

中国省区间贸易隐含PM_{2.5}的测算及其空间转移特征

吴乐英¹, 钟章奇², 刘昌新³, 王 铮^{1,3}

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;

2. 浙江财经大学经济学院, 杭州 310018; 3. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080)

摘要: 针对不同区域实行“共同而又有区别”的污染治理政策是实现区域联防联控治理大气污染的有效措施, 而随着省际贸易加强, 难免导致污染物在不同区域间的转移。本文采用区域间投入产出模型, 对中国30省区间省际贸易隐含PM_{2.5}进行核算。结果表明, 省际贸易隐含PM_{2.5}约占总PM_{2.5}排放的1/3, 经济危机使得省际贸易隐含PM_{2.5}量变小, 但贸易隐含PM_{2.5}在以生产计算的PM_{2.5}排放中的作用在增大。东部省区的省际调出贸易隐含PM_{2.5}主要由最终消费部分导致, 而中、西、东北省区则主要为中间投入部分导致, 在控制贸易隐含排放时, 需对不同调出类型省区采用不同的控制方法。省际调入贸易隐含PM_{2.5}主要由中间投入过程贸易隐含PM_{2.5}构成, 越来越多的产品在不同省区间共同生产完成, 区域联合治污显得尤为必要。东北、西部、中部省区由固定资本形成导致的省际贸易隐含PM_{2.5}比例要高于东部省区, 可见政策导向也是造成贸易隐含排放的原因之一。需重点控制省际贸易隐含PM_{2.5}排放量较高建筑业、机械制造业和其他服务业。除河北、山东外, 东部省区均为省际贸易隐含PM_{2.5}净调入省份, 中、西部、东北省区中则多为省际贸易隐含PM_{2.5}净调出省份。经济危机使得省际间净贸易隐含PM_{2.5}的转移量变小, 但并未改变其转移趋势。净调入省区需相应的补偿净调出省区, 或对其进行技术转移。

关键词: PM_{2.5}; 区域间投入产出分析; 贸易隐含排放; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201702009

1 引言

自2013年来, 中国许多城市的空气质量呈现出恶化趋势, 雾霾现象频发, 且有不断加剧的趋势。以北京为例, 其在2013年经历的雾霾情况远比1952年的伦敦雾霾事件、美国20世纪40-50年代洛杉矶光化学烟雾事件复杂和严重。在2015年第四季度, 全国有18个城市经历了20天及以上的重污染天气, 大气污染防治的迫切性已引起各级政府重视, 如国务院出台的《大气污染防治行动计划》提出到2017年实现全国地级及以上城市可吸入颗粒物浓度比2012年下降10%以上的目标。由于大气污染的特殊性, 导致区域间的污染相互影响, 区域联合治污是美国、欧盟采取治理大气污染较为有效的方法。尽管目前中国曾在发达地区实现区域联防联控治理大气污染(如为确保奥运会空气质量的6省联防联控), 但缺乏在全国范围内进行推广, 即各行政主体对区域大气污染负有“共同而又有区别的责任”^[1]。

收稿日期: 2016-04-27; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0602702) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFA0602702]

作者简介: 吴乐英(1988-), 女, 河南长葛人, 博士生, 研究方向为地理计算与政策模拟。E-mail: wuleying614@126.com

通讯作者: 王铮(1954-), 男, 云南陆良人, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110003918H), 主要从事地理计算与政策模拟研究。E-mail: wangzheng@casipm.ac.cn

由于不同省区间经济发展水平的差异，对大气污染的治理不能采取一刀切的政策，而需要区分各个省区治理责任，从而因地制宜的实现治理目标。常见的计算地区污染责任的方法为基于生产活动^[2-3]。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^[4-5]。越来越多的研究开始关注基于消费的排放和贸易隐含排放。最早的研究关注中国出口贸易隐含排放^[6-9]，中国与美国^[10-11]、中国与日本^[12-13]间的贸易隐含排放，研究结果表明中国作为贸易隐含排放净出口国家为贸易伙伴承担了相应的排放责任。然而以国家为尺度的研究并不能反映区域间差异^[14-17]，随后的研究开始从省级尺度对中国出口贸易隐含排放进行研究^[18]，发现中国出口贸易隐含排放集中在东部省区，西部省区的出口贸易隐含排放比例相对较低^[19]。但由于省区间的经济联系，东部省区的出口贸易隐含排放会导致其他省区的排放发生变化^[16, 20]。因此，相关政策的制定需考虑到不同省区间贸易经济的影响^[21]，具体分析中国省区间贸易隐含排放成为一个新的关注点。已有研究表明，2007年中国约60.02%生产性碳排放为省际贸易隐含排放^[22]，23.00%生产性PM_{2.5}排放为省际贸易隐含排放^[23]；且在中国省区间，存在从能源富集区域向经济发达区域的贸易隐含碳排放转移^[19, 24-25]，从京津地区向北部沿海的贸易隐含大气污染转移^[23, 26-27]。

然而以上关于贸易隐含排放的研究有两个问题未得到解决。一方面，贸易不仅通过最终消费部分导致隐含排放，同时也通过参与其他地区中间生产过程而导致隐含排放。而以往研究却未能解决贸易隐含排放的主要来源问题；另一方面，以上研究均为单一年份的贸易排放或转移情况，未考虑到年际变化。而经济危机后，中国GDP增长率从14.2%（2007年）下降到10.63%（2010年），省区间发展水平差异较大，2010年中国省区GDP最高省份广东的GDP（46.01千亿元）约为青海GDP（1.35千亿元）的34倍。在此情况下，省区间贸易隐含排放会否发生变化？贸易排放转移会否发生变化？

