我们假设贸易产品的碳排放强度不变，根据中国海关统计年鉴(2015, 2016, 2017)中的中美贸易各类进出口产品的变化将研究结果拓展至2017年. 本文中的碳排放数据来自于GTAP数据库，原始数据来源为国际能源署(International Energy Agency, IEA). 为了更好地对比和分析中美贸易的宏观情况，我们将GTAP的

结果合并为14个主要部门(表1), 对这14个部门的隐含排放量和排放强度进行对比和分析. 更进一步的, 我们结合中美经贸数据(中国海关)、中国GDP和R&D数据(中国国家统计局)、美国GDP数据(美国商务部经济分析局)和美国R&D数据(OECD), 对中美贸易中的重点制造业部门进行了对比分析. 由于不同数据来源的部门分类和命名有所差异, 我们对相应部门进行了匹配或合并(表2).

3 研究结果

基于全球碳排放数据库和多区域投入产出表, 本研究构建了包括全球140个国家和地区57个部门的贸易碳排放核算模型, 定量核算了全球2004年、2007年、2011年和2014年的贸易过程中隐含的碳排放转移, 并将结果拓展至2017年. 研究发现, 2017年全球贸易转移的二氧化碳约为90亿吨, 约占全球总排放量的四分之一. 全球贸易中的隐含排放在2000~2011年间快速增长, 在2011年后由于全球经济危机的影响出现增长波动和放缓. 其中, 由世界其他国家消费中国出口商品所产生的二氧化碳排放为15.9亿吨, 约占中国自身二氧化碳排放量的六分之一.

中美贸易是全球最大的双边国家贸易, 中美贸易中的隐含碳排放转移量也是世界各国贸易中最高的. 本研究发现(图1), 2017年中美贸易中隐含的二氧化碳排放转移量为3.34亿吨, 其中2.88亿吨二氧化碳为由美国消费中国出口商品而产生的在中国领土上的二氧化碳排放, 0.46亿吨二氧化碳为由中国消费美国商品而产生的在美国领土上的二氧化碳排放. 因此, 由于中美贸易顺差, 美国通过消费中国商品, 相当于向中国净转移2.42亿吨的二氧化碳排放量.

中美间贸易的隐含碳排放量存在较大差异, 其结构也有显著不同. 如图2所示, 中国对美出口商品隐含碳排放量最高的部门为“机械与电子电气设备”, 贡献了中国对美出口商品隐含碳排放总量的43.6%, 其次是“轻工业”(16.2%)和“化工产品”(12.0%). 而美国对华出口商品的隐含碳排放量中, “化工产品”“机械与电子电气设备”“交通装备”以及“农业”等部门占比最高, 依次占总量的17.3%、16.6%、14.8%和11.7%. 可以看出, 中国对美出口产品主要集中于制造业, 而美国对华出口产品涉及农业、普通制造业、交通设备等多个部门.

从中美贸易各部门的隐含碳排放的绝对量来看(图3), 美国除了在农业和采矿业等部门的对华出口商

表 1 GTAP部门与14个主要部门映射关系

合并后部门	GTAP部门
农业	水稻、小麦、其他谷物、蔬菜和水果、油料种子、甘蔗和甜菜、植物纤维、其他农作物、畜产、其他动物产品、生奶、羊毛、林业、渔业
采矿业	煤炭、石油、天然气、其他采矿业
轻工业	肉类、其他肉类、植物油、乳制品、加工米、糖、其他食品、饮料和烟草制品、纺织品、服装、皮革、木材、纸和纸制品
石油和煤炭制品	油品和焦炭
化工产品	化学橡胶制品
矿物制品	非金属矿物
金属制品	钢铁、有色金属、金属制品
机械与电子设备	电子设备、其他机械设备
交通装备	汽车及零件、其他运输设备
其他制造业	其他制造业
能源生产	电力、燃气供应、水
建筑业	建筑业
交通运输业	其他运输、水上运输、航空运输、通讯
服务业	贸易、其他金融中介、保险、其他商业服务、娱乐与其他服务、其他服务(政府)、住宅

