

李茜,宋金平,张建辉,等. 2013. 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, 33(9):2402-2411

Li Q, Song J P, Zhang J H, et al. 2013. Dynamics in the effect of China's urbanization on air quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(9):2402-2411

中国城市化对环境空气质量影响的演化规律研究

李茜^{1,2}, 宋金平^{1,*}, 张建辉², 于伟¹, 胡昊³

1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875

2. 中国环境监测总站, 北京 100012

3. 环境保护部信息中心, 北京 100029

收稿日期: 2012-12-28

修回日期: 2013-03-03

录用日期: 2013-03-03

摘要: 运用 2001—2010 年 237 个地级以上城市的面板数据, 共计 2353 个样本, 应用计量经济学分析方法, 研究城市化进程中环境空气主要污染物的演化规律. 在对面板数据进行平稳性检验后, 运用固定效应模型和随机效应模型, 将城市空气主要污染物 SO₂、NO₂、PM₁₀ 的年平均浓度、综合污染指数 4 个空气质量指标与人均 GDP、人口密度、第二产业结构、建成区面积 4 个反映城市社会经济变化的指标进行回归拟合, 得到我国城市经济发展与环境质量变化的关系和演化规律, 并提出政策建议. 结果表明, 2001—2010 年, 我国城市空气质量与经济发展之间的关系并不完全符合倒 U 型曲线, 不同的污染物类型具有不同的演化规律. 10 年间, 随着城市经济的发展, 城市空气中 SO₂ 浓度呈现下降的趋势, 并到达拐点, 符合倒 U 型曲线; 而对于 NO₂、PM₁₀ 浓度及综合污染指数, 10 年间与经济发展之间呈 U 型关系, 即现阶段呈现污染继续加重的态势. 此外, 城市第二产业结构比例、建成区面积与城市空气主要污染物浓度呈显著的正相关关系.

关键词: 城市化; 城市空气质量; 计量经济

文章编号: 0253-2468(2013)09-2402-10

中图分类号: X22

文献标识码: A

Dynamics in the effect of China's urbanization on air quality

LI Qian^{1,2}, SONG Jinping^{1,*}, ZHANG Jianhui², YU Wei¹, HU Hao³

1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875

2. China Environmental Monitoring Station, Beijing 100012

3. Environmental Information Center Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029

Received 28 December 2012;

received in revised form 3 March 2013;

accepted 3 March 2013

Abstract: This study aims to investigate the relationship between urbanization and air pollution at the city level by analyzing annual panel data of 237 cities and total amount of 2353 samples during the period 2001—2010. Firstly, we took the unit stationary test of panel data, and then used fixed effect model and random effect model to investigate the relationship. The dependent variables included annual average concentrations of SO₂, NO₂, PM₁₀ and comprehensive index, and the explanatory variables included per capita GDP, population density, proportion of secondary industry and urban area. The analysis results showed that the characteristics of relationship were dependent on types of pollutants. We found the existence of an invert U-shaped curve for SO₂, which demonstrated that SO₂ pollution of cities had reached the turning point, with the concentration of SO₂ decreased along with the economic development. In comparison, U-shaped curves existed for NO₂, PM₁₀ and comprehensive index, which showed that the concentrations of NO₂ and PM₁₀ were still in the upward trend at current stage. Moreover, the growth of secondary industries and the expansion of urban area had strong positive relationship with the concentrations of main pollutants.

Keywords: urbanization; air quality; econometric analysis

1 引言 (Introduction)

中国经济在迅猛发展的同时, 城市化的速度也明显加快, 水平显著提升. 1978—2009 年, 我国城市

化率由 17.9% 提高到 46.6%, 年均提高近 0.93%; 2007 年, 全国共有城市 655 个, 其中大型及大型以上城市 237 个, 中等城市 151 个, 小城市 267 个, 并初步形成若干规模较大、联系紧密的城市群(张平,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41171444); 2010 年中央高校基本科研业务费专项资金

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41171444) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of 2010

作者简介: 李茜 (1983—), 女, 博士研究生, E-mail: liqian@cnemc.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: jinpingsong@163.com

Biography: LI Qian (1983—), female, Ph. D. candidate, E-mail: liqian@cnemc.cn; * **Corresponding author**, E-mail: jinpingsong@163.com

2010),城市作为我国经济社会发展的中心区域,在国民经济发展过程中发挥了关键性的作用,将成为推动现代经济社会发展的源动力.但经济和城市化快速发展也带来一系列环境问题,持续的工业污染、城市的扩张致使环境污染加剧和生态恶化(王家庭等,2010;刘耀彬等,2008).全国城市空气中主要污染物浓度仍处于较高水平,2010年,全国仍有17.5%的地级以上城市环境空气质量超标,且灰霾、细粒子等新的环境问题不断凸显(中华人民共和国环境保护部,2011).“十二五”时期,中国政府提出环境保护的政策实施“要在发展中保护,在保护中发展”,在这种背景下,研究中国经济增长、城市化进程与环境污染的关联,探寻中国社会经济发展现阶段的环境污染特征和演化规律,不仅关系到环境污染治理,提高环境质量等方面,并且对经济政策的制定,城市化发展规划的实施具有重要的参考价值.

从国内外的研究来看,关于经济发展、城市化进程和环境质量关系的研究还存在一些局限性,没有全面地反映其关联及演化规律.目前,关于经济、城市发展与环境质量关系的研究基本运用“环境库兹涅茨曲线”(EKC)理论(Diao *et al.*, 2009;李瑞娥等,2008;李达等,2007).环境EKC理论1991年由Grossman和Krueger提出(Grossman *et al.*, 1991),指出环境污染先随着经济增长而恶化,发展到一定程度会出现拐点,经济发展会促使环境污染的减轻.国内外许多研究都对EKC进行了验证或分析,但研究的结果并不一致,也有学者对EKC理论和实证研究提出了质疑(李正升,2010;钟茂初等,2010).

