

# 经济增长与大气污染

## ——基于城市面板数据的联立方程估计

高 纹, 杨 昕

(南京审计大学 经济学院, 江苏 南京 211815)

**[摘 要]**采用 2003—2015 年我国 104 个城市的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度及 2013—2016 年 30 个省会城市的  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_3$  浓度作为大气污染变量,构建经济增长与大气污染相互作用的联立方程组,使用三阶段最小二乘法(3SLS)检验随着人均 GDP 的增加,大气污染先严重后减轻的倒 U 型的环境库茨涅茨曲线(EKC)是否存在。研究表明:六种大气污染物的浓度与经济增长之间均呈现倒 U 型的曲线关系; $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_3$  的污染浓度已越过拐点,说明近年来我国对点源大气污染物的治理已经取得良好效果; $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的污染浓度尚未越过拐点,即处于随着经济增长污染趋于加重的阶段。

**[关键词]**大气污染;经济增长;库茨涅茨曲线;能源消耗;环境污染;可持续发展;产业结构;人口规模

**[中图分类号]**F124.1; X51 **[文献标志码]**A **[文章编号]**2096-3114(2019)02-0090-10

### 一、引言

改革开放以来,中国 GDP 总量增长迅速,1978—2016 年 GDP 平均年增长率高达 9.7%,2010 年 GDP 总量超过日本,成为仅次于美国的世界第二大经济体。中国人均 GDP 从 1978 年的 385 元上升至 2017 年的 50251 元,实现了从低收入国家向高位中等收入国家的跨越,创造了“中国奇迹”。然而,在经济快速增长、创造大量物质财富的过程中,一些严重的环境问题日益暴露,发达国家在工业化进程中分阶段出现的环境问题在我国短时期内集中体现出来。

环境问题给我国的经济增长和发展带来了一些不利影响。截至 2017 年末,中国常住人口城镇化率已达到 58.52%。城市作为人们生活和工作的中心区域,在国民经济中起着关键作用。然而,伴随着以煤为主的能源消费结构的粗放型经济增长、人口向城市的聚集以及机动车数量的急增,城市大气污染问题日趋严重和复杂。影响居民健康的主要大气污染物是悬浮颗粒物(烟雾、灰尘、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ )、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  等,影响程度取决于大气污染物的浓度,有统计表明:在北上广等超大城市,机动车尾气排放是大气污染的主要原因,雾霾现象时常发生;北方城市的颗粒物污染问题严重;西南和华北地区城市的  $\text{SO}_2$  和酸雨污染问题最突出;人口数量超过 100 万的大城市普遍存在  $\text{NO}_x$  污染问题。生态环境部发布的《2017 年中国生态环境状况公报》显示,338 个地级及以上城市中,仅有 99 个城市的空气质量指数达标,占比为 29.3%。不可否认的是,自 2013 年国务院颁布《大气污染防治十条措

**[收稿日期]**2018-06-20

**[基金项目]**江苏省重点学科资助项目(理论经济学);江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX17-jmxy02)

**[作者简介]**高纹(1969—),女,江苏镇江人,南京审计大学经济学院教授,博士,硕士生导师,主要研究方向为发展经济学和环境经济学,邮箱:gaowen@nau.edu.cn;杨昕(1992—),女,安徽安庆人,南京审计大学经济学院硕士生,主要研究方向为人口、资源和环境经济学。

施》以来,各级政府在严控高耗能、高污染行业新增耗能,加快调整能源结构,推行激励与约束并举的节能减排新机制等方面实施了积极行动,2017年338个城市的平均优良天数(AQI值为0~100的天数)比例达到了78.0%。

由此可见,近些年来,随着新的环境问题的不断出现,对经济增长和环境污染之间的关系进行分析验证就更有必要,本文拟对此问题进行实证研究,并在实证分析的基础上提出相应的政策建议。

## 二、文献综述

随着经济增长与环境污染之间矛盾的日益凸显,学者们越来越关注两者之间的关系,其中实证研究主要是基于环境库茨涅兹曲线(Environmental Kuznets Curve,简称EKC)而展开的。EKC是Grossman和Krueger提出的,他们研究发现经济增长与环境污染之间存在倒U型曲线关系<sup>[1]</sup>。

### (一) 经济增长对环境污染的影响

大多数实证研究结论支持倒U型的EKC这一说法,社会经济在增长的同时会通过规模效应、结构效应等对环境造成污染,但当人均收入增加到一定水平后会出现拐点(污染最大值的临界点),经济增长也会通过产业结构的升级减少对环境的污染<sup>[2-7]</sup>。这与我们的经验认识趋于一致,许多发达国家在经济发展中都经历了严重的环境污染过程,但随着人均收入的增加环境质量逐步得到了改善。然而,拐点的出现并不是自然而然的,经济学的解释是:当经济增长达到一定阶段,环境恶化与经济增长的边际替代率变得足够大,以致用牺牲环境换取经济增长的代价过高;人们对环境质量的要求日益提高推动了环境技术的进步以及环境制度(环境规制、法律和政策,环境伦理教育等)的建设,最终达到了环境改善的效果。环境技术进步对污染减少的显著正效用得到了普遍证实,因此加大环保研发投入和促进环境技术创新一直都是各国环境政策的核心。

发达国家的历史数据分析结果表明,污染水平先增加后减少的拐点出现在人均GDP为5000~10000美元时。工业点源污染物(废水、废气和废渣)的拐点一般出现得较早,原因是污染者容易确定且会被追究责任,从而促进了相关污染处理技术的研发和普及;而非点源污染物(农业面源污染和移动污染源污染等)的拐点出现得较晚,因为污染者难以确定,治理难度较大。此外,由于发展中国家可以吸取发达国家的经验教训,具有直接引进环境技术以及参照发达国家的环境制度设计等后发优势,因此拐点通常出现在人均收入水平更低处。