PM_{2.5}是导致目前中国日益恶化雾霾天气的主要构成物^[28]，容易在区域间扩散，治理雾霾不仅需要区域之间在技术上协同，更需要在经济上协同。经济上协同治理需明确排放责任。多区域投入产出模型不仅能反映产业部门间的联系，同时可以反映区域间交错的经济联系。本文采用2007年、2010年中国30省区区域间投入产出数据^[29-30]计算省区间贸易隐含PM_{2.5}排放，分析其分布情况，试图为中国大气环境治理政策提供相应的建议。

2 研究方法和数据

2.1 研究方法

2.1.1 区域间投入产出模型 随着气候变化和环境问题日益受到重视，投入产出分析由于能捕捉到由上游生产导致的间接环境影响，日益成为一种重要的环境政策分析工具^[4, 5, 31-35]。依据中国区域间投入产出表，存在以下平衡关系：

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

式中： X 为30省区总产出列矩阵 $X = [x^1 \cdots x^n \cdots x^N]^T$ ； $(I - A)^{-1}$ 为里昂惕夫逆矩阵；最终消

$$\text{费矩阵 } Y = \begin{bmatrix} y^{1,1} & \cdots & y^{1,n} & \cdots & y^{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y^{n,1} & \cdots & y^{n,n} & \cdots & y^{n,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y^{N,1} & \cdots & y^{N,n} & \cdots & y^{N,N} \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} A^{1,1} & \cdots & A^{1,n} & \cdots & A^{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{n,1} & \cdots & A^{n,n} & \cdots & A^{n,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N,1} & \cdots & A^{N,n} & \cdots & A^{N,N} \end{bmatrix} \text{ 为中间投入系数矩}$$

阵； I 为单位矩阵； $N = 30$ 。

若各部门直接排放系数矩阵为 W , 则区域的完全排放系数矩阵为

$$V = \hat{W}(I - A)^{-1} \quad (2)$$

2.1.2 省区间贸易隐含污染排放 任一省区 r 的产品可作为最终消费产品或中间投入品两种途径进入其他省区, 因此其省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPT) 由最终消费品导致 EEPT 和中间投入产品导致 EEPT 组成^[36-38]。

省区 r 调出到省区 s 最终消费中的 EEPT 为:

$$EEPT_{r-sfd} = V_r Y_{r-s} \quad (3)$$

式中: V_r 为省区 r 在当前技术水平下, 每生产一单位最终产品而导致的 $PM_{2.5}$ 排放; Y_{r-s} 为省区 s 对省区 r 最终消费量。

省区 r 与省区 s 之间由于中间投入导致的 EEPT 为:

$$EEPT_{r-sip} = V_{rs} Y_s \quad (4)$$

式中: V_{rs} 为省区 s ($s \neq r$) 每生产一单位最终消费产品, 需从省区 r 调入的中间投入品中包含的 $PM_{2.5}$ 排放量; Y_s 为省区 s ($s \neq r$) 产量。

由于贸易的双边性, 对于两个省区而言, 一省区的调出即为另一省区的调入。因此, 省区 r 的省际调出贸易隐含 $PM_{2.5}$ 排放 (EEPE) 和省际调入隐含 $PM_{2.5}$ 排放 (EEPI) 表达式为:

$$EEPE_r = \sum_{s \neq r} (EEPT_{r-sfd} + EEPT_{r-sip}) \quad (5)$$

$$EEPI_r = \sum_{s \neq r} (EEPT_{s-rfd} + EEPT_{s-rip}) \quad (6)$$

省区 r 的省际净贸易隐含 $PM_{2.5}$ E_{r-p}^{BEET} 为

$$E_{r-p}^{BEET} = EEPE_r - EEPI_r \quad (7)$$

2.2 研究数据

研究数据基础为 2007 年及 2010 年区域间投入产出表^[29-30]。以 2007 年价格为基准, 校准 2010 年数据以消除通货膨胀因素。由于缺乏西藏、香港、台湾、澳门的数据, 研究对象为除此之外的 30 省区。各省区 $PM_{2.5}$ 排放数据来自清华大学编制的中国多尺度排放清单模型 (MEIC)^[3], 依据中国经济普查年鉴中分产业能源使用情况, 可得分产业的能源消费比例, 计算得到分省区分产业的 $PM_{2.5}$ 排放量。分省区分产业的总产出数据则来自于区域间 IO 表。需要注意的是区域间 IO 表中产业分类和能源使用中产业分类不一致。目前有两种方法可以将两种分类一一对应, 一种为将能源平衡表依据投入产出表进行拆分, 另一种为将 IO 表依据能源平衡表进行合并。前一种方法优点在于保证 IO 表的完备性, 后一种方法则能避免加入额外的能源消费导致潜在误差^[8]。本文结合中国 17 部门 IO 表中产业分类和现有数据, 将产业分为 15 部门, 对区域间 IO 表做相应的合并。 $PM_{2.5}$ 直接排放系数为排放量与部门总产出之比。

3 结果分析与讨论

3.1 贸易隐含 $PM_{2.5}$ 变化情况

2007 年和 2010 年中国总的省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPT) 排放量分别为 4529.15 Gg 和 4017.58 Gg, 与中国 GDP 增速表现出同样的特征, 表明经济危机对 EEPT 排放量有略微的负面影响。而其在基于生产 $PM_{2.5}$ 排放量中的比例从 2007 年的 34.95% 上升到 2010 年的

36.45%^①，表明随着中国省区间贸易活动加剧，产品生产地和消费地日益剥离，EEPT在以生产计算的PM_{2.5}排放中所发挥的作用越来越大。因此，进一步研究EEPT排放对于中国的大气污染治理政策有重要意义。