对于现有EKC的研究主要有以下几点不足:第一,研究数据的局限性可能导致结果的不一致性.一般可将EKC研究的数据类型分为截面数据(Cross-Section Data)、时序数据(Time-Series Data)和面板数据(Panel Data)3类,其中,截面数据和时序数据可能会造成研究结果的偏差.截面数据是基于不同区域的数据,而不同区域经济发展水平处在不同的阶段,如果出现倒U型曲线的拟合结果,也不代表在所有研究区域均存在EKC曲线(Unruh *et al.*, 1998);时序数据指的一个研究地区多个时间段的数据,反映了变化趋势,但存在样本量有限等缺点,会影响拟合结果的准确性;面板数据具备截面数据和时序数据的特点,应用面板数据进行EKC

的实证研究具有合理性(Coondoo *et al.*, 2002; Narayan *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2008).第二,大多数研究缺乏对数据的有效性检验和数理统计分析.部分研究虽然使用面板数据,但缺乏对面板数据的平稳性检验.非平稳的时间序列往往表现出共同的变化趋势,而这些序列间本身不一定有直接的关联,此时得到的回归结果没有实际意义,称为伪回归(Choi, 2001; Zilio *et al.*, 2011; 王志刚, 2008).同时,大多研究在对面板数据进行回归分析时,缺乏对回归方法进行筛选的过程,会导致结果的不可靠性.第三,指标选取不完善.大多数EKC研究仅运用了人均GDP与环境指标进行拟合,并没有考虑其他对环境质量产生影响的社会经济指标,这就可能会导致研究结果的片面性.同时,在选取环境质量指标时,大多研究应用的是污染物排放量这样间接反映环境质量的指标(李智等,2008;龙丽莲,2010;Lee *et al.*, 2010),而运用直接反映环境质量的主要污染物浓度进行EKC研究的文献较少,涉及综合性的环境质量指标的研究则更少.

基于此,本文运用2001—2010年237个地级以上城市的面板数据,共计2353个样本,应用计量经济学分析方法对面板数据进行检验,并对回归分析的变截距模型进行筛选,将城市空气主要污染物SO₂、NO₂、PM₁₀的年平均浓度、综合污染指数4个空气质量指标与人均GDP、人口密度、第二产业结构、建成区面积4个反映社会经济发展的指标进行回归拟合,得到我国城市经济发展与环境质量变化的关系和演化规律.

2 模型的建立和数据统计(Model establishment and data statistics)

2.1 模型的建立

从环境库兹涅茨曲线的理论和实证研究看,多数研究认为,环境质量和经济发展之间存在倒U型关系(Franklin *et al.*, 2012; Grossman *et al.*, 1995; Lindmark, 2002; 王西琴等, 2013).但随着研究的不断深入,许多研究表明,倒U型关系并不是最可靠的,环境质量和经济增长呈N形关系,即随着经济增长率的提高,物质利用量的大幅增加,环境质量和经济增长分离状态不会长期持续下去,经济发展达到一定水平后会重新组合,环境质量又会呈下降趋势(Copeland *et al.*, 2004; 李玉文等, 2005; Park *et al.*, 2011; Torras *et al.*, 1998).有的研究(Kim, 1999; Roca *et al.*, 2001; 赵细康等, 2005; 朱翠华等,

2012)也得出同步关系、U型关系、倒N型关系等。因此,在模型建立时,需要考虑二次曲线和三次曲线2种关系。

在环境质量指标方面,选取中国城市空气质量的主要监测指标 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} ,这3项污染物是我国城市空气主要污染物,且有长时间序列的监测数据。同时,为综合反映城市空气质量,计算空气综合污染指数并进行拟合。在城市发展指标上,除选取传统的人均GDP指标作为解释变量外,还考虑能够反映城市社会经济发展,并对环境质量产生潜在作用的指标,包括人口密度、第二产业结构比例、建成区面积。人口的聚集是反映城市化水平的重要标志,人口密度可以反映一个地区经济活动的频繁程度和市场规模的大小,也是影响经济发展的重要因素。城市的产业结构标志着经济发展水平的高低和发展阶段,第二产业是污染物排放的主要来源,也代表了经济发展对环境质量改善带来的压力。建成区面积是代表城市化进程的重要指标,建成区面积加速增长、城市建设用地比例的加大反映了城市的扩张,以及对环境质量带来的不利影响。

在变量的形式上,自变量和因变量的双对数变换可以降低异方差性的影响,同时对数变换后,自变量的系数可以看作是对因变量的弹性,有较强的应用意义。并且研究表明,环境质量与人均GDP的双对数形式之间存在显著的相关关系(Bimonte, 2002; Kheder *et al.*, 2012)。此外,加入时间变量用来表示因变量随时间推移的自发变化趋势。综合考虑以上因素,建立模型1(二次曲线拟合)和模型2(三次曲线拟合),其基本形式如式(1)和(2)所示。

$$\ln P / \ln I = \beta_1 \ln \text{GDP} + \beta_2 (\ln \text{GDP})^2 + \beta_3 \ln D + \beta_4 \ln R + \beta_5 \ln U + \beta_6 T + \mu \quad (1)$$

$$\ln P / \ln I = \beta_1 \ln \text{GDP} + \beta_2 (\ln \text{GDP})^2 + \beta_3 (\ln \text{GDP})^3 + \beta_4 \ln D + \beta_5 \ln R + \beta_6 \ln U + \beta_7 T + \mu \quad (2)$$

式中, P 表示 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 的年均浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), I 为空气综合污染指数(无量纲),GDP为人均地区生产总值(元 \cdot 人 $^{-1}$), D 为人口密度(人 \cdot km $^{-2}$), R 为第二产业结构比例, U 为建成区面积(km 2), T 为时间变量。因变量为 P 和 I ,解释变量为GDP、 D 、 R 、 U 。其中, I 的计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{oi}} \quad (3)$$

式中, C_i 为 SO_2 、 PM_{10} 、 NO_2 的年均浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), C_{oi} 为每项污染物对应的空气质量国家二级标准(GB3095—1996)。

2.2 数据来源与统计

本研究的统计样本量为2001—2010地级以上城市的数据,共237个城市,总计2353条、18824个数据。环境质量的数据为地级以上城市 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 的年均浓度,由于我国对 PM_{10} 的监测是从2005年起才全面开展的,之前只有部分城市开展,因此,只对10年来连续开展 PM_{10} 监测的城市进行研究,共筛选出237个城市,数据来源于历年《中国环境质量报告》。反映城市社会经济发展程度的数据为人均GDP、人口密度、第二产业比例、建成区面积,数据均来源于历年《中国城市统计年鉴》的市辖区统计数据,2001和2002年的城市建设用地比例数据缺失。对相关数据进行统计,得到表1和图1。

表1 数据描述

Table 1 Data description

数据类型	SO_2 /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	PM_{10} /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	NO_2 /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	I	GDP /(元 \cdot 人 $^{-1}$)	D /(人 \cdot km $^{-2}$)	R	U /km 2
平均值	47	92	31	2.1	32066	899.92	51.78%	99
中位数	41	89	29	2.0	26555	680.04	52.20%	62
最大值	284	256	73	7.7	199657	14052.41	90.97%	886
最小值	2	19	3	0.5	2544	31.15	13.61%	9

从图1可以看出,我国地级以上城市的人均GDP在10年间呈显著上升的趋势,这与我国经济发展的趋势相一致。另一方面,从城市空气主要污染物浓度来看,总体呈下降的趋势,尤其是在“十一

