

中国行业 $PM_{2.5}$ 排放及转移路径研究

孙 涵, 胡雪原, 马 雅

摘 要: 基于修正的投入产出模型对中国 31 个行业的 $PM_{2.5}$ 排放和进出口转移进行测算, 据此对各行业按污染进行了分类, 构建了 31 个行业间 $PM_{2.5}$ 转移的有向加权复杂网络, 分析了行业间 $PM_{2.5}$ 转移的主要路径, 最后提出了相应的政策建议。结果显示: (1) 中国 6 个主要的行业直接 $PM_{2.5}$ 排放占到了总排放的 93.95%, 受行业间 $PM_{2.5}$ 转移的影响, 各行业完全 $PM_{2.5}$ 排放与直接 $PM_{2.5}$ 排放差异显著; (2) 根据 $PM_{2.5}$ 完全排放强度与直接排放强度将 31 个行业划分为 4 个类型, 不同类型行业的进出口 $PM_{2.5}$ 转移存在明显差异; (3) $PM_{2.5}$ 净转入行业主要集中在流程制造业与采掘业, $PM_{2.5}$ 净转出行业较为分散, 主要为离散制造业与服务行业; (4) 从产业链的角度分析, 行业间 $PM_{2.5}$ 主要由下游产业向上游产业转移。 $PM_{2.5}$ 流动网络中的电力热力生产供应业、化学产品和金属冶炼加工业等关键节点, 是接收 $PM_{2.5}$ 转移的主要行业。

关键词: $PM_{2.5}$ 转移; 投入产出分析; 转移路径

中图分类号: F424.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2019)06-0085-12

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2019.06.008

一、引 言

随着社会经济的发展, 因燃煤、尾气排放等造成的空气污染已经成为全世界经济发展中一个不容忽视的环境问题。特别是雾霾天气在各地频繁出现, 并随着时间的推移显现出日益严重的迹象, 已经对各国的经济发展和居民的日常行为活动以及身体健康带来了严重影响^[1]。据 2018 年 5 月世界卫生组织研究报告数据显示, 从全球空气污染的地域情况来看, 目前主要的空气污染集中在亚洲和非洲, 室外环境空气污染仅在 2016 年就导致大约 420 万人死亡。美国 2018 年发布的全球 180 个国家环境绩效指数 (EPI, Environmental Performance Index) 报告指出, 中国在世界 180 个国家的空气质量中排 177 名。因此, 作为大气污染物排放第一的中国进行减排对全球气候变化具有重要意义。

常见的地区污染排放研究基于生产和消费活动^{[2][3]}, 主要从时空的角度刻画污染物的演化格局、变动趋势以及变动的关键要素分析^{[4][5][6][7]}。然而, 随着区域间贸易的不断加强, 产品的生产地与消费地逐渐剥离, 由贸易活动而导致的污染排放生产地与消费地的剥离现象日益引起学者们的重视^{[8][9]}。越来越多的研究开始关注贸易的污染物排放转移。最早关于空气污染转移的研究主要是

基金项目: 国家社会科学基金项目“城市群雾霾污染对公共健康影响的空间效应和治理策略研究”(17BJY063); 教育部人文社科基金项目“能源消费对空气污染的公共健康效应研究: 基于空间相关性分析”(15YJC790091); 中国地质大学(武汉)青年学者“摇篮计划”基金项目“中国典型城市群空气污染对公共健康影响的空间效应研究”(CUGW17401)

作者简介: 孙涵, 中国地质大学(武汉)经济管理学院副教授(湖北 武汉 430074); 胡雪原, 中国地质大学(武汉)经济管理学院硕士研究生

应用 Merge^[10]、GREEN^[11]、GTAP-E^[12]等模型模拟测算了各区域的污染物排放转移量，结果表明，在现有的可能存在的情景下，区域间污染物排放转移现象均普遍存在，且转移偏高的概率较大^[13]。但是，上述模型存在一定局限性，自 Bicknell 等^[14]将投入产出模型引入到对生态足迹的分析后，越来越多的学者开始借助投入产出法对隐含污染物排放进行分析。

目前，该方法已经在区域间贸易隐含污染物排放、隐含碳排放^{[15][16]}等研究中广泛使用，研究内容主要包括污染物转移方法发展与定量核算^[17]、减排责任的划分机制^[18]、贸易污染物排放转移^[19]、隐含排放对空气质量^[20]和人体健康的影响^[21]等。从研究尺度来看，早期研究关注国家之间由贸易导致的隐含排放^[22]，然而以国家为尺度的研究并不能反映区域间的差异，后来有学者开始从省级或者区域尺度对贸易隐含排放进行研究^{[23][24][25]}。上述研究侧重于对国家间、区域间贸易所带来的污染排放转移总量及其特征的分析，对污染物在具体行业间的转移特征分析较少。随着经济的发展，产业结构逐渐成为空气污染物排放的重要影响因素之一^[26]，产业结构的调整也成为了行业减排的重要手段。然而，各产业部门间因中间产品的交换，相当数量的行业部门污染物排放并非用于满足本部门的最终需求，而是跟随产业链和中间产品转移到其他部门^[27]。若忽略了行业间污染物排放转移的潜在影响，必然导致各行业减排责任难以清晰界定。虽然目前对于 PM_{2.5}、SO₂等污染物的研究也引起了学者的关注^{[28][29][30]}，但相关研究仍很少，并且缺乏对 PM_{2.5}等污染物排放行业间转移引致因素的深入挖掘。

由于以贸易为媒介，产品供应链中引致的污染物排放在国家、区域或产业间形成错综复杂的转移流量关系^[31]。虽然已有研究将生产部门的空气污染物排放与最终用户联系起来，但我们对中国供应链中污染物转移网络中的关键节点和流动路径仍然缺乏了解。随着中国经济的快速增长和工业化的出现，不同行业对空气污染物排放贡献也可能发生了巨大变化。因此，对 PM_{2.5}排放如何在行业之间转移，以及未来污染物排放变动趋势的研究非常重要——这对于有效减少大气污染物排放具有重要的政策意义。

由于化石能源的燃烧是中国 PM_{2.5}污染的主要来源^[32]，本研究以各行业基于能源消费的 PM_{2.5}排放量为研究对象，对进口项进行部分扣除处理后，应用投入产出模型测算行业的完全 PM_{2.5}排放；根据各行业的直接 PM_{2.5}排放与完全 PM_{2.5}排放强度的特征，对各行业污染类型进行分类，并用复杂网络分析行业间 PM_{2.5}排放的关键转移路径。研究结果将有助于进一步了解中国各行业与空气污染之间的关系，为差异化的行业减排政策的制订提供依据。

