

中国环境污染与经济增长之间的相关性研究 ——基于线性和非线性计量模型的实证分析

刘金全, 郑挺国, 宋 涛

(吉林大学 数量经济研究中心, 吉林 长春 130012)

摘 要: 本文对我国 29个省区 1989—2007年废水、固体废弃物和废气 3种环境污染人均指标与人均收入数据进行建模, 分析我国环境污染与经济增长之间的关系。结果表明: 人均废水排放量随人均收入增加均呈现先上升后下降的变化趋势, 而人均固体废弃物产生量和人均废气排放量随人均收入变化则呈现单调上升的趋势。

关键词: 经济增长; 环境污染; 环境库兹涅茨曲线; 非线性; 面板数据

中图分类号: F062.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-9753(2009)02-0098-09

Environmental Pollution and Economic Growth in China: An Empirical Research Based on Linear and Nonlinear Methods

LIU Jin-quan, ZHEN Ting-guo, SONG Tao

(Center for Quantitative Economics, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: This paper analyzes the relationship between environmental pollution and economic growth in China with 29 Chinese provincial data of waste water, solid wastes and exhaust gas as environmental indexes and per capita income as economic index over the period 1989—2005. The results show that with the rise of per capita income, per capita waste water emission appears a relationship of first increasing and then decreasing, but per capita solid wastes generated and per capita waste gas emission take on monotonously increasing relationships.

Key words: economic growth; environmental pollution; environmental Kuznets curve; nonlinearity; panel data

一、引言

在工业化进程中, 经济增长会带来居民收入水平的提高和社会福利水平的改善。然而, 与此同时也会产生一系列的环境问题。经济增长是否会导致环境恶化, 亦或对环境污染有所改善, 关于两者之间关系的研究已经成为近年来经济学和环境学研究领域探讨的热点问题。随着研究的不断推进和增多, 人们发现环境污染在经济增长的早

期阶段先随人均收入水平的提高而愈加严重, 在达到一定阈值或收入转变点之后会再随人均收入增加而逐渐减轻, 由于这种“先恶化后改善”的关系与 Kuznet(1955)^[1]发现的收入分配不平等关系非常相似, 所以又称之为环境库兹涅茨曲线 (简称为 EKC)。这种 EKC研究始于 Grossman和 Kueger (1991, 1993)^[2-3]关于北美贸易协定对环境的影响研究, 他们发现多种污染物与人均收入

收稿日期: 2008-10-01 修回日期: 2008-12-17

基金项目: 吉林大学“985工程”“经济分析与预测哲学社会科学创新基地”资助。

作者简介: 刘金全 (1964—), 男, 黑龙江密山人, 吉林大学数量经济研究中心教授, 经济学博士, 博士研究生导师。

之间存在一种倒 U型关系。几乎同时 Shaikh和 Bandyopadhyay (1992)^[4]以及 Panayotou (1993)^[5]等人也分别得到了类似的结果。

在这些经验 EKC研究中,一般都采用线性模型或对数线性模型的线性方法来刻画环境污染随经济增长先上升后下降的变化趋势,并且这类方法可简化为关于收入的一个多项式函数。例如, Selden和 Song (1994)^[6]发现一氧化碳(CO)和氮氧化物(NO_x)的排放量与人均收入之间存在倒 U型关系; Giles和 Mosk (2003)^[7]也验证了新西兰 1895至 1996期间甲烷(CH₄)排放量和收入之间的 EKC关系。但是,也有一些研究结果获得不支持 EKC关系假设的结果,如 Perman和 Stem (2003)^[8]的研究。也有获得支持或不支持的混合结果,如 Shen和 Hashimoto (2004)^[9]。

然而,我们需要注意到,线性模型或对数线性模型对于解释环境污染与经济增长之间关系的能力并不是充分的。首先,对数线性模型对变量施加了非负限制,而线性模型却忽略了这一点,事实上即使当经济发展到较高水平时环境污染也不可能为负;其次,线性和对数线性模型对污染和收入之间关系施加了对称的约束,而事实上这种关系在先验场面上是不允许的;再有,当在线性或对数线性模型中引入平方项或立方项时,模型便可能因引入过多参数而缺乏可解释性;而且许多 EKC文献在线性模型和对数线性模型之间没有进行严格的区分和界定。因此,传统 EKC经验研究采用的方法可能并不是一种优质的度量方法。

鉴于以上这些问题,一些研究开始重新考虑关于 EKC关系的模型设定问题,主要关心是否可能采用非线性方法来更好地描述污染和收入之间的关系。例如, Galeotti和 Lanza (1999)^[10]采用非线性 Gamma函数和 Weibull函数的方法较好地描述了 CO₂排放量和收入之间的经验 EKC关系。其后, Galeotti和 Lanza (2005)^[11]又基于 1971至 1995年 108个国家的面板数据研究了人均 CO₂排放量与人均 GDP之间的关系,并进一步考虑线性方法和非线性方法的模型设定检验问题,结果表明采用 Gamma函数和 Weibull函数形式的模型都

