

# 中国城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度影响的门槛效应研究

严雅雪 李 锴\*

**摘要:** 本文运用面板门槛效应模型,采用近十年PM<sub>2.5</sub>浓度省际面板数据,将经济增长、能源结构和产业结构作为门槛变量,实证检验了城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响。研究表明,城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度存在正向非线性的影响,并具有显著的门槛特征:当以人均实际GDP为门槛变量时,在越过门槛值之前,经济增长对城市化和PM<sub>2.5</sub>浓度的关系产生正向影响,但越过门槛值之后,经济增长对二者关系的正向影响减弱;以煤炭消费占比为门槛变量时,煤炭消费占比对城市化水平和PM<sub>2.5</sub>浓度为正向影响,但是越过门槛值之后正向影响增大,呈现“阶梯式增长”特征;以第二产业占比为门槛变量时,第二产业占比对城市化水平与PM<sub>2.5</sub>浓度关系产生正向影响,但是越过门槛值之后正向影响减小,呈现下降的趋势。同时,本文的研究也表明,在东、中、西部不同的省份之间还存在着显著的空间差异,说明城市化在不同的地区和不同发展阶段,对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响存在时空上的异质性。

**关键词:** 城市化;PM<sub>2.5</sub>浓度;门槛效应

## 一、引言

中国的城市化进程处在发展十分迅速的阶段,城市人口比重从1978年的17.92%升至2014年的54.77%。三十多年来,城市人口的快速增长、经济的高速扩张、化石能源消费的提高、重工业集聚以及产业高度集中导致了持续地、大量地向大气排放细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>),使中国PM<sub>2.5</sub>浓度逐年增高,雾霾污染现象频发。“哈佛六城市研究”发现,城市空气中的PM<sub>2.5</sub>浓度与人群寿命缩短在统计学意义上高度相关。迫于大气污染问题的严峻性和严重性,中国政府高度重视大气污染问题,在2013年的政府工作报告中将治理PM<sub>2.5</sub>作为政府的政治任务,并与政绩考核挂钩。

\*严雅雪,武汉大学经济与管理学院,邮政编码:430072,电子信箱:Yan\_yaxue@126.com;李锴,武汉大学经济与管理学院,邮政编码:430072,电子信箱:likai\_whu@126.com。

本文研究受国家自然科学基金青年科学基金项目“国际贸易对我国碳排放效率影响及政策研究”(71303176)和教育部人文社会科学研究青年基金项目“基于碳价格映射的中国工业能源结构优化研究”(13YJC790073)的资助。感谢匿名审稿人提出的宝贵建议,文责自负。

因此,揭示城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响机制并评估其影响程度,对于政府低成本地治理大气污染、降低PM<sub>2.5</sub>浓度具有重要意义。

另一方面,城市化对空气质量也可能产生积极的正面作用,当城市化上升到一定程度时,会通过人口集聚、促进生产技术创新来降低PM<sub>2.5</sub>浓度。基于此,本文构建了一个非线性门槛面板模型来检验城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响是否会发生结构性突变。本文将表征经济发展特征三个指标——经济增长、能源结构和产业结构作为门槛变量,利用中国2001–2010年29个省份的面板数据<sup>①</sup>,在Hansen(1999)的面板门槛效应模型的基础上实证检验中国各省份城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的门槛效应影响。通过实证分析,主要论证三个问题:(1)中国城市化水平与PM<sub>2.5</sub>浓度的关系曲线是否具有非线性的门槛特征;(2)门槛变量是否是PM<sub>2.5</sub>浓度升高的重要因素;(3)控制变量的引入是否对城市化水平与PM<sub>2.5</sub>浓度之间的关系产生影响。

## 二、文献综述

城市化与环境污染的研究属于经济增长和环境约束相互关系研究的一个分支领域。国外较早开始对城市化与生态环境关系的研究。Grossman和Krueger(1994)提出了环境库兹涅茨曲线(EKC)的概念,即环境质量会伴随最初的经济增长而恶化,但达到某个临界值时,环境污染的程度开始有所缓解,呈现出倒“U”型发展轨迹。EKC理论为经济增长和环境污染两者关系的研究奠定了坚实的理论基础。国内有关城市化对环境污染影响的研究主要分为理论和实证两个方面。在理论研究方面,盛广耀(2009)认为经济发展和资源消费之间呈倒“U”型关系,而这与城市化和资源环境消费强度之间的回归曲线在逻辑上是一致的,这一研究为经济增长和环境污染、城市化水平和环境污染之间的研究提供了理论支持。在实证研究方面,主要分为线性影响和非线性影响的实证研究。线性影响研究方面,黄金川和方创琳(2003)提出城市化与环境质量之间呈现负相关,城市化主要是通过人口、企业和交通活动中排放污染来形成对生态环境的“胁迫”。非线性影响方面,杜江和刘渝(2008)认为城市化与烟尘和粉尘之间存在“U”型曲线关系。

在有关城市化对环境污染非线性影响机制的文献中,大多是从城市化对资源消耗或碳排放的层面进行研究。例如从不同时期的角度,Pearce(1990)根据城市发展的不同阶段分析所出现的主要资源消耗问题,并由此提出了城市发展阶段环境对策模型,认为不同时期内城市化和资源消耗之间的相互作用具有异质性特征。郭郡郡和刘成玉(2012)认为导致城市化对碳排放量呈现非线性影响的因素有很多,其整体作用的程度与城市化发展阶段以及区域经济发展阶段相关。但是,Xu和Lin(2015)提出,在城市化对碳排放的非线性影响的研究中,大多忽视了表