二、研究方法 with 数据来源

（一）直接 PM_{2.5}排放的测算

根据生态环境部发布的《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南（试行）》中提供的固定燃烧源 PM_{2.5}排放量的计算方法，并结合 Li^[33]和 Jin^[34]等的研究来估算中国行业能源消费过程中排放的 PM_{2.5}。计算公式如下：

$$DPE = \sum_t (Energy_t \times EF_t \times (1 - \eta)) \quad (1)$$

式（1）中，DPE 表示直接 PM_{2.5}排放量；Energy_t 表示该行业第 t 种能源的终端消费量；EF_t 表示第 t 种能源的 PM_{2.5}产生系数；η 为污染控制技术对 PM_{2.5}的去除效率。具体测算中应注意以下问题：（1）对于直接 PM_{2.5}排放量的计算，仅考虑除电力、热力外的其他终端能源消费，电力、热力的消耗所造成的 PM_{2.5}排放，都计入电力热力生产供应业；（2）本文对石油加工及炼焦业的 PM_{2.5}排放量计算时，应扣除煤炭和石油的消费量，因为在该行业的生产过程中，绝大部分的煤炭

和原油都作为生产原料投入, 并未作燃料, 若直接计算将严重高估其 PM_{2.5} 的排放强度^[35]。

(二) 行业完全 PM_{2.5} 排放测算

不同行业间 PM_{2.5} 排放随着中间产品的使用相互转移, 表面上 PM_{2.5} 排放较低的行业, 可能由于中间产品大多来源于高 PM_{2.5} 排放的行业, 而是实际上的高 PM_{2.5} 排放行业; 反之, 一些表面上 PM_{2.5} 排放较高的行业, 其 PM_{2.5} 排放可能大部分是服务于其他行业的生产。因此, 从最终需求的角度出发, 通过对各行业最终产品的完全 PM_{2.5} 排放进行测算, 可以更好地反映行业间的联系。

行业间的生产与消耗关系, 可通过投入产出法来反映, 其形式为:

$$X = (I - A)^{-1} \times Y \quad (2)$$

式 (2) 中, X 为投入产出表中的总产出; I 为单位矩阵; A 为直接消耗系数矩阵; Y 为最终产品。

中国的投入产出表中, 最终产品一栏包含了进口项, 而进口产品也可作为中间产品进行生产, 进口产品的 PM_{2.5} 排放产生在国外, 因此对行业的完全 PM_{2.5} 排放的计算需要扣除进口产品的影响。根据中国投入产出学会^[36]提出的修正方法, 假设进口产品的使用比例与国内产品相同, 扣除进口产品的影响, 对完全 PM_{2.5} 排放强度进行修正:

$$TPI^* = DPI \times [I - uA]^{-1} = [TPI_1^*, TPI_2^*, \dots, TPI_n^*], u_{jj} = 1 - \frac{IM_j}{X_j + IM_j} \quad (3)$$

$$DPI = [DPI_1, DPI_2, \dots, DPI_n], DPI_j = \frac{DPE_j}{X_j} \quad (4)$$

公式 (3) 和 (4) 中, TPI^* 是修正后的行业完全 PM_{2.5} 排放强度, 即单位最终产品的 PM_{2.5} 直接排放和隐含排放总量; $[I - uA]^{-1}$ 为进口修正后的 Leontief 逆矩阵; u 是 u_{jj} 组成的对角矩阵, u_{jj} 为行业 j 各种产品的国内生产比重; IM_j 为行业 j 的进口额; DPI_j 为行业 j 的直接 PM_{2.5} 排放强度, 即单位产出的直接 PM_{2.5} 排放。

通过修正后的完全 PM_{2.5} 排放强度矩阵, 计算各行业的完全 PM_{2.5} 排放量和行业的 PM_{2.5} 净转移量:

$$TPE_j^* = TPI_j^* \times Y_j \quad (5)$$

$$NPE_j = DPE_j - TPE_j^* \quad (6)$$

在公式 (5) 和 (6) 中, TPE_j^* 为经过修正后行业 j 的完全 PM_{2.5} 排放量; Y_j 为行业 j 的最终产品; NPE_j 为行业 j 的 PM_{2.5} 转移量, 即行业 j 由于部门间产品交换导致的该行业 PM_{2.5} 排放增加 (“+”为增加, 反之为减少) 的量。

(三) 行业进出口的 PM_{2.5} 转移测算

PM_{2.5} 排放不仅在国内行业间随着中间产品进行转移, 也随进出口在国家之间转移。在国外生产的进口商品, 进入本国经济系统中将减少本国因生产产生的 PM_{2.5} 排放量。可通过矩阵计算各行业因出口而承担的其他国家的 PM_{2.5} 排放量。计算因进口产品用于国内生产、生活消费, 而减少国内的 PM_{2.5} 排放量时, 参考中国投入产出学会及朱启荣的估算方法, 对 Leontief 逆矩阵进行再次调整^[37]。

$$TPI' = DPI \times [I - vA]^{-1} = [TPI'_1, TPI'_2, \dots, TPI'_n], v_{jj} = 1 - \frac{EX_j}{X_j + IM_j} \quad (7)$$

$$EPE_j^* = TPI_j^* \times EX_j, IPE'_j = TPI'_j \times IM_j \quad (8)$$

$$VPE_j = EPE_j^* - IPE'_j \quad (9)$$

式 (7) - 式 (9) 中, TPI'_j 为行业 j 出口修正后的完全 PM_{2.5} 排放强度; EPE_j^* 是行业 j 因出口而转入的 PM_{2.5} 排放; IPE'_j 是行业 j 因进口避免的 PM_{2.5} 排放; v_{jj} 为行业 j 在消费与生产中使

