

杨晓燕, 贾秋森, 孙大利, 等. 京津冀主要大城市经济发展中城市化与大气环境质量的关系[J]. 岩矿测试, 2021, 40(2): 273 - 284.

YANG Xiao - yan, JIA Qiu - miao, SUN Da - li, et al. Research on the Relationship between Urbanization and Atmospheric Environmental Quality in the Economic Development of Major Cities in Beijing—Tianjin—Hebei Region [J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(2): 273 - 284.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202011040137】

# 京津冀主要大城市经济发展中城市化与大气环境质量的关系

杨晓燕<sup>1</sup>, 贾秋森<sup>1</sup>, 孙大利<sup>1</sup>, 胡永锋<sup>1</sup>, 吕晓剑<sup>2</sup>

(1. 北京市应对气候变化研究中心, 北京 100071;

2. 中标合信(北京)认证有限公司, 北京 100031)

**摘要:** 京津冀城市群在快速城市化进程中,“高耗能、高污染、高排放”的粗放型经济发展模式带来了一系列大气污染问题,亟需协调经济发展与大气环境质量之间的关系。本文基于2004—2017年北京市、天津市、石家庄市的大气环境质量与城市化各指标数据,运用熵值法多维度研究了城市化进程中大气环境质量的演化规律。选取城市空气主要污染物SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>的年均浓度、好于Ⅱ级天天数4个指标反映城市大气环境质量水平,选取地区生产总值、人均GDP、三产比重、建成区面积等10个指标反映城市化发展水平,分别进行综合指数模型构建和回归拟合。分析表明,城市化对大气环境质量的影响是各因素共同作用的结果,京津冀三市的城市化综合指数与大气环境污染综合指数分别呈“倒U型”、“正U型”和“倒N型”。将10个城市化指标分别归类为结构效应、规模效应以及活动效应,进一步分析了各类效应对大气环境污染指数的影响。对于北京市,三类效应各因变量对大气环境均产生负向影响;对于天津市,结构效应、规模效应中的建成区面积和活动效应中的人均GDP、生产总值、居民消费水平和社会消费品零售总额与大气环境质量呈现负相关关系;对于石家庄市,由于分析数据的时间序列有限,三种效应的各因变量对大气环境质量的影响不明确。本文研究结果可为京津冀地区的城市生态文明建设提供基础数据支撑。

**关键词:** 城市化; 大气环境质量; EKC曲线; 拟合关系

**要点:**

(1) 运用熵值法分别建立了城市化综合指数与大气环境污染综合指数。

(2) 北京市、天津市、石家庄市的城市化综合指数与大气环境污染综合指数之间分别呈“倒U型”、“正U型”和“倒N型”。

(3) 结构效应、规模效应、活动效应各因变量对北京市大气污染产生负向影响,结构效应、活动效应各因素以及规模效应因素中的建成区面积与大气环境污染指数呈负相关关系,而石家庄市的效应影响作用表现不明显。

**中图分类号:** X821

**文献标识码:** A

城市化和工业化带来城市繁荣的同时,也不断加剧了环境污染,尤其是“洛杉矶光化学烟雾事件”、“伦敦烟雾事件”的发生,引起学者的深入关注,相继开展了诸多定量和定性的关于城市化和工业化与生态破坏、环境污染之间的交互作用关系及

其机理的研究。

Grossman等<sup>[1]</sup>在1995年提出的目前被广泛接受的环境库兹涅茨曲线(EKC曲线)的假说,认为城市化与环境保护拟合曲线呈现“倒U型”关系,即整体上来说环境情况随着经济的不断增长呈现出先恶

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-11-22; 接受日期: 2020-12-11

基金项目: 国家重点研发计划项目“清洁空气管理评价关键技术研究”(2017YFF0211805)

作者简介: 杨晓燕, 博士, 副研究员, 专业方向为气候变化、环境科学、环境地球化学。E-mail: yxy8412@foxmail.com。

化再改善的趋势。但是国内外学者在研究过程中发现,EKC的“倒U型”曲线取决于不同时期、具体地区、污染指标以及估计方法的选择,不存在适合所有地区、所有污染物及估计方法的单一情况<sup>[2]</sup>。Al-Mulali等<sup>[3]</sup>发现对于中-高等收入的国家其生态环境与GDP之间存在EKC假说。Richard等<sup>[4]</sup>通过美国50个州的数据验证了七种大气污染与人均GDP之间的EKC假说,而R-Roda等<sup>[5]</sup>基于西班牙的研究发现只有SO<sub>2</sub>符合EKC假说。但Stern等<sup>[6]</sup>对158个国家研究中却没有出现收入与PM<sub>2.5</sub>的EKC假说的证据,只表明国民收入的提高对PM<sub>2.5</sub>浓度产生较小的正影响。对6个发展中国家的污染物浓度与国民收入的分析发现,不同国家两者之间的关系呈现不同模式,并不呈现传统的EKC曲线<sup>[7]</sup>。Sinha等<sup>[8]</sup>对印度139个城市的研究进一步发现,对于高收入和工业化发达的城市,SO<sub>2</sub>浓度与城市收入之间存在EKC曲线,对于其他中低收入城市,两者之间关系分别是“N型”和直线关系。

基于对中国城市的数据分析表明,中国工业化对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响呈现显著的“倒U型”<sup>[9]</sup>;城市SO<sub>2</sub>浓度与城市经济的发展符合“倒U型”曲线;而对于NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>浓度及综合污染指数与经济发展之间呈“U型”关系<sup>[10]</sup>。按照区域研究发现,中国东、中、西部地区环境库兹涅茨曲线均呈“N型”<sup>[11]</sup>。而刘华军<sup>[12]</sup>以中国160个地级市为研究样本,研究PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>作为雾霾污染衡量指标与经济发展之间的关系,发现两者呈现线性递减关系。可见,经济发展与环境污染之间不是单一关系,有可能呈现正U型、倒U型、正N型、倒N型等其他曲线关系,甚至还会出现直线关系或没有相关关系<sup>[13-15]</sup>;另一方面,影响环境质量的除了经济发展外,还有产业结构变化、人口迁移、土地利用方式、投资等诸多城市社会发展经济因素,而缺乏考虑其他对环境质量产生影响的社会经济指标,会导致研究结果的片面性;除了经济因素的单一性之外,空气质量指标的单一性如只选择SO<sub>2</sub>浓度、PM<sub>10</sub>浓度等作为单一的解释变量,也造成了分析结果的片面性。

本文利用京津冀地区三个主要大城市北京、天津、石家庄的2004—2017年的统计数据,利用熵值法将SO<sub>2</sub>浓度、NO<sub>2</sub>浓度、可吸入颗粒物浓度(PM<sub>10</sub>)和好于Ⅱ级天天数构建的综合空气质量综合指数作为解释变量,这种处理方式将传统的单独大气污染物浓度分开考察变成了综合考察,简化并明确了环境污染度量指标;同时也将城市经济发展如GDP、