要比传统线性模型和对数线性模型具有更好的拟合能力。但是,由于非线性方法特别是其面板数据模型的推广实现起来比较困难,所以这些非线性研究方法发展比较缓慢,同类现存文献较少。

从国内现有经验 EKC文献来看,大多数研究主要是采用线性模型或对数线性模型来解释我国或各省环境污染与经济增长之间的关系。例如,陈华文、刘康兵 (2004)^[12]对上海市 1990—2001年有关空气质量的环境指标数据,通过线性模型和对数线性模型的回归分析论证了人均收入与环境质量之间的关系;包群等 (2005)^[13]利用线性模型研究我国 30个省区 1996—2002年间人均收入与 6类环境污染指标之间的关系;刘荣茂等 (2006)^[14]利用对数线性模型对我国 29省区 1991—2003年工业废水、废气、固体排放物等变量与人均 GDP的面板数据进行了研究;宋涛等 (2006)^[15]采用对数线性模型对我国 29省区 1985—2004年六类环境指标与人均收入之间的关系进一步进行了实证分析。

基于 EKC基本假设,本文尝试采用线性方法和非线性方法对中国环境污染与经济增长之间的 EKC关系进行分析和比较。利用中国 29个省区 1989—2007年的面板数据,我们分别采用线性模型和对数线性模型以及 Weibull函数和 Gamma函数的面板数据模型对三类环境污染的人均指标(分别为废水、固体废弃物和废气)与人均收入的关系进行估计和分析,并利用严格的模型设定检验方法来评价各种方法的优缺性,从而更为精确地度量了中国环境污染与经济增长之间的 EKC关系。

二、EKC关系的理论基础

为有助于解释环境污染与经济增长之间的 EKC关系,并使得在下文中采用的线性和非线性方法更加合理,我们在这一部分通过构建一个简单的环境—经济理论模型加以阐述和证明。为简化分析,假设经济在产品市场和资本市场是完全竞争的,包括一个代表性消费者和代表性企业,只存在一种消费品和一种资本,且不存在人口增长,人口规模正态化为 1,并由此总消费和总资本都为

人均量。在整个系统中,生产是环境污染产生的唯一途径,环境污染影响总效用和企业生产能力,资本的一部分用于企业生产,另一部分用于污染治理。

假定变量 C_t 、 K_t 和 E_t 分别表示 t 时刻消费、资本存量和污染存量,那么这个简单经济—环境模型的无限界跨期消费选择问题可定义为:

$$\text{Max}W = \int_0^{\infty} e^{\rho t} U(C_t, E_t) dt \quad (1)$$

满足积聚约束条件为:

$$\dot{K}_t = f(\omega_t K_t, E_t) - C_t \quad (2)$$

$$\dot{E}_t = \gamma f(\omega_t K_t, E_t) - g((1-\omega_t) K_t, E_t) \quad (3)$$

在这个模型中, $U(C_t, E_t)$ 表示 t 时刻的瞬时效用, $\rho > 0$ 为时间贴现率, $\omega_t (0 < \omega_t < 1)$ 为资本用于企业生产的部分, $\gamma (> 0)$ 为污染率。假设效用函数是关于消费 (C)和污染 (E)的严格凹函数, 于是

一阶偏导数 $U_C > 0$ $U_E > 0$ 且二阶偏导数 $U_{CC} < 0$ 。 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 分别为经济的生产函数和环境更新函数。第一个约束与实际资本积聚有关,表示实际资本存量的瞬时变化率等于当期产出减去当期消费,而第二个约束与由于企业生产和环境治理引起的净污染变化有关,表示污染排放的瞬时变化率等于生产的污染减去治理的污染。

根据上述消费选择问题,我们可以得到污染和收入之间的长期关系。为此,考虑污染存量达到一个稳定水平条件即 $\dot{E}=0$ 时的稳态解。于是,稳态条件 $\dot{E}=0$ 表明

$$\gamma f(\omega K, E) = g((1-\omega) K, E) \quad (4)$$

即生产产生的污染必须等于环境治理减少的污染。方程 (4)定义了 K 和 E 之间的一个关系,表示为对给定 ω 有

$$h(\omega, K, E) = 0 \quad (5)$$

其次,令稳态时 $K = \kappa$ 为常数,这表明对给定 ω 有

$$g(\omega, \kappa, E) - C = \kappa \Rightarrow h_2(\omega, \kappa, E) = 0 \quad (6)$$

结合方程 (5)和 (6),我们可以进一步得到:

$$h_2(\omega, \kappa, E) = 0 \text{ 或等价地, } E = h(C) \quad (7)$$

这个式子直接度量了环境污染和经济增长之间的关系。

需要注意的是,对函数形式 $h(\cdot)$ 的指定是我们关注的重点。容易看出,传统研究一般将 $h(\cdot)$ 设定为线性函数或者对数线性函数,尽管收入的一次项可解释为弹性,但对于收入的二次和三次项则缺乏解释意义。更为一般地,对于研究者来说 $h(\cdot)$ 的函数形式是未知的并可能为复杂的非线性函数,因此这促使人们寻求更好的函数形式来解释 EKC关系,而不是仅停留在线性方法上。