五”期间,主要污染物浓度总体有所下降,但 NO_2 整体变化不大,在2010年还有升高的趋势。人口密度基本变化不大,第二产业结构总体略有升高,建成区面积逐年增大,表明了我国城市不断扩张的趋势。

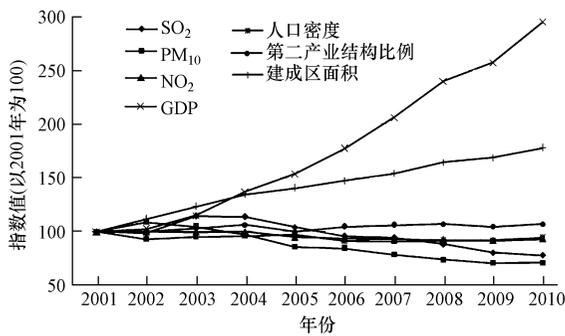


图1 2001—2010年各变量变化趋势

Fig.1 Change trend of variables in 2001—2010

3 模型分析方法及结果分析 (Modeling method and result analysis)

3.1 模型分析方法

应用计量经济学的分析方法对因变量和解释变量进行拟合. 首先应用单位根检验的方法对面板数据进行平稳性检验, 分别使用 ADF-Fisher Chi-square、PP-Fisher Chi-square 和 Levin, Lin & Chu t 统计量进行单位根检验, 结果表明, 对这 3 种统计量的检验, 所有因变量和解释变量的序列均是平稳的, 可以进行回归分析.

在回归方法的选择上, 从时间看, 模型应该允许个体成员存在个体影响, 因此, 运用变截距模型进行回归; 变截距模型分为固定效应模型和随机效应模型(孙敬水, 2008). 豪斯曼检验是判断如何选择固定效应模型和随机效应模型的常用方法, 若通过豪斯曼检验, 则选择固定效应模型, 反之选择随机效应模型. 针对不同的数据, 选用的模型有所不同, 在相关研究中, Brajer 等(2011)认为随机效应模型在模拟环境质量与经济发展的过程中更加适合; 而 Shen(2006)在 EKC 的实证研究中发现, 检验结果使用固定效应模型更为适合. 本文为便于选择和比较, 将运用两种方法进行回归拟合, 并通过豪斯曼检验结果进行判定.

3.2 模拟结果分析

运用模型 1 和模型 2 进行回归拟合. 其中, 模型 1 的二次拟合和模型 2 的三次拟合中, 分别运用两种形式, 即只将人均 GDP 作为解释变量(模型 1-A 和模型 2-A), 以及加入人口密度、第二产业比例、建成区面积 3 个解释变量进行拟合(模型 1-B 和模型 2-B), 以便于对比模拟结果.

3.2.1 SO₂ 对 SO₂ 的拟合结果见表 2, 从豪斯曼检验结果可以看出, 二次曲线和三次曲线的拟合均用

随机效应模型更合适. 从 SO₂ 和人均 GDP 的拟合结果看, 在二次曲线拟合中, 模型 1-A 和模型 1-B 的随机效应模型的回归结果显著, 人均 GDP 均通过了 1% 的显著性检验; 从系数看, 城市空气 SO₂ 污染在 10 年间呈倒 U 型的趋势, 即城市空气中的 SO₂ 浓度首先随着人均 GDP 的升高而污染加重, 到达拐点后, 污染减轻, 两个模型拐点处的人均 GDP 分别为 28180 元和 12129 元. 这个结果印证了我国 10 年来城市空气 SO₂ 污染先加重后减轻的变化趋势, 一定程度上验证了开展 SO₂ 总量减排等污染治理措施带来的成效. 只从人均 GDP 与 SO₂ 的拟合结果看, 拐点与 2006 年全国城市人均 GDP 的平均值相近. 在三次曲线的拟合中, SO₂ 和人均 GDP 的拟合没有通过显著性检验, 证明了城市空气的 SO₂ 污染与经济发展状况在十年间不存在 N 型曲线的变化. 值得注意的是, 随机效应模型更显著, 表明在我国不同城市 SO₂ 的变化具有不同的特征, 拐点并不一致.

从其他解释变量结果看, 人口密度没有通过显著性检验, 而第二产业结构比例、建成区面积与城市空气中 SO₂ 浓度均存在显著的相关关系. 在二次曲线拟合中, 第二产业结构比例与空气中 SO₂ 浓度的拟合呈正相关关系, 并通过了 1% 的显著性检验, 弹性系数约为 0.22, 表明随着第二产业结构比例的增加, 空气中 SO₂ 污染会随之加重, 第二产业结构比重每增加 1%, 空气中 SO₂ 浓度增加 0.22%. 建成区面积与空气中 SO₂ 浓度也呈正相关关系, 通过了 1% 的显著性检验, 但影响强度较小, 弹性系数约为 0.16. 可见, 工业污染源排放对空气中 SO₂ 的污染具有较强的正向影响; 同时建成区面积的增加, 城市扩张带来的影响也不容忽视, 主要源于扬尘和道路交通污染等.

3.2.2 NO₂ 城市空气 NO₂ 浓度的拟合结果见表 3, 豪斯曼检验结果表明, 二次曲线和三次曲线的拟合均用固定效应模型更合适. 从与人均 GDP 的拟合结果看, 在二次曲线的拟合中, 模型 1-A 和模型 1-B 中, 人均 GDP 均通过了 1% 的显著性检验, 表明随着城市经济的发展, 空气中 NO₂ 浓度在十年间呈 U 型的趋势, 即我国空气中 NO₂ 污染仍在不断加重, 还没有到达污染随经济发展而减轻的拐点, 经济发展和 NO₂ 的污染还没有分离, 不存在 EKC 曲线. 模型 1-A 和 1-B 中 U 型曲线的最低点坐标分别为 18400 元和 20468 元, 处在我国城市 2003 年和 2004 年间平均人均 GDP 的水平, 样本点多数分布在 U 型曲线右

表2 SO₂平均浓度与相关解释变量的固定效应模型和随机效应模型拟合结果

Table 2 Simulation result of SO₂ average concentration and explanatory variables by fixed effects model and random effects model