<sup>①</sup>考虑到数据的可得性,本文的研究时间段选取为2001–2010年,PM<sub>2.5</sub>监测数据中不包括重庆、香港、澳门和台湾,城市化水平的数据中不包括西藏。

征经济发展的变量对二者之间关系的影响程度和方向。

经济学领域有关PM<sub>2.5</sub>的研究主要集中在PM<sub>2.5</sub>形成的影响因素分析以及经济增长、城市化与PM<sub>2.5</sub>浓度的关系研究。依据不同研究方法,对PM<sub>2.5</sub>的影响因素研究又可分为三个部分。一是较为经典的结构分解分析法,即将影响PM<sub>2.5</sub>排放的因素分解为经济增长、资本形成、出口、产业结构以及排放强度等因素。Guan等(2014)利用投入-产出模型框架和结构分解法发现,资本形成是影响PM<sub>2.5</sub>排放的最主要因素,出口也是影响PM<sub>2.5</sub>排放的重要因素。冯少荣和冯康巍(2015)采用非参数统计结合多元回归的方法以及多元统计分析中的因子分析法,提出对雾霾严重程度有显著影响的因素包括:城市面积、第二产业占比、单位面积机动车辆数量等。二是综合评价模型和一般均衡模型。Meng等(2015a)采用综合评价模型,发现在中国钢铁行业中,对PM<sub>2.5</sub>排放影响最大的是指挥和控制仪器的效率。Meng(2015b)采用投入-产出模型框架,分析了不同产业间污染物排放的比例,提出国内贸易也是导致雾霾加重的重要因素。魏巍贤和马喜立(2015)采用CGE模型,以《大气污染防治行动计划》所设立的空气质量控制目标为基准情景,结合中国能源结构调整、技术进步与雾霾治理的政策组合进行模拟,发现能源结构与技术进步是影响雾霾污染程度的关键因素。三是计量分析法。国内研究中采用计量分析法的较多,部分研究采用空间计量法,证明了外商直接投资与中国雾霾污染的空间相关性(冷艳丽、杜思正,2015)。马丽梅和张晓(2014)认为省份之间的雾霾污染存在空间交互影响,而且产业转移加深了地区间经济及雾霾污染之间的空间联动性。Xu等(2016)采用STIRPAT模型发现影响PM<sub>2.5</sub>浓度的主要驱动力是城市化、煤炭消费、技术进步和能源效率。

在城市化对雾霾污染程度以及PM<sub>2.5</sub>浓度的相关性研究中,较多关注线性的影响因素,而较少关注非线性的影响因素。Xu等(2016)认为城市化与雾霾污染严重程度之间呈正“U”型关系,彭迪云等(2015)和刘伯龙等(2015)认为中国城市化与雾霾污染严重程度之间存在非线性关系。但是国内关于城市化水平和PM<sub>2.5</sub>浓度非线性影响的研究仍在初始阶段,而且这类研究仍然较多地忽视了表征经济发展的变量对二者之间非线性关系的影响程度和方向。

综上所述,国内外已有研究具有两个方面的局限性:(1)大部分文献集中讨论城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的线性化影响,隐含地假设了城市化在所有发展阶段对PM<sub>2.5</sub>浓度影响都是同质的,忽视了不同城市化发展阶段下,对PM<sub>2.5</sub>浓度存在潜在的“门槛效应”或“临界效应”。(2)多数研究重点集中在中国的部分地区城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响,较少全面覆盖到中国各省份,忽视了城市化对不同地区PM<sub>2.5</sub>浓度的影响会与样本有关,即所选样本地区的经济发展、能源结构和产业结构均会对二者关系产生影响。据此,本文在已有研究基础上,进行了以下三个方面的进一步研究:一是研究了城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度存在的非线性影响;二是采用Hansen(1999)的面板门槛模型,以数据内生特征来划分不同区间,通过数据自动识别来确定门槛值,解决了一般线性模型解释力不强以及门槛条件设定过于主观和随意的问题;三是以全国29个省份为研究对象,研究城市化对

PM<sub>2.5</sub>浓度整体的影响程度和发展方向,克服了仅对中国部分地区进行研究的局限。

### 三、模型设定与指标选取

#### (一)城市化与PM<sub>2.5</sub>浓度的STIRPAT模型的构建

IPAT等式作为研究人类活动对环境影响的模型,已经被广泛地应用到分析环境变化驱动因素的研究中。本文通过IPAT模型来分析出本地区大气污染影响因素对PM<sub>2.5</sub>浓度影响的弹性系数。IPAT方程的一般形式是:

$$I = PAT \quad (1)$$

(1)式中,  $I$  为环境变量,  $A$  为人均财富,  $P$  为人口规模,  $T$  为技术水平。York等(2003)将IPAT模型用随机形式表示,建立了STIRPAT模型,STIRPAT模型的表达式为:

$$I = aP^b A^c T^d \mu \quad (2)$$

(2)式中,  $a$  为模型系数,  $I$ 、 $P$ 、 $A$ 、 $T$  分别代表环境压力、人口规模、富裕程度、技术水平,  $\mu$  为误差项。STIRPAT模型中指数的引入可用于分析各个环境变量的影响因素对环境变量的非比例影响。在实证分析中,通常对其两边同时取对数,得到线性形式的模型:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln \mu \quad (3)$$