城市化率等诸多因素构建的综合经济发展指数作为因变量,综合考察城市化发展水平对大气环境质量的影响,进一步量化大气环境与城市化发展之间的关系。考虑到北京、天津、石家庄三个城市在京津冀区域的不同的城市定位及发展类型,选择这三个城市作为研究对象,能有效验证城市发展与大气污染之间的不同关系。本文在考虑经济发展这一因素外,将城镇化、产业结构、土地利用等作为控制变量纳入考虑因素,构建一个包含城市经济发展过程中的城市化水平提升、城市规模扩张、产业结构升级、生活水平提高等系统指标体系下的模型检验,进一步分析它们对研究结论的影响,以期探究空气污染的宏观机理提供素材。另一方面,京津冀地区是中国首都“经济圈”,2012年前后的雾霾天气不仅对交通安全造成影响,也极大地危害着人体健康,对京津冀地区经济和社会快速发展产生影响。近几年,京津冀区域的环境质量虽然得到了明显改善,但是每年冬季进入采暖季后,空气污染形势仍然十分严峻,在新的社会治理体系下,改善大气环境成为京津冀城市发展的重要内容<sup>[16]</sup>。因此,研究北京、天津、石家庄城市化发展过程中的大气污染问题,对于区域联防联控大气污染问题,以及促进区域可持续发展有重大意义,同时为京津冀地区的城市生态文明建设提供基础数据支撑。

## 1 区域概况

京津冀地区是全国大气污染比较突出、灰霾污染严重的区域,该地区的大气污染呈现同步性和区域性特点的同时,由于受经济发展、城市化水平、土地利用方式等的不同影响,各自的污染也呈现出各自的特殊性。

北京市是中国目前城市化水平最高的城市之一。截至2018年底全市总人口为2154万人,城镇化率达到86.5%,地区生产总值实现30320亿元,三产比重分别为0.4:18.6:81。根据北京市源解析的结果,机动车、燃煤、工业生产为大气污染的主要本地源。

天津市是环渤海地区的经济中心。截至2018年底常住人口达到1559.6万人,城镇化率83.15%,地区生产总值达到18809.64亿元,三产比重为0.9:40.5:58.6。受产业、人口等影响,汽车尾气、煤炭燃烧、发电和工业生产是天津大气污染的主要贡献源<sup>[17]</sup>。

石家庄市是京津冀地区重要的中心城市之一。截至2018年底常住人口1095.16万人,城镇化率为

63.16%,地区生产总值达到6082.6亿元,三产比重为6.9:37.6:55.5。产业结构中第二产业特别是重工业占绝对主导地位,其能耗高、污染大,煤炭消费比重过大,导致石家庄的大气污染以工业污染排放为主<sup>[18]</sup>。

## 2 指标体系构建、数据处理及模型设置

### 2.1 指标体系构建

城市化伴随着人口的增加、人民生活消费水平等日益增加,从而增加了城市生活废弃物、改变城市小气候、加大城市热岛等问题<sup>[19]</sup>,对城市大气环境造成影响。经济发展是一个城市化进程中的重要过程,经济发展对大气环境质量的影响主要是产业结构、产业投资等,主导产业在三次产业间进行调整时会对空气质量产生不同的影响<sup>[20-21]</sup>。一方面,城市土地规模的扩张必然带来城市交通、住宅等的增加,在城市建筑设施等施工和拆迁中会产生扬尘以及其他大气污染物<sup>[19]</sup>;另一方面,城市中各类不同功能地块的结合与布局构成了城市布局,不合理的城市布局会增加能耗和污染物,而合理地增加城市绿地面积等会有效地降低污染物<sup>[22]</sup>。在借鉴学者们的研究基础上,本文综合考量城市化过程中的人口、经济、土地利用等对大气环境质量的影响,基于城市化的基本内涵,结合北京、天津、石家庄三个城市的实际情况、数据的可获得性以及城市间的可对比性,选取反映城市化发展水平的指标体系(表1)如下:地区生产总值( $X_1$ )、人均GDP( $X_2$ )、三产比重( $X_3$ )、城市化率( $X_4$ )、固定资产投资( $X_5$ )、居民消费水平( $X_6$ )、社会消费品零售总量( $X_7$ )、城市人均居住面积( $X_8$ )、建成区面积( $X_9$ )和城市绿化覆盖率( $X_{10}$ )。

根据研究内容,不同学者分别选取可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )、二氧化硫( $SO_2$ )、氮氧化物( $NO_x$ )、一氧化碳(CO)等污染物浓度表征空气污染状况。本文综合考虑到研究样本数据的可得性和时间序列的可对比性,并参照《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663—2013)的规定,评估大气环境污染的指标(表1)包括:可吸入颗粒物年均浓度( $Y_1$ )、 $SO_2$ 年均浓度( $Y_2$ )、 $NO_2$ 年均浓度( $Y_3$ )、空气质量达到及好于Ⅱ级的天数( $Y_4$ )。这些指标是中国城市空气质量的主要表现因素,且有长时间序列的监测数据。考虑到 $PM_{2.5}$ 浓度自2012年起才有国家规定进行单独监测列出,在时间序列上长度有限,故本研究从时间序列完整性、分析科学性上考量,未将 $PM_{2.5}$ 单独列为空气质量的表征指标。

表1 城市化与大气环境质量相关性指标体系

Table 1 Index system of urbanization and atmospheric environmental quality

项目	指标	指标代号	单位
城市化	地区生产总值	$X_1$	万元
	人均GDP	$X_2$	元
	三产比重	$X_3$	%
	城市化率	$X_4$	%
	固定资产投资	$X_5$	万元
	居民消费水平	$X_6$	元
	社会消费品零售总量	$X_7$	万元
	城市人均居住面积	$X_8$	$m^2$
	建成区面积	$X_9$	$km^2$
	城市绿化覆盖率	$X_{10}$	%
大气环境质量	可吸入颗粒物浓度(年均值)	$Y_1$	$mg/m^3$
	$SO_2$ 浓度(年均值)	$Y_2$	$mg/m^3$
	$NO_2$ 浓度(年均值)	$Y_3$	$mg/m^3$
	空气质量达到及好于Ⅱ级的天数	$Y_4$	天

由于相比单项指标的评价,多指标的综合评价方法更科学和全面地反映城市化水平<sup>[19,22]</sup>,本文构建了城市化指标和大气环境污染两级指标体系,在各单项指标的基础上,通过熵值法分别构建城市化综合指数和大气环境污染综合指数。