三、线性和非线性研究方法

这一部分主要讨论并给出本文研究 EKC关系的方法。首先介绍 EKC文献的两种传统线性研究方法,即为线性模型和对数线性模型,然后为一般地考虑环境污染与经济增长之间的非线性关系,给出了基于 Weibull和 Gamma两种函数的面板数据模型。

(一) 线性模型和对数线性模型

传统 EKC研究文献一般假设污染物人均排放量与人均收入之间的经验简化型关系可由一参数化模型描述,并明确地指出为一个收入的多项式。估计的回归模型通常主要区别在两个方面:(1)方程是线性的,还是对数线性的;(2)方程是二次的,还是三次的。如果考虑 EKC关系在空间和时间上可能呈现的个体变异,即考虑跨国家(地区)和跨时间上的差异,那么一般需要在面板数据模型中引入地区(个体)效应和时间效应。

假设相依变量和解释变量分别为污染物人均排放量 (E)和人均收入 (GDP),不考虑其他因素对污染排放的影响,则标准参数化的线性模型和对数线性模型可以分别表示为:

$$E_{it} = \alpha_i + \theta_t + \beta_1 \text{GDP}_{it} + \beta_2 \text{GDP}_{it}^2 + \beta_3 \text{GDP}_{it}^3 + u_{it} \quad (8)$$

$$\log E_{it} = \alpha_i + \theta_t + \beta_1 \log \text{GDP}_{it} + \beta_2 \log(\text{GDP})^2 + \beta_3 \log(\text{GDP}_{it})^3 + u_{it} \quad (9)$$

其中,下标 i 代表个体或区域指标 ($i=1, \dots, N$), t 代表时间指标 ($t=1, \dots, T$)。个体哑变量系数 α_i 表示个体效应,时间哑变量系数 θ_t 表示时间效应,其在 t 时刻对所有面板是共同的。 u_{it} 被假设为正态随机扰动项,即 $u_{it} \sim \text{iid}N(0, \sigma^2)$ 。在两个模型中,假设参数 β_1 、 β_2 和 β_3 是同生的,即参数既不依

赖于特殊个体也不依赖于特殊时间,表明每个区域具有相同的污染-收入关系,而且会出现同一的 EKC转折点,尽管区域间的环境状况和经济发展水平可能并不相同。如果考虑两个模型中参数 $\beta_3 = 0$ 那么三次模型就缩压为相应的二次模型,并且仅当 $\beta_1 > 0$ 且 $\beta_2 < 0$ 时 EKC关系成立。

(二) 基于非线性 Weibull函数和 Gamma函数的面板数据模型

这里,我们先给出描述污染物排放量随收入变化的 Weibull函数和 Gamma函数,这两种函数被广泛应用于环境和生态经济学^[16] (Ba等, 1992), 并主要应用于持续期模型^[17] (Florens, 1996)。两种函数形式较之线性或对数线性函数更易于解释模型参数,并放宽了线性和对称性的限制。

Weibull函数和 Gamma函数均为非线性函数,其形式可分别表示为:

$$y = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-y}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-y}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (10)$$

$$y = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{x-y}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-y}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (11)$$

其中, α 、 β 和 γ 为 Weibull函数和 Gamma函数的参数,且式 (10) 和 (11) 又称为三参数 Weibull函数和 Gamma函数。这两个函数关系对自身参数具有很好的解释能力,其中, α 、 β 和 γ 分别与函数的“形状”、“规模”和“移动”有关,函数依赖于它们的取值,并由此函数关系可假设为各种不同行为。从函数的参数特点来看,参数 α 和 β 直接与函数的高度有关,并由此决定了转变点处的污染物排放量大小;移动或位置参数 γ 控制水平轴的函数位置,并由此刻画了收入的转变点;最为关键的参数是参数 α ,它控制着函数的形状,且当 $\alpha = 1$ 时 Weibull和 Gamma分布函数类似于指数分布函数,当 $\alpha < 1$ 时两种函数形式呈逆“J”型,即曲线可能是指数递减的,而当 $\alpha > 1$ 时,两种函数形式呈“钟”型或称倒 U型。

Weibull函数和 Gamma函数形式的另一个特点就是允许对转变点给出一个解析闭型表示。在实际应用中,在 (10) 和 (11) 中取 y 关于 x 的导数并设其为零可以求解 x 的极值点 x^P ,亦即“转变

点”,可分别表示为:

$$x^P = \gamma + \beta \left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)^{1/\alpha} \quad (12)$$

$$x^P = \gamma + \beta(\alpha-1) \quad (13)$$

在表达式 (12) 和 (13) 中,两个函数的转变点均依赖于自身的 3 个参数 α 、 β 和 γ 。

同线性模型和对数线性模型一样,我们也考虑对 Weibull函数和 Gamma函数扩展的面板数据模型,模型两边以自然对数形式表示,对应的参数化模型可分别表示如下:

$$\log E_{it} = \mu_i + \theta_t + (\alpha-1) \log\left(\frac{GDP_{it}-\gamma}{\beta}\right) - \left(\frac{GDP_{it}-\gamma}{\beta}\right)^\alpha + u_{it} \quad (14)$$

$$\log E_{it} = \mu_i + \theta_t + (\alpha-1) \log\left(\frac{GDP_{it}-\gamma}{\beta}\right) - \left(\frac{GDP_{it}-\gamma}{\beta}\right)^\alpha + v_{it} \quad (15)$$