用进口产品的比例; EX_j 为行业 j 的出口额; VPE_j 是行业 j 在进出口贸易中的 $PM_{2.5}$ 净转移量。

(四) 行业 $PM_{2.5}$ 转移路径分析

某一行业在向其他行业提供中间产品的过程中, 会伴随 $PM_{2.5}$ 排放的流入。各行业 $PM_{2.5}$ 的流入流出可用复杂网络来描绘。复杂网络是一种利用节点、边等连接关系呈现对象形态的图论技术。31 个行业构成 $PM_{2.5}$ 转移网络中的节点, 各节点的连接关系由行业 $PM_{2.5}$ 转移矩阵表示。通过各行业间中间产品相互使用过程, 来计算行业 $PM_{2.5}$ 转移矩阵 TPT 。

$$TPT = \hat{DPI} \times [I - uA]^{-1} \times \hat{Y} = \begin{bmatrix} TPT_{11} & TPT_{12} & \cdots & TPT_{1n} \\ TPT_{21} & TPT_{22} & \cdots & TPT_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ TPT_{n1} & TPT_{n2} & \cdots & TPT_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, \hat{DPI} 为 DPI_j 的对角矩阵; \hat{Y} 为最终产品 Y_j 的对角矩阵; TPT_{ij} 为行业 j 使用行业 i 的中间产品来生产自身最终产品而导致的行业 i 的 $PM_{2.5}$ 排放, 即行业 j 向行业 i 转移的 $PM_{2.5}$ 排放。

(五) 数据来源与处理

本文数据来源于 2012 年《中国投入产出表》和 2013 年《中国能源统计年鉴》中的分行业能源平衡表。由于行业划分的区别, 本文将投入产出表与能源平衡表都归并为 31 个行业。归并方法具体为: 将能源平衡表中 41 个工业行业对应归并成投入产出表中的 26 个工业行业; 将投入产出表中 14 个服务行业行列合并, 归并成能源平衡表中对应的 3 个行业。

三、实证结果与分析

本文对 2012 年 31 个行业的 $PM_{2.5}$ 排放情况进行测算, 2012 年中国 31 个行业的直接 $PM_{2.5}$ 排放总量是 236.94 万吨, 在对投入产出表中的数据修正扣除进口贸易的影响后, 得到的完全 $PM_{2.5}$ 排放总量为 249.19 万吨, 与直接 $PM_{2.5}$ 排放量的误差率为 5.17%。在不存在进出口贸易的情况下, 直接 $PM_{2.5}$ 排放总量理论上应与完全 $PM_{2.5}$ 排放总量相等。根据本文测算结果, 在对直接消耗系数矩阵进行修正时, 进口修正系数略低于实际值, 导致了完全 $PM_{2.5}$ 排放量略高于直接 $PM_{2.5}$ 排放量, 误差率为 5.17%, 处于较低水平, 修正方法较为准确。

(一) 中国行业 $PM_{2.5}$ 排放现状评估

根据测算结果 (如表 1 所示), 31 个行业的直接 $PM_{2.5}$ 排放总量为 238.57 万吨, 平均直接 $PM_{2.5}$ 排放强度为 1.48 吨/亿元。其中电力热力生产和供应业直接 $PM_{2.5}$ 排放强度最高, 其直接排放强度为 31.81 吨/亿元; 其次为非金属矿物制品业、煤炭采选业以及金属冶炼加工业。其他行业与电力热力生产供应业相比, 直接 $PM_{2.5}$ 排放强度均较小。根据直接 $PM_{2.5}$ 排放量的行业占比发现, 电力生产供应业占 65.38%, 其次是非金属矿物制品业占 7.78%, 第三是金属冶炼和压延加工品 6.65%, 3 个行业 $PM_{2.5}$ 排放总排放占全行业排放的 79.81%。

从完全 $PM_{2.5}$ 排放量来看, 2012 年中国 31 个行业的完全 $PM_{2.5}$ 排放总量为 249.19 万吨, 其中建筑业的 $PM_{2.5}$ 排放比重最高, 达到 28.52%, 其次是生活消费和其他服务业 (13.59%)、交通运输设备业 (6.24%)、电力热力生产和供应业 (5.87%) 和计算机通信电子设备制造业 (4.67%), 这 5 个行业的 $PM_{2.5}$ 排放量总计占比 58.89%。在完全排放强度方面, 电力、热力生产供应业的完全 $PM_{2.5}$ 排放强度最高, 为 49.94 吨/亿元, 其次是非金属矿物制品业 (11.26 吨/亿元) 和水的生产和供应业 (9.60 吨/亿元)。不同行业间的直接 $PM_{2.5}$ 排放和完全 $PM_{2.5}$ 排放存在显著差异, 一些行业有较高的直接排放量, 而完全排放量较低, 主要是因为在生产过程中, 该类行业为其他行业提

供了较多的中间产品, 导致了 PM_{2.5} 排放的流入, 如煤炭采选业。

表 1 2012 年各行业 PM_{2.5} 排放情况测算表

编号	行业	DPE(万吨)	DPI(吨 / 亿元)	TPI*(吨 / 亿元)	TPE*(万吨)	NPE(万吨)	VPE(万吨)
1	农、林、牧、渔业	1.76	0.20	1.90	5.45	-3.69	-0.88
2	煤炭开采和洗选业	5.57	2.47	6.69	0.37	5.20	-1.18
3	石油和天然气开采业	0.34	0.27	4.10	0.21	0.12	-6.06
4	金属矿采选产品	0.28	0.22	7.20	0.09	0.19	-6.56
5	非金属矿和其他矿采选产品	0.36	0.57	6.07	0.03	0.33	-0.17
6	食品和烟草	2.21	0.25	2.38	10.05	-7.84	-0.17
7	纺织业	0.91	0.25	4.03	2.52	-1.61	1.72
8	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	0.22	0.07	3.18	6.71	-6.50	3.10
9	木材加工品和家具	0.32	0.17	4.09	2.61	-2.29	1.28
10	造纸印刷和文教体育用品	1.47	0.50	4.67	3.87	-2.40	1.93
11	石油加工炼焦和核燃料加工	1.24	0.31	3.18	1.25	-0.01	-0.98
12	化学产品	11.48	0.95	6.75	10.85	0.63	-2.08
13	非金属矿物制品业	18.42	3.95	11.26	3.50	14.92	2.21
14	金属冶炼和压延加工业	15.76	1.43	7.73	3.59	12.17	-4.56
15	金属制品业	0.29	0.09	6.77	5.22	-4.93	2.31
16	通用设备制造业	0.34	0.08	4.54	9.52	-9.19	0.75
17	专用设备制造业	0.29	0.09	4.44	10.58	-10.28	-0.21
18	交通运输设备	0.52	0.08	3.89	15.55	-15.02	-0.21
19	电气机械和器材制造业	0.14	0.03	5.00	11.46	-11.32	3.23
20	计算机通信电子设备制造	0.10	0.01	2.89	11.63	-11.53	1.94
21	仪器仪表制造业	0.02	0.04	3.36	1.06	-1.04	-0.41
22	其他制造业	0.10	0.40	4.61	0.41	-0.31	0.21
23	废弃资源综合利用业	0.02	0.04	1.38	0.01	0.01	-0.33
24	金属制品、机械和设备修理业	0.01	0.14	5.86	0.00	0.01	0.00
25	电力热力生产和供应业	154.91	31.81	49.94	14.63	140.27	0.28
26	燃气生产和供应业	0.07	0.23	3.31	0.48	-0.40	0.00
27	水的生产和供应业	0.02	0.14	9.60	0.71	-0.69	0.00
28	建筑业	1.34	0.10	5.48	71.07	-69.73	0.29
29	交通运输仓储和邮政业	5.49	0.89	3.23	5.28	0.21	0.69
30	批发零售住宿餐饮业	1.96	0.21	1.57	6.60	-4.64	1.75
31	生活消费和其他服务业	10.97	0.38	2.09	33.88	-22.91	0.08