模型(3)中的回归系数可以理解为各个自变量与因变量之间的弹性系数,即当保持其他自变量不变时,某一个自变量变化1%所产生的因变量变化的百分比。STIRPAT模型不仅克服了IPAT模型各影响因素的线性化和系数单一化方面所存在的局限,而且STIRPAT在考察某变量变化时,可以控制其他解释变量对因变量的影响。同时,STIRPAT模型允许对各影响因素进行适当分解,为研究各种环境因素对环境变量的影响提供了理论依据。STIRPAT模型可以通过控制其他变量对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响,如:人均实际GDP、第二产业比重变化、技术进步、能源结构、贸易开放度和人口密度的变化对因变量的影响,克服了城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度所产生的内生性影响。因此,本文以PM<sub>2.5</sub>浓度作为环境压力对象,在STIRPAT模型中加入核心解释变量——城市化水平,来考察城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响,这样兼顾了理论和实证的一致性及必要性。基于以上分析,扩展后的面板STIRPAT模型为:

$$\begin{aligned} \ln pm_i = & \eta_i + \lambda_t + \ln a + \beta_1 \ln urb_{it} + \beta_2 \ln agdp_{it} + \beta_3 \ln rd_{it} + \beta_4 \ln es_{it} + \beta_5 \ln ind_{it} + \\ & \beta_6 \ln pd_{it} + \beta_7 \ln fdi_{it} + \beta_8 \ln open_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中,  $i$  为省份截面单元,  $t$  为时间年份,  $\ln agdp_{it}$ 、 $\ln rd_{it}$ 、 $\ln es_{it}$ 、 $\ln ind_{it}$ 、 $\ln open_{it}$ 、 $\ln pd_{it}$  和  $\ln fdi_{it}$  分别为区域  $i$  在  $t$  时期人均实际GDP、技术进步、能源结构、产业结构、贸易开放度、人口密度、FDI的观测值,  $\eta_i$  表示时间非观测效应,  $\lambda_t$  表示地区非观测效应,  $\varepsilon_{it}$  为与时间和地区都无关的随机误差项。

## (二) 面板门槛模型

门槛效应是指由于一个经济参数达到某一个特定的值而引起另一个经济参数发生方向上的变化或数量上变化的现象,这个解释变量的临界值即为门槛值(彭迪云等,2015)。通过加入二次项、交互项或者依照经验判断得到的门槛值存在稳健性不强的特点。例如,使用在模型中加入二次项或交互项方法考察非线性关系时,二次项通常会与一次项产生较强的相关性,导致模型存在多重共线性,从而影响回归结果的稳健性。因此,本文在 Hansen(1999)的门槛模型基础上,将 PM<sub>2.5</sub> 浓度作为因变量,城市化水平作为自变量,研究城市化水平对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的非线性影响,根据导向性、科学性、可得性、完备性和可比较性的原则,选取经济增长、产业结构、能源结构为门槛变量,选取外商直接投资、人口密度、技术水平和实际工资水平四个指标为控制变量。Hansen 认为门槛变量既可以是其中一个解释变量,也可以作为一个独立的门槛变量。所以,在选取其中一个门槛变量时,另外两个门槛变量仍作为控制变量。即当经济增长为门槛变量时,外商直接投资、人口密度、技术水平、实际工资水平、产业结构和能源结构为控制变量。当产业结构为门槛变量时,经济增长、外商直接投资、人口密度、技术水平和能源结构为控制变量。当能源结构为门槛变量时,经济增长、外商直接投资、人口密度、技术水平和产业结构为控制变量。(4)式为不考虑门槛效应的线性模型,结合本文研究重点,借鉴 Hansen 提出的面板门槛模型理论,本文构建如下回归模型:

$$Y_{it} = \beta_0 x_{1it} + \beta_1 x_{2it} I(q_{it} \leq \gamma) + \beta_2 x_{2it} I(q_{it} > \gamma) + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

(5)式中,  $Y_{it}$  为被解释变量,本文设定为 PM<sub>2.5</sub> 浓度值,其中  $i$  代表观察个体,  $t$  代表时间,  $x_{1it}$  代表除  $x_{2it}$  外对解释变量存在明显影响的控制变量,本文中的控制变量包括人均实际 GDP、第二产业比重、实际工资水平、人口密度、技术水平、能源结构和外商直接投资;  $x_{2it}$  为核心解释变量,本文中设定为城市化水平;  $q_{it}$  代表门槛变量,本文中设定人均实际 GDP、第二产业比重和煤炭消费比重,  $\gamma$  代表估计的门槛值,  $\beta_0$  为控制变量系数,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为不同区间内的门槛变量系数,  $I$  为指示函数,即相应的括号内条件成立时取值为 1,条件不成立时则取值为 0;  $\varepsilon_{it}$  为随机干扰项。

对于任意门槛值  $\gamma$ ,可以通过求残差平方和得到各参数的估计值。而最优门槛值应该令  $SSR(\gamma)$  在所有残差平方和内最小,即:

$$\gamma_1 = \arg \min e_i(\gamma_1) \quad (6)$$

满足式(6)的观测值便是门槛值。当门槛值确定之后,需要检验两个问题:一是门槛效应的显著性,二是门槛估计值的真实性。对于是否存在门槛效应,检验以下原假设:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 \quad (7)$$

如果此原假设成立,则不存在门槛效应。那么  $\gamma$  取任何值对模型都没有影响,故参数  $\gamma$  不

可识别。如果原假设不成立,则有:

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \quad (8)$$

如果拒绝原假设,那么认为存在门槛效应,就可以对门槛值进行检验,并再确定门槛值的置信区间。此时,使用似然比检验  $LR$  统计量:

$$LR = \frac{S_0 - S_1(\gamma)}{\gamma^2} \quad (9)$$

(9)式中,  $S_0$  代表原假设  $H_0$  成立下的残差平方和,由于在原假设  $H_0$  成立的情况下,  $LR$  统计量为非标准分布。而 Hansen(1999)所提出的“自举法”(Bootstrap)可以通过构建渐近分布构造其P值。本文的P值则使用此方法,在确定了某个变量有“门槛效应”之后,接着便通过似然比统计量展开检验,从而确定它的门槛置信区间。

### (三)变量选择的说明和数据来源

本文使用2001-2010年我国29个省份的面板数据,被解释变量为PM<sub>2.5</sub>浓度,门槛变量为经济增长、能源结构和产业结构,核心解释变量为城市化水平。

#### 1. PM<sub>2.5</sub>浓度

在大气污染物排放中,本文选择细颗粒物的浓度(PM<sub>2.5</sub>浓度)作为表征大气环境质量的变量,主要是因为以往研究中,较多采用的是某一种污染物指标、几种污染物的指标、加权综合污染物指标来衡量大气污染状况,虽然环境污染物包括多种污染物排放指标,但是采用几个污染物指标或者加权综合污染物指标用来表征环境污染的弊端在于难以找到客观权威的加权重,以及难以区分各种污染物排放的相关程度。而且,PM<sub>2.5</sub>已经成为我国雾霾污染的主要来源,加之较多研究证明了PM<sub>2.5</sub>浓度与人群寿命缩短在统计学意义上具有高度相关性。因此,本文选取单一指标(PM<sub>2.5</sub>浓度)来代表雾霾污染程度,使研究结果更有针对性。和其他环境要素相比,PM<sub>2.5</sub>浓度的外溢性更强,解决了本文的内生性问题。由于中国环境保护部发布新的《环境空气质量标准》较晚,2012年才开始监测和统计PM<sub>2.5</sub>相关数据。鉴于中国数据的滞后性,本文的PM<sub>2.5</sub>数据来源于巴特尔纪念研究所和国际地球科学信息中心网站<sup>①</sup>。

#### 2.核心解释变量:城市化水平(URB)

城市化是通过人口的集聚、产业结构的变化、城市用地的扩展、消费模式的改变等,对PM<sub>2.5</sub>浓度产生影响。本文采用城市人口占总人口之比作为城市化水平指标来考察其对PM<sub>2.5</sub>浓度的非线性影响。

#### 3.门槛变量及控制变量

(1)产业结构(IS)。城市化进程的加快导致了产业结构中第二产业占比增大,第二产业比

<sup>①</sup> <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/sdei-global-annual-avg-pm2-5-2001-2010>。

重增加是产生大量工业废气排放的一个主要原因。本文采用第二产业生产总值占地区生产总值的比重作为衡量产业结构的指标。

(2)能源消费结构(ES)。从长期来看,魏巍贤和马喜立(2015)认为降低 $PM_{2.5}$ 浓度的基本前提条件是降低煤炭在一次能源消费中的比例。本文采用原煤消费量占总能源消费量的比例作为衡量能源结构的指标。

(3)人均实际GDP(AGDP)。人均地区生产总值代表了各省份的经济增长水平。本文采用的人均国内地区生产总值数据是以2000年为基年经过GDP平减指数调整后的人均实际GDP,来说明不同经济规模下,城市化对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。

(4)人口密度(PD)。城市化过程中由于城市人口的增长,城市人口密度增加,从而导致对能源需求的剧增、城市的汽车保有量的剧增和建筑工地产生扬尘的扩散加剧等。因此,本文将人口密度作为控制变量之一,人口密度数据采用各省份人口数除以该省的地域面积计算得到。

(5)技术水平(Tech)。本文用来衡量各省份技术水平的指标是经GDP平减指数调整后的各地区技术市场成交额。

(6)外商直接投资(FDI)。较多文献发现了外商直接投资与中国的雾霾污染程度呈正相关(冷艳丽、杜思正,2015)。本文采用经GDP平减指数调整后的实际外商投资额来衡量外商投资额的流量变化。

(7)实际工资水平(AWAGE)。为避免重复控制被解释变量,该控制变量仅在经济增长作为门槛变量时使用。本文采用的是经过以2000年为基年的GDP平减指数调整后的各省份人均实际工资水平来表征经济发展水平。

以上控制变量数据均来源于《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和《中国科技统计年鉴》以及中经网统计数据库。

## 四、实证结果分析

### (一)门槛模型检验

门槛模型检验包括门槛效应的显著性检验与门槛估计值的真实性检验,检验过程中运用“自抽样法”构建渐进分布和似然比统计量 $LR$ 。门槛模型检验的目的在于检验门槛估计参数是否显著。以经济增长、能源结构和产业结构为门槛变量,依次假定存在1、2、3个门槛值的门槛回归模型,经过500次反复抽样得到具体F值和P值(见表1)。结果发现,经济增长单一门槛模型检验在1%水平下显著,双重门槛模型检验在10%水平下显著,三重门槛模型检验在5%水平下显著;能源结构单一门槛模型检验在5%水平下显著,双重门槛模型检验在1%水平下显著,三重门槛模型检验在10%水平下显著;产业结构单一门槛模型检验在1%水平下显著,双重门槛模型检验不显著,三重门槛模型检验在5%水平下显著。由此可见,单门槛在三个门槛模型检验