图1 为中国30省区2007年和2010年EEPT排放情况，坐标轴上方为省际调入贸易隐

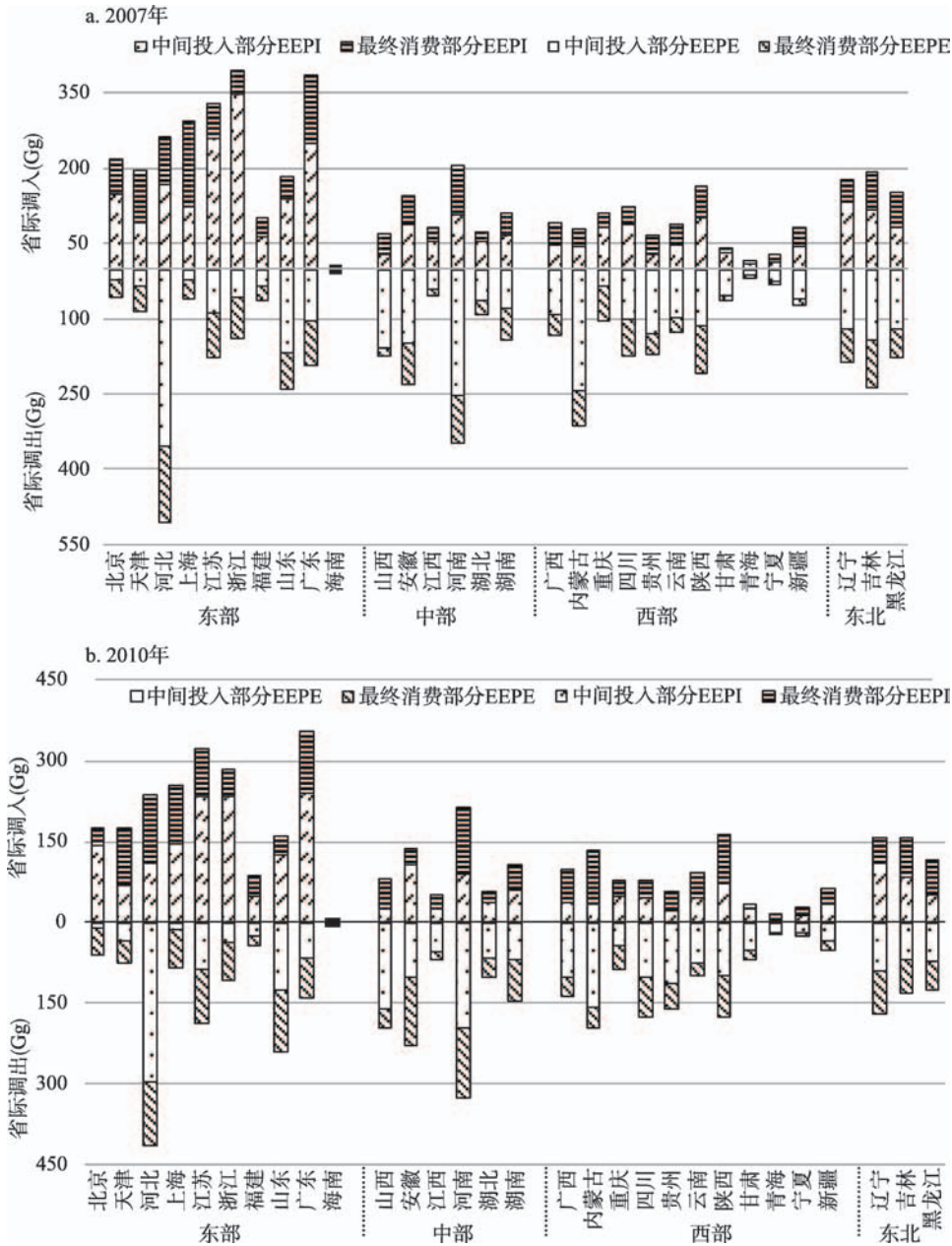


图1 2007年和2010年中国30省区贸易隐含PM_{2.5}排放量

Fig. 1 PM_{2.5} emissions embodied in provincial trade of 30 provinces in China in 2007 and 2010

① 本文计算中国基于生产PM_{2.5}排放量2007年为12.96 Tg，与Zhao等^[23]计算结果接近（13.25 Tg）。省际贸易隐含PM_{2.5}排放量（4.53 Tg）高于Zhao等^[23]（3.06 Tg），因为本文不仅考虑了包含在最终消费中的贸易隐含PM_{2.5}，也包含为满足最终消费生产在中间投入部分的间接贸易隐含PM_{2.5}，即本文的省际贸易隐含PM_{2.5}的定义与Zhao等^[23]略有不同。

含 $PM_{2.5}$, 下方为省际调出贸易隐含 $PM_{2.5}$ 。由于东部地区交通便利且最早实行改革开放, 经济发展高于中西部省区。而贸易量与经济发展水平有着密切联系, 已有研究表明贸易隐含碳排放与贸易量和经济发展水平保持一致的变化规律^[18]。对于EEPT, 经济发展良好的东部省区EEPT量最大, 中部、东北次之, 西部最小。

