

苏昕,贺克斌,张强.中美贸易间隐含的大气污染物排放估算[J].环境科学研究,2013,26(9):1022-1028.

SU Xin, HE Kebin, ZHANG Qiang. Air pollutant emissions embodied in China-US trade [J]. Research of Environmental Sciences 2013, 26(9): 1022-1028.

中美贸易间隐含的大气污染物排放估算

苏 昕¹, 贺克斌^{1*}, 张 强²

1. 清华大学环境学院, 北京 100084

2. 清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084

摘要: 随着中国能源消耗和国际贸易的快速增长, 中国国际贸易尤其是中美贸易对气候变化的影响受到了广泛关注, 但国际贸易对于大气污染的影响却鲜见系统研究. 基于环境投入产出法和结构分解分析法, 采用基于技术的、自下而上的大气污染物排放清单, 探讨了中美贸易隐含的大气污染物排放问题. 结果表明: 由于中国对美国出口贸易顺差较大且商品污染物排放强度高, 造成了中国对美国的出口贸易隐含着较大的污染物排放逆差. 2007 年中国对美国出口贸易隐含的 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放逆差分别为 174.26×10^4 、 131.15×10^4 和 46.88×10^4 t. 有行业针对性的污染物减排措施可以降低中美贸易隐含的污染物排放量; 1997—2007 年污染物燃烧排放因子和非燃烧直接排放强度的下降就可使出口贸易隐含的 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量降低 96.41% 和 226.26%. 占出口份额最高的机械类制造品的 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度分别为 72.63、58.38 和 $20.74 \text{ t}/10^8$ 元, 低于所有出口商品的污染物排放强度的平均值, 中国应加强这种高附加值、低污染物排放的商品出口.

关键词: 投入产出法; 结构分解分析法; 大气污染; 国际贸易

中图分类号: X51 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2013)09-1022-07

Air Pollutant Emissions Embodied in China-US Trade

SU Xin¹, HE Ke-bin¹, ZHANG Qiang²

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Centre for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Export-based domestic energy use and related CO_2 emissions in China have been widely argued in the scientific publications. About 20% of domestic China's CO_2 emissions are caused by international exports, and such a large amount of emissions plays an influential role in the policy making of the international climate. Meanwhile, China's international trade also has a significant impact on other air pollutants besides CO_2 . However, there was no comprehensive study about this important issue. The high levels of air pollutants caused by China's production intense domestic industry have a severe impact on human health as well as on ecosystems and biosphere. This is important to understand their drivers. Based on Environmental Extended Input-output Analysis (EEIO) and Structural Decomposition Analysis (SDA), as well as an updated bottom-up emission inventory of China, air pollutant emissions embodied in trade between China and the USA were estimated. Results showed that, in 2007, SO_2 , NO_x and $\text{PM}_{2.5}$ embodied in China's exports to the USA were 178.46×10^4 , 137.22×10^4 and 47.15×10^4 t, respectively, while those embodied in China's imports from the USA were only 4.20×10^4 , 6.07×10^4 and 0.27×10^4 t, respectively. China had an emission deficit, and this is mainly because of its huge trade surplus and higher emission intensity. From 1997 to 2007, SO_2 , NO_x and $\text{PM}_{2.5}$ embodied in export from China to the USA grew by 159%, 244% and 94% respectively. Trade quantity scale-up accounted for most of the emission growth, although energy use was also improved. Besides, Owing to the sector-specific pollution control technologies. Owing to the pollution control technology of power plant and cement industry, SO_2 and $\text{PM}_{2.5}$ embodied in China's export to the USA decreased by 96.41% and 226.26% from 1997 to 2007 respectively, when other driving forces remained constant. In 2007, emission intensities of manufactured goods, the main export from China to the USA, were $72.63 \text{ t}/10^8$ yuan for SO_2 , $58.38 \text{ t}/10^8$ yuan for NO_x , and $20.74 \text{ t}/10^8$ yuan for $\text{PM}_{2.5}$, lower than the average emission

收稿日期: 2013-04-02 修订日期: 2013-06-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新群体项目(2122100); 清华大学自主科研计划项目(20111081115)

作者简介: 苏昕(1987-),男,吉林长春人, sunxin1987email@sina.com.