(二) 行业 PM_{2.5} 污染类型

根据各行业的直接 PM_{2.5} 排放强度和完全 PM_{2.5} 排放强度大小, 可将各行业分为四个类型 (如表 2 所示)。将直接 PM_{2.5} 排放强度与完全 PM_{2.5} 排放强度都处于较低水平的行业归为低污染行业; 直接和间接排放强度都处于较高水平的行业称为全过程高污染行业; 直接 PM_{2.5} 排放强度很高, 而完全排放强度却很低的行业划入表观高污染行业一类; 相反的, 直接 PM_{2.5} 排放强度较低, 而完全 PM_{2.5} 排放强度却很高的行业则划入传导型高污染行业类型。其中, 7 个低污染行业为主要是农业

和轻工业；全过程高污染行业主要为采矿业和制造业中的高耗能行业，这类行业不仅在生产过程中有着较高的排放强度，还通过中间产品向其他行业转移大量 $PM_{2.5}$ 排放；传导型高污染行业主要集中于部分制造业，如金属制品业、设备制造业等，该类行业生产过程中直接排放了较少的 $PM_{2.5}$ ，但通过中间产品转入了大量的 $PM_{2.5}$ 排放；而表观高污染型行业有纺织业（7）、食品和烟草业（6）、交通运输仓储和邮政业（29）、生活消费和其他服务业（31）等。在绿色经济转型过程中，对不同类型的污染行业应采取不同的控制手段。

表 2 $PM_{2.5}$ 排放特征的行业分类

行业	DPI	TPI*	行业类型	行业	DPI	TPI*	行业类型
1	低	低	低污染	17	低	高	传导型高污染
2	高	高	全过程高污染	18	低	低	传导型高污染
3	高	低	表观高污染	19	低	高	传导型高污染
4	高	高	全过程高污染	20	低	低	低污染
5	高	高	全过程高污染	21	低	低	低污染
6	高	低	表观高污染	22	高	高	全过程高污染
7	高	低	表观高污染	23	低	低	低污染
8	低	低	低污染	24	低	高	传导型高污染
9	低	低	低污染	25	高	高	全过程高污染
10	高	高	全过程高污染	26	高	低	表观高污染
11	高	低	表观高污染	27	低	高	传导型高污染
12	高	高	全过程高污染	28	低	高	传导型高污染
13	高	高	全过程高污染	29	高	低	表观高污染
14	高	高	全过程高污染	30	低	低	低污染
15	低	高	传导型高污染	31	高	低	表观高污染
16	低	高	传导型高污染				

（三）行业的进出口 $PM_{2.5}$ 转移

根据进出口 $PM_{2.5}$ 转移的测算结果（如图 1 所示），中国行业进出口贸易的净 $PM_{2.5}$ 转移总量为 -2.02 万吨，占直接 $PM_{2.5}$ 总排放量的 0.85%，即通过对外贸易活动减少了 2.02 万吨的 $PM_{2.5}$ 排