省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPT) 由包含在最终消费中的EEPT和包含在中间投入中的EEPT组成。对于省际调出贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPE), 2007年, 东部省区最终消费部分包含EEPT的比例较高, 其中上海(0.68)、北京(0.65)、浙江(0.60)、天津(0.59)、江苏(0.51)的最终消费部分包含EEPE均为其总EEPE的一半以上, 这表明其他省区对东部省区最终产品依赖导致其EEPE增加。其中河北为例外, 其包含在中间投入部分的EEPE比例较高(0.70), 表明其他省区中间生产过程对其产品的需求导致EEPE增加。中部、西部、东北省区的EEPE主要隐含在中间投入部分(除重庆外), 比例最高为0.90(山西省), 而这些省区多为中国重要的能源产地(山西)和老工业基地(东北省区), 其高比例中间投入EEPE表明中国在2007年的经济发展仍依赖高耗能产业。2010年, 东部省区北京(0.86)、上海(0.84)、浙江(0.66)、江苏(0.54)最终消费部分EEPE比例较2007年有所增加, 表明东部省区对其他省区最终产品的调出继续加大, 而对其他省区中间投入部分EEPE的比例则越来越少。中部、西部、东北省区的EEPE仍主要隐含在中间投入部分, 而山西、吉林、黑龙江、河南、新疆等资源较丰富的省区, 其中间投入部分EEPE有所下降, 这表明当前中国正在进行的产业结构调整是有效果的, 对高耗能产品的生产依赖有所下降。

对于省际调入贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPI), 2007年, 除天津(0.48)、山西(0.44)、宁夏(0.46)外, 其他省区EEPI主要由中间投入部分导致, 表明越来越多的产品并非在一个地方单独完成生产, 而是在不同省区生产链中进行, 省区间生产联系紧密。2010年, 有较多省区中间投入部分EEPI比例下降, 如天津(0.41)、河北(0.47)、山西(0.31)、内蒙古(0.27), 可能的原因为受经济危机影响, 省际间生产活动下降, 贸易也有所下降。

由投入产出表可知, 最终消费包括居民政府消费和固定资本形成, 因此本文将省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPT) 按最终消费种类进行区分(图2)。30省区的EEPT均由固定资本形成所主导, 即城市的道路建设和住宅建造, 各省区固定资本导致的EEPT占其总EEPT一半以上。这是由于中国正在快速进行的城镇化带来的大规模城市经济增长和设施需求, 以及政府政策导致的需求增加^[34]。对东部、中部、西部、东北省区固定资本导致的EEPT比例取均值(各省区权重一样), 2007年4个区域平均由固定资本导致的EEPT比重逐渐增加, 分别为东部(0.57)、中部(0.58)、西部(0.59)、东北(0.60); 2010年4个区域该比例值均有增加, 东北省区有较大的增加(0.09), 中西部省区的增加次之(0.06), 东部省区增加较小(0.05); 其中东北地区固定资本形成导致的EEPT比例上升至0.69。表明随着西部大开发、中部崛起、振兴东北老工业基地政策的实施, 国家对这些区域投资增加, 从而导致其EEPT增加。2007年, 固定资本形成导致EEPT比例较高的省份为浙江(0.68)、江苏(0.66)、河南(0.66); 2010年为河南(0.73)、湖南(0.72)、辽宁(0.72)。值得注意的是2010年, 北京由固定资本形成导致的EEPT比例为0.47, 为所有省区中唯一以消费导致EEPT为主的省区。作为首都, 其城市建设相对已较完善, 而基于消费的需求则较大。因此对于控制北京EEPT更重要的需要从消费角度入手。

分行业贸易隐含 $PM_{2.5}$ 排放量(EEPT)为30省区各个行业EEPT之和。大多数产业的EEPT从2007年到2010年有所下降, 与上文EEPT变化情况一致。第二产业EEPT量最多, 其次为第三产业, 最少的为第一产业。这反映出对于控制EEPT, 不仅需要控制第二

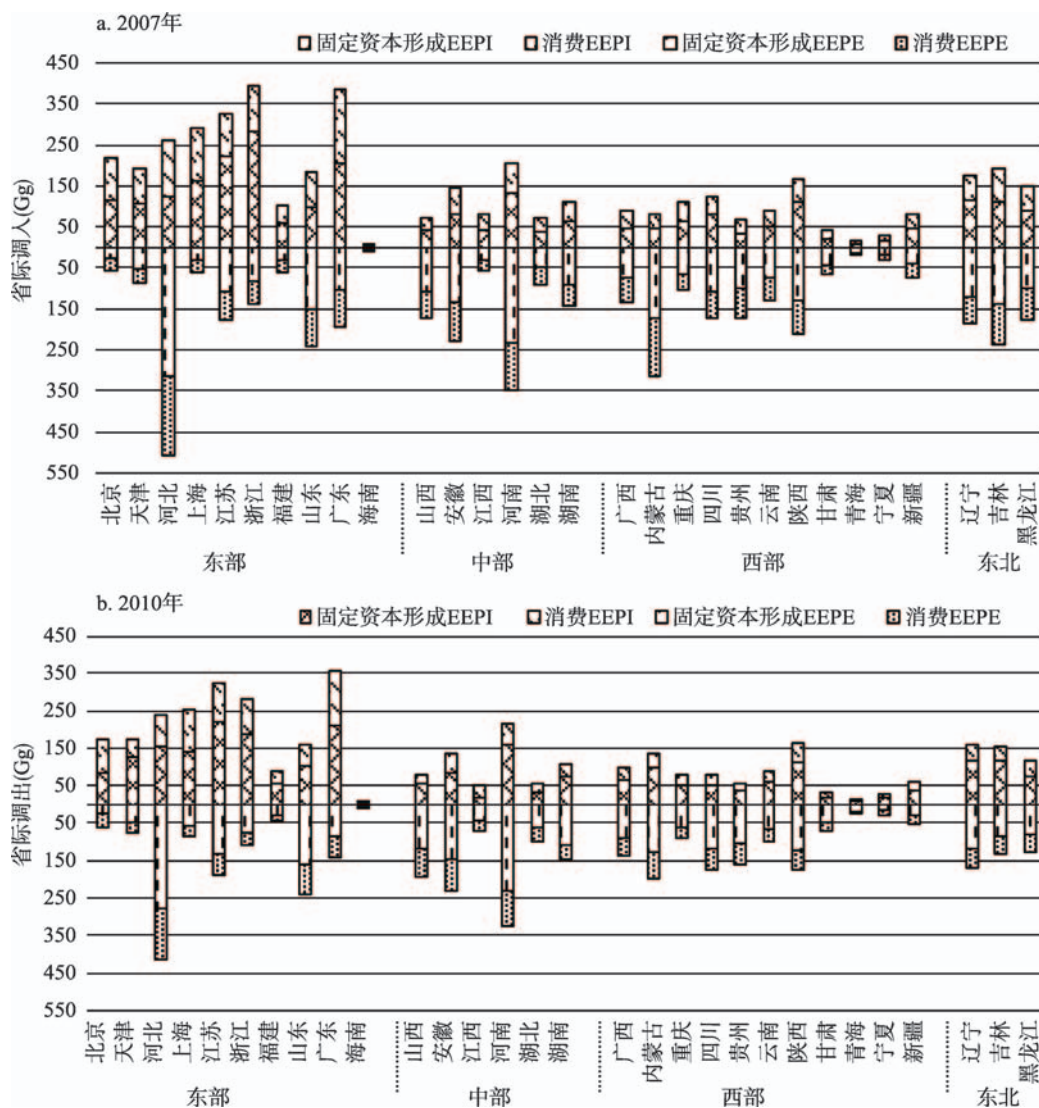
图2 2007年和2010年中国30省区的贸易隐含PM_{2.5}排放量分类情况