* 责任作者, 贺克斌(1962-),男,四川成都人,教授,博士,主要从事大气环境研究, hekb@tsinghua.edu.cn

intensities of all China's export to US. The China's economy will continue to be driven by a large amount of international exports. Based on the results, we recommend China to further expand its sector-specific pollution control measures, to enlarge the export share of high value-added goods with lower emission-intensity and to implement emission tax or emission-intensive-export quota.

This will not only help to reduce China's local air pollution and benefit its people but can also reduce the pollutants emissions embodied in China's export which will make its products for the international export market more attractive to foreign consumers.

Key words: input-output analysis; structural decomposition analysis; air pollution; international trade

伴随全球化进程的加快,国际贸易对于全球环境的影响日益重要. Wyckoff 等^[1] 研究认为,OECD(经济合作发展组织)主要成员国进口贸易隐含的碳排放占其总排放的13%. Sinden 等^[2] 认为,2004年全球人为源碳排放中的27%与国际贸易有关,并且指出这些碳排放主要来自发展中国家为发达国家提供的生产和服务.目前,国家尺度的温室气体排放核算体系采用生产者为原则(production-based principle)的计算方式,因此,国际贸易隐含的碳排放主要归属于发展中国家;而基于《联合国气候变化框架公约》中“共同但有区别的责任”原则,发展中国家不承担强制性的温室气体减排责任,这在部分程度上会削弱全球温室气体减排的效果.同时,如果基于消费者原则(consumption-based principle),国际贸易隐含的碳排放又会主要归属于发达国家,而导致发达国家采用碳关税等方式进行贸易制裁.因此,国际贸易碳排放的归属问题已经成为科学研究和国际政治中广泛关注的议题.

中国快速增长的能源消耗和国际贸易使其在该问题上的影响至关重要. Sinden 等^[2] 指出,全球31%的贸易碳排放来自中国. Davis 等^[3] 的研究表明,2004年中国出口贸易隐含的碳排放占当年中国碳排放总量的22.5%. Peters 等^[4] 认为,2002—2005年中国碳排放增长的50%与出口贸易相关. Shui 等^[5] 认为,由于能源结构的差异,中美双边贸易会增加全球的碳排放. Minx 等^[6] 指出,贸易量的快速增长是中国贸易碳排放增长的主要因素,而能源强度的下降可以缓解这种增长.但 GUAN 等^[7] 预测,即使中国采用最优的碳排放控制技术,到2030年其碳排放量仍会有一定程度的增长.

与CO₂的情况类似,国际贸易也会导致大气污染物的排放转移,部分研究者也关注了该问题^[8-9].但是,这些研究均忽略了污染物控制技术变化的因素^[10],这为准确评价该问题带来了困难.为此,该研究利用基于技术的、自下而上编制的中国大气污染物排放清单,结合投入产出分析法和结构分解分析法,研究中美贸易隐含的大气污染物排放问题,定量计算中美贸易隐含的SO₂、NO_x和PM_{2.5}排放量,并分析了影响中国对美国出口贸易隐含的污染物排放量的因素.

1 方法和数据

1.1 环境投入产出法

中国对美国出口贸易隐含的污染物排放量(EEE)可由式(1)计算:

$$EEE = D \times L \times T_e \quad (1)$$

式中 D ($1 \times n$ 矩阵) 为单位生产投入的污染物排放量,即污染物的直接排放强度; L ($n \times n$ 矩阵) 为 Leontief 逆矩阵,表征生产结构关系; T_e ($n \times 1$ 矩阵) 为中国对美国出口的 n 种商品的价值量.有关环境投入产出分析法的说明见文献[11].

采用相同方法计算中国从美国进口贸易隐含的污染物排放量(EEI),见式(2).但由于缺乏较为详尽的美国污染物排放数据,该研究采用了近似算法:

$$EEI = D \times L \times T_i \times \frac{P_{US}}{P_{China}} \quad (2)$$

式中 T_i ($n \times 1$ 矩阵) 为中国对美国进口的 n 种商品的价值量; P_{US} (1×1 矩阵) 与 P_{China} (1×1 矩阵) 分别为美国和中国的单位GDP污染物排放量.

