

The Dynamic Relationship among Energy Consumption, Environmental Pollution and Economic Growth in China

—An Empirical Analysis Based on the Dynamic Panel Model of 30 Provincial Administrative Units of China

Bo Ma

School of Statistics and Mathematics, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming Yunnan
Email: ericmeu2011@hotmail.com

Received: Aug. 6th, 2015; accepted: Aug. 30th, 2015; published: Sep. 2nd, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

According to the relationship between energy consumption and economic development in different counties and societies, Apergis and Payne (2009) proposed four hypotheses—energy-driven growth hypothesis, energy-conserved growth hypothesis, bidirectional interaction hypothesis and energy-neutral growth hypothesis, revealing the corresponding characteristics of the above relationship, which are unidirectional causality, two-way causality and weak correlation respectively. And Grossman and Krueger (1991) proposed the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis in which the inverted u-shaped relationship between environmental pollution and economic growth is considered. Based on the above hypotheses, this paper brings the relationship among energy consumption, environmental pollution and economic growth into an overall framework for statically theoretical analysis, and the empirical research on the correspondingly dynamic relationship among three referred above is made by using the panel data model, established by the data of 30 provincial administrative units of China. Results show that 1) the economic development of China, which has been at the left of THE EKC in the long time term, has climbed up to the inflection point and stood at the stage II of EKC; 2) economic growth of China is gradually getting rid of the dependence on energy and the sacrifice to environment; the development of energy and environmental protection industries will become the endogenous power of economic development of China; 3) the transformation of the pattern of economic development is building the dynamic equilibrium mechanism of energy consumption, environmental pollution and economic growth.

Keywords

Energy Consumption, Environmental Pollution, Economic Growth, Four Hypotheses, Environmental Kuznets Curve, Dynamic Panel Data Model

我国能源消费、环境污染与经济增长的动态关系研究

—基于全国30个省级行政单位动态面板模型的实证分析

马 博

云南财经大学统计与数学学院，云南 昆明

Email: ericmeu2011@hotmail.com

收稿日期：2015年8月6日；录用日期：2015年8月30日；发布日期：2015年9月2日

摘 要

Apergis and Payne (2009)提出了能源消费与经济成长的四大假说，即增长性假说、保护性假说、反馈性假说和中性假说，认为不同国家和社会的能源消费与经济增长之间存在着单向因果关系、双向因果关系或弱相关关系。Grossman and Krueger (1991)提出的环境库兹涅兹曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC)假说认为环境污染与经济增长之间存在着倒U型关系。本文以上述假说为理论依据，将能源消费、环境污染与经济增长的关系纳入到一个整体的框架之中进行静态理论分析，并利用全国30个省级行政单位的面板数据建立动态面板模型对三者之间的动态关系进行了实证研究。结果表明，我国的经济成长水平在长期中处在EKC曲线的左边但已经站上EKC曲线的拐点；我国的经济成长正在逐渐摆脱对能源的依赖和对环境的破坏，能源产业和环保产业的发展将成为我国经济发展的内生动力；经济发展方式的转变构建起能源消费、环境污染与经济增长的动态均衡机制。

关键词

能源消费，环境污染，经济增长，四大假说，环境库兹涅兹曲线，动态面板模型

1. 引言

能源消费、环境污染和经济增长三者构成既相互统一又相互矛盾的有机系统。经济发展过程中产生的能源消耗问题和环境污染问题关系到人类社会未来的发展，由能源消耗所引发的非可再生能源资源的枯竭以及由环境污染所引发的全球气候变暖问题将是人类在二十一世纪面临的巨大挑战，而经济发展却又是解决能源消耗问题和环境污染问题的根本途径。

改革开放以来，我国正式步入工业化发展进程，国民经济保持较快的发展水平，经济发展取得了巨大的成就。根据党的十八大提出的全面建成小康社会的要求，我国年均GDP增长率务必保持在7%以上的水平。为了实现这一目标，仍处于工业化发展初期的我国仍然需要将能源视为重要的生产要素来驱动经济快速发展，能源消费量必然会伴随着经济水平的迅速增长而大幅提高，这将会大大减少我国的能源资源储备，加剧能源消费与经济增长之间的矛盾。

而伴随经济发展和能源消费量的大幅增加所产生的环境污染问题也是不言而喻的。随着党的十八大将生态文明建设纳入中国特色社会主义建设的进程，环境污染问题得到了空前的重视，并将环境保护的具体指标纳入到国民经济中长期发展规划中，如中国政府决定到2020年将单位GDP二氧化碳排

放量比 2005 年下降 40% 左右等。节能减排的约束性指标必然也会与经济增长和能源消费产生尖锐的矛盾。

因此，对能源消费、环境污染和经济增长三者的内在因果关系进行研究既是我国政府妥善解决三者之间的矛盾、实现能源、环境与经济的协调发展的前提，也是学术界探索在保持经济高速增长的同时减少能源消耗和环境污染的可持续发展道路的重要基础性研究工作。