本文主要研究京津冀城市化对大气环境质量的影响作用,收集了人口、城市、经济、土地利用等共10个变量,其中反映大气污染程度的 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 以及空气质量达到好及好于Ⅱ级天数的数据来源于《中国城市统计年鉴》、《环境状况公报》与《中国环境统计年鉴》;地区生产总值、人均GDP、三产比重、城市化率、固定资产投资、居民消费水平、社会消费品零售总量、城市人均居住面积、建成区面积和城市绿化覆盖率等社会经济指标都来自于《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《北京市统计年鉴》、《天津市统计年鉴》、《石家庄市统计年鉴》以及各市《国民经济与社会发展统计公报》。数据时间跨度为2003—2017年。

### 2.2 数据处理

多指标的综合评价方法包括主观赋权评价法和客观赋权评价法。为了保证评价结果的客观性,本研究采用客观赋权法,消除人为主观因素的影响<sup>[23]</sup>。熵值评价法是客观赋权评价法中的一种,具有信息量越大、不确定性越小的优点,可以明确地判断指标的客观性和科学性<sup>[24]</sup>。评价方法的基本步骤如下<sup>[25-26]</sup>。

#### 2.2.1 原始数据标准化处理

由于选取的各项指标的原始数据量纲、数量级

均有差异,为消除因量纲不同对评价结果的影响,需要对各指标进行标准化处理。计算方法为:

$$Z_{ij} = (Y_{ij} - \bar{y}) / S_j$$

式中: $\bar{y}$ 为第 $j$ 个指标的均值; $S_j$ 为第 $j$ 个指标的标准差。然后再采用 $Z$ -Score 标准化公式进行标准化。

### 2.2.2 计算权重

本文选取熵值法确定指标权重。由于计算熵时,要取自然对数, $Z$ -Score 标准化值必须为正数。因此,对标准化值进行修正,令  $U_{ij} = Z_{ij} + d$ , 其中  $d$  是正数,这样就得到了标准化矩阵  $U = (U) m \times n$ , 然后利用熵值法计算方法计算各个指标的权重 ( $w_j$ ),具体见表2。

### 2.2.3 综合指数的运算

城市化程度综合指数计算公式为:

$$f(X) = \sum_{j=1}^n w_j U_j$$

大气环境污染综合指数计算公式为:

$$f(Y) = \sum_{j=1}^n w_j A_j$$

式中: $f(X)$ 为城市化综合评价函数; $f(Y)$ 为大气环境污染综合评价函数; $w_j$ 为各指标权重; $U_j$ 、 $A_j$ 为标准化数据。

### 2.3 模型设置

研究表明,大气环境污染与城市化可能存在多种关系,所以在此分别采取一次线性、二次曲线和三次曲线进行拟合<sup>[11-15]</sup>。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3$$

式中: $Y$ 为大气环境污染情况; $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 分别为模型系数; $X$ 为城市化水平。

## 3 城市化水平与大气环境质量分析与评价

### 3.1 城市化水平发展过程及其综合评价

#### 3.1.1 城市化进程变化

通过熵值评价法确定城市化水平各单项评价指标的权重,并计算北京市、天津市、石家庄市 2004—2017 年城市化水平综合指数,绘制出城市化综合指数动态变化图(图1)。结果表明,2004—2017 年三城市的城市化水平一直处于直线上升趋势,尤其是在 2010 年之后,城市化进程快速发展、迅速上升。但城市化发展水平不同:北京、石家庄城市化水平的年均增长率保持在 20% 以上,天津市城市化水平的年均增长率保持在 4% 以上。在上升速度上,石家庄城市化上升水平表现最快,由 2004 年的 0.021 上升到 2017 年的 0.116,升幅达到 552%,2010 年后城市化发展速度超过北京;天津的城市化水平发展速度整体比较平稳,在 2004—2010 年期间其城市化水平在三个城市中表现最为明显;对于北京市来说,整体呈直线上升趋势,但是 2010 年之前的城市化综合水平发展迅速,自 2010 年以后相对平稳。从权重分

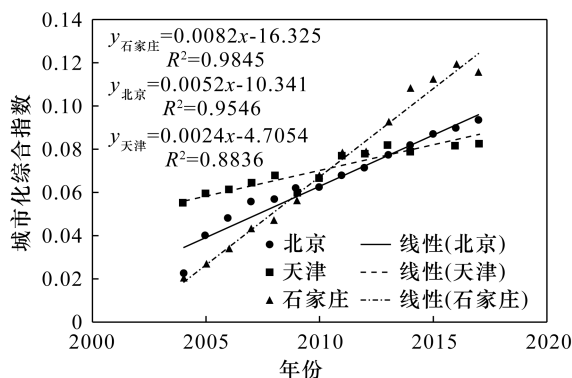


图1 京津冀城市 2004—2017 年时间序列内城市化综合指数动态变化及趋势图

Fig. 1 Dynamic changes and trend of comprehensive urbanization index in the three cities during 2004—2017

表2 京津冀城市化与大气环境污染各指标权重值

Table 2 Weight values of urbanization index and atmospheric environmental pollution index in the three cities

城市	权重( $w_j$ )													
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
北京	0.089	0.089	0.129	0.144	0.089	0.088	0.089	0.099	0.088	0.095	0.171	0.159	0.166	0.505
天津	0.097	0.100	0.074	0.096	0.123	0.097	0.097	0.100	0.091	0.123	0.145	0.158	0.149	0.548
石家庄	0.102	0.101	0.079	0.101	0.098	0.097	0.097	0.109	0.096	0.119	0.130	0.122	0.132	0.616

注: $X$ 表示城市化的各指标, $Y$ 表示大气环境污染的各指标。

析来看,三个城市的城市化率的影响因素不同。三产和城市化率对北京市的城市化贡献最大,固定资产投资和城市绿化覆盖率对天津市的贡献率最大,而城市绿化覆盖率和人均居住面积则对石家庄市的贡献率最大。从城市化综合指数和贡献率来看,三个城市的城市发展模式和特征存在差异。

### 3.1.2 大气环境质量变化情况

从 2004—2017 年的统计数据、环境公报数据

(图 2)可以看出,北京、天津、石家庄均在 2013 年、2014 年连续两年达到了大气污染的最严重状况,空气 II 级天数达到了最低值,PM<sub>10</sub> 浓度超标(GB 3095—2012)严重。从图 2a 中可以看出,北京市的 PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 浓度从 2004 年开始整体呈现逐渐减少的趋势,而且 PM<sub>10</sub> 和 NO<sub>2</sub> 浓度在 2013—2014 年期间出现小幅反弹,在 2015 年之后恢复到下降的趋势;从 II 级天数来看,2004—2012 年期间均呈现出