模型	C	lnGDP	(lnGDP) ²	(lnGDP) ³	lnD	lnR	lnU	Time Trend	R ²	F-test/λ	豪斯曼检验	
固定效应模型	模型 1-A	-0.3596 (-0.2436)	0.7941 *** (2.6693)	-0.03990 *** (-2.6159)				0.0054 (0.7316)	0.7143	22.1105 ***		
	模型 1-B	-1.2996 (-0.86110)	0.7483 ** (2.4755)	-0.0382 ** (-2.4780)	-0.0003 (-0.0122)	0.1860 ** (2.4546)	0.1302 *** (2.8169)	-0.0013 (-0.1719)	0.7164	21.9975 ***		
	模型 2-A	7.4748 (0.7333)	-1.6512 (-0.5222)	0.2125 (0.6532)	-0.0086 (-0.7767)			0.0045 (0.6045)	0.7144	22.0167 ***		
	模型 2-B	3.8989 (0.3810)	-0.8711 (-0.2750)	0.1291 (0.3959)	-0.0057 (-0.5136)	-0.0002 (-0.0077)	0.1819 ** (2.3865)	0.1300 *** (2.8129)	-0.0019 (-0.2450)	0.7165	21.9004 ***	
随机效应模型	模型 1-A	-0.6972 (-0.4817)	0.8409 *** (2.8792)	-0.0410 *** (-2.7566)				0.0020 (0.3254)	0.0053	4.1697 ***	1.9177	
	模型 1-B	-1.7019 (-1.1680)	0.7942 *** (2.6846)	-0.0422 *** (-2.8074)		0.0129 (0.6599)	0.2199 *** (3.1378)	0.1556 *** (4.4876)	0.0017 (0.2780)	0.0182	7.2424 ***	9.4240
	模型 2-A	9.8923 (0.9820)	-2.4594 (-0.7882)	0.2994 (0.9333)	-0.0116 (-1.0623)			0.0011 (0.1824)	0.0058	3.4100 ***	3.1118	
	模型 2-B	4.24598 (0.4201)	-1.0553 (-0.3378)	0.1487 (0.4627)	-0.0065 (-0.5947)	0.0128 (0.6528)	0.2159 *** (3.0662)	0.1547 *** (4.4560)	0.0012 (0.1943)	0.0184	6.2558 ***	10.2549

注:括号内的数据表示t检验值,***表示在1%水平上显著,**表示在5%水平上显著,*表示在10%水平显著,下同。

表3 NO₂平均浓度与相关解释变量的固定效应模型和随机效应模型拟合结果

Table 3 Simulation result of NO₂ average concentration and explanatory variables by fixed effects model and random effects model

模型	C	lnGDP	(lnGDP) ²	(lnGDP) ³	lnD	lnR	lnU	Time Trend	R ²	F-test/λ	豪斯曼检验	
固定效应模型	模型 1-A	6.7891 *** (7.6606)	-0.6900 *** (-3.8637)	0.0351 *** (3.8371)				-0.0115 *** (-2.6135)	0.6677	17.7499 ***		
	模型 1-B	6.1504 *** (6.7888)	-0.7111 *** (-3.9192)	0.0358 *** (3.8678)		-0.0009 (-0.0723)	0.1129 *** (2.4809)	0.0891 *** (3.2121)	-0.0162 *** (-3.4492)	0.6701	17.6671 ***	
	模型 2-A	-7.3930 (-1.2095)	3.7364 ** (1.9707)	-0.4218 ** (-2.1623)	0.0156 ** (2.3450)			-0.0099 ** (-2.2279)	0.6685	17.7365 ***		
	模型 2-B	-9.9271 (-1.6187)	4.2972 ** (2.2638)	-0.4817 ** (-2.4643)	0.01768 *** (2.6505)	-0.0012 (-0.0951)	0.1257 *** (2.7506)	0.0896 *** (3.2350)	-0.0144 *** (-3.0301)	0.6712	17.6737	
随机效应模型	模型 1-A	6.2641 *** (7.2631)	-0.6474 *** (-3.7185)	0.0367 *** (4.1379)				-0.021695 *** (-6.12251)	0.0252	20.2212 ***	18.7888 ***	
	模型 1-B	5.152095 *** (5.987998)	-0.589843 *** (-3.365953)	0.030367 *** (3.413592)		0.014053 (1.251130)	0.096138 ** (2.389711)	0.168614 *** (9.056534)	-0.022196 *** (-6.448220)	0.0628	26.1330 ***	21.4456 ***
	模型 2-A	-2.453086 (-0.40799)	2.066408 (1.10989)	-0.243049 (-1.27028)	0.009545 (1.46347)			-0.021164 *** (-5.951423)	0.0262	15.7650 ***	28.9078 ***	
	模型 2-B	-6.851004 (-1.139848)	3.140106 * (1.691041)	-0.354409 * (-1.856377)	0.013132 * (2.017571)	0.014550 (1.297173)	0.103346 ** (2.562902)	0.170699 *** (9.172705)	-0.021265 *** (-6.133515)	0.0644	23.0294 ***	26.6313 ***

侧.从三次曲线的拟合看,模型 2-A 和 2-B 中,人均 GDP 均通过了 5% 的显著性检验,呈 N 型特征,也不符合 EKC 曲线.从顶点坐标看,N 型曲线第一个顶点坐标分别对应的人均 GDP 为 2510 元和 2624 元,第二个顶点坐标分别为 26909 元和 29525 元.从 N 型曲线的顶点坐标看,所有样本的人均 GDP 最小值为 2544 元,因此,第一个顶点没有实际意义,这可能与这 10 年的数据无法准确拟合出第一个顶点的坐标有关;第二个顶点坐标与二次曲线拟合的 U 型最低点相差不大,因此,我们可以认为 10 年间城市空气中 NO_2 污染呈 U 型发展的特征,现阶段仍随着城市经济发展而污染加重,不存在 EKC 关系.

其他解释变量中,与 SO_2 相似,人口密度与 NO_2 没有显著的相关关系,第二产业结构和建成区面积均与 NO_2 存在显著的正相关关系.从弹性系数看,第二产业结构对 NO_2 污染的影响更大,弹性系数为 0.11~0.13,建成区面积的弹性系数约为 0.09.

从以上结果分析可以看出,在 2004 年之前, NO_2 污染有减轻的趋势,2004 年之后, NO_2 污染随着城市的经济发展而加重.有研究证明,有些发达国家已经出现了这种态势,即环境质量随经济发展在改善后又趋于恶化的趋势,而出现这种现象的原因可能是经济增长率的提高致使物质消耗的增加等(李玉文等,2005).具体到本研究中,可以从城市 NO_2 的污染来源和我国的污染治理措施来分析.空气中的 NO_2 主要来自重油、汽油、煤炭、天然气等矿物燃料在高温条件下的燃烧,而城市空气 NO_2 的主要来源为汽车尾气排放(闫静等,2012).随着城市人均收入的提高和城市的扩张,机动车数量迅速增加,有数据显示(陈璇璇,2008),我国私人汽车保有量的年均增长率在 2004 年后显著增加,2004 年较 2003 年的增长率为 11.9%,而 2005 年迅速增加到 39.2%,此后一直维持在高水平.可以看到,近年来城市 NO_2 污染来源急剧增加,但我国对城市 NO_2 污染的治理力度和措施并没有跟上这种变化,在环保设施的投入及污染源控制的力度上, NO_2 污染的控制并不作为重点,这都导致了 NO_2 污染状况随着城市化的加速发展而恶化,现阶段仍处在加重状态.从各城市的 NO_2 年平均值来看,十年间 NO_2 浓度并没有显著下降,2010 年反而有所上升,这与拟合的结果相符.在国家“十二五”规划中,明确提出了氮氧化物污染减排的目标,这将对今后城市空气 NO_2 污染的改善起到关键作用.