本文首先利用国内外研究成果把能源消费、环境污染和经济增长置于同一空间下的整体框架中进行理论分析，随后利用全国 30 个省级行政单位的面板数据建立动态面板模型，利用系统广义矩估计方法 (GMM-System) 对三者之间的动态关系进行了实证分析。

2. 研究现状

针对这一社会热点问题，大量学者对能源消费、环境污染与经济增长的关系进行了深入的探索，大致可以分为以下几类：

1) 缺少能源消费、环境污染与经济增长的整体性理论研究框架，从静态的角度对两两之间的关系进行研究。

陈耀辉、汪古月(2011)利用协整方程和 3E 系统的脉冲响应模型分别对江苏省能源消费与经济增长的关系、环境污染与经济增长的静态关系进行了研究，并分别对工业三废的环境库兹涅兹曲线进行了初步估计[1]。

宋香荣、王依军(2011)基于协整理论和格兰杰因果关系检验等方法分别研究了新疆能源消费、环境污染和经济增长三者的协整关系和两两之间的静态因果关系[2]。

缺少整体理论框架和采用两两静态因果关系分析只能从定性的角度分析三者之间当期的关系，无法动态地考察三者之间存在的联动效应和作用机理。

2) 缺少能源消费、环境污染与经济增长的整体性理论研究框架，从比较静态的角度对两两之间的关系进行研究。

付博君、杨新吉勒图(2012)运用协整理论、向量自回归模型和脉冲响应分析等方法研究了内蒙古自治区能源消费、环境污染和经济增长的关系[3]。

该研究将能源消费、环境污染和经济增长纳入到整体框架进行了协整分析和向量自回归模型分析，但是仍然没有提出关于三者关系的完整理论，仅仅是凭借经验研究结果人为地将三者纳入到一个整体。同时该研究利用脉冲响应分析方法探索了两两之间的动态关系，但是仍然无法看到三者同时联动变化的全貌，该分析仍然属于比较静态的范畴。

3) 对能源消费、环境污染与经济增长关系中的某两部分进行研究，从动态的角度对二者的关系进行研究

肖涛、张宗益、汪锋(2012)根据全国各省份能源资源禀赋的不同状况，利用向量误差修正模型(VCEM)分别对能源输出省和能源输入省的能源消耗与经济增长的关系进行了动态研究，并提出了各自不同且有针对性的能源和产业政策建议[4]。

该研究使用的向量误差修正模型(VCEM)是实现动态研究的一个良好的工具，该模型刻画出了能源消费与经济增长之间的动态变化全貌。本文美中不足之处在于文中提出的能源和产业发展政策上没有考虑到环境问题，缺少整体性的理论框架，仅从经济增长和能源消费的角度出发分析政策制定难免会出现偏颇，其政策建议的效果会大打折扣。

4) 建立了能源消费、环境污染与经济增长的整体性理论研究框架，从动态的角度对两两之间的关系进行研究。

Soytas and Sari (2006)把能源消费、环境污染和经济增长纳入到一个整体的理论框架下进行分析,认为中国能源消费和经济增长之间不存在长期的格兰杰因果关系,说明了能源保护性政策在长期中不会影响中国经济的发展[5]。Zhao and Yuan (2008)用同样的理论框架得到了不同的结论认为三者长期和短期均存在双向因果关系[6]。

张宝山、袁晓玲、张小妮(2012)成功地将 Apergis and Payne (2009)提出的能源消费与经济增长的四大假说[7]嵌入到 Grossman and Krueger (1991)提出的环境库兹涅兹曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC) [8]中建立了统一的整体理论框架[9]。Lee and Chang (2008)、Huang *et al.* (2008)采用 1989~2009 年中国省际面板数据和系统广义矩估计(GMM-System)方法研究了能源消费、环境污染与经济增长的内在相关性和动态因果关系[10] [11]。

已有的实证研究表明,想要探索能源消费、环境污染与经济增长的关系需要将三者统一到一个整体理论框架中,并选取与之相适应的计量分析方法才能科学地、深入地研究三者的关系,才能为政策制定提供客观的、有效的理论依据。

因此,下文第三章将对张宝山、袁晓玲、张小妮(2012)提出的基于 EKC 的能源消费、环境污染与经济增长的理论框架进行整合与重构;第四章将介绍 Lee and Chang (2008)、Huang *et al.* (2008)使用的面板数据系统广义矩估计方法;在结合以上理论分析和计量方法的基础上,第五章将对源消费、环境污染与经济增长的内在相关性和动态因果关系进行分析,并在第六章进行总结得出结论。