表 2　不同数据来源的重点制造业部门映射关系

合并后部门	中国海关	中国国家统计局	美国商务部经济分析局	OECD
化工产品	无机化学品、贵金属等的化合物、有机化学品、药品、鞣料、着色料、涂料、油灰; 墨水等、精油及香膏; 香料制品及化妆盥洗品、洗涤剂、润滑剂、人造蜡、塑型膏等照相及电影用品、杂项化学产品、塑料及其制品、橡胶及其制品	化学原料及化学制品制造业、化学制造业、橡胶和塑料制品业	化学品/塑料与橡胶制品	化学及化学品制造业/基本药物和药物制剂制造业/橡胶和塑料制品制造业
矿物制品	矿物材料的制品、陶瓷产品、玻璃及其制品	非金属矿物制品业	非金属矿物制品	其他非金属矿物产品制造业
金属及金属制品	钢铁、钢铁制品、铜及其制品、铝及其制品、贱金属器具、利口器、餐具及零件贱金属杂项制品、矿砂、矿渣及矿灰	黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业、金属制品业	主要金属/金属制品	基本金属制造业/金属制品制造业, 但机械和设备除外
交通装备	车辆及其零附件, 但铁道车辆除外、航空器、航天器及其零件	汽车制造业铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	汽车、车身和拖车及零件/其他交通运输设备	汽车、拖车和半拖车制造业/其他交通运输设备制造业
服饰纺织	针织或钩编的服装及衣着附件、非针织或非钩编的服装及衣着附件、其他纺织制品; 成套物品; 旧纺织品鞋靴、护腿和类似品及其零件头饰、加工羽毛及制品; 人造花; 人发制品	纺织业、纺织服装、服饰业、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	纺织厂和纺织制品厂/服装、皮革及相关产品	纺织品、服装、皮革和相关产品制造业
纸和印刷品	木浆等纤维状纤维素浆; 废纸及纸板、纸及纸板; 纸浆、纸或纸板制品、印刷品; 手稿、打字稿及设计图纸	造纸及纸制品业、印刷和记录媒介复制业	纸制品/印刷及相关制品	纸和纸制品制造业/印刷与复制记录媒介
机械与电子电气设备	核反应堆、锅炉、机械器具及零件、电机、电气、音像设备及其零附件、光学、照相、医疗等设备及零附件	电气机械和器材制造业、通用设备制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业、专用设备制造业	电气设备、器材和组件/机械/电脑及电子产品	电气设备制造业/其他机械和设备制造业/电脑、电子产品和光学产品制造业
木材和木制品	木及木制品; 木炭	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	木制品	木材及木制品制造业(家具除外)、稻草和编织材料制品的制造