然而,倒U型的EKC并不是对所有污染物都成立。森林植被破坏是随着经济增长单调递减的,原因是只要人们停止破坏行为,大气污染状况就可以得到改善,无须太多的技术投入。温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、NO等)的排放是随着经济增长单调递增的,无论是历史排放还是当前排放,发达国家都远高于发展中国家,比较合理的解释是温室气体的减排是一种类似于国防的“纯公共物品”的提供,“搭便车”行为难以避免,从而导致各国减排温室气体的动力和压力都不足。鉴于当前的技术水平,减少温室气体排放意味着必须减少化石燃料的消耗,这必将波及工业文明的方方面面。很显然,转变工业文明的成本极其巨大,因此,除非新能源技术能够获得重大突破和普及,否则温室气体排放的拐点难以出现<sup>[4-5]</sup>。

### (二) 环境污染对经济增长的影响

所有经济活动都会受到环境的制约,环境污染也会反作用于经济增长。环境污染的负外部性会降低要素的投入量和生产性,从而阻碍经济增长<sup>[8]</sup>。学者们关于环境污染对经济增长的实证研究尚未得到一致的结论,如包群等基于环境污染对经济增长的产出方程进行回归发现,三类污染指标(工业废水排放量、工业废水中污染物化学需氧量、工业烟尘排放总量)对产出具有负效应,另三类污染指标(工业废水排放量、工业粉尘排放量、SO<sub>2</sub>排放总量)对产出的影响不显著<sup>[9]</sup>。

一方面,环境污染会影响人们的身体健康和工作效率,从而降低经济增长的速度;另一方面,环境

污染使得健康产业和环境产业的规模扩大,对经济增长具有正向作用。有学者认为环境污染会影响长期乃至超长期稳定的经济增长,如 Georgescu-Roegen 根据热力学定律得出经济增长存在极限的悲观结论<sup>[10]</sup>,而 Ayres 却得出了相反的比较乐观的结论<sup>[11]</sup>。此后的理论研究主要集中于环境和资源约束下的内生经济增长模型,但因为数据和计量模型构建的局限性,环境污染对长期经济增长的实证研究进展缓慢。

我国学者对环境污染和经济增长之间关系的实证研究已经有了相当的积累。与国外研究主要选取环境质量监测数据作为污染变量不同,国内学者主要使用废水、废气和废渣等工业点源污染物的排放量数据进行回归分析<sup>[12-16]</sup>。然而,纵观我国的实证研究,因为数据和变量的选取以及计量模型设计的不同,得出的结论大相径庭,倒 U 型的 EKC 并未得到普遍证实,各种估计结果存在差异的原因可能是环境技术的重大突破或环境规制的实施等使得 EKC 的形状和拐点发生了改变。在计量模型的构建上,采用省际面板数据建立单方程进行回归的研究较多,而使用城市数据进行联立方程估计的文献较少。基于此,本文拟选取现阶段能够收集到的最新的两组面板数据,以 2003—2015 年我国 104 个城市的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM10 大气污染浓度和 2013—2016 年 30 个省座城市(因拉萨的数据不全,所以予以剔除)的 PM2.5、CO 和 O<sub>3</sub> 浓度作为环境污染变量,构建同时包括产出方程与污染方程在内的联立方程组对中国经济增长与城市大气污染的关系进行实证分析,找出经济增长与城市大气污染之间相互作用的内在机制,这不仅关系到大气污染的治理和人民生活水平的提高,而且对经济政策的制定以及城市可持续发展的规划设计具有重要参考价值。

### 三、研究设计

#### (一) 模型设定

为验证经济增长与环境污染之间的内在关系,我们构建污染方程与产出方程的联立方程组,以准确剖析经济增长与环境污染之间的相互作用和均衡关系。基于我国各城市面板数据的经济增长与大气污染的联立方程如下:

$$\begin{cases} \ln(P_{it}) = \varphi_0 + \varphi_1 \ln(Y_{it}) + \varphi_2 \ln^2(Y_{it}) + \omega X_{it} + \varepsilon_{it} & (1) \\ \ln(Y_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(K_{it}/L_{it}) + \beta_2 \ln(H_{it}) + \beta_3 \ln(P_{it}) + e_{it} & (2) \end{cases}$$

式(1)为大气污染方程,  $X_{it}$  是影响大气环境污染的一组控制变量,  $\varepsilon_{it}$  表示与各城市相关的特定截面效应。式(2)为产出方程,基于扩展的柯布—道格拉斯生产函数,环境污染  $P_{it}$  表示第  $i$  个城市第  $t$  年的大气污染浓度,  $Y_{it}$  表示第  $i$  个城市第  $t$  年的人均 GDP,  $K_{it}$  表示第  $i$  个城市第  $t$  年的物质资本存量,  $L_{it}$  表示第  $i$  个城市第  $t$  年的劳动投入量,  $K_{it}/L_{it}$  表示劳均资本存量,  $H_{it}$  表示第  $i$  个城市第  $t$  年的人力资本存量,  $e_{it}$  表示与各城市相关的特定截面效应。

根据联立方程组式(1)中的系数  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ,我们可以判断环境污染与经济增长之间关系的曲线形状。如果  $\varphi_1 > 0$ 、 $\varphi_2 < 0$ ,则两者呈倒 U 型曲线关系;如果  $\varphi_1 < 0$ 、 $\varphi_2 > 0$ ,则两者呈正 U 型曲线关系;如果  $\varphi_1 > 0$ 、 $\varphi_2 > 0$ ,则两者呈单调递增曲线关系;如果  $\varphi_1 < 0$ 、 $\varphi_2 < 0$ ,则两者呈单调递减曲线关系。