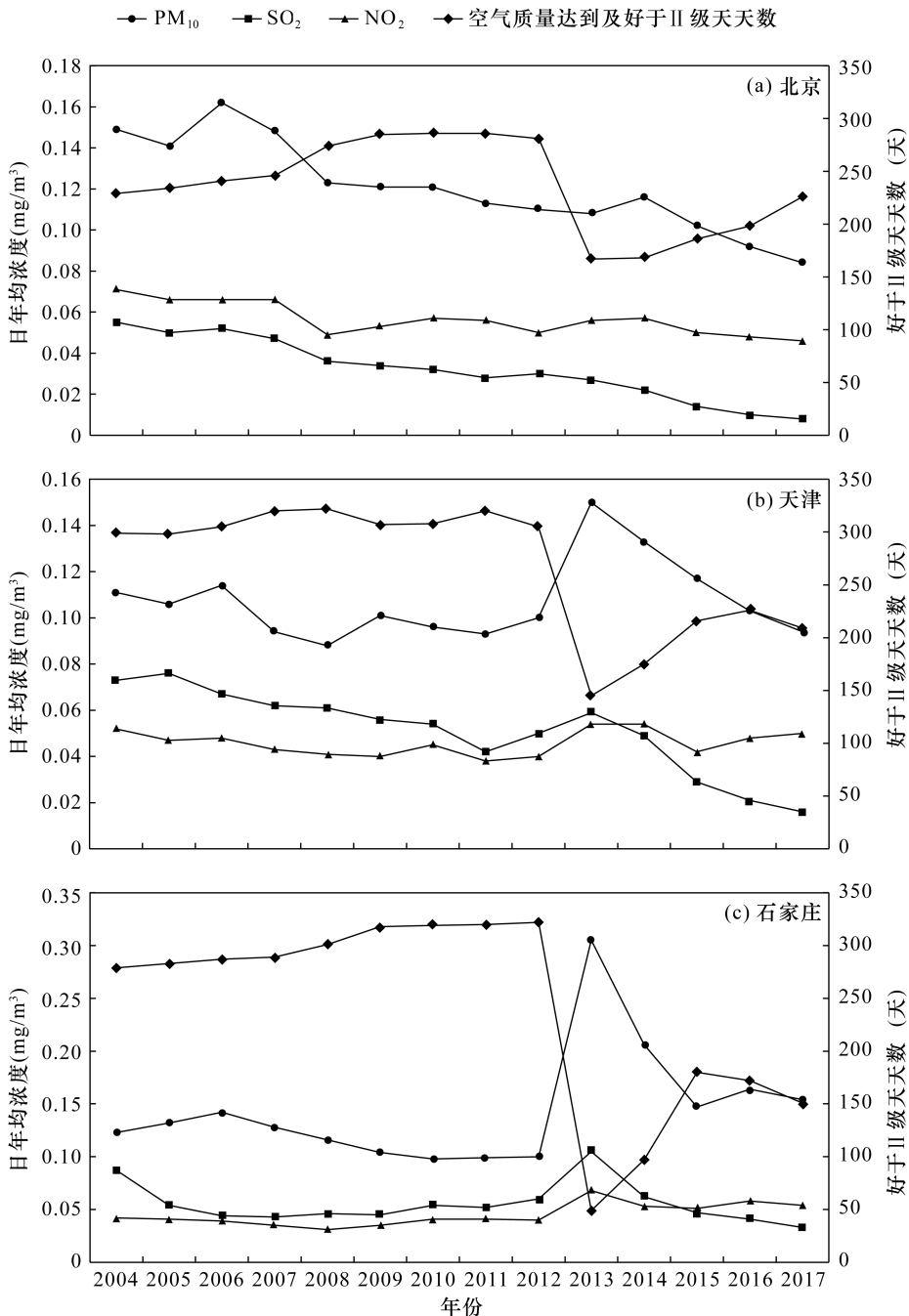


图 2 京津冀城市 2004—2017 年大气环境污染情况时间序列动态变化图

Fig. 2 Dynamic changes of atmospheric environmental pollution index for the three cities in 2004—2017

明显增加的趋势,在2013—2016年期间Ⅱ级天数下降到200天以内,2013年达到最低值仅有167天。从贡献度分析来看,对于北京市的大气环境质量起到主要作用的是Ⅱ级天天数和SO<sub>2</sub>浓度。对于天津市(图2b)、石家庄市(图2c)来说,在2004—2017年期间PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>浓度变化基本上可以分为四个阶段:2004—2006年平稳期,2007—2011年缓慢下降期,2012—2013年突增期,2014—2017年下降期;Ⅱ级天天数和这三个污染物浓度变化相似,尤其与PM<sub>10</sub>的浓度变对化最为接近,在2013—2014年期间PM<sub>10</sub>浓度超标严重达到最大值的情况下,Ⅱ级天数也达到最低值,尤其是石家庄市,2013年的Ⅱ级天数只有49天,空气质量状况改善迫在眉睫。从贡献度分析发现,Ⅱ级天数均是石家庄市和天津市大气环境质量的主要影响因素。

用公式分别计算三个城市的大气环境污染综合指数(图3)。可以看出,北京市的大气环境污染综合指数自2004年始整体呈曲线下降的趋势。天津、石家庄两市大气环境污染综合指数呈现显著的“倒

V型”,变化曲线具有一致性:2004—2012年的大气环境质量下降;2013年达到最高值,主要是由于这两个城市PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>的年均浓度严重超标;2014—2017年大气环境污染指数逐渐趋于下降。除北京市外,石家庄市和天津市的大气环境污染均在2013年出现了反复,根据2013年《国家环境公报》显示,京津冀区域内的PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>浓度均超标,且超标天数中重度及以上污染天数比例达到20.7%,空气污染严重。自2013年之后国家发布《大气污染防治行动计划》,京津冀地区随后发布《2013—2017年清洁空气行动计划》和打赢蓝天保卫战三年行动计划、“大气十条”的实施,区域空气质量改善决心显著。

### 3.2 城市化水平综合指数与大气环境污染综合指数之间的拟合分析

#### 3.2.1 大气环境污染情况与城市化之间的关系

将城市化水平综合指数作为自变量(X轴),将大气环境污染综合指数作为因变量(Y轴),利用SPSS软件分别对因变量和自变量进行了线性回归、二元线性回归和三元线性回归(表3)。