中不仅影响系数最为显著(0.002,0.012,0.002),而且具有简洁清楚的优点,故本文选择经济增长、能源结构、产业结构作为三个门槛变量,估计得到经济增长的单一门槛值为87811.703元/人,置信区间为[77000,110000];能源结构的单一门槛值为44.6%,置信区间为[0.257,0.865];产业结构的单一门槛值为56.52%,置信区间为[0.564,0.569]。

表1 门槛估计值检验

门槛变量	单一门槛模型			双重门槛模型			三重门槛模型		
	门槛估计值	F值	P值	门槛估计值	F值	P值	门槛估计值	F值	P值
AGDP	87811.703	10.595***	0.002	2.9e+04 8.8e+04	6.739*	0.064	13000 29000 87811.7	4.809**	0.044
ES	0.446	9.240**	0.012	0.897 0.803	9.726***	0.016	0.446 0.897 0.803	4.223*	0.054
IS	0.5652	19.796***	0.002	0.306 0.565	1.341	0.262	0.306 0.447 0.565	4.963**	0.032

注:(1)P值和临界值均为采用“自抽样法”反复抽样500次得到的结果;(2)\*\*\*、\*\*和\*分别表示在1%、5%和10%水平下显著,下同。

通过绘制似然比函数图,我们可以清楚地看到不同模型设定下门槛效应的直观表现,即门槛值的估计以及置信区间的构造过程。从图1、2、3<sup>①</sup>中我们可以看出,不论经济增长、能源结构和产业结构哪一个作为门槛变量,城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的门槛效应都是显著存在的。由于门槛参数的估计值是LR等于零时的取值,所以在三个单一模型中的门槛估计值分别为:87811.703、0.446和0.5652,门槛值的识别为后续计量参数的估计提供了基础。

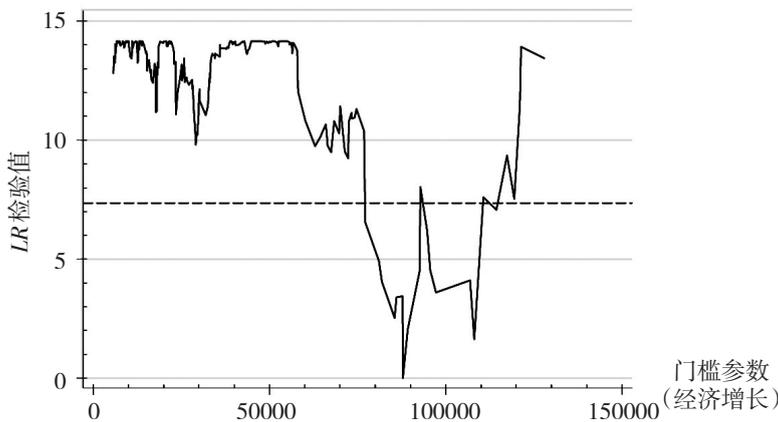


图1 以经济增长为门槛变量的门槛估计值

①图中实线为随着 $\gamma$ 变动的似然率走势,虚线为根据Hansen计算的95%的置信水平下的渐近临界值。

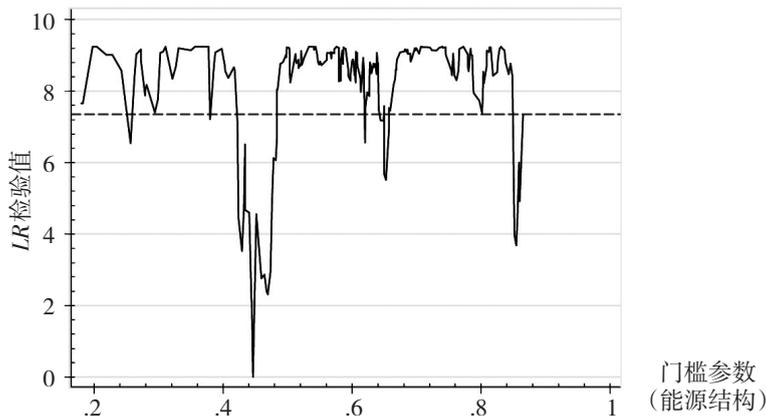


图2 以能源结构为门槛变量的门槛估计值

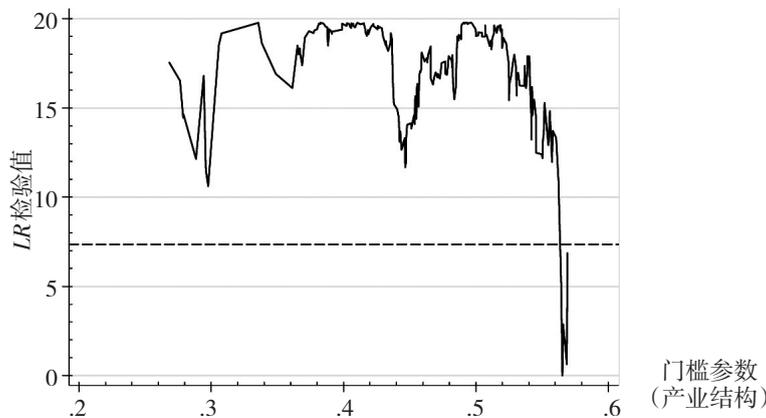


图3 以产业结构为门槛变量的门槛估计值

## (二) 门槛效应模型估计

得到门槛值以后,我们对门槛参数进行估计。下面分别估计了以经济增长、能源结构和产业结构为门槛变量的门槛效应模型。结果显示,在这三个门槛变量的模型中,城市化对 $PM_{2.5}$ 浓度的效应均存在单门槛影响,且单一门槛值的影响系数均在5%水平下显著。