1.2 结构分解分析法

D 、 L 和 T_e 对 $t-1$ 至 t 时期内的 EEE 变化量的影响程度可由式(3)计算:

$$\Delta EEE = EEE_{(t)} - EEE_{(t-1)} = \Delta D \times L_{(t)} \times T_{e(t)} + D_{(t-1)} \times \Delta L \times T_{e(t)} + D_{(t-1)} \times L_{(t-1)} \times \Delta T_e \quad (3)$$

式中 ΔEEE 、 ΔD 、 ΔL 和 ΔT_e 分别为 EEE、 D 、 L 和 T_e 在 $t-1$ 至 t 时期内的变化量.式(3)的形式不唯一,对于 m 个影响因素有 $m!$ 种形式.该研究采用了所有形式的平均值,这种处理方法得到了广泛认可^[12-14].

式(3)中影响 EEE 变化的 D 与 T_e 可进一步分解,见式(4)(5):

$$D = C \times K + J \quad (4)$$

$$T_e = S \times Q \quad (5)$$

式中 C ($1 \times n$ 矩阵) 为污染物的燃烧排放因子; K ($n \times n$ 对角矩阵) 为直接能耗强度; J ($1 \times n$ 矩阵) 为污染物的非燃烧直接排放强度; S ($n \times n$ 对角矩阵) 为中国对美国的出口贸易结构; Q ($n \times 1$ 矩阵) 为中国对美国的出口贸易规模. C 、 K 、 J 、 S 和 Q 对于 ΔEEE 影响程度的计算可参考文献[6].

1.3 数据来源

中国的 Leontief 逆矩阵(L)取自《中国投入产出

表》,该表仅有尾数为0、2、5、7年份的数据.该研究采用Weber等^[15]的方法去除进口的竞争影响,采用双缩法去除价格变动的影响.价格指数取自《中国农产品价格调查年鉴》和《中国城市(镇)生活和价格年鉴》.

中美贸易的商品价值量(T_e 和 T_i)取自《中国对外经济统计年鉴》和《中国贸易外经统计年鉴》.出口贸易结构(S)和出口贸易规模(Q)可通过 T_3 计算得到.

中国的能耗数据取自《中国能源统计年鉴》,采用Peters等^[10]的方法进行处理.结合投入产出表中的总投入量,可计算直接能耗强度(K).

中国的污染物排放数据取自清华大学开发的中國多尺度大气污染物排放清单数据库(www.meicmodel.org),该清单采用了基于技术的、自下而上的编制方法,能够反映各个部门污染物排放因子的逐

年变化情况^[16-17].结合能耗数据和投入产出表中的总投入量数据,可计算污染物的非燃烧直接排放强度(J)和污染物的燃烧排放因子(C).

美国的污染物排放数据取自EDGAR(Emission Database for Global Atmospheric Research),结合中国的污染物排放数据以及来自联合国数据库的中美两国GDP数据,计算中美两国单位GDP污染物排放量(P_{US} 和 P_{China}).

不同数据之间的行业分类存在一定差异,该研究最终统一为36个行业,见表1.该研究选取了中国大气主要污染物(SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$),计算了1997年、2000年、2002年、2005年和2007年(年份的选取与《中国投入产出表》数据有关)中美贸易隐含的污染物排放量.同时,为了与其他研究对比,分析了该研究中方法的不确定性,还计算了中美贸易隐含的 CO_2 排放量.

表1 该研究使用的行业编号解释

Table 1 Sector code explanation of this study

编号	行业	编号	行业	编号	行业
1	农业	13	非金属矿物制品业	25	水的生产和供应业
2	煤炭开采和洗选业	14	金属冶炼及压延加工业	26	建筑业
3	石油和天然气开采业	15	金属制品业	27	交通运输及仓储业
4	金属矿采选业	16	通用、专用设备制造业	28	邮政业
5	非金属矿采选业	17	交通运输设备制造业	29	批发和零售贸易业
6	食品制造及烟草加工业	18	电气、机械及器材制造业	30	住宿和餐饮业
7	纺织业	19	通信设备计算机及其他电子设备制造业	31	金融保险业
8	服装皮革羽绒及其制品业	20	仪器仪表及文化办公用机械制造业	32	房地产业
9	木材加工及家具制造业	21	其他制造业	33	科学研究事业
10	造纸印刷及文教用品制造业	22	废品废料	34	公共管理和社会组织
11	石油加工及炼焦业	23	电力、热力的生产和供应业	35	科教文卫、社会保障与福利
12	化学工业	24	燃气生产和供应业	36	其他部门