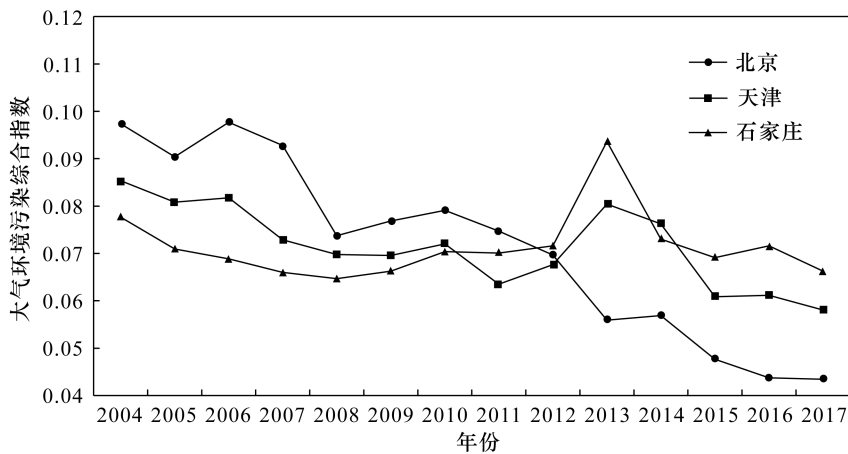


图3 京津冀城市2004—2017年大气环境污染综合指数动态变化图

Fig. 3 Dynamic trend of comprehensive atmospheric environmental pollution index for the three cities in 2004—2017

表3 京津冀城市大气环境污染综合指数与城市化综合指数的模型拟合结果

Table 3 Curve fitting between the comprehensive atmospheric environmental pollution index and the comprehensive urbanization index for the three cities

城市	模型	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R^2$	F 检验 P 值
北京	线性回归	0.129	-0.888	-	-	0.868	0.000
	二元线性回归	0.094 (0.000)	0.413 (0.032)	-10.754 (0.007)	-	0.935	0.000
	三元线性回归	0.071 (0.030)	1.935 (0.292)	-39.657 (0.248)	165.881 (0.390)	0.940	0.000
天津	线性回归	0.109	-0.533	-	-	0.423	0.012
	二元线性回归	0.202	-3.212	18.920	-	0.447	0.039
	三元线性回归	0.202	-3.212	18.920	0.000	0.447	0.039
石家庄	线性回归	0.070	0.026	-	-	0.015	>0.5
	二元线性回归	0.069	0.032	-0.040	-	0.015	>0.5
	三元线性回归	0.123	-3.101	50.733	-241.459	0.521	0.050

注:所有分析均在5%显著水平上进行回归分析。括号内数据为t检验P值。

从表 3 中的  $R^2$  值来看,在 5% 的显著水平下,各个城市的拟合曲线存在不同形式。对于北京市来说,二次曲线和三次曲线的  $F$  检验  $P$  值均小于 0.05,  $R^2$  值均达到 0.9 以上,再根据  $t$  检验  $P$  值来分析,二次曲线的拟合通过了 5% 的检验,但是三次曲线没有通过,因此综合考虑选取二次曲线进行拟合模型较为合适。从  $R^2$  和  $F$  检验值来看,天津市拟合曲线为二次曲线,石家庄市为三次曲线。因此,模拟曲线方程式分别为:

$$Y_{\text{北京}} = 0.094 - 10.754X^2 + 0.413X$$

$$Y_{\text{天津}} = 0.202 + 18.92X^2 - 3.212X$$

$$Y_{\text{石家庄}} = 0.123 - 241.146X^3 + 50.733X^2 - 3.101$$

京津冀三城市处于同一区域内,但是城市的发展格局、发展阶段以及发展模式等均存在较大的差异,在大气污染治理方面也存在明显的投入差异、技术差异等,造成大气环境污染指数与城市化指数之间的关系出现三种形式:“倒 U 型”、“倒 N 型”和“正 U 型”(图 4)。北京的大气环境质量与城市化水平之间存在“倒 U 型”关系,且基本上处于“倒 U 型”的右半段部分,表明随着城市化水平的不断提高,北京城市的大气污染情况是逐渐减轻的,符合 ECK 曲线假设。在城市化指数为 0.06 ~ 0.08 期间,大气环境污染指数的下降速率最快,年份基本上是在 2010—2014 年期间,正是北京大气污染防治持续加大力度、经济发展开始由粗放型向集约型转变的时期。天津市的大气环境污染指数和城市化指数虽然也拟合为二次曲线,但是从形状来看,可能是呈现“正 U 型”,且基本上处于“正 U 型”的前半段,虽然从目前情况来看,其大气环境污染指数是随着城市化发展下降的,但是后期如何发展则无法判断,加大城市污染治理力度,可能会逐渐发展成“倒 U 型”关系,如果放松治理,则污染情况会出现反复,就可能出现“倒 U 型”的拟合关系。因此,对于天津市来说两者之间的关系还需要进一步研究。

从石家庄市的分析结果发现,大气环境污染指数与城市化指数之间存在“倒 N 型”曲线关系,其大气污染情况在城市化发展过程中出现了反复,在城市化水平 0.06 ~ 0.09 的情况下,大气环境污染指数在本已降低的情况下出现了上升,甚至在 0.09 的水平下,出现了大气环境污染指数的最大值,可能是因其城市化发展加大,一些因素导致了大气污染又重复加重的情况。

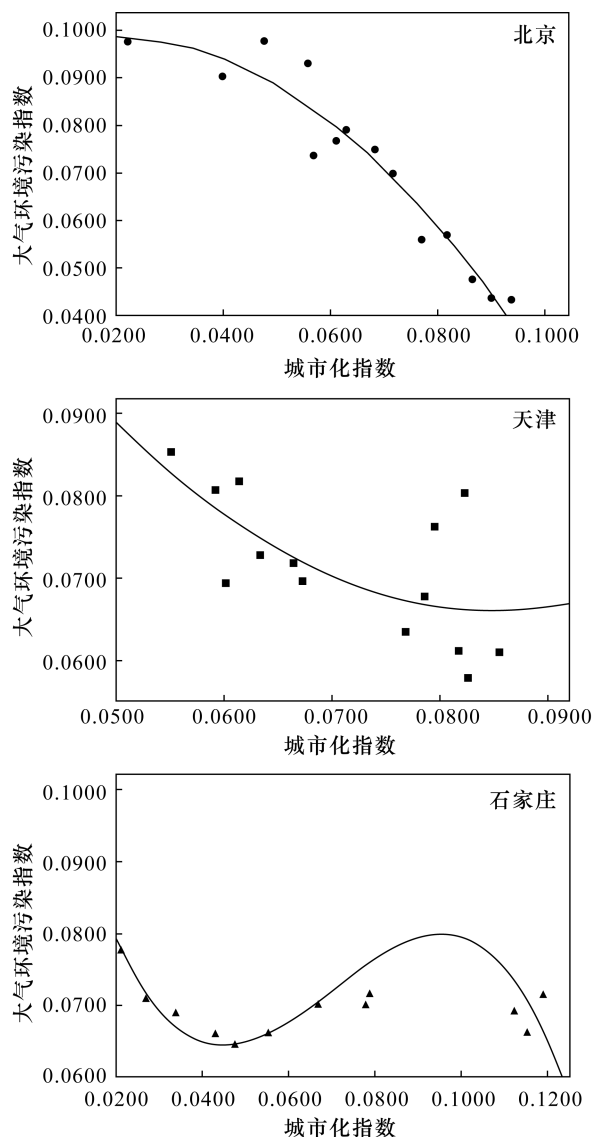


图 4 大气环境污染指数与城市化水平指数拟合曲线

Fig. 4 Curve fitting between atmospheric environmental pollution index and urbanization index for the three cities in 2004—2017