从表2可以看出,以经济增长为门槛变量时,即当人均实际GDP低于87811.703元/人时,城市化水平每增长1%, $PM_{2.5}$ 浓度增加16.64微克/立方米,且在10%水平下显著;当人均实际GDP高于87811.703元/人时,城市化水平每增长1%, $PM_{2.5}$ 浓度会增加12.94微克/立方米,但不显著。表明了随着经济发展水平的提高并超过一定的门槛值时, $PM_{2.5}$ 的边际浓度将会递减。结果证明在越过门槛值之前,人均实际GDP对城市化和 $PM_{2.5}$ 浓度的关系产生正向影响;但越过门槛值之后,由于城市化水平的提升,结构效应、技术效应和政策效应日益凸显,使得经济增长对二者关系的正向影响减弱。

以能源结构为门槛变量时,即当煤炭占总能源消费比例低于44.6%时,城市化水平对 $PM_{2.5}$

浓度的影响系数为16.36,即城市化水平每增长1%,PM<sub>2.5</sub>浓度增加16.36微克/立方米,且在10%水平下显著;当煤炭占总能源消费比例高于44.6%时,城市化水平每增长1%,PM<sub>2.5</sub>浓度增加20.41微克/立方米,且在5%水平下显著。所以,以煤炭消费占比为门槛变量时,煤炭消费对城市化水平和PM<sub>2.5</sub>浓度产生正向影响,但是越过门槛值之后正向影响增大,呈现“阶梯式增长”特征。表明了随着煤炭消费占比的提高并超过一定的门槛值时,PM<sub>2.5</sub>的边际浓度将会递增。也就是说,能源结构的优化是PM<sub>2.5</sub>治理的关键。

以产业结构为门槛变量时,当第二产业比重低于56.52%时,城市化水平每增长1%,PM<sub>2.5</sub>浓度增加22.23微克/立方米,且在5%水平下显著;当第二产业高于56.52%时,城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响系数为15.98,即城市化水平每增长1%,PM<sub>2.5</sub>浓度增加15.98微克/立方米,且在10%水平下显著。所以,在以第二产业占比为门槛变量时,第二产业对城市化水平与PM<sub>2.5</sub>浓度具有正向影响,但是,越过门槛值之后正向影响减小,呈现下降的趋势。表明随着第二产业占比的提高并超过一定的门槛值时,PM<sub>2.5</sub>的边际浓度将会递减。在控制经济增长和能源结构等变量的情况下,第二产业占比的提高会产生集聚和规模效应,而产业集聚和规模效应能在一定程度上减少PM<sub>2.5</sub>浓度的增幅,一些学者的研究也表明产业的集聚水平与我国工业污染的排放是负相关,产业集聚是工业占比提高与环境污染之间的矛盾得以缓解的解决方案之一(李顺毅、王双进,2014;杨仁发,2015)。

在其他控制变量中,外商直接投资在回归分析中影响系数均显著,而且外商直接投资的估计系数在三个门槛效应模型中都为正,这表明外商直接投资对PM<sub>2.5</sub>浓度的升高具有加剧作用,印证了“污染天堂假说”。

表2 门槛模型参数估计

门槛变量	经济增长	能源结构	产业结构
门槛值	单一门槛 (87811.703)	单一门槛 (0.446)	单一门槛 (0.5652)
URB	16.64* ( $\gamma \leq 87811.703$ )	16.36* ( $\gamma \leq 0.446$ )	22.23** ( $\gamma \leq 0.5652$ )
	12.94 ( $\gamma > 87811.703$ )	20.41** ( $\gamma > 0.446$ )	15.98* ( $\gamma > 0.5652$ )
Tech	3.59e-08	6.66e-08	5.71e-08
FDI	0.796206**	0.734173*	0.812347**
PD	1.89517	2.410423	1.784889
AGDP	—	0.0000248	0.000369**
ES	0.74	—	-0.213476
IS	11.0554	9.1761	—
AWAGE	-0.0000676***	—	—
常数项	10.0682**	9.72324**	13.84722***
R <sup>2</sup> -within	0.1005	0.1130	0.1389
样本数	290	290	290

(三)2001-2010年各区间内门槛值的省份数目变化

依据面板门槛效应模型,我们得到经济增长、能源结构和产业结构的门槛值,依据门槛值——人均实际GDP、煤炭消费占比、第二产业占比将样本划分为不同的区间,通过不同区间内的省份数目的变化来观察各省份在城市化进程中的运行状态,可以从区域层面了解中国城市化的发展规律。

2001-2010年门槛区间内的省份数目变化统计结果如表3。从表中可以发现:

第一,人均实际GDP低于门槛值87811.703元/人的省份数目逐渐减少,由2001年的29个减少到2010年的19个,减少了10个省份,相应地,人均实际GDP高于门槛值87811.703元/人的省份数目逐渐增多,由2001年的0个增加到2010年的10个,即辽宁、北京、山东、广东、上海、福建、天津、内蒙古、浙江和江苏。这表明在样本期内大部分省份仍然处于门槛值以下。