Fig. 2 Classification of 30 provinces' EEPT in China in 2007 and 2010

产业的PM_{2.5}排放，第三产业的作用也需得到重视。在第二产业中，建筑业、机械制造业EEPT较高，2007年分别占总贸易隐含PM_{2.5}的30.72%、23.76%，2010年分别占26.47%、27.01%。2007年和2010年第三产业中的其他服务业则分别拥有14.43%、14.85%的EEPT。

2007-2010年，多数省区省际调出贸易隐含PM_{2.5} (EEPE) 有所下降，下降较多的为内蒙古、吉林、河北和黑龙江，这4个省份的EEPE下降量约占EEPE总下降量的71.16%；对于省际调入贸易隐含PM_{2.5} (EEPI)，仅有6个省区的EEPI有所增加，其他省份均有下降，下降量较大的为浙江、四川、北京和上海，其EEPI下降比例约占EEPI总变化量的47.05%。可见，省际贸易隐含PM_{2.5} (EEPT) 的变化多集中在某几个省区，从地理分布上来看，对EEPE变化贡献前十的省区中，有4个西部省区 (38.39%^②)，3个东

② 对EEPT变化的贡献比例，因有些省区的贸易隐含PM_{2.5}为增加，因此总贡献比例相加大于1。

部省区 (33.71%)、2 个东北省区 (30.81%) 和 1 个中部省区 (4.40%); 对 EEPI 贡献前十的省区中, 有 5 个东部省区 (49.30%)、2 个西部省区 (15.06%)、2 个东北省区 (14.41%) 和 1 个中部省区 (6.01%)。西部、东北省区对 EEPE 变化的贡献表明其在经济生产过程中依然发挥较重要的作用, 而这些省区多为资源型省区和重工业基地, 表明当前中国清洁生产技术仍存在上升空间。

3.2 省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ 的省区间转移

3.2.1 净省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ 的时空变化 图 3 为 2007 年和 2010 年净省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPT) 的空间分布。整体来看, 2007-2010 年, EEPT 净流入主要为经济发达的东部省区 (广东、浙江、上海、江苏、北京、天津、福建、海南) 及个别经济欠发达的西部省区 (新疆); 东部省区 EEPT 净流入量偏大。表明东部沿海地区的发展需要能源和重化工省区为其提供相应的经济支撑。而欠发达西部省区的产业结构不完整, 需要从其他省区调入产品用以生产。其中东部省区河北、山东 EEPT 净流出量较大, 因河北资源丰富, 而山东制造业基础较好。

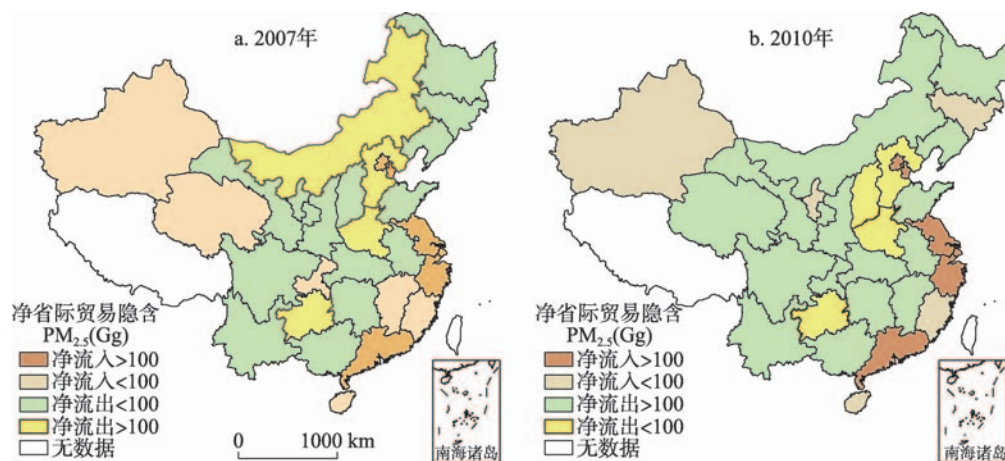


图3 2007年和2010年中国净省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ 的分布情况

Fig. 3 Distribution of the net $PM_{2.5}$ emissions embodied in China's provincial trade in 2007 and 2010