2 结果与讨论

2.1 中美贸易隐含的污染物排放

2007年中国对美国的出口贸易额为进口贸易额的3倍,中国单位GDP的 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 排放量分别是美国的9.5和37倍,中国对美国较大的贸易顺差和高污染物排放强度造成了较大的污染排放逆差(见表2).2007年,中国对美国的出口贸易隐含的 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 排放逆差分别为 174.26×10^4 、 131.15×10^4 和 46.88×10^4 t.1997—2007年,电力、热力的生产和供应业(表1中的编号23,下同)的煤炭燃烧对出口贸易隐含的 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 排放量的贡献分别为50%~60%、40%~45%和20%~25%;交通运输及仓储业(27)的汽、柴油燃烧对出口贸易隐含的 NO_x 排放量贡献达30%~40%;非金属

矿物制品业(13)的水泥生产对出口贸易隐含的 $PM_{2.5}$ 排放量的贡献达25%~50%.综上,中国对美国出口贸易隐含的 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 来源差异显著.

2.2 中美贸易隐含污染物排放的影响因素

1997—2007年中国对美国出口贸易增长558%,而隐含的 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 排放量则分别增长了159%、244%和94%,表明污染物排放量并未随贸易规模同步增长甚至在2005—2007年出现下降(见表2).贸易间的污染问题主要由贸易规模、贸易结构以及生产技术三因素决定.与贸易间隐含碳排放的研究^[18-20]类似,由图1可见:贸易规模扩大是导致中国对美国出口贸易隐含污染物排放量增长的主要因素;生产技术中,生产结构的改变促进了2002—2007年出口贸易隐含污染物排放量的增长;直接能耗强度的

表2 中美贸易隐含的大气污染物排放量

Table 2 Air pollution emissions embodied in

		China-US trade					10 ⁴ t
项目	污染物	1997年	2000年	2002年	2005年	2007年	
出口贸易	SO ₂	69.09	94.24	97.90	214.17	178.46	
	NO _x	39.89	57.20	64.32	135.20	137.22	
	PM _{2.5}	24.31	30.81	35.33	55.64	47.15	
进口贸易	SO ₂	3.83	3.63	3.10	4.22	4.20	
	NO _x	3.75	4.31	4.09	5.87	6.07	
	PM _{2.5}	0.19	0.21	0.19	0.26	0.27	

下降则减缓了出口贸易隐含污染物排放量的增幅,这体现了节能措施的效果。此外,污染物的燃烧排放因子和非燃烧直接排放强度的下降也减缓了出口贸易隐含的SO₂和PM_{2.5}的增长。保持其他因素不变,单就1997—2007年污染物燃烧排放因子和非燃烧直接排放强度的下降就可分别使SO₂和PM_{2.5}排放量降低96.41%和226.26%。近年来,中国实施了一系列污染物总量控制措施^[21-25],电力、热力的生产和供应业(23)煤炭燃烧的SO₂排放因子从2005年的744 t/10¹⁵ J降至2007年的505 t/10¹⁵ J,非金属矿物制品

业(13)中水泥行业的排放因子也有所下降(见表3),这表明,除节能措施外,具有行业针对性的污染物减排措施是有效抑制出口贸易隐含污染物快速增长的另一因素。

虽然贸易结构对出口贸易隐含污染物排放量年际变化的影响较小(见图1),但不同商品的污染物排放强度差异显著。2007年机械类制品(表4中第16类,下同)占中国对美国出口贸易份额的46.3%,因其商品附加值相对较高,故其SO₂、NO_x、PM_{2.5}排放强度(分别为72.63、58.38和20.74 t/10⁸元)低于所有商品的污染物排放强度的平均值(分别为99.94、76.85和26.41 t/10⁸元)。服装制品(11)、家具和玩具(20)分别占中国对美国出口贸易份额的9.8%和11.0%,也具有类似情况。虽然精密仪器(18)情况类似,但其占出口贸易份额相对较小,中国应鼓励这类商品的出口。而另一方面,金属制品(15)和非金属制品(13)属于低端制成品,污染物排放强度较大,并且占有一定的出口份额,应减少这类商品的生产 and 出口。