#### (二) 研究方法

根据污染方程(1)和产出方程(2)所构成的联立方程组,可采用的计量方法有单一方程估计法(如普通最小二乘法 OLS、二阶段最小二乘法 2SLS、有限信息极大似然法 LIML)和系统估计法(如三阶段最小二乘法 3SLS、系统广义矩估计 System GMM)。由于系统估计法将所有方程作为一个整体进行估计,能够充分考虑到各方程之间的联系,并可以识别模型系统提供的变量信息,因此本文采用能够较好处理联立方程中内生性问题的 3SLS 方法进行估计<sup>①</sup>。

①我们分别使用 3SLS 和 System GMM 这两种方法进行了计量回归分析,发现 3SLS 的拟合效果更好。

## (三) 变量选取

本文选取两组面板数据进行联立方程估计:一组是 2003—2015 年 104 个城市的面板数据,以  $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $PM_{10}$  的年均浓度作为环境污染变量;另一组是 2013—2016 年 30 个省会城市的面板数据,以  $PM_{2.5}$ 、 $CO$  和  $O_3$  的年均浓度作为环境污染变量。考虑到相邻区域的大气污染存在溢出效应,因此我们认为使用城市数据优于省际数据,因为这样溢出效应可以忽略。

由于我国各城市在人口规模、自然禀赋等方面存在较大差异,因此我们选用人均 GDP 作为经济增长的衡量指标。

在环境污染指标选取方面,现有文献大多选用大气污染物的工业排放量来衡量,本文则选择更能客观反映城市空气质量的大气污染物浓度监测数据的年平均值作为衡量指标,其中  $SO_2$  年均浓度数据对外公布较早, $NO_2$  和  $PM_{10}$  年均浓度数据分别于 2003 年和 2001 年公布,自 2013 年起一些大中城市的  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$ 、 $CO$  年均浓度数据陆续公布。

在产出方程中,我们以劳均物质资本存量、人力资本、大气污染浓度作为主要解释变量。关于物质资本存量,本文借鉴张军等的做法<sup>[17]</sup>,采用永续盘存法来计算,计算公式为  $K_{it} = (1 - \delta_{it}) K_{it-1} + I_{it}$ ,其中  $K_{it}$  表示第  $t$  年  $i$  城市的固定资产形成总额, $\delta_{it}$  为折旧率并取固定值 9.6%,该方法在基准年后采用不变价格来计算物质资本存量。关于人力资本,受教育程度能够反映城市平均人力资本状况,因此本文选用平均受教育年限作为人力资本衡量指标,将受教育总人口根据受教育程度(分为小学、初中、高中和高等教育四个阶段)进行分类,并以各阶段受教育年限(小学 6 年、初中 3 年、高中 3 年、高等教育 4 年)作为权重进行加权平均计算得到。

另外,本文加入可能引起环境质量变化的重要因素(包括公共政策、产业结构、FDI、降雨量等)作为污染控制变量。同时,考虑到数据的可获得性以及拟合的效果,我们对两组联立方程组中污染控制变量的选取略有差异。

对于样本的选择,考虑到一些城市年份数据的缺失和面板数据的整合性,在最终的两组数据中我们分别选取 104 个城市和 30 个省会城市作为样本。两组样本中的名义 GDP 数据和物质存量数据分别以 2003 年和 2013 年为基期,并用历年城市消费价格指数(数据来源于 EPS 中国宏观经济数据库)持续计算的结果进行修正。

主要变量的定义详见表 1。

表 1 主要变量定义表

变量类型	变量名称	变量符号	变量单位	变量定义
被解释变量与 解释变量	$SO_2$ 污染浓度	$SO_2$	$\mu g/m^3$	$SO_2$ 年均浓度
	$NO_2$ 污染浓度	$NO_2$	$\mu g/m^3$	$NO_2$ 年均浓度
	$PM_{10}$ 污染浓度	$PM_{10}$	$\mu g/m^3$	$PM_{10}$ 年均浓度
	$PM_{2.5}$ 污染浓度	$PM_{2.5}$	$\mu g/m^3$	$PM_{2.5}$ 年均浓度
	$CO$ 污染浓度	$CO$	$\mu g/m^3$	$CO$ 年均浓度
	$O_3$ 污染浓度	$O_3$	$\mu g/m^3$	$O_3$ 年均浓度
控制变量	人均 GDP	$Y$	元	人均实际 GDP
	物质资本	$K$	元	物质资本存量
	劳动资本	$L$	人	城镇总就业人数
	人力资本	$H$	年	受教育年限的加权平均数
	产业结构	$Industry$	%	第二产业占 GDP 的比重
	外商直接投资	$Fdi$	%	当年实际外资投资额占 GDP 的比重
	城市公共基础设施建设	$Road$	$m^2$	人均城市道路面积
	公共交通 <sub>1</sub>	$Transport_1$	辆	每万人使用公共交通汽车车辆数
	公共交通 <sub>2</sub> <sup>①</sup>	$Transport_2$	辆	每万人年末实有公共汽(电)车营运车辆数
	人口密度	$Density$	人/ $km^2$	每平方公里的人口数
	环境治理投资额	$Investment$	%	省际环境治理投资额占 GDP 的比重
	绿化覆盖率	$Green$	%	建成区绿化覆盖率
	年降水量	$Rain$	mm	年均降雨量
空气湿度	$Humidity$	%	平均相对湿度	

<sup>①</sup>考虑到所公布的公共交通指标统计数据的变化,本文将两组联立方程组中所用到的该指标的变量符号分别用  $Transport_1$  和  $Transport_2$  表示。