中部省区多为 EEPT 净调出省份 (2007 年除江西外), 西部省区多为 EEPT 净调出省份 (2007 年除重庆、青海、新疆外, 2010 年除青海、新疆外), 东北省区为 EEPT 净调出省份 (2010 年除吉林外)。中部省区河南、山西净流出量较大, 西部资源型省区、东北省区净流出量较小, 表明目前中国的生产活动还是在很大程度上依赖于资源的消耗, 导致以上省区省际调出初级产品较多。整体来看, EEPT 净流向为从中、西和东北省区流到东部省区, 表明东部省区通过转移高耗能产业将 $PM_{2.5}$ 的生产压力转移到了其他省区。

3.2.2 省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ 的省区间转移 图 4 为 30 省区间贸易隐含 $PM_{2.5}$ 的净转移情况。整体来看, 从 2007 年到 2010 年, 大于 30 Gg 省际净贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPT) 主要发生在资源丰富省区对东部省区的调出 (河北对北京、天津、浙江、江苏)。较大规模的净 EEPT (20~30 Gg) 主要发生在东部省区内部 (河北、浙江对上海, 山东对上海、江苏), 中部省区对东部省区的调出 (山西对河北的调出, 安徽对上海、江苏、浙江, 河南对江苏), 西部资源型省区对东部省区调出 (广西、贵州、云南对广东, 内蒙古对北京、天津), 东北省区间 (黑龙江对吉林)。中等规模净 EEPT (10~20 Gg) 主要发生在中部省区对东部沿海省区调出 (山西对江苏、浙江、山东), 东北省区间 (吉林对辽宁), 东

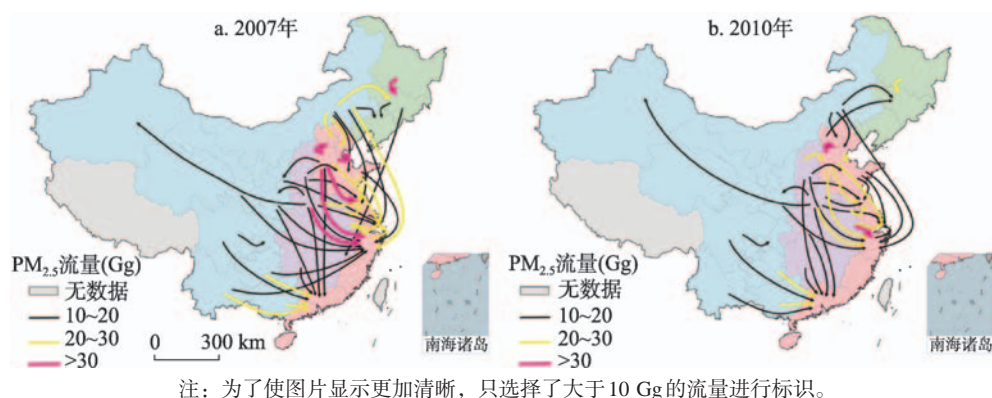
图4 2007年和2010年中国省区间净贸易隐含PM_{2.5}的流向

Fig. 4 Direction of the net interprovincial transfer of embodied PM_{2.5} emissions in China's mainland in 2007 and 2010

北省区对中部省区调出（吉林对江西），中部省区对东部省区调出（河南对上海、江苏、广东，湖北、湖南与广东），西部省区对东部省区调出（内蒙古对辽宁、上海、江苏、山东，陕西对上海，四川、陕西对广东，贵州、云南、陕西、甘肃对浙江）。较小净EEPT（<10 Gg）主要发生于西部省区间（除四川对重庆的调出），西部省区对中部省区的调出（除陕西从河南的调入外），中部省区间。

2010年省际贸易隐含PM_{2.5}（EEPT）的省际净转移量普遍要小于2007年，与EEPT的变化趋势一致。西部、中部省区对东部沿海省区的调出明显减少，因东部沿海省区的生产活动受经济危机影响而减弱，从而导致其国内需求下降。但总体的转移趋势依然为中部、西部、东北省区流向东部地区，从东北省区流向中部省区，及少量的从西部省区流向中部和东北省区。

4 结论

基于中国区域间投入产出模型，本文对2007、2010年中国30省区省际贸易隐含PM_{2.5}（EEPT）进行核算，结果表明EEPT约为以生产计算PM_{2.5}排放量的1/3。由此可见在治理大气污染时，以生产计算的排污责任划分不能实现公平原则，而需同时考虑贸易隐含排放所带来的治污责任的转移。在地理分布上，东部省区多为净调入贸易隐含PM_{2.5}，而中部、西部、东北省区则多为净调出。且东部发达省区（北京、山东、浙江、上海）省际贸易调入隐含PM_{2.5}的变化速度高于其省际调出贸易隐含PM_{2.5}的变化速度，导致东部发达省区与其他省区间EEPT之差持续加大，无疑为中西部省区、东北老工业省区的环境治理增加了难度。

东部省区的省际调出贸易隐含PM_{2.5}（EEPE）主要由最终消费部分导致，而中、东北、西部省区则主要为中间投入部分导致。对于东部省区发达省区而言，控制其最终产品的调出是降低其EEPE的有效手段；而对于东部资源型省区及中西部、东北省区而言，则需控制对其他省区中间投入部分高污染产品的调出，减少其污染的生产成本。省际调入贸易隐含PM_{2.5}（EEPI）主要由中间投入过程中产生EEPI构成，即越来越多的产品并非在一个地方单独完成生产，而是在不同省区间的生产链中进行。这也表明区域联合防污的必要性，仅靠一个地区的努力去实现大气污染的治理是不太可能的，需整个生产链的生产结构同时实现优化调整，才有利于污染治理的快速实现。