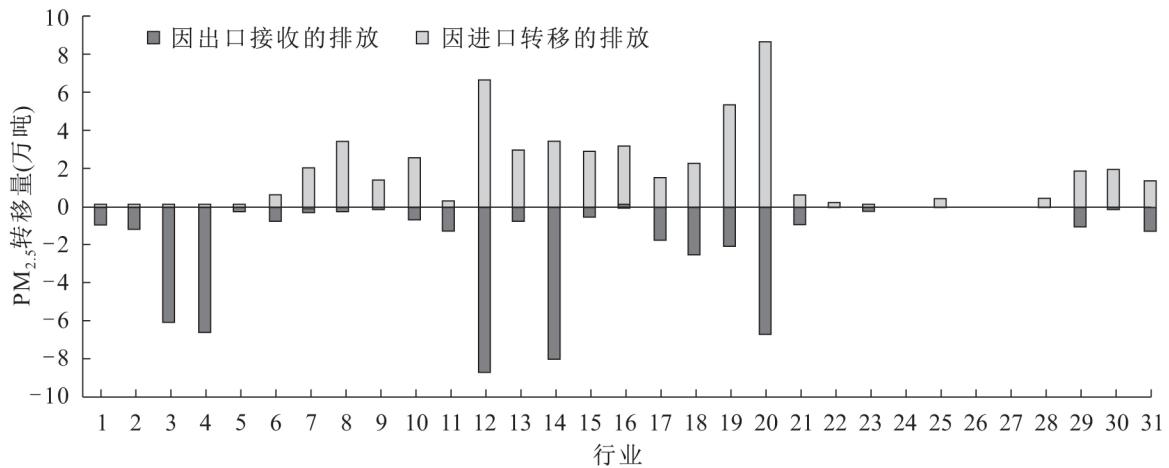


图 1 2012 年中国各行业进出口贸易的 $PM_{2.5}$ 排放转移

注：“-”表示因进口减少国内排放。

放。但是由于进口国排放强度数据的局限性, 在计算进口产品隐含的 $PM_{2.5}$ 排放时, 本文使用了国内的 $PM_{2.5}$ 排放强度来代替进口国的排放强度, 而实际上国内的排放强度要高于进口国, 会导致由于进口向外转移的 $PM_{2.5}$ 排放测算的高估^[38], 但同时 Guo 等^[38] 也提出对于最终的减排目标来说, 通过各行业进出口差异的角度来探讨减排策略的制定更有实际意义。图 1 显示了中国各行业进出口贸易的 $PM_{2.5}$ 转移, 农林牧渔业 (1)、矿产品采选业 (煤、石油、天然气、金属、非金属)、石油加工炼焦和核燃料加工 (11)、化学产品业 (12) 和金属冶炼压延制品业 (14) 等行业 $PM_{2.5}$ 排放逆差较大, 其中比较多的行业属于全过程高污染类型, 这些行业通过进口向其他国家转移了比较多的 $PM_{2.5}$ 排放; 而轻工业、金属和非金属制品业、部分制造业和服务业等大多数传导型高污染或低污染的行业则具有较大的 $PM_{2.5}$ 排放顺差, 这些行业则通过出口大量产品, 导致了较多的 $PM_{2.5}$ 流入。

(四) 行业间的 $PM_{2.5}$ 转移路径

随着行业间中间产品的交换, 各行业在向外转移 $PM_{2.5}$ 排放的同时也接收来自各行业的 $PM_{2.5}$ 排放。本文从需求出发, 对 31 个行业的 $PM_{2.5}$ 排放转移矩阵进行了测算, 得到 930 个 $PM_{2.5}$ 流动路径 (不考虑自身转移)。通过将去除对角元素后行业的 $PM_{2.5}$ 转移矩阵导入 Gephi0.9.2 软件, 绘制成 31 个行业间 $PM_{2.5}$ 转移的有向加权复杂网络, 来分析 $PM_{2.5}$ 排放的主要转移路径。复杂网络中的节点为中国 31 个行业, 有向的边表示各行业间的 $PM_{2.5}$ 转移关系, 边的权重为行业间的 $PM_{2.5}$ 转移量。得到的行业间 $PM_{2.5}$ 排放转移路径如图 2 所示, 除金属制品、机械和设备修理业 (24) 无 $PM_{2.5}$ 转出外, 所有行业都存在着 $PM_{2.5}$ 排放的转入和转出, 且电力、热力生产供应业 (25) 接收了较多来自于建筑业 (28)、生活消费和服务业 (31) 和行业 18—20 的 $PM_{2.5}$ 排放。

930 个 $PM_{2.5}$ 转移量的平均值为 2 291.4 吨, 将转移量低于平均值的行业间 $PM_{2.5}$ 流动视为不稳定转移, 对不稳定转移进行过滤, 重新得到 31 个行业间稳定的隐含 $PM_{2.5}$ 流动路径以及和行业的 $PM_{2.5}$ 排放流入流出路径数, 如图 3 和图 4 所示。图 3 中显示在行业稳定的 $PM_{2.5}$ 转移网络中, 24 个行业都向电力、热力生产供应业 (25) 转移了 $PM_{2.5}$ 排放, 其中建筑业 (28) 与生活消费和服务业 (31) 分别向其转移了 42.88 万吨和 19.46 万吨 $PM_{2.5}$ 排放。这两条转移路径所包含的 $PM_{2.5}$ 排放占全部 $PM_{2.5}$ 转移的 29.3%, 是 $PM_{2.5}$ 转移网络中的两条重要转移路径。石油和天然气开采业 (3)、金属矿采选产品 (4)、非金属矿和其他矿采选产品 (5)、废弃资源综合利用业 (23)、机械和

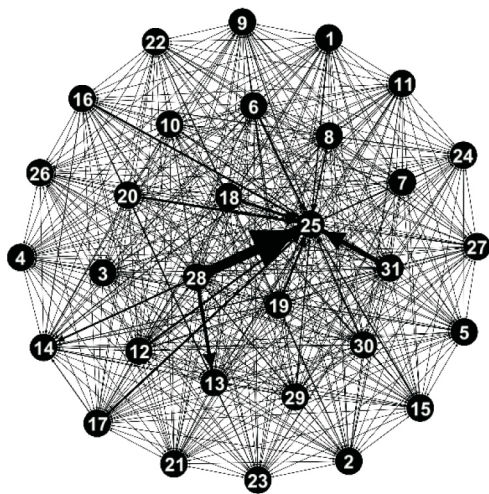


图 2 31 个行业间 $PM_{2.5}$ 排放转移路径

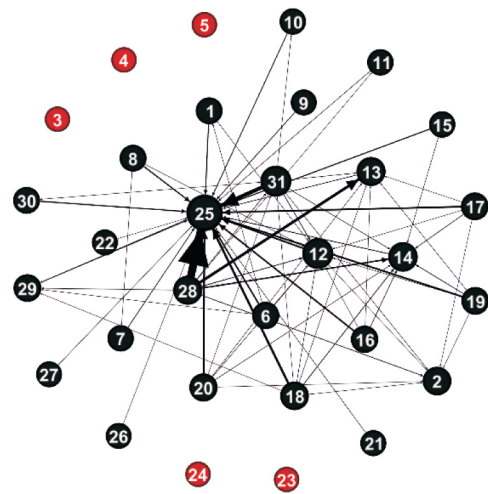


图 3 31 个行业间污染物排放转移的稳定路径

设备修理业（24）与其他行业间的无稳定 $PM_{2.5}$ 转移路径，是 $PM_{2.5}$ 转移网络中的孤点行业。图 3 中节点中心度越高，其节点越大，表示 $PM_{2.5}$ 的流动路径越多，其中化学产品（12）、非金属矿物制品业（13）、金属冶炼和压延加工品（14）、电力、热力生产供应业（25）、建筑业（28）、生活消费和其他服务业（31）是 $PM_{2.5}$ 转移网络中的关键行业。这 6 个节点行业的总转移量为 304.4 万吨占整个 $PM_{2.5}$ 转移网络的 71.4%，由此可见，这 6 个关键行业显著影响其他行业的 $PM_{2.5}$ 排放水平。