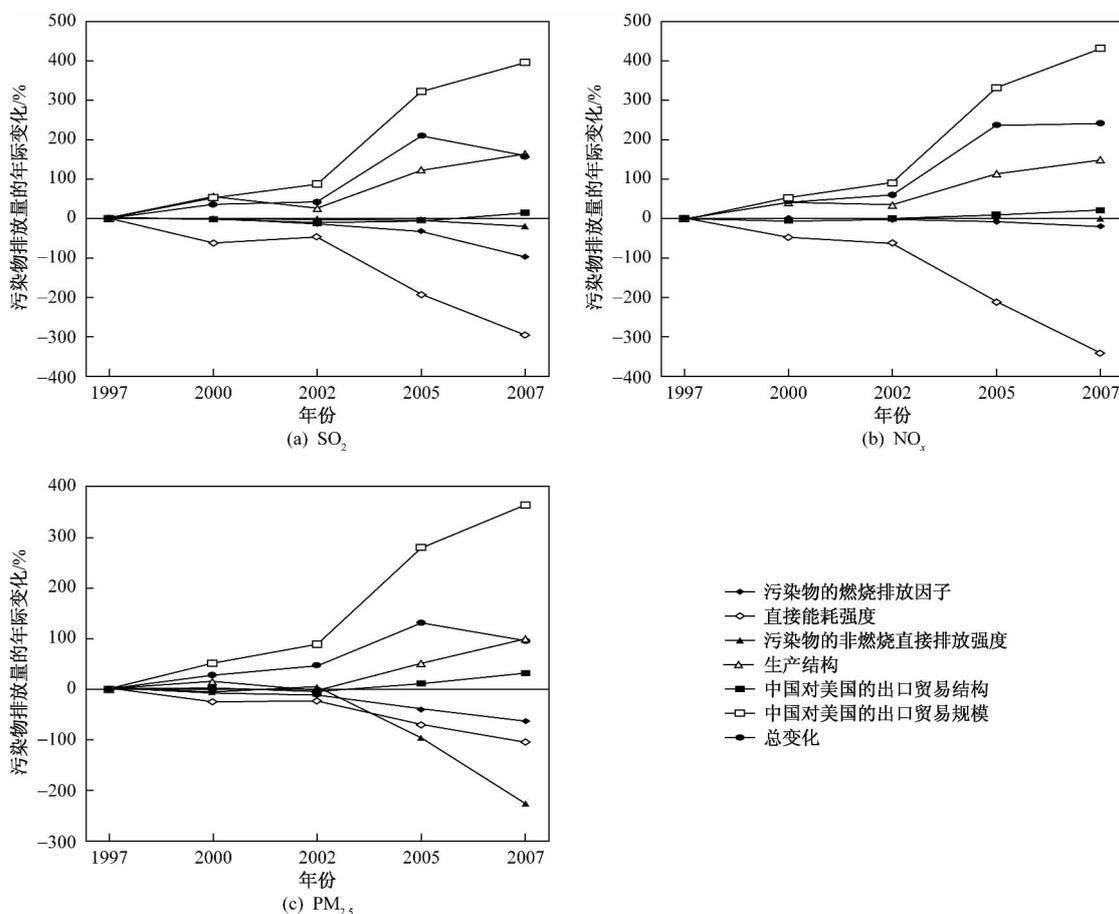


图1 影响中国对美国出口贸易隐含污染物排放量的因素

Fig. 1 Driving forces of emissions embodied in China-US trade

表3 各水泥生产工艺的PM_{2.5}排放因子Table 3 PM_{2.5} emission factor of different cement

时间	production process			t/10 ⁴ t
	预分解窑	立窑	其他窑	
1997年	56	92	65	
2000年	36	74	40	
2002年	23	62	32	
2005年	13	51	26	
2007年	9	37	18	