这里 E 为污染物人均排放量, GDP 为人均收入, $i=1, \dots, N$ 表示地区, $t=1, \dots, T$ 表示时间, u 表示个体特殊效应, θ_t 表示时间特殊效应, α 、 β 和 γ 表示 Weibull函数和 Gamma函数的 3 个参数。而且假设 u 和 v 为正态随机扰动项,即 $u_{it} \sim iidN(0, \sigma_u^2)$ 和 $v_{it} \sim iidN(0, \sigma_v^2)$ 。

与传统线性模型和对数线性模型不同,模型 (14) 和模型 (15) 为非线性模型,估计参数时无法使用传统的 OLS估计方法,所以一般采用 NLS(非线性最小二乘)方法进行估计^[18] (Colin Cameron, 2005),这种估计方法等价于这些模型的极大似然估计方法。

四、中国环境污染与经济增长之间关系的实证分析

本文试图选取与环境污染和经济增长有关的几种指标,如工业废水排放量、工业固体废弃物产生量、工业废气排放量和实际 GDP等,基于中国大陆除重庆和西藏之外的 29 个省(市、自治区,下面简称省区) 1989—2007 年的样本数据(数据来源于《中国统计年鉴》和《中国环境年鉴》),建立上述各种线性和非线性模型,对中国环境污染与经济增长之间的关系进行分析。

考虑到《中国统计年鉴》中各省区的 GDP是以现价计算,必须对这些名义 GDP数据进行调整,所以先消除相应每个省区物价水平(用 GDP平减指数(2000年 100代替))的影响,然后计算获得各省区每年的实际 GDP水平。由此,可分别计算获得所考察变量的人均量,分别表示为人均 GDP(元/人)、人均废水排放量(千克/人)、人均固体废弃物产生量(千克/人)和人均废气排放量(立方米/人)。

(一)传统线性方法计算结果

我们先对线性和对数线性的面板数据模型实施组内(Within) OLS估计,并分别估计两种模型的二次函数和三次函数情形,具体结果见表 1。从模型估计结果来看,人均废水方程二次或三次模型和线性或对数线性模型的参数估计值均比较显著,且二次和三次线性模型估计出的转变点比较接近,而二次和三次对数线性模型的转变点则相差较大;对于人均固体废弃物方程来说,仅有二次对数线性模型时参数估计值具有显著性;而对于人均废气方程,三次对数线性模型参数估计值不显著,而二次对数线性模型参数则在 5%水平具有显著性。对于人均固体废弃物二次线性模型、人均固体废弃物三次对数线性模型以及人均废气三次线性模型,排放量随收入变化的转变点都不存在,此时不支持 EKC基本假设。除此之外,尽管各种模型的拟合优度都在 0.75以上,但这些结果对于模型的选择却是非常模糊的。

为在线性模型和对数线性模型以及二次函数和三次函数之间进行模型选择,我们进一步基于模型设定检验方法来选择成对模型的较优者。首先,利用 Wald检验方法检验参数约束 $\beta_3 = 0$,即原假设 $\beta_3 = 0$ 成立,函数为二次,备择假设为 $\beta_3 \neq 0$,函数为三次。在表 2中,Wald检验结果表明对于人均废水方程,在 5%水平下都拒绝了二次线性或二次对数线性的原假设,所以描述人均废水与收入之间关系的模型应选取为三次线性模型;而对于人均固体废弃物方程和人均废气方程,在 5%水平下都无法拒绝二次线性或二次对数线性的原假设,所以关于人均固体废弃物和人均废气的选择

模型应该设定为二次线性模型或二次对数线性模型。

其次,利用 Godfrey和 Wickens(1981)^[19]提出的 IM检验,可以继续对线性模型和对数线性模型进行模型选择与设定。该检验方法的基本思想如下:采用 Box和 Cox(1964)^[20]的 Box-Cox转换将线性模型和对数线性模型纳入到统一的线性模型中,并且当转换参数 λ 等于 0和 1时该转换模型就分别为线性模型和对数线性模型,于是利用 OLS估计参数分别为 0和 1时的线性模型和对数线性模型,并计算 Godfrey和 Wickens提出的 IM检验统计量。IM检验的原假设为 $\lambda = 0$ (线性模型)或为 $\lambda = 1$ (对数线性模型),备择假设为其他形式即 $\lambda \neq 0$ 或 $\lambda \neq 1$ 的 Box-Cox转换模型,如果拒绝 $\lambda = 0$ 而接受 $\lambda = 1$,那么应选择对数线性模型,如果拒绝 $\lambda = 1$ 而接受 $\lambda = 0$,那么应选择线性模型,如果既拒绝 $\lambda = 0$ 也拒绝 $\lambda = 1$,那么应考虑其他形式的 Box-Cox转换模型。