### 3.2.2 大气环境污染的城市化驱动因素分类分析

Grossman 等<sup>[1]</sup>认为导致 EKC 出现的原因主要在于经济增长对环境质量产生规模效应、技术效应与结构效应三种影响效应。基于 Grossman 等的观点,并借鉴其他学者的研究<sup>[27-30]</sup>,根据每一驱动因素的性质,将城市化进程中 10 种环境污染的城市化驱动因素进行如下归类:三产比重作为结构效应,城市化率、固定资产投资、建成区面积、建成区绿化率统称为规模效应,人均 GDP、生产总值、居民消费水平、社会消费品零售总额、人均居住面积变动统称为活动效应。以下进一步分析这三种效应与大气环境污染指数之间的定量关系,结果列于表 4。

表4 大气环境污染指数与标准化后的各城市化因变量指标之间的相关关系

Table 4 Correlation between atmospheric environmental pollution index and the dependent variables of urbanization after standardization

项目	结构效应	规模效应				活动效应				
	三产比重	城市化率	固定资产投资	建成区面积	建成区绿化率	人均GDP	生产总值	居民消费水平	社会消费品零售总额	城市人均居住面积
北京大气环境污染指数	(0.635)*	(0.730)**	(0.954)**	(0.843)**	(0.912)**	(0.964)**	(0.969)**	(0.968)**	(0.968)**	(0.916)**
天津大气环境污染指数	(0.69)**	0.53	(0.08)	(0.81)**	(0.05)	(0.66)**	(0.71)**	(0.70)**	(0.70)**	0.30
石家庄大气环境污染指数	(0.04)	0.19	0.12	(0.05)	0.02	0.15	0.16	0.10	0.11	0.23

注：“\*\*”表示相关性在0.01水平上显著(双侧)，“\*”表示相关性在0.05水平上显著(单侧)，括号内数据表示负数。

对于北京市,在大气环境污染指数与城市化各指标的分析过程中发现,规模效应、活动效应均与大气环境污染指数呈现在0.01水平下的负相关关系,结构效应与大气环境污染指数呈现0.05水平下的负相关关系。因此,城市化水平的提高对于北京市环境污染指数呈现的负影响,从因素分析上证明了EKC的假说在北京市是存在的,北京市目前处于经济与大气环境协调发展的后期阶段。优化调整效应结构及组成,可有效改善北京市的大气环境质量。

对于天津市,结构效应与大气环境污染指数在0.01置信水平下呈负相关关系,意味着要改善环境质量,要逐步调整产业结构。规模效应因素中,只有建成区面积与大气环境污染指数呈显著负相关关系,其他因素关系不明显。活动效应中,人均GDP、生产总值、居民消费水平、社会消费品零售总额均与大气环境污染指数呈现0.01水平的负相关关系,而这种负相关关系应考虑到公众环保意识、绿色低碳消费水平意识的提高,才能表现出来。

对于石家庄市,其各城市化因变量与大气环境污染指数的相关关系不明显,可能是由于各城市化因变量对大气环境污染指数的影响是共同作用的结果,但本文统计的数据量偏少,两者之间的关系不能明显体现出来。根据EKC假说,污染排放随着经济的增长而增加,达到某点之后又随着经济的增长而下降,对于石家庄市来说,这个拐点还存在不确定性,因此,城市化各因素对大气环境质量的深入影响还需要开展进一步深入的研究。

城市化正是通过以上多种效应作用于环境质量,不同的效应在不同城市化发展阶段对环境质量产生不同的影响,有正的驱动作用<sup>[31-33]</sup>,也有负的制动作用<sup>[34-36]</sup>。在城市化进程演进中,不同效应之间相互作用,共同构成了城市化对大气环境质量的影响与传动机制<sup>[37]</sup>。伴随着城市化发展阶段演进,不同效应此消彼长,正是这种此消彼长的动态变化,

导致了城市化与大气环境质量出现环境库兹涅茨的几种不同曲线的关系,而非简单的线性关系。

#### 4 结论和建议

本文采用2004—2017年北京、天津、石家庄三城市的统计数据,分析了城市化发展水平与大气环境质量之间的关系,主要获得以下结论。

(1)北京市的城市化发展指数与大气环境污染指数已进入“倒U型”曲线的右侧,三大效应的各变量与大气环境污染指数间呈现显著的负相关关系,即符合EKC假说,北京市已进入城市发展与大气环境质量协调发展的阶段,通过技术研发进一步支持城市化发展改善大气环境质量。

(2)天津市的城市化发展指数与大气环境污染指数之间的关系进入“正U型”曲线的左侧,若加强环保政策力度,曲线关系会持续下降进入“倒U型”右侧,环保政策一旦松懈,大气污染则会反复。结构效应、活动效应以及规模效应因素建成区面积与大气环境污染指数呈现0.01置信水平下的负相关关系。深化结构转型应是改善天津市大气环境质量的主要措施。

(3)石家庄市的城市化发展水平与大气环境污染指数之间的拟合曲线呈“倒N型”,三大效应的各因变量对大气环境质量的影响不明确,表明城市化发展过程中大气环境污染出现了反复,城市化发展与大气环境协调发展的拐点未出现,还需进一步调整产业和能源结构,加大环境政策执行力度。

#### 5 参考文献

- [1] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [2] 谭梦薇. 经济增长与环境污染实证研究[J]. 合作经济与科技, 2020(16): 42-44.