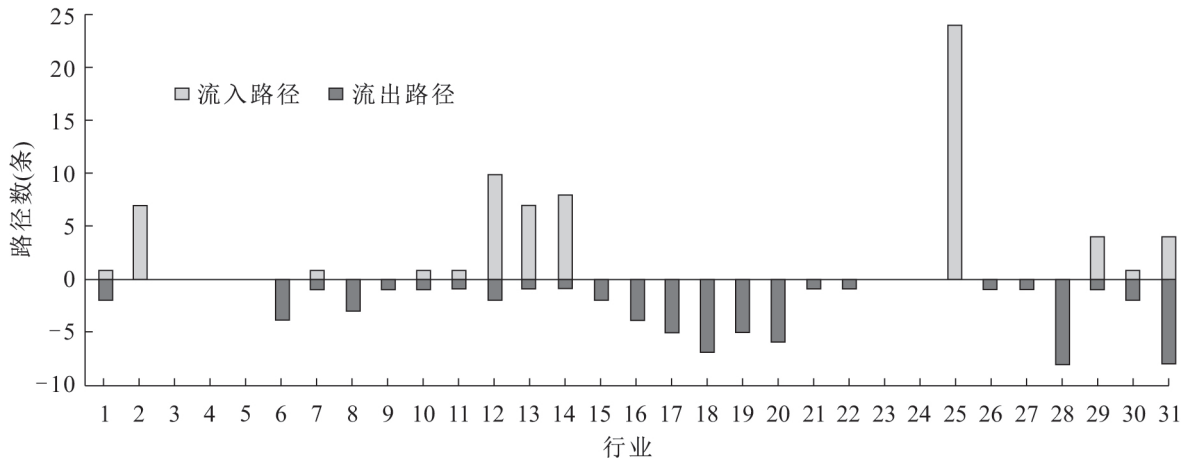


图 4 2012 年 31 个行业间的稳定 $PM_{2.5}$ 转移路径数

注：“-”仅表示 $PM_{2.5}$ 流出。

根据 $PM_{2.5}$ 的流入流出路径可知， $PM_{2.5}$ 流入分布比较集中，5 个关键节点行业的流入路径总数为 56 条，占总流入路径数的 81.2%；相反， $PM_{2.5}$ 的流出行业比较分散，图 4 中大多数行业都存在流出路径数，其中建筑业（28）、生活和服务业（31）、食品和烟草（06）和行业 16—20 都是 $PM_{2.5}$ 主要的流出行业；行业 12—14 和 31 的流入路径与流出路径数均较多，说明这些行业不仅接收其他行业的 $PM_{2.5}$ 排放，也向其他行业转移 $PM_{2.5}$ 排放。在行业 $PM_{2.5}$ 转移网络中，大部分转移路径都经过这三个行业，这类行业称为“中转行业”。 $PM_{2.5}$ 转移网络中的中转行业大多属于流程制造业，这类行业将被加工对象不间断地通过生产设备，通过一系列的加工装置使原材料进行化学或物理变化，最终得到产品，而这个过程往往会造成较多的污染物排放。相反，行业 16—22 仅有稳定的 $PM_{2.5}$ 流出路径，而这些行业都属于离散制造业，其生产过程中基本上没有发生物质改变，只是物料的形状和组合发生改变，即最终产品是由各种物料装配而成，因此该类行业的直接排放较低，向提供各种物料的流程制造业转移了大量的 $PM_{2.5}$ 排放。 $PM_{2.5}$ 转移网络中主要流动路径可总结为：离散制造业→流程制造业→电力热力生产供应业、离散制造业→流程制造业→交通运输与邮政仓储、生活服务业→电力热力生产供应业、生活服务业→制造业→电力热力生产供应业、建筑业→制造业→电力热力生产供应业、流程制造业→采掘业→电力热力生产供应业等。

由表 1 可知，中国大部分行业的直接与完全 $PM_{2.5}$ 排放量存在显著差异，各行业既通过中间产品的消耗向其他行业转移 $PM_{2.5}$ 排放，同时也为其他行业提供中间产品而接收来自其他行业的 $PM_{2.5}$ 转移。图 5 显示了各行业 $PM_{2.5}$ 排放的净转移量，正值表示行业通过中间产品的交换增加的 $PM_{2.5}$ 排放，将这类行业称为 $PM_{2.5}$ 净转入行业。负值表示行业通过中间产品交换减少的 $PM_{2.5}$ 排放，这类行业则为 $PM_{2.5}$ 净转出行业。 $PM_{2.5}$ 净转入的行业数量为 11 个，比 $PM_{2.5}$ 净转出的数量 20 个要少得多，且 $PM_{2.5}$ 净转入较为集中。 $PM_{2.5}$ 净转出行业相对较为分散，大多数行业都向外转移了较多的 $PM_{2.5}$ 排放。 $PM_{2.5}$ 排放净转入量较大的行业为电力、热力生产和供应业（25）、非金属矿

物制品业 (13)、金属冶炼和压延加工品 (14), 这三个行业由于给其他行业提供了较多的中间产品, 且最终产品较少, 导致接收了大量来自其他行业的 PM_{2.5} 排放。其中, 电力、热力生产和供应业 (25) 净转入 PM_{2.5} 排放最大, 为 140.27 万吨, 远高于其他 PM_{2.5} 净转入行业, 主要是因为电力、热力生产和供应业 (25) 为其他所有行业提供了大量的电力与热力, 而自身最终使用较少。相反, 建筑业 (28)、生活消费和其他服务业 (31) 以及交通运输设备业 (18) 大量利用其他行业的中间产品来服务本行业的生产消费, 使得这三个行业成为了最大的 PM_{2.5} 净转出行业, 其中建筑业 (28) 向外转移了最多的 PM_{2.5} 排放, 为 69.73 万吨。虽然生活消费与其他服务业 (31) 向外转移的排放量较多, 但其由投入产出表中多个服务业归并而来, 导致了该行业 PM_{2.5} 转移量较大。而随着住房需求的增长和房地产市场的火爆, 建筑业 (28) 生产了大量的最终产品, 其作为一个独立的行业存在相当大的 PM_{2.5} 净转出, 在减排政策的制定中应该受到更多的关注。