#### (四) 数据来源

本文所需数据来源于《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国环境质量公告》、各省区市统计年鉴、各省区市统计公告、EPS 数据库。个别缺失的数据我们采用移动平均法补齐。

### 四、实证结果与分析

#### (一) 描述性统计

表2为SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10联立方程组中变量的描述性统计结果。从2003—2015年104个城市大气污染物浓度的年平均均值来看,SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10浓度最高的城市分别是潍坊、阳泉、乌鲁木齐,而SO<sub>2</sub>和PM10浓度最低的城市是海口,NO<sub>2</sub>浓度最低的城市是北海。中国2012年修订的《环境空气质量标准》规定:SO<sub>2</sub>年平均浓度限值一级标准为20μg/m<sup>3</sup>,二级标准为60μg/m<sup>3</sup>;NO<sub>2</sub>年平均浓度限值标准为40μg/m<sup>3</sup>;PM10年平均浓度限值一级标准为40μg/m<sup>3</sup>,二级标准为70μg/m<sup>3</sup>。由表2可知,SO<sub>2</sub>的年平均浓度均值已达二级标准,尚未达到一级标准;NO<sub>2</sub>的年平均浓度均值已达标准;PM10的年平均浓度均值尚未达到二级标准。

表3为PM2.5、CO、O<sub>3</sub>联立方程组中变量的描述性统计结果。从2013—2016年30个省会城市PM2.5浓度的年平均均值来看,浓度最高的城市是邯郸,高达154μg/m<sup>3</sup>;浓度最低的城市则是海口,为21μg/m<sup>3</sup>。我国PM2.5达标限值为年平均浓度一级标准15μg/m<sup>3</sup>,二级标准35μg/m<sup>3</sup>,24小时平均浓度为75μg/m<sup>3</sup>。在世界卫生组织推荐的环境空气质量指导值中,PM2.5年平均浓度标准仅为10μg/m<sup>3</sup>。由表3中结果我们可以判断出,我国PM2.5污染问题非常严重。

CO的24小时平均和1小时平均浓度标准分别为4μg/m<sup>3</sup>和10μg/m<sup>3</sup>;O<sub>3</sub>的8小时平均和1小时平均浓度标准分别为一级标准100μg/m<sup>3</sup>和160μg/m<sup>3</sup>,二级标准160μg/m<sup>3</sup>和200μg/m<sup>3</sup>。从表3中可以看出,我国CO和O<sub>3</sub>的污染不太严重。

#### (二) 回归分析

表4至表7分别是对SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和PM10联立方程以及PM2.5、CO和O<sub>3</sub>联立方程的回归结果。从结果来看,整体上拟合得很好,获得了统计上有意义的估计。

##### 1. 大气污染对经济增长的作用

从两组产出方程的估计来看,基本要素的投入中劳均物质资本存量和人力资本对经济增长的推动作用都是稳健的。关于大气污染对经济增长的作用,产出方程的结果显示:SO<sub>2</sub>和PM10对经济增长具有显著的负向作用;NO<sub>2</sub>、PM2.5和O<sub>3</sub>对经济增长具有显著的正向作用;CO虽然对经济增长具有正向作用,但不显著。

从经验认识来看,一方面由污染所导致的环境破坏和健康损害会降低要素生产率,从而阻碍经济增长;另一方面用于环境修复和健康增进的投资将促进经济增长。如果前者的效应大于后者,则大气

表2 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10联立方程组中变量的描述性统计结果

变量	均值	标准差	最小值	最大值
SO <sub>2</sub>	46.86	26.48	4.00	267.00
NO <sub>2</sub>	36.86	11.44	3.00	73.00
PM10	98.35	31.54	29.00	305.00
Y	44225	4352	5353	221384
K/L	46.4	177.0	7.5	4806.9
H	10.25	2.15	6.02	12.41
Industry	51.95	11.18	19.25	90.97
Fdi	3.39	0.47	1.37	4.67
Road	11.8	6.4	0.3	64.0
Transport <sub>1</sub>	10.05	10.18	1.02	115.13
Density	1303.0	963.2	31.2	11449.3
Investment	1.31	0.62	0.41	4.24
Green	39.01	6.81	39.02	70.12

表3 PM2.5、CO、O<sub>3</sub>联立方程组中变量的描述性统计结果

变量	均值	标准差	最小值	最大值
PM2.5	63.48	21.95	21.00	154.00
CO	2.28	1.01	0.90	5.90
O <sub>3</sub>	138.67	28.19	69	203
Y	92387	3915	48868	205918
K/L	68.6	150.2	20.9	5213.2
H	10.51	1.92	7.84	12.52
Industry	38.81	8.71	18.57	59.11
Rain	1000	608	149	2940
Road	8.53	0.69	6.79	9.79
Transport <sub>2</sub>	9.18	3.55	2.56	17.92
Humidity	66.9	10.8	43.1	84.0
Investment	1.5	0.8	0.3	4.24
Green	40.88	5.16	27.18	61.58
Industry	38.81	8.71	18.57	59.11

污染与经济增长之间呈负向关系,反之两者之间则呈正向关系。从回归结果来看,环境污染对经济增长呈现出正向作用的原因可能是人们在对  $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  的污染防治和健康方面的投资比较大。实际上,通过日常观察我们可以发现,为了减轻  $\text{PM}_{2.5}$  对健康的损害,近些年来人们的确大幅增加了在医疗和购买空气净化装置等方面的支出。