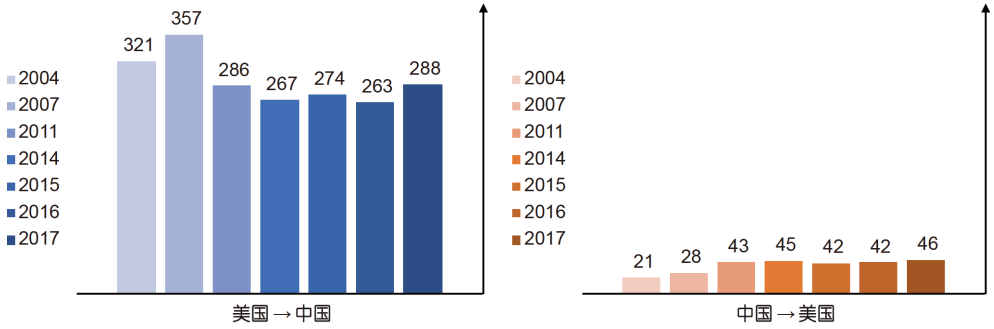

图 1　中美贸易中的隐含碳排放转移

单位: 百万吨二氧化碳

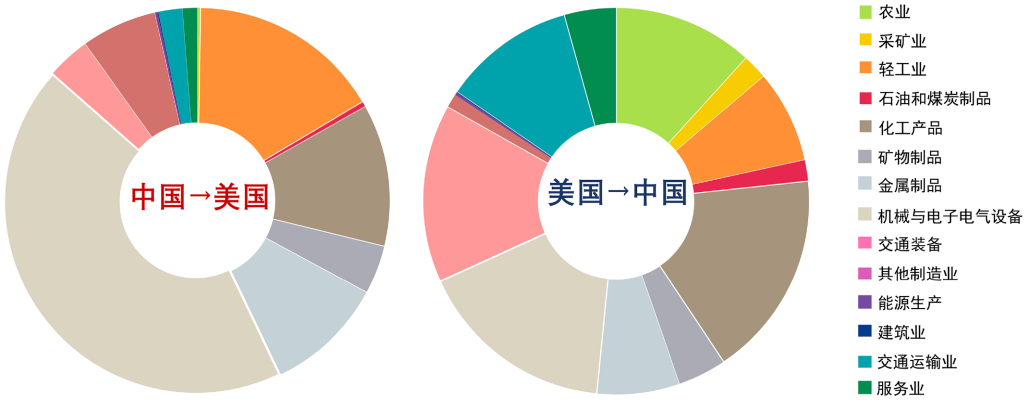

图 2　2017年中美贸易中隐含碳排放转移的部门贡献

品的隐含碳排放量高于中国之外，其他部门对华出口商品的隐含碳排放量均低于中国. 在中美贸易中，美国通过消费从中国进口的“机械与电子电气设备”与“化工产品”等能源密集型和碳密集型商品，避免了直接在本土生产这些产品所造成的直接碳排放，以贸易的形式将碳排放转移到了中国. 虽然中国通过贸易获得了经济效益，但同时也被迫承担了被转移的隐含碳排放.

本研究引入“碳排放强度”指标来综合评价中美贸易中的经济利益和环境成本. 碳排放强度即单位经济价值量的碳排放量，表征获得每单位的经济收益(本研究中为一美元)的同时产生的环境压力(本研究为吨二氧化碳排放). 中国对美出口商品的隐含碳排放强度为0.92千克/美元，而美国对华出口商品的隐含碳排放强度为0.53千克/美元，中国对美出口商品的隐含碳排放强度比美国对华出口商品的隐含碳排放强度高74%，表明在获得相同经济价值的基础上，中国平均要比美国多付出近一倍的环境成本和减排代价. 分部门的贸易隐含碳排放强度表明(图4)，中国大部分部门出口商品的隐含碳排放强度高于美国出口商品的隐含碳排放强度.