3. 理论整合与重构

Grossman and Krueger (1991)在分析北美自由贸易协定(NAFTA)的环境效益时,首次考证了环境与收入的倒 U 型曲线关系,从而完成了这篇影响深远的文章[8]。Grossman and Krueger 认为环境库兹涅兹曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC)可以从经济增长对环境污染的两个方面来解释:经济发展意味着扩大化再生产会产生更大规模的经济活动和资源需求,因而会对环境产生负的规模效应;但同时经济发展又通过技术效应(环保新技术的使用)和结构效应(产业结构的升级和优化)减少了环境污染、改善了环境质量。这三类效应共同决定了经济增长与环境污染的倒 U 型曲线关系。

Apergis and Payne (2009)根据能源消费对经济发展的不同作用方式提出了能源消费与经济发展关系的四大假说[7]。1) 增长性假说, Akarca and Long (1979)认为能源可以被视作除劳动力和资本外的生产要素直接或者间接地投入到生产过程中,通过产出推动经济增长,即存在着从能源消费到经济增长的单向因果关系[12],这意味着该经济是能源依赖型经济,应该采取更加积极的能源政策驱动经济发展;2) 保护性假说, Wietze and Montfort (2007)认为经济增长可能会受制于政治影响、基础设施或者资源配置不合理等原因,但对能源的依赖较少,同时经济增长会引起能源消费量的增加,即存在着从经济增长到能源消费的单向因果关系[13],这意味着政府适时地实施节能政策会减少能源消费量,但不会影响实际的产出;3) 反馈假说, Yang (2000)认为能源消费和经济增长很可能是相互关联的,即两者存在双向因果关系[14],应该积极提高能源利用效率;4) 中性假说, Altinay and Karagol(2004)认为能源消耗只占总产出的一小部分,因此能源消费对经济发展的影响很小或甚至没有,经济发展也不会对能源消费产生影响[15]。

从我国改革开放 30 余年发展历程的经验事实可以看出,经济的迅猛发展必然会引起能源消费的增加,能源消费增加又会产生环境污染的问题,而在经济发展初期,资金和技术都是环境污染治理的障碍。因此在这一时期、环境污染量的增长与经济增长同步,体现在 EKC 曲线的左边;能源消费与经济增长的关系印证了增长性假说,增长性假说的发展状况应该位于 EKC 曲线左边拐点以下的部分(见图 1 阶段 I)。

在国民经济经历了初期的发展之后,伴随着资本积累的增加,经济发展将会朝着“资源节约、环境友好”的可持续方向发展,这一时期的能源消费、环境污染与经济增长的关系变得更加多元化。

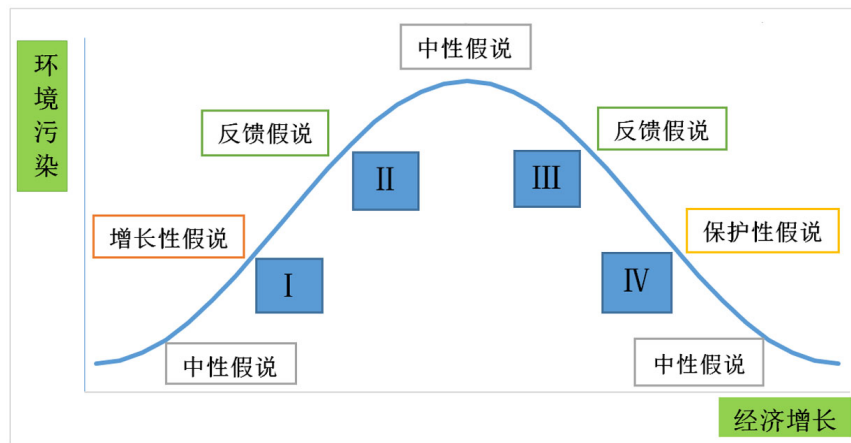


Figure 1. The theoretical framework of energy consumption, environmental pollution and economic growth based on EKC

图 1. 基于 EKC 的能源消费、环境污染与经济增长理论框架示意图

资本积累可以用于搭建环保体系或者发展环保产业、也可以优化升级产业结构使得经济发展进入“边发展，边治理”阶段，经济增长在逐渐摆脱环境污染的困境，环境污染的增长速度随着经济增长由快变慢，当越过 EKC 曲线顶点后，环境污染状况便会随着经济增长得到更大的改善，这一时期的环境污染和经济增长的状况可以在 EKC 曲线顶点两侧得到体现。