表 2也给出了 Godfrey和 Wickens的 IM检验结果,根据前面结果这里仅对人均废水方程的三次线性模型和三次对数线性模型进行选择,而对于人均固体废弃物和人均废气则关心二次线性模型和二次对数线性模型的选择。如表 2所示,其结果表明对于人均废水、人均固体废弃物和人均废气方程,在 5%水平下都拒绝了线性($\lambda = 0$)的原假设,而接受了对数线性($\lambda = 1$)的原假设,所以模型设定都应选择对数线性模型。同时,根据表 1的估计结果,我们也再次验证了人均固体废弃物和人均废气方程二次对数线性模型参数估计值的相对稳健性和可靠性。

(二)Weibull和 Gamma模型计算结果及其与线性模型结果的比较分析

为更好地描述污染物人均排放量与人均收入之间的关系,我们采用 NLS方法对非线性 Weibull和 Gamma函数的面板数据模型实施了估计,结果见表 3。如表 3所示,除人均固体废弃物 Gamma模型中参数 β 在 10%水平下显著外,在其他情形中 3个参数 α 、 β 和 γ 在 5%水平下都是显著的,而且调整 R^2 统计量表明各种污染物的 Weibull模型

和 Gamma模型估计均具有较高的拟合优度,都在 0.85以上,并且 Weibull模型的拟合效果与 Gamma模型的拟合效果几乎一致。因此,估计结果表明

Weibull模型和 Gamma模型对人均排放量与人均收入之间关系具有较好的解释能力,参数估计比较稳健,模拟精度较高。

表 1 线性模型 (8)和对数线性模型 (9)的估计结果二次函数人均废水

	二次函数					
	人均废水		人均固体废弃物		人均废气	
	线性	对数线性	线性	对数线性	线性	对数线性
GDP	1.3601** (5.915)	2.3341** (6.302)	-0.0034 (-0.352)	2.1009** (5.194)	0.5995** (3.279)	3.0716** (9.282)
GDP平方	-5.22E-05** (-12.012)	-0.0806** (-4.509)	-1.84E-07 (-0.997)	-0.0944** (-4.838)	-6.36E-06+ (-1.842)	-0.1184** (-7.416)
调整 R ²	0.8682	0.8431	0.8029	0.8659	0.7885	0.8977
转变点	13 029	1 958 317	—	68 079	47 097	430 441
三次函数						
GDP	3.1485** (6.065)	-22.2759** (-6.720)	0.0329 (1.473)	6.8315+ (1.782)	1.3317** (3.188)	0.6331 (0.202)
GDP平方	-1.33E-04** (-6.178)	2.7100** (7.243)	-1.82E-06* (-1.971)	-0.6308 (-1.458)	-3.94E-05* (-2.277)	0.1581 (0.446)
GDP立方	1.1289** (3.829)	-0.1054** (-7.466)	2.29E-11+ (1.808)	0.0203 (1.241)	4.6217+ (1.948)	-0.0104 (-0.781)
调整 R ²	0.8721	0.8603	0.8039	0.8660	0.7898	0.8976
转变点	14 768	30 309	1 185	—	—	134 601

注:括弧 ()内为参数的对应 统计量。“**”、“*”和“+”分别表示在 1%、5%和 10%水平下参数估计值显著不为零。

表 2 模型选择与设定检验

假设检验	人均废水	人均固体废弃物	人均废气
1. Wald检验			
H ₀ :二次线性, H ₁ :三次线性	14.66**	3.27	3.79
H ₀ :二次对数线性, H ₁ :三次对数线性	55.74**	1.54	0.61
2. LM检验			
H ₀ :线性, H ₁ :对数线性	198.8**	243.8**	316.9**
H ₀ :对数线性, H ₁ :线性	0.015	1.271	0.131

注:(1)Wald检验用于参数约束检验;(2)LM检验由 Godfrey和 Wickens(1981)提出,用于检验线性与对数线性模型。表中人均废水方程对应的 LM检验采用三次函数,其余人均固体废弃物和人均废气则采用二次函数。Wald检验和 LM检验的统计量都渐近服从于自由度为 1的卡方分布,且记号“**”表示在 5%水平下拒绝原假设,对应 5%临界值水平为 3.84

表 3 Weibull函数和 Gamma函数的面板数据模型估计结果

参数估计值	人均废水		人均固体废弃物		人均废气	
	Weibull	Gamma	Weibull	Gamma	Weibull	Gamma
α	2.1008** (24.269)	3.1358** (9.289)	1.3928** (15.131)	1.3884** (14.967)	1.9231** (20.267)	2.0525** (17.604)
β	37997.9** (21.645)	13698.7** (6.129)	104548.2** (2.761)	155211.1+ (1.658)	59136.0** (8.160)	53915.1** (4.027)
γ	-991.00* (-2.002)	-3651.68** (-2.690)	1035.37** (20.091)	1036.57** (19.679)	551.57** (5.649)	392.26** (2.829)
调整 R ²	0.8639	0.8637	0.8705	0.8702	0.8985	0.8983
转变点	26 945	25 605	43 168	61 325	40 927	57 139