由于中国的劳动力等生产要素的成本相对较低，中国出口产品的碳排放强度普遍较高. 例如，我们对主要工业产品生命周期过程中的单位产品产量的二氧化

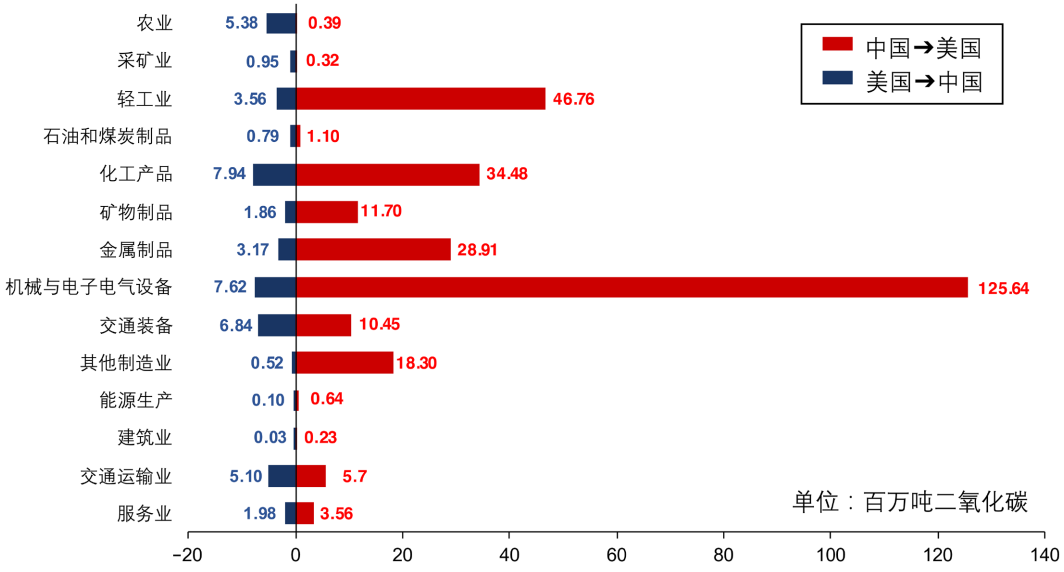

图 3　2017年分行业中美贸易隐含碳排放

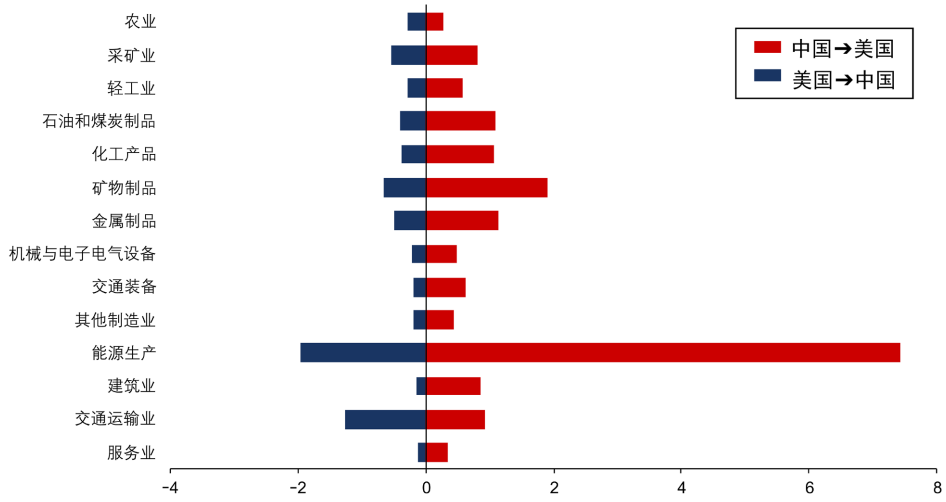

图 4　2017年分行业中美贸易隐含碳排放强度

单位: 千克/美元

碳排放进行量化, 发现相对于欧盟平均水平, 中国在玻璃、钢、铁、铝等工业材料的生产过程中, 单位产品产量的二氧化碳排放是欧盟的数倍之多, 同时大多数中国工业产品的单价都低于欧美国家. 换言之, 在获得相同经济收益的前提下, 中国将付出数倍于其他国家的资源和环境代价.

然而, 中国在中美贸易中的环境成本逆差并不仅仅由中美商品的经济成本决定. 通过分析对比中美重点行业的研发投入和单位排放的产值可知(图5), 美国在高研发投入的基础上实现了较高产值, 从而有效降低了环境成本. 例如美国航空航天装备单位碳排放的经济收益超过3万美元, 是美国机械制造产品单位碳排放经济收益的近三倍, 但其单位碳排放的研发投入也是机械制造产品的七倍. 2017年, 中国对美出口最多的部门为机械与电子电气设备, 占中国对美出口总额的56%; 美国对华出口最多的商品为航空航天装备, 占美国对华出口总额的13%. 然而, 美国对华出口的航空航天装备的单位碳排放的经济价值高达3.3万美元/吨二氧化碳, 而中国对美出口的机械制造产品的单位碳排放的经济价值仅为8千美元/吨二氧化碳, 即在相同的环境代价(二氧化碳排放)下美国航空航天装备出口产品获得的经济收益是中国机械制造产品的四倍之多, 说明中国的出口商品普遍存在单位研发投入和产品附加值相对较低的特点, 而美国主要出口的如航空航天装备等商品具有极高的附加值. 从对相同部门的比较来看, 美国高端制造业的单位研发投入也相对较高, 如美国航空航天装备每单位碳排放的研发投入高达8千美元/吨二氧化碳, 中国航空航天装备每单位碳排放的研发投入仅为1千美元/吨二氧化碳. 由低劳动力成本决定的中国制造商品的低成本, 虽然带来了中国出口商品在国际市场上的畅销, 但是单位研发投入的相对不足, 造成了中国通过出口商品获得的单位环境成本的经济效益普遍低于美国的出口商品. 未来中国制造业的提升方向之一, 即是从低研发投入、低附加值的制造业(图5左下角), 逐渐升级至高技术含量、高附加值的制造业(图5右上角).

4　结论与讨论

本研究有如下关键性结论.

(1) 本文以贸易隐含碳为指标, 显示出中国在中美贸易中有显著的环境成本逆差. 2017年, 美国通过进口中国商品向中国净转移2.42亿吨二氧化碳排放. 其中, 2.88亿吨二氧化碳为美国从中国进口商品而转移到中国的二氧化碳排放量, 0.46亿吨二氧化碳为中国从美国进口商品而转移到美国的二氧化碳排放量.