## 2. EKC 曲线的验证和拐点值

污染方程中六种大气污染物的浓度与经济增长之间均呈现倒 U 型的曲线关系,这验证了 EKC 曲线的存在。六种污染物的污染水平随着人均 GDP 的增长呈现先加剧后减轻的变化趋势,即污染最大值的临界点所对应的人均 GDP 分别为 27799 元 ( $\text{SO}_2$ )、104768 元 ( $\text{NO}_2$ )、34929 元 ( $\text{PM}_{10}$ )、332435 元 ( $\text{PM}_{2.5}$ )、31323 元 ( $\text{CO}$ ) 和 17624 元 ( $\text{O}_3$ )。其中, $\text{O}_3$  的拐点出现得最早,原因可能在于地表  $\text{O}_3$  大部分是汽车、工厂等污染源排入大气中的  $\text{NO}_x$  和  $\text{CH}_4$  等一次污染物在太阳紫外线的照射下发生光化学反应后形成的二次污染物,而我国整体上紫外线并不强烈,因此  $\text{O}_3$  的污染并不严重。 $\text{SO}_2$  的拐点出现得也比较早,2010 年(全国人均 GDP 约为 3 万元)左右已经越过拐点,这与政府管控有关,自“九五”规划开始我国已将  $\text{SO}_2$  作为大气污染的主要监控指标,“十一五”规划中再次强调了对  $\text{SO}_2$  的管控, $\text{SO}_2$  减排与政府政绩挂钩,实行一票否决制。为此,各级政府为实现  $\text{SO}_2$  减排出台了一系列措施,如要求所有新建电厂安装脱硫设备,对装机容量低于 20 万千瓦的老电厂强行关闭,对达到脱硫要求的电厂发电采用脱硫优惠电价等。因为  $\text{SO}_2$  污染的 80% 源于工业排放,污染责任者比较容易确定,所以强制性的环境管制措施非常有效。值得关注的是,虽然  $\text{SO}_2$  处于随经济增长而减少的阶段,但迄今大多数城市的  $\text{SO}_2$  年平均浓度仍未达到一级标准限值  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

$\text{CO}$  是含碳燃料不完全燃烧的产物,若燃烧过程能组织和控制好,即具备充足的氧气、足够高的温度和较长的滞留时间,中间产物  $\text{CO}$  最终会燃烧完毕,生成  $\text{CO}_2$ ,因此控制  $\text{CO}$  的排放不是企图抑制它的形成,而是努力使之完全燃烧。在我国  $\text{CO}$  浓度已经越过拐点,而且污染不严重,说明  $\text{CO}$  完全燃烧处理技术已经比较成熟。

表 4  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  污染方程估计结果

	$\ln(\text{SO}_2)_{it}$	$\ln(\text{NO}_2)_{it}$	$\ln(\text{PM}_{10})_{it}$
$\ln(\text{GDP})_{it}$	9.803*** (7.78)	13.016*** (5.95)	7.260*** (11.94)
$\ln(\text{GDP})_{it}^2$	-0.479*** (-7.97)	-0.563*** (6.07)	-0.347*** (-12.04)
$\ln(\text{Industry})_{it}$	0.983*** (3.67)	0.363*** (6.25)	0.520*** (7.26)
$\ln(\text{Fdi})_{it}$	0.001 (0.12)	-0.017*** (-2.87)	0.003 (0.44)
$\ln(\text{Road})_{it}$	-0.038 (-1.31)	-0.113*** (-4.89)	-0.027 (-0.334)
$\ln(\text{Transport}_1)_{it}$	-0.085*** (-3.01)	-0.256*** (-10.92)	-0.115*** (-4.18)
$\ln(\text{Density})_{it}$	0.031* (1.80)	0.017 (1.27)	0.027*** (3.17)
$\ln(\text{Investment})_{it}$	0.068*** (4.54)	0.035*** (3.01)	0.066* (1.79)
$\ln(\text{Green})_{it}$	-0.517*** (-6.58)	-0.079 (-1.51)	-0.537*** (-7.57)
_cons	-7.221*** (-7.42)	6.880*** (6.13)	-8.517*** (-11.55)
调整后的 $R^2$	0.217	0.281	0.265
F 统计量	690.48***	712.45***	363.88***
EKC 形状	倒 U 型	倒 U 型	倒 U 型
拐点(元)	27799	104768	34929

注:括号内为估计系数所对应的  $t$  统计值,\*\*\*、\*\*、\* 分别代表 1%、5% 和 10% 的显著性水平。下同。

表 5  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_3$  污染方程估计结果

	$\ln(\text{PM}_{2.5})_{it}$	$\ln(\text{CO})_{it}$	$\ln(\text{O}_3)_{it}$
$\ln(\text{GDP})_{it}$	0.534** (2.29)	1.470*** (3.21)	0.176 (0.24)
$\ln(\text{GDP})_{it}^2$	-0.021** (-2.37)	-0.071** (-1.94)	-0.009** (-2.05)
$\ln(\text{Industry})_{it}$	0.005** (2.19)	0.014 (1.37)	0.063 (1.21)
$\ln(\text{Rain})_{it}$	-0.291*** (-6.46)	-0.461*** (-9.89)	-0.045** (-2.02)
$\ln(\text{Road})_{it}$	0.233*** (5.68)	-0.121 (-0.77)	-0.093*** (-4.17) -0.011
$\ln(\text{Transport}_2)_{it}$	-0.229*** (-3.60)	-0.003 (-1.35)	(-0.31)
$\ln(\text{Humidity})_{it}$	-0.188 (-1.37)	-0.001* (-1.81)	0.004 (0.05)
$\ln(\text{Investment})_{it}$	0.110** (1.97)	0.118* (1.71)	-0.044 (-1.60)
$\ln(\text{Green})_{it}$	-0.089 (-0.44)	-0.010 (-0.04)	-0.236** (-2.22)
_cons	0.253 (0.18)	2.431*** (2.65)	2.577 (0.77)
调整后的 $R^2$	0.399	0.311	0.250
F 统计量	135.91***	218.81***	163.07***
EKC 形状	倒 U 型	倒 U 型	倒 U 型
拐点(元)	332435	31323	17624