这一时期的能源利用则可能出现不同的发展轨迹，一方面可以利用资本积累进口能源，在保护本国的能源储备的基础上继续利用能源作为生产要素推动经济增长。依赖进口能源使得经济增长能够暂时摆脱对国内能源的依赖，经济增长反过来会刺激国内能源的消费，二者呈现出双向因果关系，印证了反馈假说。但是能源进口措施仍然会导致环境污染的增加，而且将会受限于能源输出国的产出能力，因此这并非是一条可持续发展道路，此时的反馈假说应该位于 EKC 曲线左边拐点以上的部分(见图 1 阶段 II)。另一方面通过资本积累进行产业升级改造以提升能源的综合利用效率，更高层次和更大规模的经济扩张同样会刺激能源消费的增长，使得二者呈现出双向因果关系，印证了反馈假说。同时能源利用效率的提升会减少污染排放，会逐步改善环境污染水平。这条可持续发展道路使得反馈假说可以从 EKC 曲线的左边逐渐移动到 EKC 曲线的右边(见图 1 阶段 II 和 III)。

当经济发展逐渐向更高水平迈进，经济增长将会对环境治理产生更加积极的规模效应，新能源技术的开发和应用将会大大降低经济增长对能源消费的依赖，此时的能源消费与经济增长的关系印证了保护性假说，位于 EKC 曲线右边拐点以下的部分(见图 1 阶段 IV)。

因此，基于 EKC 假说，加上能源消费与经济增长之间的四种假说，可以把能源消费、环境污染与经济增长纳入到一个统一的理论框架之中(详见图 1)¹。

4. 研究方法

4.1. 动态面板模型的设定

本文构造了包含 3 个变量的动态面板模型，该模型包含了 N 个省份 T 年的数据，同时考虑个体固定效应和时间固定效应，模型如下：

$$y_{i,t} = \sum_{j=1}^{p+1} \alpha_j y_{i,t-j} + \beta'(L)x_{i,t} + \eta_i + \phi_t + \varepsilon_{i,t}, \quad i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

¹ 能源消费与经济增长的中性假说位于 EKC 曲线的起点、顶点和终点的位置。因为中性假说与当前中国经济发展状况不相符合，不是本文的研究重点，所以没有在正文中进行过多讨论。

为考察能源消费、环境污染和经济增长之间动态因果关系，本文特别构造三个动态面板模型，分别以能源消费、环境污染和经济增长的相应指标作为被解释变量，相应的以另外两个变量的相应指标作为解释变量，变量选择详见 5.1 节。

该动态面板模型具有如下特征：

1) 被解释变量 $y_{i,t}$ 分别在三个模型中表示第 i 省在第 t 年的实际 GDP 总量 ($rgdp_{i,t}$)、一次能源消费总量 ($hjr_{i,t}$) 和工业三废排放总量 ($hjr_{i,t}$)。

2) $y_{i,t-j}$ 是被解释变量 $y_{i,t}$ 的 j 阶滞后项，是动态面板模型的内生变量， $y_{i,t-j}$ 需要满足条件 $E(y_{i,t}, \varepsilon_{i,s}) \neq 0 (s \leq t)$ ，即来自当期的冲击既会影响当期被解释变量的值也会影响以后各期被解释变量的值。

3) $x_{i,t}$ 是动态面板模型的先决变量，它表示第 i 省在第 $t-j$ 年的实际 GDP 总量 ($rgdp_{i,t-j}$)、一次能源消费总量 ($hjr_{i,t-j}$) 和工业三废排放总量 ($hjr_{i,t-j}$)， $j=1, \dots, p$ ， p 为最优滞后步长， $\beta'(L)$ 为多项式滞后算子。先决变量 $x_{i,t}$ 需要满足如下条件： $E(x_{i,t}, \varepsilon_{i,s}) \neq 0 (s < t)$ 且 $E(x_{i,t}, \varepsilon_{i,s}) = 0 (s \geq t)$ ，即来自前期的冲击会对当期的 $x_{i,t}$ 产生影响，来自当期的冲击也会对以后各期的 $x_{i,t}$ 产生影响，而来自当期的冲击不会对当期的 $x_{i,t}$ 产生影响。

4) η_i 为个体固定效应，表示每个省份或者直辖市由于地理位置、社会背景等的不同而具有的效应。 η_i 与 $\varepsilon_{i,t}$ 是相互独立的，不同截面的 η_i 是独立同分布的。

5) ϕ_t 为时间固定效应，表示每个省份或者直辖市在研究期间由于生产效率、技术进步和政策变化而具有的效应。 ϕ_t 与 $\varepsilon_{i,t}$ 是相互独立的，不同时点的 ϕ_t 是独立同分布的。本文根据研究的需要设置了从 2008~2012 年的时间虚拟变量。

6) $\varepsilon_{i,t}$ 是动态面板模型的随机干扰项，对于不同的截面 i 和时点 t 是独立同分布的，且均值为 0，可能存在异方差。

4.2. 动态面板模型的估计方法

上述动态面板模型的设定存在内生性问题，即滞后被解释变量与个体固定效应之间存在线性相关性 $E(y_{i,t-j}, \eta_i) \neq 0$ ，因此模型设定不符合线性回归模型的假设条件，采用传统的方法将会导致模型参数估计有偏，造成估计不够准确。众多学者在解决模型内生性问题的同时也提出了相应的模型参数估计方法。