3.2.3 PM_{10} 城市空气 PM_{10} 浓度的拟合结果见表 4,二次曲线和三次曲线的拟合均用固定效应模型更合适.从与人均 GDP 的拟合结果看,在模型 1-A 和模型 1-B 中,人均 GDP 均通过了 1% 的显著性检验,与 NO_2 的趋势相同,空气中 PM_{10} 浓度在 10 年间呈 U 型发展趋势,两个模型的顶点坐标对应的人均 GDP 分别为 49122 元和 49288 元,大部分样点位于最低点左侧.从三次曲线结果来看,模型 2-B 中的人均 GDP 通过了 10% 的显著性检验,呈 N 型曲线.从顶点坐标看,第一个顶点坐标对应的人均 GDP 为 307 元,没有实际意义;第二个顶点坐标对应的人均 GDP 为 47995 元,与二次曲线的拟合结果相符.因此,这 10 年间,城市空气中 PM_{10} 污染呈 U 型曲线的变化趋势,不存在 EKC 曲线.其他解释变量中,人口密度和第二产业结构与 PM_{10} 浓度没有显著的相关关系.建成区面积与 PM_{10} 浓度存在显著的正相关关系,通过了显著性检验,弹性系数约为 0.08,这表明城市建成区面积每增加 1%,会引起 PM_{10} 的污染浓度升高 0.08%.

从城市数据的样点分布看,大部分样点均分布在 U 型曲线的左侧,占总样点的 86.40%,因此,10 年间,总体上我国大部分城市的 PM_{10} 污染随经济发展而呈现减轻的趋势,这与 PM_{10} 浓度总体呈下降趋势相一致.而分布在右侧的样点有 320 个,占总样点的 13.60%,从这些样点的年份看,大部分都是 2005 年之后的城市数据;而从城市的分布看,主要分布在东部沿海的大型城市群及周边,如京津冀、长三角、珠三角及山东省部分大型城市.从 PM_{10} 污染的影响因素看,建成区面积对其污染加重有重要的影响,这与 PM_{10} 的污染来源有关,研究表明(吴雷等,2003;余锡刚等,2010),除沙尘天气影响外,城市 PM_{10} 主要来源于道路扬尘、建筑扬尘等.近年来,大型城市的快速扩张不可避免地带来施工和建设,机动车行驶会载带地面扬尘,这些都是城市 PM_{10} 污染的主要原因,也是 2005 年之后我国东部沿海城市群及发展水平较高的城市呈现 PM_{10} 污染加重趋势的主要原因,也表明我国对空气中颗粒物污染的治理还较为薄弱,跟不上城市快速发展的步伐.因此,现阶段我国城市空气的 PM_{10} 污染,尤其是在城市化发展水平较高的地区仍是呈加重的态势,不存在 EKC 曲线.10 年间,我国城市空气中的 PM_{10} 一直以来均是首要污染物,2010 年仍有 10% 的城市 PM_{10} 年均浓度超标,颗粒物的污染改善仍面临很大压力.

表 4 PM₁₀ 平均浓度与相关解释变量的固定效应模型和随机效应模型拟合结果

Table 4 Simulation result of PM₁₀ average concentration and explanatory variables by fixed effects model and random effects model

模型	C	lnGDP	(lnGDP) ²	(lnGDP) ³	lnD	lnR	lnU	Time Trend	R ²	F-test/λ	豪斯曼检验
固定 效应 模型	模型 1-A	14.16114 *** (17.54993)	-1.770589 *** (-11.04265)	0.081956 *** (10.14677)				-0.030928 *** (-8.941969)	0.8001	29.0426 ***	
	模型 1-B	13.44341 *** (16.12450)	-1.691871 *** (-10.29437)	0.078288 *** (9.500153)	0.001142 (0.122384)	-0.005926 (-0.162626)	0.080883 *** (3.396514)	-0.036117 *** (-9.55995)	0.8009	28.7148 ***	
	模型 2-A	-0.703868 (-0.125486)	2.798433 (1.63298)	-0.382962 ** (-2.20346)	0.015659 *** (2.67789)			-0.029679 *** (-8.518749)	0.8009	29.0544 ***	
	模型 2-B	-1.672117 (-0.297183)	2.948663 * (1.718098)	-0.394276 ** (-2.263804)	0.015926 *** (2.716338)	0.000520 (0.055827)	0.002991 (0.081898)	0.081277 *** (3.419279)	-0.034842 *** (-9.168530)	0.8017	28.7326 ***
随机 效应 模型	模型 1-A	13.59205 *** (17.18010)	-1.697395 *** (-10.78440)	0.080566 *** (10.20335)				-0.037228 *** (-12.72713)	0.3501	353.7454 ***	21.0228 ***
	模型 1-B	12.64963 *** (15.87479)	-1.626982 *** (-10.18681)	0.075434 *** (9.430934)	0.009084 (1.05071)	0.062920 ** (1.893441)	0.109840 *** (6.655814)	-0.039117 *** (-13.58006)	0.3593	183.5981 ***	41.1504 ***
	模型 2-A	2.503897 (0.45202)	1.706054 (1.00945)	-0.265480 (-1.55008)	0.011654 ** (2.02268)	-0.036611 *** (-12.46855)			0.3515	266.8404 ***	25.3337 ***
	模型 2-B	-0.715118 (-0.128894)	2.467635 (1.460532)	-0.341048 * (-1.991343)	0.014029 ** (2.434526)	0.009009 (1.043688)	0.069369 ** (2.083327)	0.111906 *** (6.776420)	-0.038414 *** (-13.28416)	0.3613	158.6648 ***

表 5 综合污染指数与相关解释变量的固定效应模型和随机效应模型拟合结果

Table 5 Simulation result of comprehensive index and explanatory variables by fixed effects model and random effects model