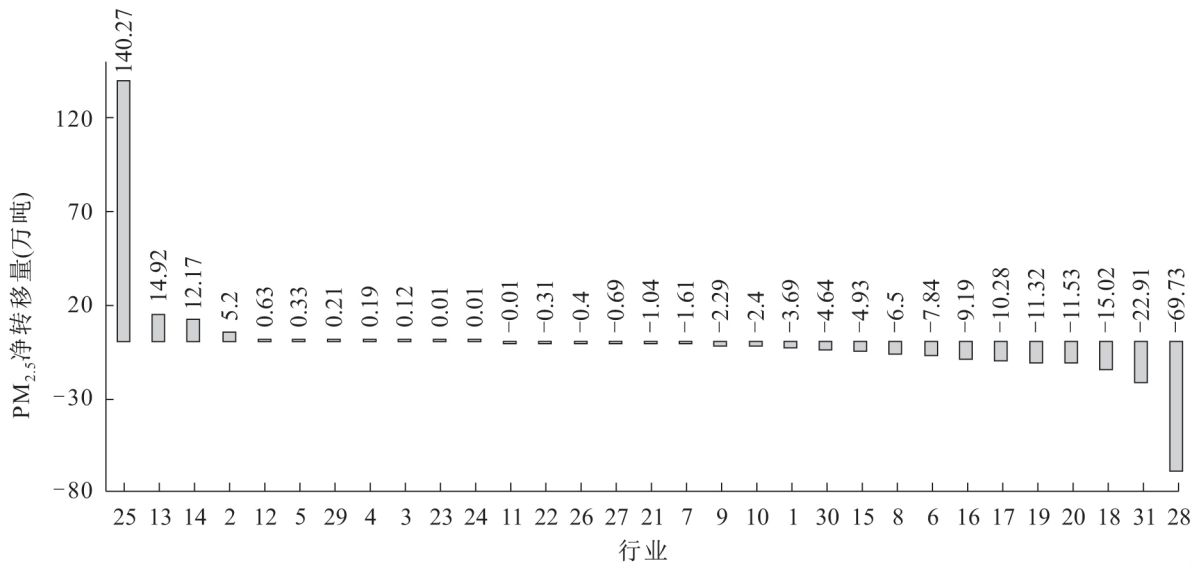


图 5 2012 年中国各行业 PM_{2.5} 排放净转移量

四、结论与建议

本文通过对中国 31 个行业的直接 PM_{2.5} 排放与完全 PM_{2.5} 排放的测算, 探究了各行业 PM_{2.5} 排放的差异, 并对其进行了污染行业的分类; 结合复杂网络, 分析了行业间 PM_{2.5} 排放转移网络中的关键节点与转移路径。主要结论及启示如下:

1. 中国各行业的 PM_{2.5} 排放量以及排放强度的测算结果表明, PM_{2.5} 完全排放强度与直接排放量较高的行业具有一定的一致性, 但高完全排放量与高直接排放量对应的行业却具有明显的差异。主要表现为: 完全 PM_{2.5} 排放量较高的行业, 直接 PM_{2.5} 排放量不一定高, 该类行业通过中间产品的消耗产生了大量的隐含 PM_{2.5} 排放; 而高直接排放量与高完全排放强度所对应的行业往往都集中在少数几个关键行业, 如电力热力生产供应业、金属冶炼加工业、非金属制品业等。几个关键行业的直接 PM_{2.5} 排放量之和占全行业总排放量的 90% 以上, 这些行业将是未来的重点减排对象。考虑到在经济飞速发展的过程中, 必然会带来大量的 PM_{2.5} 排放, 而如何以最少的排放实现最大的经济增长就成为了政府与企业共同的目标, 因此选择完全 PM_{2.5} 排放强度作为减排的控制目标, 既明确了隐含 PM_{2.5} 排放的责任归属问题也能很好的保证减排效果。

2. 为了更好地对各行业在 PM_{2.5} 转移中的污染程度采取针对性的减排策略, 本文根据完全排放

强度与直接排放强度对 31 个行业进行了污染分类,对于不同类型的污染行业应采取不同的污染控制手段。具体的分类控制上,对纺织业、食品和烟草业、交通运输仓储和邮政业等 7 个表观高污染行业,其污染更多地来源于直接能源消费产生的排放量,减排控制的重点应放在升级能源消费结构,降低煤炭等高污染能源的使用比例;对金属制品业、设备制造业、建筑业、水生产和供应业等 8 个传导型高污染行业,应重点控制其中间产品的用量,提高生产技术与资源利用率,实现中间产品的效益最大化;而对能源生产供应行业和工业初级产品生产加工业等 9 个全过程高污染行业,则需要多种减排方案协同作用。

3. 在行业间 $PM_{2.5}$ 转移中, $PM_{2.5}$ 净转入的行业数量比 $PM_{2.5}$ 净转出行业的数量少得多,且 $PM_{2.5}$ 净转入行业主要集中在流程制造业和采掘业。相反, $PM_{2.5}$ 净转出行业相对较为分散,大多数行业都向外转移了较多的 $PM_{2.5}$ 排放,且净转出行业主要为离散制造业、建筑业和生活消费与其他服务业。未来可考虑由主要的净转出行业对净转入行业采取适当的激励措施以提高全行业污染减排的积极性。另外,在各行业进出口 $PM_{2.5}$ 转移中,全过程高污染行业具有较大的 $PM_{2.5}$ 排放逆差;而大多数传导型高污染或低污染的行业则具有较大的 $PM_{2.5}$ 排放顺差。根据各行业进出口污染转移情况,适当调整进出口贸易结构,也可以有效减少国内 $PM_{2.5}$ 排放。

4. 受行业间 $PM_{2.5}$ 排放转移影响,不同行业间需共同承担减排责任,不能仅以直接排放量或直接排放强度来划分各行业的减排责任。 $PM_{2.5}$ 排放的转移路径分析显示,电力热力生产供应业与其他行业间、采掘业和制造业的部分行业间(如煤炭、油气开采业与石油加工业之间)以及流程制造业和离散制造业的部分行业间(如金属加工业与设备制造业之间)都存在着紧密的 $PM_{2.5}$ 流动,建筑业与生活消费服务业也向其他行业转移的大量的 $PM_{2.5}$ 排放。根据各行业间的污染转移的关键路径、能源流动与技术联系,可以更加有效地设计协同减排方案。