注:括弧 ()内为参数的对应 统计量。“**”、“*”和“+”分别表示在 1%、5%和 10%水平下参数估计值显著不为零。转变点估计值由 (12)式和 (13)式计算得到。

另外,表 3结果还给出了各种污染物人均排放量与人均收入之间 EKC关系的收入转变点,所有拟合的模型均存在对应的转变点,其中通过 Weibull模型估计得到的废水、固体废弃物和废水的收入转变点依次为 26945元、43168元和 40927元,而通过 Gamma模型估计得到的结果分别为 25605元、61325元和 57139元。对于这些结果,从各种不同污染物来看,人均废水排放量的收入转变点较低,而人均固体废弃物产生量和人均废气排放量的收入转变点较高;从不同函数拟合结果来看,采用 Weibull模型估计得到的人均固体废弃物和人均废气的收入转变点要明显低于采用 Gamma模型估计得到的结果。

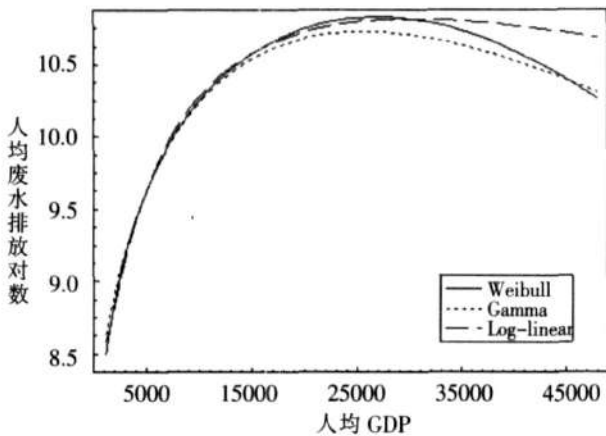


图 1 人均废水与人均收入的拟合结果

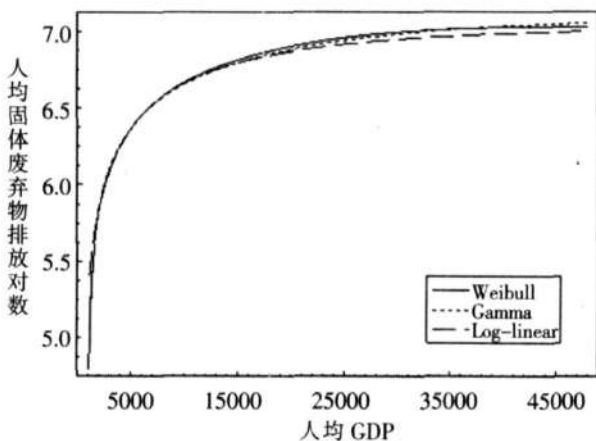


图 2 人均固体废弃物与人均收入的拟合结果

图 1—图 3依次给出了各种污染物人均排放量随人均收入变化的对数线性模型、Weibull模型和 Gamma模型的因变量拟合值,纵轴表示人均排放量拟合值对数,横轴表示人均 GDP。从不同污染物的拟合图可以看出,人均废水排放量随人均

收入增加的变化关系均已呈现下降趋势,而人均固体废物排放量和人均废气排放量随人均收入变化尚未出现下降的趋势,这与前面面板数据模型估计结果是一致的,前者具有较低的收入转变点,后者具有较高的收入转变点。从不同拟合模型的结果来看,各种模型的拟合曲线在峭度(表示排放量的高度)和深度(表示下降的速度)上表现不同。具体来说,非线性 Weibull模型和 Gamma模型的拟合曲线比较接近,而对数线性模型的拟合曲线相对较为发散,这也与前面获得的对数线性模型的收入转变点一般较大的结果一致。