4.2.1. 一阶差分广义矩估计法

Arellano and Bond (1991)为解决动态面板模型的内生性问题提出可以利用一阶差分广义矩估计法 (GMM-Difference) 来对动态面板模型进行估计 [17]，其基本步骤如下所述。

1) 首先对模型(1)两边同时取一阶差分可以消除个体固定效应 η_i ，得到模型(2)：

$$\Delta y_{i,t} = \sum_{j=1}^p \alpha_j \Delta y_{i,t-j} + \beta^{*'}(L) \Delta x_{i,t} + \Delta \phi_t + \Delta \varepsilon_{i,t}, i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

2) 在模型(2)中有： $\Delta y_{i,t-1} = y_{i,t-1} - y_{i,t-2}$ ， $\Delta \varepsilon_{i,t} = \varepsilon_{i,t} - \varepsilon_{i,t-1}$ ，因为 $E(\Delta y_{i,t-1}, \Delta \varepsilon_{i,t-1}) \neq 0$ 且 $\Delta \varepsilon_{i,t} = \varepsilon_{i,t} - \varepsilon_{i,t-1}$ ，所以 $E(\Delta y_{i,t-1}, \Delta \varepsilon_{i,t}) \neq 0$ ，即经过一阶差分后的模型仍然存在内生性的问题。

3) Arellano and Bond (1991)提出通过选择合适的工具变量 $z_{i,t}$ ，当工具变量 $z_{i,t}$ 满足矩条件 $E(\Delta y_{i,t-1}, z_{i,t}) \neq 0$ 且 $E(e_{i,t}, z_{i,t}) = 0$ 时，该工具变量可以用来克服模型设定的内生性问题，即使 $E(\Delta y_{i,t-1}, \Delta \varepsilon_{i,t}) \neq 0$ 成立。Arellano and Bond (1991)提出了设定工具变量的原则：滞后二阶及以上的水平变量 $y_{i,t-s} (s \geq 2)$ 可以作为内生变量 $y_{i,t-j}$ 的工具变量；滞后一阶及以上的水平变量 $x_{i,t-s} (s \geq 1)$ 可以作为先决变量 $x_{i,t}$ 的工具变量；对于存在外生变量的模型，它本省可以作为自己的工具变量。因此，考虑了先决变量 $x_{i,t}$ 的最优工具变量矩阵 Z_i 为：

$$Z_i = \begin{pmatrix} y_{i,1} & x_{i,1} & x_{i,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{i,1} & y_{i,2} & x_{i,1} & x_{i,2} & x_{i,3} & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & y_{i,1} & \cdots & y_{i,T-2} & x_{i,1} & \cdots & x_{i,T-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中，矩阵中的每一行对应于模型(2)中第 i 省第 t 年 ($t = 3, 4, \dots, T$) 的方程。

4) 一阶差分广义矩估计分为一步估计法和两步估计法。两步估计法的有效渐进估计是在矩条件(5)下，最小化 J_N (6)的准则。

$$E(Z_i', \Delta \varepsilon_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad \Delta \varepsilon_i = (\Delta \varepsilon_{i,3}, \Delta \varepsilon_{i,4}, \dots, \Delta \varepsilon_{i,T})' \quad (5)$$

$$J_N = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta \varepsilon_i Z_i \right) W_N \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \Delta \varepsilon_i \right) \quad (6)$$

其中 W_N 为加权矩阵， $W_N = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i \Delta \varepsilon_i \Delta \varepsilon_i' Z_i) \right]^{-1}$ 。

在随机误差项 $\varepsilon_{i,t}$ 同方差的条件下，广义矩估计的渐进有效估计可以通过一步估计法实现，只不过加权矩阵的形式改变了。则一步估计法中所采用的加权矩阵为 $W_{1N} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i H Z_i) \right]^{-1}$ ， H 是主对角元为 2，次对角元为 -1，其他元素为 0 的 $(T-2)$ 阶矩阵， W_{1N} 不依靠任何估计系数的信息。

4.2.2. 系统广义矩估计法

Blundell and Bond(1998)指出虽然一阶差分广义矩估计可以有效地解决模型内生性问题，但是一阶差分广义矩估计并不适用于模型变量为累积性变量的情况，这是由一阶差分广义矩估计所采用的弱工具变量引起，这将会使模型估计有偏[18]。