表6 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM10 产出方程估计结果

	$\ln(GDP)_{it}$	$\ln(GDP)_{it}$	$\ln(GDP)_{it}$
$\ln(SO_2)_{it}$	-0.922 *** (-12.85)		
$\ln(NO_2)_{it}$		0.923 *** (9.61)	
$\ln(PM10)_{it}$			-1.581 *** (-11.37)
$\ln(K/L)_{it}$	0.317 *** (9.96)	0.443 *** (17.75)	0.520 *** (18.42)
$\ln H_{it}$	0.116 *** (8.43)	0.073 *** (5.42)	0.213 *** (14.10)
-cons	13.298 *** (40.46)	4.951 *** (17.82)	16.728 *** (25.84)
F 统计量	1068.66 ***	1712.50 ***	1644.83 ***
调整后的 R <sup>2</sup>	0.860	0.614	0.542
N	1352	1352	1352
个体异质性	YES	YES	YES
Sargan	98.769	92.712	67.826
P 值	0.230	0.110	0.164

表7 PM2.5、CO 和 O<sub>3</sub> 产出方程估计结果

	$\ln(GDP)_{it}$	$\ln(GDP)_{it}$	$\ln(GDP)_{it}$
$\ln(PM2.5)_{it}$	0.317 *** (2.92)		
$\ln(CO)_{it}$		0.061 (0.71)	
$\ln(O_3)_{it}$			0.807 * (1.91)
$\ln(K/L)_{it}$	0.156 *** (3.12)	0.103 ** (1.81)	0.057 * (1.66)
$\ln H_{it}$	0.141 *** (3.34)	0.118 *** (3.91)	0.249 (1.18)
-cons	10.080 (13.13)	11.128 *** (15.47)	8.385 *** (4.93)
F 统计量	144.90 ***	104.10 ***	67.20 ***
调整后的 R <sup>2</sup>	0.527	0.302	0.356
N	120	120	120
个体异质性	YES	YES	YES
Sargan	99.281	62.183	43.081
P 值	0.499	0.546	0.318

PM10 污染在 2011 年(全国人均 GDP 约为 3.5 万元)已经越过拐点。PM10 颗粒物一部分来自工业污染源的直接排放,另一部分主要是道路和建筑工地扬尘。PM10 较 PM2.5 对人体危害小一些,但长期累积也会引起呼吸系统疾病。此外,大气能见度和 PM10 显著相关,PM10 污染浓度的上升常常会降低大气能见度,给出行带来不便,进而会增加交通事故发生率。由于点源污染的控制以及各城市环卫部门的努力(如清扫和洒水等),PM10 污染得到了有效控制,PM10 污染虽然呈逐步减轻的趋势,但迄今半数样本城市的 PM10 年平均浓度仍未达到二级标准限值 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

从全国人均 GDP 来看,NO<sub>2</sub> 污染的拐点即将到来,人均 GDP 超过 10 万元的富裕城市已经越过了拐点。人类生活中的 NO<sub>2</sub> 主要是汽车在启动时生成的 NO 排放到空气中与氧气接触发生反应后生成的,因此车流量和交通堵塞与 NO<sub>2</sub> 污染浓度相关。此外,燃煤工业也会排放出大量的 NO<sub>2</sub>。我国通过改进燃烧设备以及采用催化还原、吸收、吸附等排烟脱氮的方法,有效地控制了工业 NO<sub>2</sub> 的排放量,但因车辆使用增加和交通堵塞所引起的 NO<sub>2</sub> 污染问题始终没有解决,这是 NO<sub>2</sub> 的拐点值远大于 SO<sub>2</sub> 和 PM10 的原因。

PM2.5 的拐点值出现在人均 GDP 高达 332435 元处。PM2.5 污染除了与化石燃料的大量消耗有关外,还与 2010 年后家用汽车的迅速普及密切相关,因此 PM2.5 问题出现的很大一部分原因是近些年来人们生活方式的改变。在人口密集和车辆多的大中城市,交通堵塞问题日趋严重,人们既是 PM2.5 污染的受害者又是 PM2.5 污染的施加者。无论是改变使用化石燃料的工业文明方式还是改变人们的生活方式,都是极其困难的,这是 PM2.5 拐点难以出现的原因。

总的来说,从拐点出现的先后顺序来看,CO、SO<sub>2</sub> 和 PM10 主要是工业点源污染造成的,易于治理,所以拐点到来得比较早;NO<sub>2</sub> 和 PM2.5 涉及移动污染源造成的污染,治理难度大,因此拐点出现得较晚。这一估计结果完全符合我们的预期和经验认识。

### 3. 控制变量对大气污染的影响

第一,产业结构对大气污染的影响。回归结果显示,第二产业占 GDP 的比重对六种物质的大气污染浓度均具有正向效应,而且除 CO、O<sub>3</sub> 外都很显著,其中对 SO<sub>2</sub> 的影响最大,这说明工业排放仍然是造成大气污染的主要原因,工业化进程中以牺牲环境为代价的发展模式尚未完全改变,通过产业结构的升级来降低第二产业所占比重将有助于改善空气质量。

第二,FDI对大气污染的主要影响。回归结果显示,FDI对NO<sub>2</sub>大气浓度具有显著的负向影响,对SO<sub>2</sub>和PM10大气浓度均具有正向影响,但不显著,说明“污染避难所假说”在此并未得到有效验证。

第三,城市人均道路面积对大气污染的影响。结果显示,城市人均道路面积对PM2.5具有显著的正向影响,可能的解释是道路面积的增加促进了机动车的使用,从而致使PM2.5污染浓度上升。