从最终消费的分类来看, 固定资本形成导致的省际贸易隐含 $PM_{2.5}$ (EEPT) 占主导地位 (仅北京在 2010 年例外), 且该比例在 2010 年比 2007 年有所增加。中部、西部、东北省区由固定资本形成导致的 EEPT 比例高于东部省区, 因此投资政策不仅要关注其带来的经济效应, 同时还应考虑是否会导致发达省区的污染产业转移至欠发达省区, 使得欠发达地区的环境更加恶化。

为了实现环境治理总目标, 政府需将注意力放在改进重点产业的技术上, 分产业贸易隐含 $PM_{2.5}$ 的数据表明, 需对第二产业中建筑业和机械制造业重点控制, 其次为第三产业中的其他服务业。

对省际净贸易隐含 $PM_{2.5}$ 的转移情况分析表明, 经济危机虽然导致净贸易隐含 $PM_{2.5}$ 转移量下降, 但并未改变省际净贸易隐含 $PM_{2.5}$ 从西部资源丰富省区、中部、东北省区流向东部省区的转移趋势。在短期内这种转移趋势不会发生变化, 由于这些省区在某种程度上承担了东部发达省区需求的生产活动, 因此, 在制定区域联控政策时, 东部地区应考虑对这些区域进行补偿或技术转移, 提高其清洁生产的能力。

致谢: 感谢华东师范大学地理科学学院唐曦老师和徐鹏飞同学在地图设计与制作方面给予的帮助!

参考文献(References)

- [1] Ning Miao, Sun Yamei, Yang Jintian. Analysis on the regional joint control mode of atmospheric pollution in China and abroad. *Environment and Sustainable Development*, 2012(5): 11-18. [宁淼, 孙亚梅, 杨金田. 国内外区域大气污染联防联控管理模式分析. *环境与可持续发展*, 2012(5): 11-18.]
- [2] Zhang Q, Streets D G, He K, et al. Major components of China's anthropogenic primary particulate emissions. *Environ. Res. Lett.*, 2007, 2(4): 45027.
- [3] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2009, 9(14): 5131-5153.
- [4] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics*, 2009, 69(2): 211-222.
- [5] Peters G P. From production-based to consumption-based national emission inventories. *Ecological Economics*, 2008, 65(1): 13-23.
- [6] Pan J, Phillips J, Chen Y. China's balance of emissions embodied in trade: Approaches to measurement and allocating international responsibility. *Oxford Review of Economic Policy*, 2008, 24(2): 354-376.
- [7] Chen Z M, Chen G Q, Zhou J B, et al. Ecological input-output modeling for embodied resources and emissions in Chinese economy 2005. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(7): 1942-1965.
- [8] Su B, Huang H C, Ang B W, et al. Input-output analysis of CO_2 emissions embodied in trade: The effects of sector aggregation. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 166-175.
- [9] Chen G Q, Zhang B. Greenhouse gas emissions in China 2007: Inventory and input-output analysis. *Energy Policy*, 2010, 38(10): 6180-6193.
- [10] Shui B, Harriss R C. The role of CO_2 embodiment in US-China trade. *Energy Policy*, 2006, 34(18): 4063-4068.
- [11] Du H, Guo J, Mao G, et al. CO_2 emissions embodied in China-US trade: Input-output analysis based on the energy/dollar ratio. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 5980-5987.
- [12] Liu X, Ishikawa M, Wang C, et al. Analyses of CO_2 emissions embodied in Japan-China trade. *Energy Policy*, 2010, 38(3): 1510-1518.
- [13] Wu R, Geng Y, Dong H, et al. Changes of CO_2 emissions embodied in China-Japan trade: Drivers and implications. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(5): 4151-4158.
- [14] Ahmad N, Wyckoff A. Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, 2003, 25(4): 1-22.
- [15] Wang T, Watson J. Who owns China's carbon emissions? Tyndall Briefing Note, 2007, 23.
- [16] Zhang Y, Tang Z. Driving factors of carbon embodied in China's provincial exports. *Energy Economics*, 2015, 51: 445-454.