(2) 中美贸易中, 中国所承受的环境成本与获得的经济收益并不相符. 中国出口美国产品的隐含碳排放强度比美国出口中国产品的隐含碳排放强度高74%, 即在获得相同经济价值的基础上, 中国平均要比美国

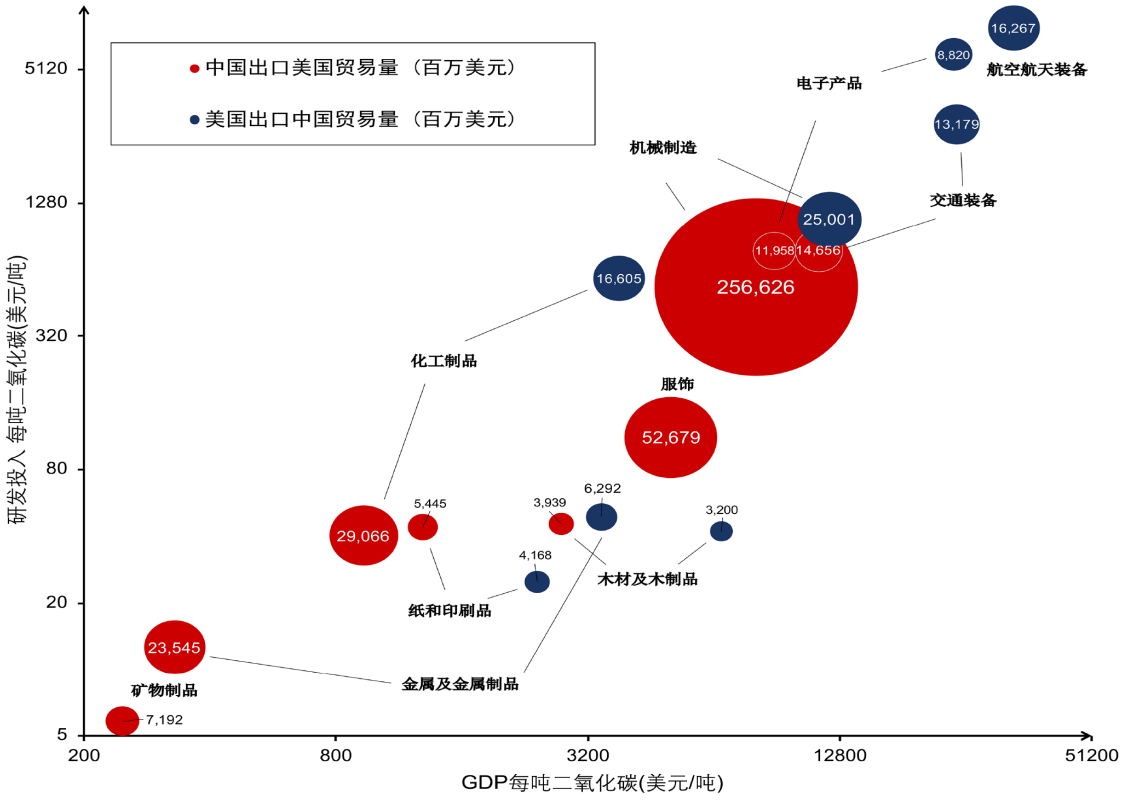

图 5　2017年中美重点制造业部门贸易产品的单位排放产值(GDP/CO_2)与单位排放的研发投入(R&D/CO_2)对比

多付出约74%的能源消费和环境代价.

(3) 美国商品的单位二氧化碳排放的经济价值普遍高于中国相应部门的商品. 从行业分布上看, 中国出口美国产品多为机械制造产品, 而美国出口产品集中在如航空航天器材和电子产品等具有高附加值的高端制造业等部门, 而相同环境代价下美国航空航天装备出口产品获得的经济收益是中国机械制造出口产品的四倍.

(4) 制造业的隐含碳分析表明, 较高的产值是在高研发投入的基础上实现的. 例如在每单位碳排放七倍以上的研发投入的基础上, 美国的航空航天器材等高端制造业产品实现了普通机械制造产品三倍左右的单位碳排放经济收益. 因此, 中国需要进一步扩大研发投入, 增加高端制造业的国际市场竞争力.