第四,每万人拥有的公共汽车数量越多,越会使得大气污染物浓度下降,说明发展公共交通事业有助于改善空气质量。

第五,城市人口密度对大气污染具有一定的正向效应,说明人口向城市集聚会加重城市的空气污染。

第六,城市绿化覆盖率对SO<sub>2</sub>、PM10和O<sub>3</sub>污染浓度均具有显著的负向效应,表明城市绿化对环境改善具有一定的积极作用。

第七,降雨量和湿度对PM2.5污染浓度具有负向影响,而且降雨量指标通过了1%的显著性水平检验,这说明近几年来我国南方城市雾霾天气较少的原因可能是阴雨天增多,而不一定是空气质量得到了真正改善。

第八,环境污染治理投资额占GDP的比重对SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10、PM2.5和O<sub>3</sub>污染浓度均具有正向效应,这与通常的经验认识相悖,可能的解释是污染削减边际成本的上升,即污染水平低时减少一个单位污染的治理成本要小于污染严重时减少一个单位污染的治理成本。此外,环境投资效率的低下也是其中一个原因,即虽然增加了环境治理投资额,但环境质量仍没有得到改善。

### (三) 稳健性检验

为了确保本文回归结果的稳健性,我们选用2003—2015年104个城市人均SO<sub>2</sub>工业排放量(SO<sub>2</sub>pfI)、人均工业烟尘(粉尘)排放量<sup>①</sup>(FCpfI)作为第一组联立方程中大气污染的替代指标,用2013—2016年30个省会城市空气质量达到二级标准及以上的天数(AQI值为0~100的天数)<sup>②</sup>(Days)作为第二组联立方程中大气污染的替代指标,同样采用3SLS计量回归方法进行稳健性检验。数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》。

由稳健性检验结果<sup>③</sup>可知,人均SO<sub>2</sub>工业排放量和人均工业烟尘(粉尘)排放量与人均GDP之间均存在倒U型的EKC关系,拐点值分别为28732元和33116元,这和使用CO、SO<sub>2</sub>、PM10大气污染浓度监测指标进行回归所得到的估计结果相近,说明工业点源污染已经得到了有效控制。空气质量达到二级标准及以上的天数与人均GDP之间存在正U型曲线关系,即随着人均GDP的增加,空气质量先变差后变好,拐点值为307736元。AQI指标主要反映的是首要污染物PM2.5的污染情况,这个拐点值与采用PM2.5污染浓度监测指标所估计出的结果相近,非常符合预期。值得一提的是,回归结果同样显示降雨量越多空气质量越好,这说明当PM2.5污染减少的时候,未必是人为的治理和控制取得了成效,而是雨水多造成的。

## 五、结论性评述

本文选用六种大气污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10、PM2.5、CO和O<sub>3</sub>),通过构建包含污染方程与产出方程的联立方程组,实证分析城市大气污染与人均GDP之间的关系。与大多数文献基于单方程估计相

<sup>①</sup>《中国城市年鉴》统计数据显示:2010年及以前公布的数据均为工业烟尘排放量,2011年及之后公布的数据为城市工业粉尘排放量。

<sup>②</sup>关于AQI的计算,我们先分别计算出各个污染物的分指数IAQI(均在0~500之间,数值越大说明污染越严重),数值最大的那个IAQI为最终报告的AQI值,即AQI反映了首要大气污染物的污染程度。

<sup>③</sup>限于篇幅,本文未列示稳健性检验结果,数据备索。



比,本文不仅同时考虑了经济增长与大气污染的双向反馈作用,而且选取了更能反映空气质量真实情况的城市大气污染浓度监测数据,得到了更加客观可信的结论:(1)回归结果验证了倒U型EKC的存在,而且CO、SO<sub>2</sub>和PM10已经越过污染最大值的临界点,即处于随着人均GDP的增加大气质量得到改善的阶段,这说明我国为减少大气污染,减少工业点源大气污染的环境管制、产业结构升级、公共政策(城市绿化、公共交通建设等)等防治措施已经取得了重大成效。(2)总体上我国仍然是世界上大气污染比较严重的国家之一,NO<sub>2</sub>和PM2.5污染尚未越过拐点,即使是已经越过拐点的SO<sub>2</sub>和PM10,许多城市的空气质量并没有达到我国的环境标准。此外,随着污染削减边际成本的上升,为减少污染浓度所需投入的防治成本将越来越大,这使得我国大气污染的减排面临很大难度。(3)在我国,由工业点源排放引起的SO<sub>2</sub>和PM10污染问题已经得到了一定控制,而NO<sub>2</sub>和PM2.5污染特别是PM2.5污染涉及及家用汽车普及引起的移动污染源污染,因此这一问题仍然比较难以解决。

根据本文所得结论,我们提出如下政策建议:

第一,从“工业减排总量控制”到“复合型大气污染控制”。长期以来,我国采取工业污染源头的排放总量控制管理模式,这是“谁污染谁治理”或“谁污染谁付费”的污染治理原则的体现。考虑到许多城市的SO<sub>2</sub>和PM10排放仍然没有达标这一事实,今后通过制定更加严格的排放标准和加强行政管理来控制工业点源排放仍然是大气污染防治的重要措施。随着车辆尾气排放成为大气污染的主要源头之一,以减少大气污染浓度和改善空气质量为核心的“复合型大气污染控制”模式逐渐成为必然。值得一提的是,限制车流量的措施只是权宜之计,长期来看还需要提高车用汽油的质量和燃烧效率或普及新能源汽车。