- [17] Lin J, Pan D, Davis S J, et al. China's international trade and air pollution in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(5): 1736-1741.
- [18] Guo J E, Zhang Z, Meng L. China's provincial CO₂ emissions embodied in international and interprovincial trade. *Energy Policy*, 2012, 42(C): 486-497.
- [19] Feng K, Davis S J, Sun L, et al. Outsourcing CO₂ within China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(28): 11654-11659.
- [20] Huang Rui, Zhong Zhangqi, Sun Yi, et al. Measurements of regional sectoral embodied CO₂ emissions: A case study of Beijing. *Geographical Research*, 2015, 34(5): 933-943. [黄蕊, 钟章奇, 孙翊, 等. 区域分部门贸易的隐含碳排放: 以北京为例. *地理研究*, 2015, 34(5): 933-943.]
- [21] Liu Q, Wang Q. Reexamine SO₂ emissions embodied in China's exports using multiregional input-output analysis. *Ecological Economics*, 2015, 113: 39-50.
- [22] Zhong Z, Huang R, Tang Q, et al. China's provincial CO₂ emissions embodied in trade with implications for regional climate policy. *Frontiers of Earth Science*, 2015, 9(1): 77-90.
- [23] Zhao H Y, Zhang Q, Davis S J, et al. Assessment of China's virtual air pollution transport embodied in trade by a consumption-based emission inventory. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2014, 14(18): 25617-25650.
- [24] Shi Minjun, Wang Yan, Zhang Zhuoying, et al. Regional carbon footprint and interregional transfer of carbon emissions in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1327-1338. [石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移. *地理学报*, 2012, 67(10): 1327-1338.]
- [25] Zhong Zhangqi, Sun Yi, Liu Xiao, et al. Measurements of regional sectoral embodied CO₂ emissions: A case study of Beijing. *Tropical Geography*, 2015, 35(6): 785-796. [钟章奇, 孙翊, 刘晓, 等. 城市贸易隐含碳排放的计算: 以上海市为例. *热带地理*, 2015, 35(6): 785-796.]
- [26] Liang S, Zhang C, Wang Y, et al. Virtual atmospheric mercury emission network in China. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(5): 2807-2815.
- [27] Li Fangyi, Liu Weidong, Tang Zhipeng. Study on inter-regional transfer of embodied pollution in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(6): 791-801. [李方一, 刘卫东, 唐志鹏. 中国区域间隐含污染转移研究. *地理学报*, 2013, 68(6): 791-801.]
- [28] Guan D, Su X, Zhang Q, et al. The socioeconomic drivers of China's primary PM_{2.5} emissions. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(2): 1-9.
- [29] Liu Weidong, Chen Jie, Tang Zhipeng, et al. Theory and Practice for Building Multi-regional Input-output Table for 30 Provinces in China in 2007. Beijing: China Statistics Press, 2012. [刘卫东, 陈杰, 唐志鹏, 等. 2007年中国30省市区区域间投入产出表. 北京: 中国统计出版社, 2012.]
- [30] Liu Weidong, Tang Zhipeng, Chen Jie, et al. Theory and Practice for Building Multi-regional Input-output Table for 30 Provinces in China in 2010. Beijing: China Statistics Press, 2014. [刘卫东, 唐志鹏, 陈杰, 等. 2010年中国30省市区区域间投入产出表. 北京: 中国统计出版社, 2014.]
- [31] Zhang Z, Folmer H. Economic modelling approaches to cost estimates for the control of carbon dioxide emissions. *Energy Economics*, 1998, 20(1): 101-120.
- [32] Wiedmann T, Lenzen M, Turner K, et al. Examining the global environmental impact of regional consumption activities (Part 2): Review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 15-26.
- [33] Chen G Q, Guo S, Shao L, et al. Three-scale input-output modeling for urban economy: Carbon emission by Beijing 2007. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2013, 18(9): 2493-2506.
- [34] Feng K, Hubacek K, Sun L, et al. Consumption-based CO₂ accounting of China's megacities: The case of Beijing, Tianjin, Shanghai and Chongqing. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 26-31.
- [35] Liu Z, Feng K, Hubacek K, et al. Four system boundaries for carbon accounts. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 118-125.
- [36] Peters G P, Hertwich E G. CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(5): 1401-1407.
- [37] Serrano M, Dietzenbacher E. Responsibility and trade emission balances: An evaluation of approaches. *Ecological Economics*, 2010, 69(11): 2224-2232.
- [38] Xu Y, Dietzenbacher E. A structural decomposition analysis of the emissions embodied in trade. *Ecological Economics*, 2014, 101(5): 10-20.

Measurement and spatial transfer of China's provincial PM_{2.5} emissions embodied in trade

WU Leying¹, ZHONG Zhangqi², LIU Changxin³, WANG Zheng^{1,3}

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. School of Economics, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China;

3. Institute of Policy and Management, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: With the environmental problems becoming increasingly serious, the urgency of the air pollution control has attracted the attention of the Chinese government. Due to the unique natural conditions and industrial structure across different provinces, the central government should make endeavors to figure out the problems of emission reduction responsibilities. Actually, the spatial transfer of PM_{2.5} emissions embodied between the producer and the consumer in the production of consumable items through trade flows has the ability to undermine future climate and environmental policies. Based on the MRIO tables in 2007 and 2010, this article calculated PM_{2.5} embodied in interprovincial trade, and explored the corresponding spatial transfer characteristics of PM_{2.5} embodied emissions. The results showed that, PM_{2.5} emissions embodied in interprovincial trade (EEPT) approximately accounted for 1/3 of the country's total amount, and more importantly, the EEPT decreased significantly since the economic crisis in 2008, though the ratio between the PM_{2.5} EEPT and the production-based PM_{2.5} emissions increased to some extent. Moreover, PM_{2.5} emissions embodied in provincial export trade (EEPE) of the eastern provinces are mostly made up by final consumption, while the EEPE of the central, western and northeastern provinces are mainly composed of the intermediate input production. Therefore, in terms of the controlling on the PM_{2.5} EEPE, the eastern provinces should pay more attention to the final consumption, and the other provinces should focus on the intermediate input production. From the perspective of the production chain in China, PM_{2.5} emissions embodied in interprovincial import trade is primarily dominated by the intermediate input, which means that the regional corporation on the environment may be necessary for regional environmental policies. Furthermore, for the central, western and northeastern provinces, the proportion of the EEPT reduced by fixed capital formation is higher than that of the eastern provinces. Therefore, for these industries, the EEPT with the highest emissions such as the construction, the machinery, and other services should receive more attention in the pollution control policy. Considering the balance of the EEPT, the eastern provinces are net importers except for Hebei and Shandong, while the central, western and northeastern provinces are net exporters. In other words, the EEPT is transferred from the central, western and northeastern provinces to the eastern ones, which is stable after the economic crisis. Finally, in terms of policy, the eastern provinces should provide financial and technological aid to the provinces where the EEPT is transferred in regional environmental policy.

Keywords: PM_{2.5}; multi-regional Input-output; emissions embodied in trade; China