本研究表明, 在中国位于中美贸易的经济贸易顺差的同时, 中国承受着环境成本视角下的贸易逆差, 表明在获得同等单位经济收益下, 中国实际上付出了更高的环境成本. 而美国作为产品消费国, 造成了中国处于中美贸易的环境成本逆差的地位. 因此, 自2018年起美国以对华贸易逆差为理由率先征收中国商品关税, 忽略和回避了美国在中美贸易中对中国的环境成本转移.

中国若要减少自身环境成本, 一方面, 需要进一步加大创新投入, 转变经济增长方式, 促进产业进一步升级调整, 增加产品的技术含量、附加价值和国际竞争力, 最终实现创新驱动的可持续发展. 目前, 中国制造业产品的单位研发投入仍远低于发达国家. 只有进一步加大研发投入, 提升制造业产品附加价值, 才能使中国在国际贸易中缩小与发达国家的单位环境成本的经济收益差距. 另一方面, 中国应利用“一带一路”倡议等战略机遇, 促进生态文明建设, 积极构建全球产业生态系统. 广大发展中国家和“一带一路”沿线国家具有广阔的市场前景和特有的资源优势. 通过推进基础设施建设等方式, 形成更广泛的产业生态系统, 可以实现资源禀赋和人力投入的优化配置. 同时, 将制造业部门分散于不同国家和地区, 有利于避免污染物集中于人口密集地区, 可以降低人口密集地区的环境影响和健康损失. 建设跨区域、跨产业的资源利用和回收

系统，也将为消除全球贸易背景下的污染物转移、解决全球环境问题提供可行之道. 中国需要在政策、技术、市场的综合作用下，实现创新驱动产业的竞争力持续提高.

本文结果中的不确定主要来自以下几个方面: (1) 多区域投入产出表. 目前研究中广泛使用的投入产出表包括GTAP、WIOD和EORA等，不同数据库之间的结果(包含碳排放数据的差异)误差不超过13%(Peters等, 2012b). Owen等(2014)的研究进一步表明，碳足迹的核算中不确定性主要来源于碳排放数据而非经济数据. 而本文的碳排放数据是来自于国际能源署(IEA). 作为权威的碳排放数据来源之一，IEA也是其他几个数据库，如WIOD和EORA数据库的碳排放数据来源. GTAP相比其他数据库分类一致的部门数最多，并且在全球研究中被广泛使用(Davis和Caldeira, 2010; Wiebe等, 2012b; Andrew和Peters, 2013). (2) 最新的全球多区域投入产出表为2014年数据，在计算2017年贸易中隐含的碳排放量时采用了碳排放强度不变的假设，会引起一定误差(2017年中国碳排放强度约比2014年下降17%). (3) 由于GTAP数据库的部门分类和中国海关数据的部门分类不完全一致，不同数据库的比对中需要进行一定的拆分和合并. 总的来说本文结果中的不确定性源自于数据的限制以及滞后性，在未来数据更充足的情况下可以相对提高准确性.

参考文献

陈锡康. 1982. 经济数学方法与模型. 北京: 中国财政经济出版社

邓荣荣, 陈鸣. 2014. 中美贸易的隐含碳排放研究——基于I-O SDA模型的分析. 管理评论, 26: 46–57

国家发展和改革委员会. 2015. 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献

国家统计局. 2019. 2018年国民经济和社会发展统计公报

李善同, 齐舒畅, 何建武. 2016. 2007年中国地区扩展投入产出表: 编制与应用. 北京: 经济科学出版社

刘红光, 刘卫东, 刘志高. 2011. 区域间产业转移定量测度研究——基于区域间投入产出表分析. 中国工业经济, 6: 79–88

詹晶, 叶静. 2014. 中美贸易隐含碳测度及影响因素研究. 广东商学院学报, 29: 36–42

Aguiar A, Narayanan B, McDougall R. 2016. An overview of the GTAP 9 data base. J Glob Econ Anal, 1: 181–208

Ahmad N, Wyckoff A. 2003. Carbon dioxide emissions embodied in international trade of goods. OECD Science, Technology and Industry Working Papers. Paris: OECD Publishing. No. 2003/15

Andrew R M, Peters G P. 2013. A multi-region input-output table based on the global trade analysis project database (GTAP-MRIO). Econ Syst Res, 25: 99–121