参考文献

- [1] 王慧文,潘秀丹,林刚. 沈阳市空气二氧化硫污染对心血管疾病死亡率的影响[J]. 环境与健康杂志, 2002(1).
- [2] Zhang, Q., D. G. Streets, G. R. Carmichael, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009(14).
- [3] Zhang, Q., D. G. Streets, K. He, et al. Major components of China's anthropogenic primary particulate emissions[J]. *Environmental Research Letters*, 2007(4).
- [4] Chu, A. M. Y., R. W. M. Li, M. K. P. So. Bayesian spatial-temporal modeling of air pollution data with dynamic variance and leptokurtosis[J]. *Spatial Statistics*, 2018, 26.
- [5] Tai, A. P., L. J. Mickley, D. J. Jacob. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change[J]. *Atmospheric Environment*, 2010(32).
- [6] Tong, Z., Y. Chen, A. Malkawi, et al. Energy saving potential of natural ventilation in China: The impact of ambient air pollution[J]. *Applied Energy*, 2016, 179.
- [7] 邵帅,李欣,曹建华,等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016(9).
- [8] Wiedmann, T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting[J]. *Ecological Economics*, 2009(2).
- [9] Peters, G. P. From production-based to consumption-based national emission inventories[J]. *Ecological Economics*, 2008(1).
- [10] Manne, A. S., R. G. Richels. The Kyoto Protocol: A cost-effective strategy for meeting environmental objec-

- tives? [J]. *The Energy Journal*, 1999(2).
- [11] 孙立成, 程发新, 李群. 区域碳排放空间转移特征及其经济溢出效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014(8).
- [12] Kuik, O., R. Gerlagh. Trade liberalization and carbon leakage[J]. *The Energy Journal*, 2003(3).
- [13] 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(10).
- [14] Bicknell, K. B., R. J. Ball, R. Cullen, et al. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy[J]. *Ecological Economics*, 1998(2).
- [15] Feng, K. S., S. J. Davis, L. Sun, et al. Outsourcing CO₂ within China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013(28).
- [16] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010(5).
- [17] Andrew, R. M., S. J. Davis, G. P. Peters. Climate policy and dependence on traded carbon[J]. *Environmental Research Letters*, 2013(3).
- [18] Kander, A., M. Jiborn, D. D. Moran, et al. National greenhouse-gas accounting for effective climate policy on international trade[J]. *Nature Climate Change*, 2015(5).
- [19] 庞军, 石媛昌, 李梓瑄, 等. 基于 MRIO 模型的京津冀地区贸易隐含污染转移[J]. *中国环境科学*, 2017(8).
- [20] Jiang, X. J., Q. Zhang, H. Y. Zhao, et al. Revealing the hidden health costs embodied in Chinese exports[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015(7).
- [21] 谢杨, 戴瀚程, 花冈達也, 等. PM_{2.5} 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016(11).
- [22] Ahmad, N., A. Wyckoff. Carbon dioxide emissions embodied in international trade of goods[J]. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, 2003(15).
- [23] 吴乐英, 钟章奇, 刘昌新, 等. 中国省区间贸易隐含 PM_{2.5} 的测算及其空间转移特征[J]. *地理学报*, 2017(2).
- [24] 黄蕊, 王铮, 钟章奇, 等. 区域贸易隐含碳排放和 SO₂ 排放的投入产出分析——以江苏为例[J]. *自然资源学报*, 2017(5).
- [25] 张宁, 阳景. 中国工业进出口贸易隐含废水排放动态变化分析[J]. *统计与信息论坛*, 2017(2).
- [26] 齐园, 张永安. 区域产业结构演变对 PM_{2.5} 排放的影响机理研究[J]. *软科学*, 2016(11).
- [27] 杨顺顺. 中国工业部门碳排放转移评价及预测研究[J]. *中国工业经济*, 2015(6).
- [28] Yang, X., W. Zhang, J. Fan, et al. The temporal variation of SO₂ emissions embodied in Chinese supply chains, 2002—2012[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241.
- [29] 冯彤, 赵红艳, 张强. 基于环境投入产出的多视角全球二氧化硫排放[J]. *环境科学学报*, 2017(4).
- [30] 黄永明, 陈小飞. 中国贸易隐含污染转移研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018(10).
- [31] 刘华军, 杜广杰. 中国雾霾污染的空间关联研究[J]. *统计研究*, 2018(4).
- [32] 余江, 张凤青. 煤炭消费对中国 PM_{2.5} 污染影响的实证分析[J]. *生态经济*, 2016(7).
- [33] Li, L., Y. Lei, S. M. Wu, et al. Evaluation of future energy consumption on PM_{2.5} emissions and public health economic loss in Beijing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187.
- [34] Jin, Q., X. Y. Fang, B. Wen, et al. Spatio-temporal variations of PM_{2.5} emission in China from 2005 to 2014 [J]. *Chemosphere*, 2017, 183.
- [35] 陈琳. 中国能源消费碳排放变化的影响因素分析——基于投入产出模型[J]. *中外能源*, 2013(1).
- [36] 中国投入产出学会课题组, 许宪春, 齐舒畅, 等. 国民经济各部门水资源消耗及用水系数的投入产出分析——2002 年投入产出表系列分析报告之五[J]. *统计研究*, 2007(3).
- [37] 朱启荣. 中国外贸中虚拟水与外贸结构调整研究[J]. *中国工业经济*, 2014(2).
- [38] Guo, J., Z. Zhang, L. Meng. China's provincial CO₂ emissions embodied in international and interprovincial trade[J]. *Energy Policy*, 2012, 42.

Study on PM_{2.5} Emission and Transfer Path of Chinese Industry

SUN Han, HU Xue-yuan, MA Ya

Abstract: Based on the modified input-output model, PM_{2.5} emission and import and export transfer of 31 industries in China were evaluated, and pollution of each industry was classified. PM_{2.5} transfer paths among 31 industries were analyzed through a complex network, and corresponding policy suggestions were put forward. The results show that: (1) the direct PM_{2.5} emission of 6 major industries in China accounts for 93.95% of the total emission. Affected by the inter-industry PM_{2.5} transfer, the total PM_{2.5} emission of all industries is significantly different from that of direct PM_{2.5} emission. (2) according to the total emission intensity and direct emission intensity of PM_{2.5}, the 31 industries are divided into 4 types, and different management strategies should be adopted for different types of industries; (3) the net inflowing industries of PM_{2.5} are mainly process manufacturing and mining industries, while the net outflowing industries of PM_{2.5} are scattered among discrete manufacturing and service industries. (4) from the perspective of industrial chain, PM_{2.5} between industries is mainly transferred from the downstream industry to the upstream one. Power and heat production and supply industry, chemical products, metal smelting and processing industry and other key nodes in PM_{2.5} mobile network are the main industries receiving PM_{2.5} transfer.

Key words: embodied PM_{2.5}; input-output analysis; transfer path

(责任编辑 孙 洁)