模型	C	lnGDP	(lnGDP) ²	(lnGDP) ³	lnD	lnR	lnU	Time Trend	R ²	F-test/λ	豪斯曼检验
固定 效应 模型	模型 1-A	5.250070 *** (7.49169)	-0.825424 *** (-5.84535)	0.038047 *** (5.255706)				-0.023852 *** (-6.83926)	0.7911	33.4792 ***	
	模型 1-B	4.544186 *** (6.370655)	-0.845368 *** (-5.917450)	0.038661 *** (5.302546)	-0.003067 (-0.308100)	0.122232 *** (3.412839)	0.099695 *** (4.564367)	-0.029150 *** (-7.876529)	0.7941	33.5855 ***	
	模型 2-A	-8.012029 * (-1.658583)	3.313882 ** (2.21151)	-0.389255 ** (-2.52483)	0.014587 *** (2.774667)			-0.022361 *** (-6.34676)	0.7919	33.4775 ***	
	模型 2-B	-10.73868 ** (-2.225783)	3.915555 *** (2.621978)	-0.453264 *** (-2.947679)	0.016804 *** (3.202687)	-0.003343 (-0.336532)	0.134338 *** (3.738243)	0.100167 *** (4.595939)	-0.027405 *** (-7.341730)	0.7951	33.6365 ***
随机 效应 模型	模型 1-A	4.920028 *** (7.11922)	-0.783300 *** (-5.62050)	0.037345 *** (5.250986)				-0.027769 *** (-9.06313)	0.2022	198.5038 ***	11.0025 **
	模型 1-B	4.110900 (5.928008)	-0.797914 (-5.677687)	0.035998 (5.033981)	0.003707 (0.394652)	0.147419 (4.371876)	0.120005 (6.952467)	-0.029670 (-9.703002)	0.2221	111.4920 ***	17.7033 ***
	模型 2-A	-6.001684 (-1.253228)	2.621612 * (1.76659)	-0.313914 ** (-2.05729)	0.011990 ** (2.30452)	-0.026807 *** (-8.68319)			0.2040	150.4401 ***	15.6978 ***
	模型 2-B	-9.952225 ** (-2.082375)	3.576555 ** (2.420546)	-0.415625 *** (-2.733947)	0.015422 *** (2.97406)	0.003895 (0.415481)	0.157193 *** (4.648870)	0.121935 *** (7.071440)	-0.028411 *** (-9.219856)	0.2250	97.1542 ***

3.2.4 空气综合污染指数 空气综合污染指数综合反映了前面 3 项污染物的污染程度和超标情况。豪斯曼检验表明,二次曲线和三次曲线的拟合均用固定效应模型更合适(表 4)。在模型 1-A 和模型 1-B 中,人均 GDP 均通过了 1% 的显著性检验,综合污染指数在 10 年间呈 U 型趋势,两个模型的顶点坐标对应的人均 GDP 分别为 51402 元和 55999 元。从三次曲线看,模型 2-A 和 2-B 中,人均 GDP 均通过了 5% 的显著性检验,呈 N 型曲线。但从顶点坐标看,第一个顶点坐标位于人均 GDP 1200 元左右,小于样本中人均 GDP 的最小值,无实际意义;第二个顶点坐标对应的人均 GDP 分别为 46049 元和 47656 元,与二次曲线模拟结果相近。从模拟结果看,城市空气综合污染状况与 PM₁₀ 的污染拟合结果最接近,现阶段污染改善面临较大压力,这主要是由于在 10 年间,超标最为严重的污染物为 PM₁₀。

影响综合污染指数的其他解释变量为第二产业结构和城市建成区面积,均通过了 1% 的显著性检验。第二产业结构与综合污染指数呈显著的正相关关系,弹性系数为 0.12 ~ 0.13,表明产业结构对城市空气污染状况有重要影响,第二产业的工业粉尘和烟尘排放等均为城市空气中污染物的主要来源。建成区面积也与综合污染指数呈正相关,弹性系数约为 0.10,表明城市扩张对空气污染的加重有显著的作用。

3.3 模拟结果讨论

为检验研究结果的可靠性,总结了国内关于城市空气污染物浓度与经济发展相关性研究的结论。由于国内大部分 EKC 研究(胡明秀等,2005;凌虹等,2009;夏自兰等,2010;杨凯等,2003)选取的指标

为污染物排放量,具有可比性的文献并不多,且评价单元、时间段和研究方法都有所差异,因此,只对总体结论进行对比。对比结果表明,SO₂、NO₂/NO_x (部分文献应用 NO_x 浓度)、综合污染指数的变化趋势基本与本文相符,有关 PM₁₀ 的研究结论有一定差别。从 SO₂ 浓度看,除个别文献外(杨丹辉等,2011),大部分文献(杜涛等,2008;杨海生等,2008;张喆等,2007)得到的曲线类型与本文相同,现阶段已经达到拐点,SO₂ 浓度随着经济发展的加快而下降。从 NO₂/NO_x 浓度看,有 2 个文献得到的模拟结果是倒 U 型(杨海生等,2008;李红莉,2008),其中,对山东省的实证研究中(李红莉,2008),只有东营和威海达到了拐点,其他大部分城市处在污染加重阶段,这也与本文结论相符;PM₁₀ 其他文献中的结论与本文相同,即 NO₂/NO_x 的浓度处在随人均 GDP 的增加而升高的阶段。从 PM₁₀ 浓度看,只有 1 个文献(李红莉,2008)与本文结论相符,PM₁₀ 浓度仍处在升高阶段;杨丹辉等(2011)对山东省 PM₁₀ 的研究中,其趋势虽为倒 N 型,但仅东营达到了拐点,其他城市 PM₁₀ 处在上升阶段,也与本文结论相符;对比其他 2 个 PM₁₀ 处在下降趋势的文献发现,研究时段或在 1990—2003 年(张喆等,2007),或是不属于经济高度发展的城市(杜涛等,2008),而本文中处在 U 型曲线右侧的样点大部分是 2005 年之后、经济发展较快的城市,因此,这 2 个文献与本文的结论不矛盾。此外,对空气综合污染指数进行研究的结论与本文相符。通过分析可以得出,有关我国城市空气质量与经济发展的 EKC 实证研究的文献中,其总体结论与本文基本相符,印证了本文研究结果的可靠性。

表 6 评价指标、单元、时间和结论与相关文献的对照表

Table 6 Comparison of evaluation item, range, time and results between this paper and other relevant literatures