- Tan M W. An empirical study on economic growth and environmental pollution[J]. *Co - Operative Economy & Science*,2020(16):42 - 44.
- [3] Al - Mulali U, Weng - Wai C, Sheau - Ting L, et al. Investigating the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis by utilizing the ecological footprint as an indicator of environmental degradation [J]. *Ecological Indicators*,2015(48):315 - 323.
- [4] Richard T C, Yongil J, Donald R M. The relationship between air pollution emissions and income: US data [J]. *Environment and Development Economics*,1997,20(12):433 - 450.
- [5] R - Roda I, Comas J, Poch M. Automatic knowledge acquisition from complex processes for the development of knowledge - based system[J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*,2001,40(15):3353 - 3360.
- [6] Stern D I, Dijk J V. Economic growth and global particulate pollution concentrations [J]. *Social Science Electronic Publishing*,2016,142(3 - 4):1 - 16.
- [7] Noroglu E, Robert M. Kuznets and Environmental Kuznets Curves for developing countries [M]//Yülek M. *Industrial policy and sustainable growth, sustainable development*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2017. DOI 10. 1007/978 - 981 - 10 - 3964 - 5\_12 - 1.
- [8] Sinha A, Bhattacharya J. Estimation of Environmental Kuznets Curve for SO<sub>2</sub> emission: A case of India cities [J]. *Ecological Indicators*,2017,72:881 - 894.
- [9] 李雅男,丁振民,邓元杰,等. 中国城市工业化发展与PM<sub>2.5</sub>的关系:兼论 EKC 曲线形成的内在机制[J]. *环境科学*,2020,41(4):1987 - 1995.
- Li Y N, Ding Z M, Deng Y J, et al. Relationship between urban industrialization and PM<sub>2.5</sub> concentration in China and the internal mechanism of EKC [J]. *Environmental Science*,2020,41(4):1987 - 1995.
- [10] 李茜,宋金平,张建辉,等. 中国城市化对环境空气质量影响的演化规律研究[J]. *环境科学学报*,2013,22(9):2402 - 2411.
- Li Q, Song J P, Zhang J H, et al. Dynamics in the effect of China's urbanization on air quality [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2013,22(9):2402 - 2411.
- [11] 周茜. 中国区域经济增长对环境质量的影响:基于东、中、西部地区环境库兹涅茨曲线的实证研究[J]. *统计与信息论坛*,2011,26(10):45 - 51.
- Zhou Q. The effect of China's regional economic growth on the environmental quality: Based on the empirical study of eastern, central and western Kuznets Curve [J]. *Statistics & Information Forum*,2011,26(10):45 - 51.
- [12] 刘华军,裴延峰. 我国雾霾污染的环境库兹涅茨曲线检验[J]. *统计研究*,2017,34(3):45 - 54.
- Liu H J, Pei Y F. An empirical test of the Environmental Kuznets Curve of China's Haze pollution [J]. *Statistical Analysis*,2017,34(3):45 - 54.
- [13] 崔秀萍. 经济发展中城市化与大气污染曲线拟合相关性研究——以内蒙古呼和浩特市为例[J]. *干旱区资源与环境*,2017,31(11):44 - 49.
- Cui X P. Curve fitting of urbanization and air pollution in economic development of Hohhot City, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2017,31(11):44 - 49.
- [14] 王盈晓,刘目兴,张永利,等. 武汉市城市化进程与大气污染关系探究[J]. *环境保护科学*,2016,42(1):77 - 82.
- Wang Y X, Liu M X, Zhang Y L, et al. Study on the relationship between urbanization process and air pollution in Wuhan City [J]. *Environmental Protection Science*,2016,42(1):77 - 82.
- [15] 张喆,王金南,杨金田,等. 城市空气质量与经济发 展的曲线估计研究[J]. *环境与可持续发展*,2007(4):36 - 38.
- Zhang Z, Wang J N, Yang J T, et al. Study on the curve estimation of urban air quality and economic development [J]. *Environment and Sustainable Development*,2007(4):36 - 38.
- [16] 唐倩,郑博,薛文博,等. 京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析[J]. *环境科学*,2020, <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202007218>.
- Zheng Q, Zheng B, Xue W B, et al. Contributors to air pollutant emission changes in autumn and winter in Beijing—Tianjin—Hebei and its surrounding areas [J]. *Environmental Sciences*,2020, <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202007218>.
- [17] 沈楠驰,周丙铨,李珊珊,等. 2015—2019年天津市大气污染物时空变化特征及成因分析[J]. *生态环境学报*,2020,29(9):1862 - 1873.
- Shen N C, Zhou B F, Li S S, et al. Temporal and spatial variation characteristics and origin analysis of air pollutants in Tianjin from 2015 to 2019 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*,2020,29(9):1862 - 1873.
- [18] 杜颖. 河北省经济增长与大气污染关系研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
- Du Y. Study on the relationship between economic growth and air pollution in Hebei Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (北京),2016.
- [19] 高明,郭峰. 城市化对空气质量的影响研究——以京津冀城市群为例[J]. *环境经济研究*,2018(3):

- 88 - 105.
- Gao M, Guo F. The influence of urbanization on air quality: A case of Beijing—Tianjin—Hebei Urban Agglomeration[J]. Environmental Economic Research, 2018(3):88 - 105.
- [20] 孙能浩. 城市化对环境污染的影响机制分析——基于268个地级市面板数据的实证研究[D]. 天津:南开大学,2015.
- Sun N H. The analysis of influence mechanism between urbanization and environment pollution basing on empirical research of panel data of 268 cities [D]. Tianjin; Nankai University, 2015.
- [21] 邵咪咪. 中国城市化和工业化阶段的环境污染因素及应对策略[D]. 南京:南京大学,2011.
- Shao M M. China's environmental pollution under urbanization and industrialization process, influence factors and abatement policies [D]. Nanjing; Nanjing University, 2011.
- [22] 杨柳青青. 产业格局、人口集聚、空间溢出与中国城市生态效率[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- Yang L Q Q. Industrial pattern, population agglomeration, spatial spillover and city ecological efficiency in China [D]. Wuhan; Huanzhong University of Science and Technology, 2017.
- [23] 高明,郭施宏,夏玲玲. 福州市城市化进程与大气污染关系研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(5): 44 - 49.
- Gao M, Guo S H, Xia L L. Relationship between urbanization and air pollution in Fuzhou City [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2015, 37(5): 44 - 49.
- [24] 吴玥弢, 仲伟周. 城市化与大气污染——基于西安市的经验分析[J]. 当代经济科学, 2015, 37(3): 71 - 79.
- Wu Y T, Zhong W Z. Urbanization and atmospheric pollution - based on the empirical analysis of Xi'an City [J]. Modern Economic Science, 2015, 37(3): 71 - 79.
- [25] 李景刚, 张效军, 高艳梅, 等. 基于改进熵值模型的城市土地集约利用动态评价——以广州市为例[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(4): 118 - 123.
- Li J G, Zhang X J, Gao Y M, et al. Dynamic analysis and evaluation on the degree of urban land intensive use based on improved entropy model: A case of Guangzhou City [J]. Area Research and Development, 2012, 31(4): 118 - 123.
- [26] 周瑾. 基于熵值法的上海市大气污染排放水平综合评价研究[J]. 上海节能, 2020(10): 1141 - 1144.
- Zhou J. Research on comprehensive evaluation of Shanghai air pollution emission level based on entropy evaluation method [J]. Shanghai Energy Conservation, 2020(10): 1141 - 1144.
- [27] 李小红, 宋马林, 安庆贤. 中国经济增长对环境污染影响的异质性研究[J]. 南开经济研究, 2013(5): 96 - 114.
- Li X S, Song M L, An Q X. The heterogeneity research of the impact of China's economic growth on environmental pollution [J]. Nankai Economic Studies, 2013(5): 96 - 114.
- [28] Cole M A, Rayner A J, Bates J M. The Environmental Kuznets Curve: An empirical analysis [J]. Environment and Development, 1997, 2(4): 433 - 450.
- [29] 刘满芝, 杨继贤, 马丁, 等. 基于 LMDI 模型的中国主要大气污染物的空间差异及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2015, 37(2): 333 - 341.
- Liu M Z, Yang J X, Ma D, et al. Spatial disparity and factor analysis of major air pollutant emission in China based on LMDI methods [J]. Resource Science, 2015, 37(2): 333 - 341.
- [30] Fujii H, Managi S, Kaneko S. Decomposition analysis of air pollution abatement in China: Empirical study for ten industrial sectors from 1998 to 2009 [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 59(15): 22 - 31.
- [31] Wu L, Zeng W. Research on the contribution of structure adjustment on SO<sub>2</sub> emissions reduction——Case study Shijingshan District, Beijing [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 18: 849 - 855.
- [32] 赵惠, 吴金希. 基于环境库兹涅茨曲线的京津冀区环境污染转移的测度研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 90 - 97.
- Zhao H, Wu J X. Measurement of environmental pollution transfer in Beijing—Hebei Region based on the Environmental Kuznets Curve [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(5): 90 - 97.
- [33] Pfaff A, Chaudhuri S, Nye H. Household production and Environmental Kuznets Curves—Examining the desirability and feasibility of substitution [J]. Environmental & Resource Economics, 2004, 27(2): 187 - 200.
- [34] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4): 27 - 36.
- Lin B Q, Jiang Z J. Environmental Kuznets Curve prediction and influence factor analysis of carbon dioxide in China [J]. Management World, 2009(4): 27 - 36.
- [35] 高宏霞, 杨林, 付海东. 中国各省经济增长与环境污染关系的研究与预测[J]. 经济学动态, 2012(1):