Chen Z M, Ohshita S, Lenzen M, Wiedmann T, Jiborn M, Chen B, Lester L, Guan D, Meng J, Xu S, Chen G, Zheng X, Xue J J, Alsaedi A, Hayat T, Liu Z. 2018. Consumption-based greenhouse gas emissions accounting with capital stock change highlights dynamics of fast-developing countries. Nat Commun, 9: 3581

Davis S J, Caldeira K. 2010. Consumption-based accounting of CO_2 emissions. Proc Natl Acad Sci USA, 107: 5687–5692

Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies

Gereffi G, Frederick S. 2010. The global apparel value chain, trade and the crisis: Challenges and opportunities for developing countries. World Bank Policy Research Working Paper No. 5281

Guan D, Peters G P, Weber C L, Hubacek K. 2009. Journey to world top emitter: An analysis of the driving forces of China's recent CO_2 emissions surge. Geophys Res Lett, 36: L04709

Guan D, Su X, Zhang Q, Peters G P, Liu Z, Lei Y, He K. 2014. The socioeconomic drivers of China's primary $PM_{2.5}$ emissions. Environ Res Lett, 9: 024010

Jiang X, Zhang Q, Zhao H, Geng G, Peng L, Guan D, Kan H, Huo H, Lin J, Brauer M, Martin R V, He K. 2015. Revealing the hidden health costs embodied in Chinese exports. Environ Sci Technol, 49: 4381–4388

Lin J, Pan D, Davis S J, Zhang Q, He K, Wang C, Streets D G, Wuebbles D J, Guan D. 2014. China's international trade and air pollution in the United States. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 1736–1741

Liu Z, Guan D, Wei W, Davis S J, Ciais P, Bai J, Peng S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G, Andres R J, Crawford-Brown D, Lin J, Zhao H, Hong C, Boden T A, Feng K, Peters G P, Xi F, Liu J, Li Y, Zhao Y, Zeng N, He K. 2015. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. Nature, 524: 335–338

Meng J, Liu J, Xu Y, Guan D, Liu Z, Huang Y, Tao S. 2016. Globalization and pollution: Tele-connecting local primary $PM_{2.5}$ emissions to global consumption. Proc R Soc A, 472: 20160380

Meng J, Mi Z, Guan D, Li J, Tao S, Li Y, Feng K, Liu J, Liu Z, Wang X, Zhang Q, Davis S J. 2018. The rise of South-South trade and its effect on global CO_2 emissions. Nat Commun, 9: 1871

Mi Z, Meng J, Guan D, Shan Y, Song M, Wei Y M, Liu Z, Hubacek K. 2017. Chinese CO_2 emission flows have reversed since the global financial crisis. Nat Commun, 8: 1712

Owen A, Steen-Olsen K, Barrett J, Wiedmann T, Lenzen M. 2014. A

structural decomposition approach to comparing MRIO databases. Econ Syst Res, 26: 262–283

Peters G P, Hertwich E G. 2008. CO_2 embodied in international trade with implications for global climate policy. Environ Sci Technol, 42: 1401–1407

Peters G P, Marland G, Le Quéré C, Boden T, Canadell J G, Raupach M R. 2012a. Rapid growth in CO_2 emissions after the 2008–2009 global financial crisis. Nat Clim Change, 2: 2–4

Peters G P, Davis S J, Andrew R. 2012b. A synthesis of carbon in international trade. Biogeosciences, 9: 3247–3276

Su B, Ang B W. 2014. Input-output analysis of CO_2 emissions embodied in trade: A multi-region model for China. Appl Energy, 114: 377–384

Weber C L, Matthews H S. 2007. Embodied environmental emissions in US international trade, 1997–2004. Environ Sci Technol, 41: 4875–4881

Wiebe K S, Bruckner M, Giljum S, Lutz C. 2012a. Calculating energy-related CO_2 emissions embodied in international trade using a global input-output model. Econ Syst Res, 24: 113–139

Wiebe K S, Bruckner M, Giljum S, Lutz C, Polzin C. 2012b. Carbon and materials embodied in the international trade of emerging economies. J Industrial Ecol, 16: 636–646

Yang R, Long R, Yue T, Shi H. 2014. Calculation of embodied energy in Sino-USA trade: 1997–2011. Energy Policy, 72: 110–119

Zhang Z, Zhu K, Hewings G J D. 2017. A multi-regional input-output analysis of the pollution haven hypothesis from the perspective of global production fragmentation. Energy Econ, 64: 13–23

(责任编委: 陈发虎)