第二,煤炭占总能源消费比例低于门槛值44.6%的省份数目逐渐增多,由2001年的4个增加至8个,即海南、辽宁、北京、广东、上海、黑龙江、天津和浙江;高于门槛值44.6%的省份数目逐渐减少,由2001年的25个减少至21个,但总体来看,在样本期内高于门槛值的省份是21个,表明中国大部分省份仍然是高煤炭消费地区。

第三,第二产业比重低于门槛值56.52%的省份数目由2001年的29个减少至2010年27个;高于门槛值56.52%的省份数目由2001年的0个增加到2010年的2个,即山西和河南。这表明在样本观察期内,中国大部分省份的第二产业占比还没有超过门槛值,说明中国绝大部分省份的产业结构在样本期内处于对PM<sub>2.5</sub>浓度影响最严重的阶段。

表3 2001-2010年门槛区间内省份数目变化统计结果

成长区间		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
AGDP	$\gamma \leq 87811.703$	29	29	29	29	29	27	26	25	22	19
	$\gamma > 87811.703$	0	0	0	0	0	2	3	4	7	10
ES	$\gamma \leq 0.446$	4	5	6	4	7	6	6	6	8	8
	$\gamma > 0.446$	25	24	23	25	22	23	23	23	21	21
IS	$\gamma \leq 0.5652$	29	29	29	29	27	25	26	25	28	27
	$\gamma > 0.5652$	0	0	0	0	2	4	3	4	1	2

结合对表2进行的分析,可以发现不同省份城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响不同,即东、中、西部省份的城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响存在空间异质性特点。当经济增长、能源结构、产业结构在满足一定门槛条件后,各省份的城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度为正面影响,但是越过门槛值以后,各省份城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度正面影响的程度不同。

通过表4可以看出,依据门槛值和各省份现实条件,把样本省份划分为东、中、西部三个区域,就2010年为时点的样本地区来看,城市化过程中,东、中、西部PM<sub>2.5</sub>浓度的影响因素以及对PM<sub>2.5</sub>浓度变化的影响程度存在明显差异:

第一,大部分东部地区北京、广东、辽宁、天津、山东、江苏、福建、浙江和上海,人均实际GDP高于门槛值87811.703元/人,城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度影响的弹性系数(以下简称影响系数)较低;同时大部分东部地区北京、天津、辽宁、上海、浙江、广东和海南煤炭消费占比低于门槛值44.6%,影响系数较低;东部地区第二产业比重都低于56.52%,影响系数较高。

第二,有42.10%的中部地区的人均实际GDP低于87811.703元/人,影响系数较高;大部分中部地区湖南、山西、江西、湖北、河南和安徽煤炭消费占比高于门槛值44.6%,影响系数较高;大部分中部地区吉林、黑龙江、安徽、江西、湖北、湖南第二产业比重都高于门槛值56.52%,影响系数较低。

第三,大部分西部地区的人均实际GDP低于门槛值87811.703元/人(除内蒙古外),影响系数高;同时西部地区煤炭消费占比都高于门槛值44.6%,影响系数高;所有西部地区第二产业比重都低于门槛值56.52%,影响系数高。

表4 不同省份城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度影响

门槛变量	门槛条件( $\gamma$ )	地区类型	对因变量影响	2010年地区类型
经济增长	$\gamma \leq 87811.703$	欠发达地区	强贡献度	东部地区(10.52%) 中部地区(42.10%) 西部地区(47.36%)
	$\gamma > 87811.703$	发达地区	弱贡献度	东部地区(90.00%) 中部地区(0.000%) 西部地区(10.00%)
能源结构	$\gamma \leq 0.446$	低煤炭比例地区	弱贡献度	东部地区(87.50%) 中部地区(12.50%) 西部地区(0.000%)
	$\gamma > 0.446$	高煤炭比例地区	强贡献度	东部地区(19.04%) 中部地区(33.30%) 西部地区(47.61%)
产业结构	$\gamma \leq 0.5652$	低第二产业地区	强贡献度	东部地区(40.74%) 中部地区(22.22%) 西部地区(37.03%)
	$\gamma > 0.5652$	高第二产业地区	弱贡献度	东部地区(0.000%) 中部地区(100.0%) 西部地区(0.000%)

## 五、主要结论和政策含义

中国城市化的发展会如何影响PM<sub>2.5</sub>浓度的升高,是关乎中国大气污染治理政策有效性的重要问题。本文的贡献在于较为全面地考察了中国城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的非线性影响以及表征经济发展的三个门槛变量对城市化与PM<sub>2.5</sub>浓度之间关系的影响程度。本文研究得出如下主要结论:

(1)城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响属于非线性的正向影响。在不同的门槛变量条件下,城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的贡献度会发生不同程度的改变,但方向仍然保持不变,证明了城市化水平与PM<sub>2.5</sub>浓度之间保持正向影响的稳健性较强。

(2)以能源结构为门槛变量时,越过门槛值之后城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度贡献度加快,呈现“阶梯式增长”特征;以经济增长和产业结构为门槛变量时,越过门槛值之后城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度贡献度减弱,开始呈现下降趋势。表明了不同的门槛变量对城市化和PM<sub>2.5</sub>浓度的影响不同,揭示出不同的城市化发展阶段对PM<sub>2.5</sub>浓度的作用存在着差异性。