表4 2007年各类商品占出口贸易份额及隐含的污染物排放强度

Table 4 Emission intensities and trade shares of goods from China to US in 2007

出口商品类别	污染物排放强度/ (t/10 ⁸ 元)			占出口 贸易份 额/%
	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	
第1类 动物产品	63.01	53.19	13.69	0.5
第2类 植物产品	77.25	61.99	15.55	0.3
第3类 动植物油脂及蜡	79.54	63.46	14.66	0.0
第4类 食品、饮品及烟草	84.32	67.81	16.58	1.1
第5类 矿产品	179.80	126.21	57.03	0.7
第6类 化学工业品	209.04	144.52	36.35	2.6
第7类 塑料及橡胶	142.63	100.63	26.08	3.9
第8类 皮革及毛皮制品	73.66	59.11	14.50	1.8
第9类 木材及木制品	102.04	78.75	17.59	1.3
第10类 木浆及纸浆等制品	173.50	87.70	19.10	0.8
第11类 服装制造品	105.42	76.78	17.12	9.8
第12类 鞋帽等制品	100.59	75.74	18.97	4.3
第13类 非金属制品	271.09	210.00	207.75	1.2
第14类 珠宝及贵金属	130.79	100.08	35.95	0.6
第15类 金属制品	164.88	129.22	53.05	7.7
第16类 机械类制造品	72.63	58.38	20.74	46.3
第17类 运输设备制造品	104.45	83.72	27.55	3.8
第18类 精密仪器	73.33	59.29	20.81	2.3
第19类 武器弹药	118.01	94.11	30.29	0.0
第20类 家具和玩具	104.21	80.48	24.04	11.0
第21类 艺术品及收藏品	111.52	84.55	26.29	0.0
第22类 特殊交易品及未分类	84.91	64.87	20.00	0.1
平均值	99.94	76.85	26.41	

2.3 政策意义

出口导向型的发展战略使得中国经济的国际贸易依存度从1997年的34.14%升至2007年的66.82% (根据《中国统计年鉴》表17-1数据计算), 2009年中国贸易出口总额与进口总额分别居世界第1位和第2位。

国际贸易在促进中国经济快速发展的同时,也增加了中国大气污染物排放量,带来了巨大的环境负担。与美国相比,中国单位GDP的大气污染物排放量较高,意味着在贸易顺差的同时,存在着污染物排放逆差。中国在国际贸易上虽然获益,但由于污染物排

放量的增加导致大气污染问题恶化,在贸易上的获益被环境代价所抵消。而美国通过国际贸易实现了制造业等高污染行业的转移,是事实上的受益者。与此同时,在环境问题受到高度重视的今天,中国又因相对较高的大气污染物排放强度受到其他国家的批评,未来国际上将存在以污染转移为由限制中国出口贸易规模的风险。

综上,中国应采取一系列有效措施减少国际贸易的环境负担。第一,应进一步加大具有行业针对性的大气污染物减排控制措施。不同行业隐含的污染物排放强度差别很大,非金属矿物制造业、金属制品业等行业不但排放强度高,而且出口贸易量较大,针对这些高污染行业实施提高准入门槛、加严排放标准等有针对性的措施,以减少污染物的贸易转移。第二,应进一步调整出口贸易结构。一方面,应减少低附加值、高污染物排放的商品(如玻璃制品与陶瓷制品)的生产与出口;另一方面,应加强精密仪器等高附加值、低污染物排放的商品出口。这样在维持国际贸易顺差的同时,可以进一步减少贸易隐含的大气污染物排放逆差。第三,应加强经济手段在贸易隐含污染物排放问题上的作用。可以考虑征收贸易污染税或制订污染产品的贸易配额制度,通过经济杠杆的调节作用,以较小的社会成本降低贸易污染逆差。

2.4 不确定性

该研究的不确定性一方面来自投入产出模型本身的假设^[11]和结构分解分析法对于不同分解方式的处理^[12],另一方面源于数据的选取与处理。由于第三方转运贸易的原因^[9],中美两国统计的双边贸易数据存在一定差异,修正的贸易数据应介于二者之间^[26],采用中国统计数据计算的出口贸易隐含污染物排放量比采用美国统计数据计算的要低40%~70%,为保持分析的一致性,该研究采用了中国统计的双边贸易数据。

该研究在计算进口贸易隐含污染物排放量时采用了近似处理方法,并且计算的中国对美国进口贸易隐含CO₂排放量与其他研究近似(见图2)。该研究使用的中国多尺度大气污染物排放清单数据库的精度得到了其他研究者的认可。LIN等^[30]认为,该数据库估算的中国人为源NO_x排放量与高分辨率卫星反演的结果非常接近,偏差在5%以内。Kondo等^[31]指出,该数据库估算的中国黑碳排放量与模式和观测结果之间吻合很好。由该数据库可知,由于实施了污染物控制措施,中国SO₂排放量在2007年有所下降,这

也导致了出口贸易隐含的 SO_2 排放量在 2007 年的下降. 而由于缺少污染物控制措施的相关信息, 以往的研究^[9] 难以发现该现象.