系统广义矩估计与一阶差分广义矩估计的主要区别在于选择的工具变量不同。一阶差分广义矩估计是在差分方程中选取滞后水平项 Z_i 为工具变量，而系统广义矩估计选择滞后的差分项 Z_i^* 为工具变量，这相当于进一步增加了可用的工具变量，因此，系统广义矩估计比一阶差分广义矩估计能更好地处理了弱工具变量的问题。 Z_i^* 的定义为：

$$Z_i^* = \begin{pmatrix} Z_i & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta y_{i,2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \Delta y_{i,3} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \Delta y_{i,T-1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

4.3. 动态面板模型设定的检验方法

动态面板模型使用了工具变量来克服模型存在的内生性问题，而如果过量使用工具变量则会导致模型估计有偏。因此本文采用 Sargan 检验来验证所采用的工具变量的有效性，Sargan 检验的原假设为 H_0 ：模型使用的工具变量是合理的。

动态面板模型设定假设干扰项无序列相关，因此需要对模型干扰项进行序列相关性的检验，检验干扰项是否存在二阶或高阶序列相关，其原假设为 H_0 ：模型不存在序列相关。

在模型估计完后，采用 Wald 检验和联合检验分别来考察模型整体是否显著和解释变量整体上是否显著。并通过 z 统计量的伴随概率来判断环境污染、能源消费和经济增长三个变量之间动态因果关系的方向。

4.4. 动态面板模型估计方法和最优滞后步长的选择

通过 4.3 节的分析可知,一阶差分广义矩估计法有效地解决了动态面板模型的内生性问题,但是因其弱工具变量的性质会导致模型估计有偏,而系统广义矩估计法能够更好地处理弱工具变量的问题,因此本文实证分析部分应该使用动态面板模型的系统广义矩估计法。

关于选择一步法还是两步法进行估计的问题,Arellano and Bond (1991)指出:当模型干扰项存在异方差时,一步法的 Sargan 检验倾向于过度拒绝原假设,因此,一步法估计得到的结果不可信,采用两阶段估计更为稳妥;而两阶段估计的 Sargan 检验又倾向于过度接受原假设。通常而言,这两种情况很可能是模型设定不当或者工具变量选择不合理造成的。但是 Arellano and Bond (1991)通过蒙特卡罗模拟表明两步法估计相对于一步法估计更为稳妥[17]。

因此,本文的实证分析部分应该选择系统广义矩估计的两步法。

Arellano and Bond (1991)还指出最优滞后步长的选择可以通过 Sargan 检验和干扰项序列相关性检验进行判断得到[17]。

5. 实证分析

本文以基于 EKC 的能源消费、环境污染与经济增长的理论框架为基础,利用全国 30 个省级行政单位的面板数据建立动态面板模型,利用系统广义矩估计方法(GMM-System)对能源消费、环境污染与经济增长三者之间的动态关系进行实证分析。

5.1. 变量选择及数据来源和处理

本文选择 2004~2012 年中国 30 个省级行政单位²的相关数据作为研究对象。以各省份各年的实际 GDP 总量(简记为 rgdp,单位:亿元)表示经济增长水平,实际 GDP 为各年名义 GDP 扣除以 2004 年作为基年的价格变动因素后的实际值,数据来源于历年《中国统计年鉴》和中国国家统计局官方网站。以一次能源消费总量(简记为 nyxfl,单位:万吨标准煤)表示能源消费水平,根据《中国统计年鉴》筛选出的一次能源包括煤炭制品(煤炭和焦炭)和石油制品(原油、汽油、煤油、柴油和燃料油)³,根据《中国能源统计年鉴》给出的能源单位换算标准将所有能源产品的单位统一到万吨标准煤,并将其加总得到一次能源消费总量,数据来源于历年《中国能源统计年鉴》和中国国家统计局官方网站。以工业三废(废水、废气和固体废弃物)排放总量(简记为: hjwr,单位:万吨)表示环境污染水平,首先将废水、废气和固体废弃物的单位统一到万吨,再将其加总得到工业三废排放总量,数据来源于历年《中国环境年鉴》和《中国统计年鉴》。全部数据来源描述见表 1。

能搜集到的已有 GDP 总量数据基本上都呈现线性趋势,采用二次指数平滑法对缺失值进行插补,对异常值进行替换。能搜集到的已有能源消费指标数据和环境污染指标数据没有呈现出特定的变化趋势,采用 missForest 插补法[16]进行插补。为克服建立的模型的异方差性,全部数据均进行对数化处理。

5.2. 动态面板模型的建立

基于我国 2004~2012 年 30 个省份和直辖市的实际 GDP 总量(rgdp)、一次能源消费总量(nyxfl)、环境污染总量(hjwr),采用动态面板模型系统广义矩估计的两步法(two-step GMM-System)估计方程(2)。

²由于无法获得相关的原始数据,本文的研究对象不包括西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区。