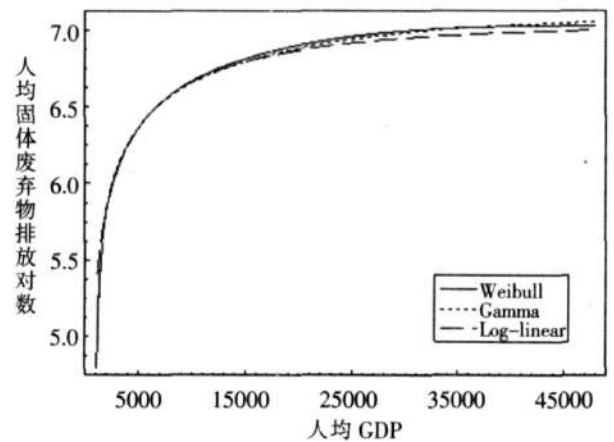


图 3 人均废气与人均收入的拟合结果

尽管前面已经得到各种线性模型和非线性模型的估计结果,并表明对数线性模型相对于线性模型在线性方法中具有更好的模拟结果,但是对于对数线性模型与非线性 Weibull模型或 Gamma模型的选择以及 Weibull模型与 Gamma模型之间的选择却并不清楚。为此,接下来采用 Davidson和 Mackinnon (1981)^[21]提出的检验方法对对数线性模型和非线性模型以及不同非线性模型之间进行模型选择。检验的基本思想是:首先分别估计 M_1 和 M_2 两个模型(模型形式可以为线性模型或非线性模型)并获得因变量的拟合值 \hat{q}_1 和 \hat{q}_2 ,然后将 \hat{q}_1 和 \hat{q}_2 作为解释变量分别引入到 M_1 和 M_2 两个模型中并再次进行估计,最后分别计算对应于解释变量 \hat{q}_1 和 \hat{q}_2 的系数 t 统计量,如果对应解释变量的 t 统计量大于 5% 临界值水平 1.96,那么拒绝原假设,否则接受原假设。

表 4 成对模型的非缩压 (non-nested) 检验: 检验

假设检验	人均废水	人均固体废弃物	人均废气
H_0 : 对数线性, H_1 : Weibull	3.4535 (0.0003)	4.2310 (0.0000)	2.1444 (0.0163)
H_0 : 对数线性, H_1 : Gamma	3.7996 (0.0001)	44.0285 (0.0000)	2.2405 (0.0128)
H_0 : Weibull H_1 : 对数线性	0.3563 (0.3609)	-2.6903 (0.9963)	0.1393 (0.4446)
H_0 : Gamma H_1 : 对数线性	-1.7769 (0.9619)	-2.9811 (0.9985)	-1.2229 (0.8890)
H_0 : Weibull H_1 : Gamma	0.6623 (0.2541)	-2.4454 (0.9926)	0.2440 (0.4037)
H_0 : Gamma H_1 : Weibull	1.0925 (0.1376)	6.0227 (0.0000)	0.9696 (0.1664)

注: 括弧 () 中的数值为对应的 P 值。 检验由 Davidson 和 Mackinnon (1981) 提出用来检验非缩压的非线性回归模型, 这里我们考虑线性模型与非线性模型的选择以及非线性模型之间的选择, 所有统计量均为基于非缩压检验总体模型相关变量的单 (右) 边 统计量。 人均废水采用三次对数线性模型估计, 人均固体废弃物和人均废气则采用二次对数线性模型估计得到。

表 4 给出了关于对数线性与非线性 Weibull 或 Gamma 以及 Weibull 和 Gamma 之间的成对模型选择的 检验结果, 注意人均废水、人均固体废弃物和人均废气分别选择三次、二次和二次的对数线性模型。 前两种检验以对数线性为原假设, 以非线性 Weibull 为或非线性 Gamma 为备择假设, 结果表明人均废水、人均固体废弃物和人均废气都明显拒绝对数线性的原假设。 同时中间两种检验又通过分别以非线性 Weibull 或非线性 Gamma 为原假设, 以对数线性为备择假设, 结果都表明无法拒绝原假设, 进一步验证了两种非线性模型更胜于对数线性模型的结论。 最后两种检验是关于 Weibull 和 Gamma 之间的模型选择检验, 对于人均固体废弃物方程, 结果表明当以 Weibull 为原假设时无法拒绝, 而当以 Gamma 为原假设时拒绝原假设, 这说明在描述固体废弃物人均排放量与人均收入之间关系时, Weibull 模型较 Gamma 模型更为贴切、准确; 而对于人均废水方程和人均废气方程, 检验结果均无法拒绝原假设, 所以表明此时选择 Weibull 模型或 Gamma 模型均可。

五、基本结论

我国自 20 世纪 80 年初开始经历了持续、快速的工业化和城市化过程, 在此期间经济体制由计划经济体制向市场经济体制转变并带来了快速的经济增长, 人均 GDP 一直保持在 10% 左右的增长水平。 快速的经济增长给人民生活带来了福利, 然而与此同时快速的城市化和工业化也引起了大规模的工业污染和严重的环境退化, 这使得人们难以安全地享受经济增长所带来的好处。 协调经济增长与环境保护之间的关系将是中国在当前和

未来发展中必须面对且亟待解决的重要问题。 因此, 如何准确估计和评价当前环境污染状况与经济增长之间的关系是十分必要的。

基于 EKC 基本假设, 本文尝试采用传统线性方法和非线性方法对我国环境污染与经济增长之间关系进行分析和比较, 进而给出环境污染与经济增长之间的准确关系。 利用 29 个省区 1989—2005 年的经济和环境面板数据, 分别采用线性模型、对数线性模型以及 Weibull 和 Gamma 函数形式的的面板数据模型研究 3 种环境污染人均指标 (分别为人均废水排放量、人均固体废弃物产生量和人均废气排放量) 和人均收入之间的关系。 通过文中分析, 我们得到以下一些基本结论:

首先, 通过一些模型设定检验方法, 对线性方法和非线性方法获得了一个比较清晰的总体评价, 即采用非线性方法来描述污染物人均排放量与人均收入之间的关系较之线性方法具有更高精确性和更好的拟合能力。 具体来说, Weibull 函数和 Gamma 函数的模型优于对数线性的模型, 而对数线性模型又优于线性模型。