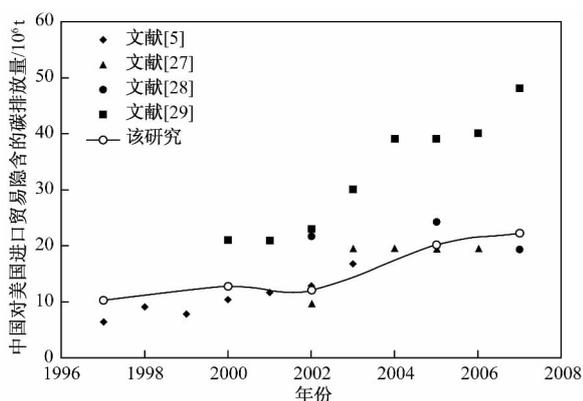


图2 中国对美国进口贸易隐含的 CO_2 排放量^[5 27-29]

Fig. 2 CO_2 embodied in China's import from US^[5 27-29]

3 结论与建议

a) 中国具有比美国较高的单位 GDP 污染物排放量及较大的贸易顺差, 因此, 中国对美国的出口贸易隐含着较大的污染物排放逆差, 2007 年 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放逆差分别为 174.26×10^4 、 131.15×10^4 和 46.88×10^4 t.

b) 中国对美国出口贸易隐含的 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 来源不同, 其中, 电力行业煤炭燃烧对 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献分别达 50%~60%、40%~45% 和 20%~25%; 交通运输行业汽柴油燃烧对 NO_x 的贡献占 30%~40%; 水泥生产对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献则占 25%~50%.

c) 除节能措施外, 采取有行业针对性的污染物减排控制措施可抑制出口贸易隐含污染物排放量的快速增加. 保持其他因素不变, 1997—2007 年由污染物燃烧排放因子和非燃烧直接排放强度的下降就分别使出口贸易隐含的 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量降低了 96.41% 和 226.26%.

d) 中国对美国出口商品的污染物排放主要来自高附加值的机械类制造品, 其排放强度在所有出口商品中较低. 2007 年中国对美国出口贸易的 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度平均值分别为 99.94、76.85 和 26.41 $\text{t}/10^8$ 元, 而占出口份额 46.3% 的机械类制造品的 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度分别为 72.63、58.38 和 20.74 $\text{t}/10^8$ 元.

e) 中国应进一步实施具有行业针对性的污染物减排控制措施, 并调整出口贸易结构, 增加低污染物

排放强度的商品出口, 此外, 还应考虑征收贸易污染税或制订污染商品的贸易配额制度. 通过上述措施, 努力缩小国际贸易带来的大气污染物排放逆差.

致谢: 感谢清华大学中国多尺度大气污染物排放清单数据库的工作人员. 感谢郑博对于该数据库的具体问题的技术支持. 感谢刘竹、Sören Lindner 及评审专家对于该文的宝贵修改意见.

参考文献 (References):

- [1] WYCKOFF A W, ROOP J M. The embodiment of carbon in imports of manufactured products: implications for international agreements on greenhouse gas emissions[J]. *Energy Policy*, 1994, 22(3): 187-194.
- [2] SINDEN G E, PETERS G P, MINX J, et al. International flows of embodied CO_2 with an application to aluminium and the EU ETS[J]. *Climate Policy*, 2011, 11(5): 1226-1245.
- [3] DAVIS S J, CALDEIRA K. Consumption-based accounting of CO_2 emissions[J]. *PNAS*, 2010, 107(12): 5687-5692.
- [4] PETERS G P, GUAN Dabo, HUBACEK K, et al. Effects of China's economic growth[J]. *Science*, 2010, 328(5980): 824-825.
- [5] SHUI B, HARRISS R C. The role of CO_2 embodiment in US-China trade[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(18): 4063-4068.
- [6] MINX J C, BAIOCCHI G, PETERS G P, et al. A "carbonizing dragon": China's fast growing CO_2 emissions revisited[J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(21): 9144-9153.
- [7] GUAN Dabo, HUBACEK K, WEBER C L, et al. The drivers of Chinese CO_2 emissions from 1980 to 2030[J]. *Global Environ Chang*, 2008, 18(4): 626-634.
- [8] PETERS G P, WEBER C L, GUAN D, et al. China's growing CO_2 emissions: a race between increasing consumption and efficiency gains[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(17): 5939-5944.
- [9] XU Ming, ALLENBY B, CHEN Weiqiang. Energy and air emissions embodied in China-U. S. trade: eastbound assessment using adjusted bilateral trade data[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(9): 3378-3384.
- [10] PETERS G P, WEBER C L, LIU J R. Construction of Chinese energy and emissions inventory[R]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2006: 10-11.
- [11] MILLER R E, BLAIR P D. Input-output analysis: foundations and extensions[M]. 2nd ed. UK: Cambridge University Press, 2009: 10-68.
- [12] ROSE A, CASLER S. Input-output structural decomposition analysis: a critical appraisal[J]. *Economic Systems Research*, 1996, 8(1): 33-62.
- [13] DIETZENBACHER E, LOS B. Structural decomposition techniques: sense and sensitivity[J]. *Economic Systems Research*, 1998, 10(4): 307-324.
- [14] 李景华. SDA 模型的加权平均分解法及在中国第三产业经济发展分析中的应用[J]. *系统工程*, 2004, 22(9): 69-73.
- [15] WEBER C L, PETERS G P, GUAN Dabo, et al. The contribution of Chinese exports to climate change[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(9): 3572-3577.