环境指标	经济指标	评价单元	时间段	结论对比				文献来源
				SO ₂	NO ₂ /NO _x	PM ₁₀	综合污染指数	
SO ₂ 、NO _x 浓度	人均 GDP	全国 46 个城市	1994—2005 年	倒 U 型	倒 U 型	/	/	杨海生等,2008
SO ₂ 、NO ₂ 、PM ₁₀ 浓度	人均 GDP	山东 17 个城市	1995—2008 年	N 型	N 型	倒 N 型	/	杨丹辉等,2011
SO ₂ 、NO ₂ 、PM ₁₀ 浓度	人均 GDP	山东 17 个城市	1995—2005 年	无曲线关系	倒 U 型	N 型	/	李红莉,2008
SO ₂ 、NO _x 、PM ₁₀ 浓度	人均 GDP	全国 46 个城市	1990—2003 年	下降趋势	升高趋势	下降趋势	/	张喆等,2007
SO ₂ 、NO ₂ 、PM ₁₀ 浓度	人均 GDP	泸州市	1995—2007 年	下降趋势	先下降后增加	下降趋势	/	杜涛等,2008
空气综合污染指数	人均 GDP	青岛市	1996—2008 年	/	/	/	N 型	李国华等,2011

4 结论(Conclusions)

1) 我国城市空气质量与经济发展之间的关系

并不完全符合倒 U 型曲线,不同的污染物类型具有不同的演化规律。2001—2010 年,城市空气中 SO₂ 浓度出现了拐点,为倒 U 型曲线,若只考虑人均 GDP

对环境质量的影响,倒 U 型曲线的拐点为 28180 元,若同时考虑人口密度、第二产业结构和建成区面积的影响,拐点为 12129 元.从人均 GDP 与 SO_2 的拟合结果看,拐点与 2006 年全国城市人均 GDP 的平均值近似,也就是说“十一五”期间,我国城市 SO_2 污染已经在总体上跨过了拐点,进入了随着经济发展而污染减轻的阶段.这与我国实施的 SO_2 污染减排措施有关,2006 年起我国对 SO_2 排放实施了总量控制计划,运用加强工业脱硫设施等一系列措施进行控制,2010 年全国 SO_2 排放量较 2005 年下降了约 14.3%,有效地控制了污染源,推进了城市空气 SO_2 污染的改善,是拐点出现的直接原因.

2) 对于 NO_2 、 PM_{10} 浓度和综合污染指数,并不存在倒 U 型曲线,研究表明,2001—2010 年,这两项污染物与经济发展之间呈 U 型关系,即现阶段仍为污染继续加重的态势,这与污染物的来源及环境保护政策有直接关系.21 世纪初,由于环境保护越来越受到重视,对城市空气污染的治理也采取了不同程度的治理措施,使得 NO_2 、 PM_{10} 污染并未加重.但 2004 年之后, NO_2 污染总体上随着城市的经济发展而加重;2005 年以后,东部沿海的大型城市群及周边出现了 PM_{10} 污染加重的趋势.这主要由于这两项污染物的主要来源为汽车尾气和建筑、道路扬尘,近年来我国城市的加速扩张、机动车保有量的迅猛增加,致使现阶段城市 NO_2 、 PM_{10} 污染呈现加重趋势,而环境保护治理措施并没有跟上这种变化.因此,要从根本上改善城市空气质量,今后必须加大对城市 NO_2 和 PM_{10} 污染的治理力度.

3) 城市第二产业结构比例与城市空气主要污染物浓度呈显著的正相关关系.第二产业结构比例的增加,会导致城市空气中 SO_2 、 NO_2 浓度和综合污染指数的升高,其与 SO_2 、 NO_2 、综合污染指数的弹性系数分别约为 0.22、0.12 和 0.13,高于建成区面积对污染物浓度的影响程度.工业污染物排放是空气中污染物的主要来源,2010 年,全国工业源排放量分别占 SO_2 和 NO_x 排放总量的 85.3% 和 79.1%.因此,降低工业污染是改善空气质量最为有效的措施,且优化产业结构,重点发展低能耗、资源依赖小的第三产业对空气污染的改善具有显著效果.但也应该注意到,有些大型城市将污染重、资源依赖性产业向外转移,这当然会降低城市空气污染程度,但也将污染带到周边小城镇,并不会在根本上改善我国空气质量.因此,促进产业结构的调整,加强工

程减排,提高工业污染源的治理力度,加大工业环保设施的投入,鼓励使用清洁能源等才是减轻城市空气污染的根本措施.

4) 城市的建成区面积与城市空气主要污染物浓度呈正相关关系.城市建成区面积与城市空气中 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、综合污染指数的弹性系数分别约为 0.16、0.09、0.08 和 0.10.虽然建成区面积的弹性系数远小于第二产业结构,但其影响不能忽视.建成区面积的增加代表着城市的扩张,随之而来的城市建设、道路建设会直接带来扬尘和粉尘的增加,间接带来资源能源利用的加大、生活污染排放的增加,都会对城市空气质量带来不利影响.因此,城市扩张应把资源环境的可持续性放在首位,要考虑到资源承载能力是否能够承受这种扩张,否则城市化进程的外部性会带来资源的紧张、环境的恶化和人们生活质量的下降.此外,研究表明城市的人口密度与这 3 项污染物和综合污染指数并不存在显著的相关关系.这可能是由于人口密度仅是间接指标,人口的增加虽然会对城市空气质量带来潜在的不利影响,但其无法直接反映这些影响,在模拟结果中无法直接体现.

责任作者简介: 宋金平(1968—),男,教授,博导,研究方向为城市与区域发展. E-mail: jinpinsong@163.com.

参考文献 (References):

- Bimonte S. 2002. Information access, income distribution, and the Environmental Kuznets Curve [J]. *Ecological Economics*, 41: 145-156
- Brajer V, Mead RW, Xiao F. 2011. Searching for an Environmental Kuznets Curve in China's air pollution [J]. *China Economic Review*, 22: 383-397
- 陈璇璇. 2008. 人口、资源与环境视角下的汽车保有量影响因素研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学
- Choi I. 2001. Unit root tests for panel data [J]. *Journal of International Money and Finance*, 20: 249-272
- Coondoo D, Dinda S. 2002. Causality between income and emission: a country group-specific econometric analysis [J]. *Ecological Economics*, 40 (3): 351-367
- Copeland B R, Taylor M S. 2004. Trade, growth and the environment [J]. *Journal of Economic Literature*, 42(1): 7-71
- Diao X D, Zeng S X, Tam C M, et al. 2009. EKC analysis for studying economic growth and environmental quality: a case study in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 17: 541-548
- 杜涛, 黄璐, 陈曦, 等. 2008. 泸州空气质量变化和经济发展关系的探讨[J]. *三峡环境与生态*, 1(3): 58-61
- Franklin R S, Ruth M. 2012. Growing up and cleaning up: The