其次, 非线性方法获得的收入转变点相对于线性方法的收入转变点估计更为可信。 线性方法在一些情形时无法获得收入转变点的闭型解, 并且获得的收入转变点可能过低或可能过高, 例如采用线性模型估计人均废水方程得到的收入转变点为 13029 元, 明显低于非线性方法的结果, 而采用对数线性模型获得人均废气的收入转变点为 430441 元, 又过度高于非线性方法的结果。

再次, 无论是线性方法还是非线性方法, 结果都表明我国人均废水排放量随人均收入增加呈现

先上升后下降的变化趋势,并出现了 EKC关系的收入转变点,而对于人均固体废弃物产生量和人均废气排放量随人均收入变化则呈现单调上升的趋势,其 EKC关系的收入转变点尚未出现。

总之,结合线性方法和非线性方法,本文获得了关于中国环境污染与经济增长之间关系的较好结果,并且从方法应用上对中国 EKC关系的经验研究提供了新的证据和新的补充。然而,正如 Stem (2004)^[22]所说的“EKC本质上是一种经验现象,而大多数 EKC文献在统计意义上脆弱的”。尽管本文的结论已经通过了较为严格的统计检验,但仍有更为深入的问题有待下一步研究,例如环境污染与经济增长之间长期关系的非线性协整检验问题。

参考文献:

[1] Kuznets S Economic Growth and Income Inequality [J]. American Economic Review 1955, 45: 1—28.

[2] Grossmann G M, Krueger A B Environmental Impact of a North American Free Trade Agreement [Z]. NBER Working Paper 3914, 1991.

[3] Grossmann G M, Krueger A B Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement [A]. Garber P The U.S.—Mexico Free Trade Agreement [C]. Cambridge: MIT Press, 1993, 13—56.

[4] Shafik N, Bandyopadhyay S Economic Growth and Environmental Quality: Time—Series and Cross—Country Evidence [Z]. World Bank Policy Research Working Paper 904, 1992.

[5] Panayotou T Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development [Z]. Geneva, Switzerland: International Labour Office Working Paper 238, 1993.

[6] Selden T M, Song D Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution? [J]. Journal of Environmental Economics and Environmental Management 1994, 27: 147—162.

[7] Giles D E, Mosk C Run Invariant Erucciation and a Long—Run Environmental Kuznets Curve for Enteric Methane in New Zealand: Conventional and Fuzzy Regression [Z]. Econometrics Working Paper 0306, 2003.

[8] Peman R, Stem D J Evidence from Panel Unit Root and Cointegration Tests that the Environmental Kuznets Curve does not Exist [J]. Australian Journal of Agricultural and Resource

Economics 2003, 47 (3): 325—347.

- [9] Shen J Y, Hashimoto Y Environmental Kuznets Curve on Country Level: Evidence from China [Z]. Discussion Papers in Economics and Business 04—09, 2004.
- [10] Galeotti M, Lanza A Richer and cleaner: A Study on Carbon Dioxide Emissions by Developing Countries [J]. Energy Policy 1999, 27: 565—573.
- [11] Galeotti M, Lanza A Desperately Seeking Environmental Kuznets [J]. Environmental Modelling & Software 2005, 20: 1379—1388.
- [12] 陈华文, 刘康兵. 经济增长与环境质量: 关于环境库兹涅茨曲线的经验分析 [J]. 复旦学报 (社会科学版), 2004 (2): 87—94.
- [13] 包群, 彭水军, 阳小晓. 是否存在环境库兹涅茨倒 U 型曲线 [J]. 上海经济研究, 2005 (12): 3—13.
- [14] 刘荣茂, 张莉侠, 孟令杰. 经济增长与环境质量: 来自中国省际面板数据的证据 [J]. 经济地理, 2006 (3): 374—377.
- [15] 宋涛, 郑挺国, 佟连军, 赵妍. 基于面板数据模型的中国省区环境分析 [J]. 中国软科学, 2006 (10): 121—127.
- [16] Bai J, Jakeman A J, McAleer M Estimation and Discrimination of Alternative Air Pollution Models [J]. Ecological Modelling 1992, 64: 89—124.
- [17] Florens J P, Fougere D, Mouchart M Duration Models [A]. McAleer M, Sevestre P The Econometrics of Panel Data [C]. Kluwer: Dordrecht, 1996, 491—536.
- [18] Colin Cameron A, Pravin K Trivedi Microeconometrics: Methods and Applications [M]. Cambridge University Press, 2005.
- [19] Godfrey L G, Wickens M R Testing Linear and Log—Linear Regressions for Functional Form [J]. Review of Economic Studies 1981, 48: 487—496.
- [20] Box G E P, Cox D R An Analysis of Transformations [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B 1964, 26: 211—252.
- [21] Davidson R, Mackinnon J G Several Tests for Model Specification in the Presence of Alternative Hypotheses [J]. Econometrica 1981, 49 (3): 781—793.
- [22] Stem D J The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve [J]. World Development, 2004, 32 (8): 1419—1439.

(本文责编: 海洋)