第二,“命令-控制”与“经济激励”的综合运用。环境污染的外部性为政府干预提供了理论依据,“命令-控制”型的强制手段仍然是控制点源污染的有效途径,但污染排放管制和标准的设定需符合经济规律,超过企业在现有技术条件下能够承受的污染削减成本的过于严格的排放标准反而会导致弄虚作假和腐败问题的发生。关于非点源污染的控制,可以采取税收、补贴等“经济激励”型手段,例如在日本,购买混合动力车的车辆购置税减半以及排气量0.66L以下的车辆税减免等措施较好地促进了省油车辆的普及。当前,为了减少燃煤使用所造成的大气污染和温室气体排放问题,我国对光伏产业和新能源车的补贴金额巨大,但补贴发放显得粗放,缺乏监管且审核不力,导致骗补现象丛生。诚然,要改变使用化石燃料支撑起来的现代工业文明方式,需要付出巨额代价,投资失败难以避免,因此国家应该鼓励创新、宽容失败,同时要尽可能地提高财政补贴的效率。

第三,环境伦理教育的促进。与温室气体类似,PM2.5的减排也相当于一种“纯公共物品”的提供,“搭便车”行为难以避免,通过教育促进人们自发的减排行动是成本最低的减少移动污染源的手段。政府虽然无法直接干预人们的生活方式,但可以通过环境伦理教育和宣传来转变人们的思维方式,促使人们成为绿色出行和低碳生活的环保主义者。

归根结底,大气污染源于化石燃料的大量使用,这涉及现代工业文明方式和生活方式,不是一朝一夕能够实现转变的。当前,减少燃煤使用和提高能源效率仍是大气污染防治的主要手段。氢燃料电池等新能源技术的突破,无疑将促使大气污染浓度从上升转为下降的拐点提前到来。考虑到环境技术趋于不断创新中,今后使用最新的样本数据检验经济增长和大气污染的相互作用和拐点值仍然是一个非常值得研究的课题。此外,我国幅员辽阔,不同区域的经济发展的不平衡,能源消费结构亦存在较大差异,但目前因受到数据获得的局限,本文未能进一步作区域差异分析,这将是今后深入研究的一个方向。

#### 参考文献:

[1] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. NBER Working Papers, 1995, 110(2):353-377.

- [2] 杨海生,贾佳,周永章,等. 贸易、外商直接投资、经济增长与环境污染[J]. 中国人口·资源与环境,2005(3):99-103.
- [3] 刘燕,潘杨,陈刚. 经济开放条件下的经济增长与环境质量——基于中国省级面板数据的经验分析[J]. 上海财经大学学报,2006(6):48-55.
- [4] 张学刚. 环境库兹涅茨曲线理论批评综述[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2009(5):51-56.
- [5] 陈向阳. 传统经济增长方式导致环境危机的经济学分析[J]. 南京审计学院学报,2015(1):13-20.
- [6] 黄菁. 环境污染、人力资本与内生经济增长:一个简单的模型[J]. 南方经济,2009(4):3-11.
- [7] 彭水军,包群. 环境污染、内生增长与经济可持续发展[J]. 数量经济技术经济研究,2006(9):114-126.
- [8] 彭水军,包群. 经济增长与环境污染——环境库兹涅茨曲线假说的中国检验[J]. 财经问题研究,2006(8):3-17.
- [9] 包群,彭水军. 经济增长与环境污染:基于面板数据的联立方程估计[J]. 世界经济,2006(11):48-58.
- [10] Georgescu-Roegen N. The entropy law and the economic process[M]. Cambridge:Harvard University Press,1971.
- [11] Ayres R. Comments on georgescu-roegen[J]. Ecological Economics, 1997, 22(3):285-287.
- [12] 赵细康,李建民,王金营,等. 环境库兹涅茨曲线及在中国的检验[J]. 南开经济研究,2005(3):48-54.
- [13] 黄菁. 环境污染与城市经济增长:基于联立方程的实证分析[J]. 财贸研究,2010(5):8-16.
- [14] 牛海鹏,朱松,尹训国,等. 经济结构、经济发展与污染物排放之间关系的实证研究[J]. 中国软科学,2012(4):160-166.
- [15] 王兴杰,谢高地,岳书平. 经济增长和人口集聚对城市环境空气质量的影响及区域分异——以第一阶段实施新空气质量标准的74个城市为例[J]. 经济地理,2015(2):71-76.
- [16] 王敏,黄滢. 中国的环境污染与经济增长[J]. 经济学(季刊),2015(2):557-578.
- [17] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. 经济研究,2004(10):35-44.

[责任编辑:王丽爱]

## Economic Growth and Air Pollution: Simultaneous-Equation Model on Basis of Urban Panel Data

GAO Wen, YANG Xin

(School of Economics, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)

**Abstract:** Using the pollution data of PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> in 104 cities from 2003 to 2015 and pollution data of PM<sub>2.5</sub>, CO and O<sub>3</sub> in 30 provincial capitals from 2013 to 2016 as air pollution variables, constructing simultaneous equations considering the interaction between growth and pollution, this paper tests the existence of “the inverted U-shape” Environmental Kuznets Curve(EKC) with the increase of per capita GDP, based on Three-stage Least Square method (3SLS). The results show that the relationship between concentration of the six kinds of air pollutants and economic growth presents inverted U-shaped curves. The pollution concentration of SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO and O<sub>3</sub> has crossed the maximum-pollution turning point, which indicates that China has made a great achievement in controlling the point source air pollutants in recent years. On the other hand, the pollution concentration of NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> has not crossed the maximum-pollution turning point, that is, the degrees of pollution are still on the increasing stages with the economic growth.

**Key Words:** air pollution; economic growth; Environmental Kuznets Curve(EKC); energy consumption; environmental pollution; sustainable development; industrial structure; population scale