(3)城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响存在空间的异质性,即具体到东、中、西部不同的省份,城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响存在差异。

本文的研究结论为中国正在实施的新型城镇化提供了清晰的政策含义:以经济增长、能源结构和产业结构的门槛值作为参照可以把城市化划分为不同的发展阶段,政府在城市化发展的不同阶段应当采取不同的措施来降低PM<sub>2.5</sub>浓度;由于城市化水平对PM<sub>2.5</sub>浓度在空间上存在异质性特点,东部地区的PM<sub>2.5</sub>浓度可以优先考虑优化产业结构达到有效地降低,而中西部地区治理PM<sub>2.5</sub>,则需要采取促进经济增长、调整能源结构以及优化产业结构等组合政策才能达到降低PM<sub>2.5</sub>浓度的目的。

## 参考文献:

- [1] 杜江,刘渝. 城市化与环境污染:中国省际面板数据的实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(6): 825-830.
- [2] 冯少荣, 冯康巍. 基于统计分析方法的雾霾影响因素及治理措施[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, (1): 114-121.
- [3] 郭郡郡,刘成玉. 城市化对碳排放量及强度的影响[J]. 城市问题, 2012, (5): 21-28.
- [4] 黄金川,方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 211-220.
- [5] 冷艳丽,杜思正. 产业结构、城市化与雾霾污染[J]. 中国科技论坛, 2015, (9): 49-56.
- [6] 李顺毅,王双进. 产业集聚对我国工业污染排放影响的实证检验[J]. 统计与决策, 2014, (8): 128-130.
- [7] 刘伯龙,袁晓玲,张占军. 城镇化推进对雾霾污染的影响——基于中国省级动态面板数据的经验分析[J]. 城市发展研究, 2015, (9): 23-28.
- [8] 马丽梅,张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J]. 中国工业经济, 2014, (4): 19-31.
- [9] 彭迪云,刘畅,周依仿. 长江经济带城市化发展对雾霾污染影响的门槛效应研究——基于居民消费水平的视角[J]. 金融与经济, 2015, (8): 36-43.
- [10] 盛广耀. 城市化模式与资源环境的关系[J]. 城市问题, 2009, (1): 11-17.
- [11] 魏巍贤,马喜立. 能源结构调整与雾霾治理的最优政策选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, (7): 6-14.
- [12] 杨仁发. 产业集聚能否改善中国环境污染[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(2): 23-29.
- [13] Grossman, G.M. and A.B. Krueger. Economic Growth and the Environment[J]. Social Science Electronic Publishing, 1994, (2): 353-377.
- [14] Guan, D.B., X. Su, Q. Zhang, G.P. Peters, Z. Liu, Y. Lei, and K.B. He. The Socioeconomic Drivers of China's Pri-

mary PM<sub>2.5</sub> Emissions[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(2): 24010.

[15] Hansen,B.E. Threshold Effects in Non-dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference[J]. Journal of Econometrics, 1999, (12): 345-368.

[16] Meng,J., J.Liu, Y.Xu, and S.Tao. Tracing Primary PM<sub>2.5</sub> Emissions via Chinese Supply Chains[J]. Environmental Research Letters, 2015a, (5): 54005.

[17] Meng,J., J.F.Liu, S.Guo, Y.Huang, and S.Tao. The Impact of Domestic and Foreign Trade on Energy-related PM Emissions in Beijing [J]. Applied Energy, 2015b, (9): 82-90.

[18] Pearce,D. Economics of Natural Resources and the Environment[M]. New York: Harvester Wheat Sheaf, 1990.

[19] York,R., E.A.Rosa, and T.Dietz. STIRPAT, IPAT and IMPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.

[20] Xu,B. and B.Q.Lin. How Industrialization and Urbanization Process Impact on CO<sub>2</sub> Emissions in China: Evidence from Nonparametric Additive Regression Models[J]. Energy Economics , 2015, (48):188-202.

[21] Xu,B., L.Luo, and B.Lin. A Dynamic Analysis of Air pollution Emissions in China: Evidence from Nonparametric Additive Regression Models[J]. Ecological Indicators, 2016, (1): 346-358.

## Threshold Effect of Urbanization on PM<sub>2.5</sub> Concentration

Yan Yaxue and Li Kai

(Economics and Management School of Wuhan University)

**Abstract:** This paper applies panel threshold effect model and employs Chinese provincial PM<sub>2.5</sub> concentration panel data in recent ten years, to investigate the impact of urbanization level on PM<sub>2.5</sub> concentrations by empirical test. The research shows that the urbanization has positive nonlinear influence on PM<sub>2.5</sub> concentrations and possess significant feature of threshold. With real GDP per capita as threshold variable, urbanization level contributes PM<sub>2.5</sub> concentration at a slower pace when economies growth surpassing the threshold value. With the proportion of coal consumption as threshold variable, urbanization level accelerates the promotion effect when the proportion of coal consumption surpassing the threshold value, which presents "ladder growth" feature. With the proportion of second industry as the threshold variable, urbanization level contributes PM<sub>2.5</sub> concentration at a slower pace when industrial structure surpassing the threshold value. Therefore, impacts on PM<sub>2.5</sub> concentration exists heterogeneity on the space and time according to different urbanization level and regions.

**Keywords:** Urbanization; PM<sub>2.5</sub> Concentration; Panel Threshold Model

**JEL Classification:** F205

(责任编辑:朱静静)