- [16] ZHANG Q ,STREETS D G ,CARMICHAEL G R ,*et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmos Chem Phys* 2009 9: 5131-5153.
- [17] LEI Yu ,ZHANG Qiang ,NIELSEN C *et al.* An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China , 1990-2020 [J]. *Atmos Environ* 2011 45(1) : 147-154.
- [18] 倪红福 ,李善同 ,何建武. 贸易隐含 CO₂ 测算及影响因素的结构分解分析 [J]. *环境科学研究* 2012 25(1) : 103-108.
- [19] 朱聆 ,张真. 上海市碳排放强度的影响因素解析 [J]. *环境科学研究* 2011 24(1) : 20-26.
- [20] 郭彩霞 ,邵超峰 ,鞠美庭. 天津市工业能源消费碳排放量核算及影响因素分解 [J]. *环境科学研究* 2012 25(2) : 232-239.
- [21] 雷宇 ,贺克斌 ,张强 ,等. 基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单 [J]. *环境科学* 2008 29(8) : 2366-2371.
- [22] 张楚莹 ,王书肖 ,赵瑜 ,等. 中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析 [J]. *环境科学* 2009 30(7) : 1881-1887.
- [23] LU Zifeng ,ZHANG Qiang ,STREETS D G. Sulfur dioxide and primary carbonaceous aerosol emissions in China and India [J]. *Atmos Chem Phys* 2011 11: 9839-9864.
- [24] LIU Fei ,KLIMONT Z ,ZHANG Q *et al.* Integrating mitigation of air pollutants and greenhouse gases in Chinese cities: development of GAINS-City model for Beijing [J/OL]. *Journal of Cleaner Production* 2013 [2013-03-22]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613001583>.
- [25] ZHAO Yu ,WANG Shuxiao ,DUAN Lei *et al.* Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: current status and future prediction [J]. *Atmos Environ* 2008 42(36) : 8442-8452.
- [26] FUNG K C ,LAU L J. Adjusted estimates of United States-China bilateral trade balances: 1995-2002 [J]. *Journal of Asian Economics* 2003 14(3) : 489-496.
- [27] GUO Jie ,ZOU Lele ,WEI Yiming. Impact of inter-sectoral trade on national and global CO₂ emissions: an empirical analysis of China and US [J]. *Energy Policy* 2010 38(3) : 1389-1397.
- [28] DU Huibin ,GUO Jianghong ,MAO Guozhu ,*et al.* CO₂ emissions embodied in China-US trade: input-output analysis based on the energy/dollar ratio [J]. *Energy Policy* 2011 39(10) : 5980-5987.
- [29] 尹显萍 ,程茗. 中美商品贸易中的内涵碳分析及其政策含义 [J]. *中国工业经济* 2010(8) : 45-55.
- [30] LIN J T ,MCELROY M B ,BOERSMA K F. Constraint of anthropogenic NO_x emissions in China from different sectors: a new methodology using multiple satellite retrievals [J]. *Atmos Chem Phys* 2010 10: 63-78.
- [31] KONDO Y ,OSHIMA N ,KAJINO M ,*et al.* Emissions of black carbon in East Asia estimated from observations at a remote site in the East China Sea [J]. *J Geophys Res* 2011 116(D16) : doi: 10.1029/2011JD015637.

(责任编辑: 孙彩萍)