³根据能源划分标准,天然气也属于一次能源,而且天然气属于清洁能源,天然气消费不会对环境产生污染。鉴于考察我国环境污染情况作为本文的主要研究目的之一,同时由于天然气并非我国主要的消费能源(其消费量远小于煤炭制品和石油制品),因此在变量选择时不将天然气消费量考虑在内。

5.3. 模型拟合结果

从表 2 中可以看出, 3 个动态面板模型的 Sargan 检验的伴随概率 P 值均大于 0.05 的显著性水平, 说明 3 个模型的工具变量选择都是合理的。3 个模型的二阶序列相关性检验的伴随概率 P 值均大于 0.05, 说明 3 个模型的随机干扰项均不存在二阶序列相关性。同时, 3 个模型整体显著性的 Wald 统计量的伴随概率 P 值为 0.0000, 3 个模型联合检验的伴随概率 P 值为 0.0000。综合以上检验说明 3 个模型的拟合情况较好, 可以通过变量的显著性程度来判断能源消费、环境污染与经济增长的动态关系⁴。

在 0.05 的显著性水平下, 从模型拟合结果可以发现能源消费、环境污染与经济增长的格兰杰因果关系满足以下结论: 1) 存在从环境污染到能源消费的单向因果关系; 2) 存在从环境污染到经济增长的单向因果关系; 3) 存在从能源消费到经济增长的双向因果关系。

Table 1. Selected variables and data source of the research on the dynamic relationship among energy consumption, environmental pollution and economic growth

表 1. 能源消费、环境污染与经济增长动态关系研究的变量选择和数据来源

变量	简写	单位	数据来源
实际 GDP 总量	rgdp	亿元	历年《中国统计年鉴》和中国国家统计局官方网站
一次能源消费总量	nyxfl	万吨标准煤	历年《中国能源统计年鉴》和中国国家统计局官方网站
工业三废排放总量	hjwr	万吨	历年《中国环境年鉴》和《中国统计年鉴》

Table 2. GMM-system results of dynamic panel data

表 2. 动态面板模型的系统广义矩估计(GMM-system)结果

解释变量	被解释变量								
	$\Delta rgdp_{i,t}$			$\Delta nyxfl_{i,t}$			$\Delta hjwr_{i,t}$		
	Coef.	Z	P 值	Coef.	Z	P 值	Coef.	Z	P 值
$\Delta rgdp_{i,t}$				6.65963	1.29	0.198	12.1585	3.46	0.001*
$\Delta rgdp_{i,t-1}$	0.93540	11.60	0.000*	8.44959	0.80	0.423	-14.1668	-1.61	0.108
$\Delta rgdp_{i,t-2}$	-0.36240	-3.10	0.002*	-32.2743	-2.52	0.012*	3.3937	0.36	0.719
$\Delta rgdp_{i,t-3}$	0.35562	3.81	0.000*	19.9859	3.76	0.000*	-0.09700	-0.01	0.991
$\Delta nyxfl_{i,t}$	-0.00035	-0.51	0.609				-0.00786	-0.21	0.831
$\Delta nyxfl_{i,t-1}$	0.00099	1.54	0.124	0.87365	8.51	0.000*	0.02823	1.13	0.258
$\Delta nyxfl_{i,t-2}$	-0.00141	-3.49	0.000*	-0.43931	-1.11	0.266	-0.01472	-0.57	0.567
$\Delta nyxfl_{i,t-3}$	-0.00017	-0.26	0.792	-0.27033	-0.68	0.493	0.00355	0.10	0.916
$\Delta hjwr_{i,t}$	0.00802	4.96	0.000*	-0.06846	-0.74	0.460			
$\Delta hjwr_{i,t-1}$	-0.00294	-1.86	0.063	-0.02059	-0.23	0.821	0.75408	16.35	0.000*
$\Delta hjwr_{i,t-2}$	-0.00002	-0.02	0.987	0.68014	3.46	0.001*	0.47113	8.32	0.000*
$\Delta hjwr_{i,t-3}$	0.00741	5.74	0.000*	-0.36505	-2.19	0.028*	0.29087	-7.24	0.000*
Sargan Test	χ^2 统计量	21.57	0.801	χ^2 统计量	16.04	0.965	χ^2 统计量	14.32	0.985
M1		-2.09	0.036		-3.11	0.002		-1.88	0.060
M2		-0.53	0.595		-0.45	0.654		0.83	0.406
M3	Z 统计量	0.43	0.665	Z 统计量	0.07	0.943	Z 统计量	-0.86	0.390
M4		1.30	0.192		-0.08	0.932		-1.04	0.299