52 - 57.

Gao H X, Yang L, Fu H D. Research and forecast on the relationship between economic growth and environmental pollution in Chinese provinces [ J ]. Economic Perspectives, 2012(1) : 52 - 57.

[36] 陈佳贵, 黄群慧, 钟宏武. 中国地区工业化进程的综合评价和特征分析[J]. 经济研究, 2006(6) : 4 - 15.

Chen J G, Huang Q H, Zhong H W. The synthetic evaluation and analysis on regional industrialization[J]. Economic Research, 2006(6) : 4 - 15.

[37] Shafik N, Bandyopadhyay S. Economic growth and environment quality: Time - series and cross - country evidence[R]. World Bank, 1992.

## Research on the Relationship between Urbanization and Atmospheric Environmental Quality in the Economic Development of Major Cities in Beijing—Tianjin—Hebei Region

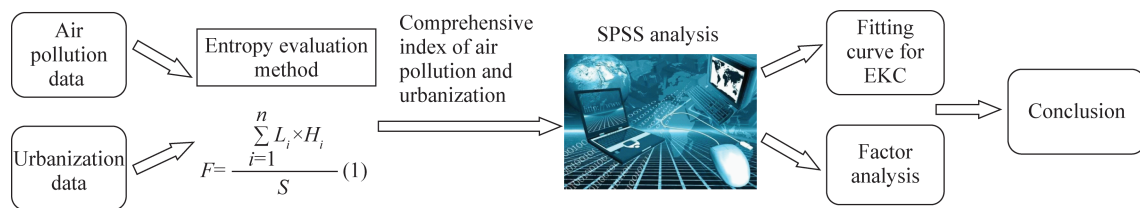
YANG Xiao - yan<sup>1</sup>, JIA Qiu - miao<sup>1</sup>, SUN Da - li<sup>1</sup>, HU Yong - feng<sup>1</sup>, LÜ Xiao - jian<sup>2</sup>

(1. Beijing Climate Change Research Center, Beijing 100071, China;

2. China Standard Conformity Assessment Co. , LTD, Beijing 100031, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) The entropy method was used to establish the comprehensive urbanization index and comprehensive atmospheric environmental pollution index.
- (2) The relationship between comprehensive index of urbanization and atmospheric environmental pollution in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang occurred as ‘inverted U - shaped’, ‘positive U - shaped’ and ‘inverted N - shaped’, respectively.
- (3) The structure effect, scale effect and activity effect had negative effects on atmospheric pollution in Beijing. There was a negative correlation between the structural effect, activity effect and the built - up area belonged to the scale effect and the atmospheric pollution index in Tianjin. For Shijiazhuang, the effect of these factors was not obvious.



**ABSTRACT**

**BACKGROUND:** During rapid urbanization of cities in the Beijing—Tianjin—Hebei Region, the extensive economic development mode of ‘high energy consumption, high pollution and high emission’ has caused a series of atmospheric pollution problems. It is crucial to coordinate the relationship between economic development and atmospheric environmental quality.

**OBJECTIVES:** To investigate the relationship between the urbanization and the atmospheric environmental quality of the three cities of Beijing, Tianjin and Shijiazhuang.

**METHODS:** Based on the data of various indicators of atmospheric environmental quality and urbanization in Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang from 2004 to 2017, the entropy method was used to study the evolution of atmospheric environmental quality in the process of urbanization in multiple dimensions. The annual average concentration of urban atmospheric pollutants  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , and the number of days better than level 2 were 4 atmospheric environmental quality indicators, and 10 development indicators including regional GDP, per capita GDP, proportion of tertiary industries, and built – up area were selected to construct comprehensive index models and regression fitting.

**RESULTS:** The impact of urbanization on atmospheric environmental quality was the result of the combined effect of various factors. The relationship between comprehensive urbanization index and comprehensive atmospheric environmental pollution index in Beijing, Tianjin and Hebei was ‘inverted U – shaped’, ‘positive U – shaped’ and ‘inverted N – shaped’, respectively. The 10 urbanization indicators were classified into structural effects, scale effects and activity effects, and further analyze the impact of various effects on the atmospheric environmental pollution index. For Beijing, the dependent variables of the three types of effects all had negative impacts on atmospheric environmental quality. For Tianjin, the built – up area in the structure effect and scale effect, and the per capita GDP, GDP, resident consumption level and the total retail sales of consumer goods in the activity effect had negative correlations with atmospheric environmental quality. The impact of each dependent variable of the three effects on atmospheric environmental quality was unclear for Shijiazhuang.

**CONCLUSIONS:** The EKC hypothesis can reflect the relationship between the urbanization and atmospheric environmental quality to a certain extent. For the cities like Beijing that have basically completed the transformation of economic development, the EKC hypothesis is established obviously. But for the cities like Tianjin and Shijiazhuang that have not completed the economic restructuring, the relationship between urbanization and atmospheric environmental quality is uncertainty. Further study should be necessary.

**KEY WORDS:** urbanization; atmospheric environmental quality; EKC curve; fitting relationship