- environmental Kuznets curve redux[J]. *Applied Geography*, 32: 29-39
- Grossman G M, Krueger A B. 1991. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement[R]. NBER Working Paper No. 3914. Cambridge MA: NBER. 1-38
- Grossman G M, Krueger A B. 1995. Economic growth and the environment[J]. *Quarterly Journal of Economics* 110(2):353-377
- 胡明秀, 胡辉, 王立兵. 2005. 武汉市工业/三废污染状况计量模型研究——基于环境库兹涅茨曲线(EKC)特征[J]. *长江流域资源与环境*, 14(4): 470-474
- Kheder S B, Zugravu N. 2012. Environmental regulation and French firms location abroad: An economic geography model in an international comparative study[J]. *Ecological Economics*, 77: 48-61
- Kim J H. 1999. Does an environmental Kuznets curve exist in Korea's Case? [J] *Journal of Environmental Policy and Administration*, 7(1):169-191
- Lee C C, Chiu Y B, Sun C H. 2010. The environmental Kuznets curve hypothesis for water pollution: Do regions matter? [J] *Energy Policy*, 38: 12-23
- Lindmark M. 2002. An EKC-pattern in historical perspective: carbon dioxide emissions, technology, fuel prices and growth in Sweden 1870—1997[J]. *Ecological Economics*, 42: 333-347
- 李达, 王春晓. 2007. 我国经济增长与大气污染物排放的关系——基于分省面板数据的经验研究[J]. *财经科学*, 227(2):43-50
- 李国华, 王志宪. 2011. 青岛市环境库兹涅茨曲线特征分析及空气质量评价[J]. *安徽农业科学*, 39(27): 16703-16706
- 李红莉. 2008. 十年经济发展对环境空气和地表水体质量的影响——山东省实例研究[D]. 济南: 山东大学
- 凌虹, 朱晓东, 王惠中, 等. 2009. 苏州市经济增长与工业污染物排放的关系: EKC 如何[J]. *应用生态学报*, 20(4): 955-962
- 李瑞娥, 张海军. 2008. 中国环境库兹涅茨曲线的变化特征(1981—2004) [J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 28(4):35-43
- 李玉文, 徐中民, 王勇, 等. 2005. 环境库兹涅茨曲线研究进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 15(5): 7-13
- 李正升. 2010. 对环境库兹涅茨曲线的质疑与思考[J]. *生态经济*, 11:55-57
- 李智, 鞠美庭, 刘伟, 等. 2008. 中国经济增长与环境污染响应关系的经验研究[J]. *城市环境与城市生态*, 21(2):45-47
- 刘耀彬, 陈斐, 周杰文. 2008. 城市化进程中的生态环境响应度模型及其应用[J]. *干旱区地理*, 31(1): 122-128
- 龙丽莲. 2010. 上海市环境库兹涅茨曲线分析[J]. *环境保护科学*, 36(3): 89-92
- Narayan P K, Narayan S. 2010. Carbon dioxide emissions and economic growth: panel data evidence from developing countries[J]. *Energy Policy*, 38(1): 661-666
- Park S, Lee Y. 2011. Regional model of EKC for air pollution: Evidence from the Republic of Korea[J]. *Energy Policy*, 39: 5840-5849
- Roca J, Padilla E, Farre M, et al. 2001. Economic growth and atmospheric pollution in Spain: discussing the environmental Kuznets curve hypothesis[J]. *Ecological Economics*, 39: 85-99
- Shen J Y. 2006. A simultaneous estimation of Environmental Kuznets Curve: Evidence from China[J]. *China Economic Review*, 17: 383-394
- Song T, Zheng T, Tong L. 2008. An empirical test of the environmental Kuznets curve in China: A panel cointegration approach[J]. *China Economic Review*, 19(3): 381-392
- 孙敬水. 2008. 中级计量经济学[M]. 上海: 上海财经大学
- Torras M, Boyce J K. 1998. Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets curve[J]. *Ecological Economics*, 25:147-160
- Unruh G C, Moomaw W R. 1998. An alternative analysis of apparent EKC-type transitions[J]. *Ecological Economics*, 25: 221-229
- 王家庭, 王璇. 2010. 我国城市化与环境污染的关系研究——基于 28 个省市面板数据的实证分析[J]. *城市问题*, 184(11):9-15
- 王西琴, 杜倩倩, 张远. 2013. 我国东中西部典型城市 EKC 曲线的阶段判断[J]. *生态经济*, 266: 56-60
- 王志刚. 2008. 面板数据模型及其在经济分析中的应用[M]. 北京: 经济科学出版社
- 吴雷, 王慧. 2003. 城市颗粒物污染源与特性分析[J]. *干旱环境监测*, 17(3):157-159
- 夏自兰, 赵小风, 王继军. 2010. 江苏省环境库兹涅茨曲线特征及其成因分析[J]. *水土保持研究*, 17(1): 198-206
- 闫静, 王文川, 杨榭. 2012. 浅析成都市机动车保有量的增加对大气污染物中二氧化氮浓度的影响[J]. *四川环境*, 31(1):34-35
- 杨丹辉, 李红莉. 2011. 地方经济增长与环境质量——以山东省域为例的库兹涅茨曲线分析[J]. *经济管理*, 3:37-46
- 杨海生, 周永章, 王夕子. 2008. 我国城市环境库兹涅茨曲线的空间计量检验[J]. *统计与决策*, 10:43-46
- 杨凯, 叶茂, 徐启新. 2003. 上海城市废弃物增长的环境库兹涅茨特征研究[J]. *地理研究*, 22(1): 60-66
- 余锡刚, 张胜军, 吴建, 等. 2010. 浙东沿海城市大气颗粒物污染特征及来源解析研究[J]. *环境污染与防治*, 32(6): 65-68
- 张平. 2010. “十二五规划”战略研究[M]. 北京: 人民出版社
- 张喆, 王金南, 杨金田, 等. 2007. 城市空气质量与经济曲线的估计研究[J]. *环境与可持续发展*, 4:36-38
- 赵细康, 李建民, 王金营, 等. 2005. 环境库兹涅茨曲线及在中国的检验[J]. *南开经济研究*, (3): 48-54
- 中华人民共和国环境保护部. 2011. 2006—2010 中国环境质量报告[M]. 北京: 中国环境出版社
- 钟茂初, 张学刚. 2010. 环境库兹涅茨曲线理论及研究的批评综述[J]. *中国人口·资源与环境*, 20(2):62-67
- 朱翠华, 张晓峒. 2012. 经济发展与环境关系的实证研究[J]. *生态经济*, 250:48-53
- Zilio M, Recalde M. 2011. GDP and environment pressure: The role of energy in Latin America and the Caribbean[J]. *Energy Policy*, 39: 7941-7949