附注: *表示变量在 0.05 的水平上是统计显著的。

⁴ 本文根据研究的需要设置了从 2008~2012 年的时间虚拟变量, 因文章篇幅的问题没有在表 2 中列出来。

5.4. 模型拟合结果分析

5.4.1. 从环境污染到能源消费的单向因果关系分析

本文建立的动态面板模型中用工业三废(废水、废气和固体废弃物)的排放总量来代表环境污染程度, 而用煤炭制品(煤炭和焦炭)和石油制品(原油、汽油、煤油、柴油和燃料油)的消费总量来代表能源消费水平, 因此从理论上讲应该存在着从能源消费到环境污染的单向因果关系, 而模型拟合结果并没有显现出这种因果关系, 针对于这个悖论可以从以下几个方面来解释:

1) 从能源消费到环境污染的单向因果关系是“先污染, 后治理”的工业化模式的表征, 模型拟合结果说明我国工业化发展在逐渐从“先污染, 后治理”的旧模式走向“边发展, 边治理”的可持续发展模式。

2) 工业化生产中通过能源消耗产生污染排放是必然的, 但是模型拟合结果没有出现从能源消费到环境污染的单向因果关系说明了污染排放增速并没有与能源消费增速保持一致。这说明了当前我国工业化进程中, 通过加大对能源产业的投资产生了规模效应或者对能源技术的研发生产出了传统能源的替代产品(如新能源等)使得能源使用效率得到了提升。能源使用效率的提升在长期中会降低污染排放, 环境状况将会得到改善, 使得能源消费在长期中不再是环境污染的始作俑者。

3) 从模型拟合结果中可以发现滞后三期和滞后二期的环境污染总量对能源消费总量的影响是相反的。事实上, 在笔者建立动态面板模型的过程中尝试过增加滞后步长, 其结果显示滞后后期的环境污染总量对能源消费总量的影响出现正负循环的状况。从这个模型拟合的细微之处可以窥探出当环保体系被纳入工业化发展进程后, 环保体系的作用在短期和长期中将会得到显现。

在短期中, 环境污染将会与能源消费形成动态均衡机制, 即当环境污染总量的增加对能源消费总量产生正效应时, 能源消费总量会随之增加, 也会带动环境污染总量的增加; 而在下一时期, 环境污染总量又对能源消费总量产生了负的效应, 则环境污染总量的增加又会导致能源消费总量的下降, 从而又使环境污染总量下降。这使得环境污染总量和能源消费总量通过一个“相互制约”的方式保持在一个合理的范围内。

在长期中, 随着环保产业的发展壮大, 环境污染水平将会得到控制甚至改善, 届时能源消费对环境污染的影响将会逐步减小, 反而环保产业将会刺激能源消费的增长, 从而对经济增长产生更大的驱动力。

4) 同时, Arellano and Bond (1991)在介绍一阶差分广义矩估计的二步法时还提出了排除随机干扰项的异方差和序列相关性的稳健性估计方法[17]。笔者在建模的过程中也尝试使用稳健估计方法与二步法进行对比发现, 在 0.05 的显著性水平下, 前者的因果关系仅存在与从环境污染到能源消费的单向关系。因此从模型的角度可以看出从环境污染到能源消费的单向关系是能源消费、环境污染与经济增长整体动态关系的核心。

综上所述, 从环境污染到能源消费的单向因果关系揭示了环境污染和能源消费在短期中形成的动态均衡机制和经济发展方式在长期中发生的转变。

5.4.2. 从环境污染到经济增长的单向因果关系分析

从环境污染到经济增长的单向因果关系这一结果揭示了中国在长期以来所取得的巨大成就是以牺牲环境为代价的, 这种经济现象在发展中国家和发达国家的工业化进程中都曾出现过, 这也说明了我国的经济水平还处于 EKC 曲线的左边。

从模型拟合结果可以发现, 环境污染总量的当期和滞后三期的显著性是非常明显的, 而滞后二期的在 0.07 的显著性水平下是显著的, 其系数的符号也是正负交替的。系数为正说明了环境污染总量的增加推动了经济增长; 系数为负则说明了环境污染总量的减少推动了经济增长。产生这种现象的根本原因仍

然是环保产业的快速发展和环境污染的有效控制，这在一定程度上说明了我国经济发展方式的转变正在逐渐摆脱对环境的破坏。

而对于二者关系在短期中的考察仍然沿用上文的思路。由于环保产业的发展对工业化产生的环境污染起到了一定的控制作用，在不影响经济增长的前提下，环境污染总量随着环保产业对环境净化能力的增强而控制在合理的范围内，这样，在短期内环境污染与经济增长之间也形成了动态均衡。

同时，环境污染总量滞后项的系数为负也说明了在短期中随着环保产业的发展，我国经济发展水平有越过 EKC 曲线拐点的能力，关于这个问题的结论还需要结合下文能源消费与经济增长的关系进行分析。

综上所述，从环境污染到经济增长的单向因果关系揭示了我国长期中的经济发展水平还处于 EKC 曲线的左边，经济发展方式的转变正在逐渐摆脱对环境的破坏。在短期中，环境污染与经济增长之间形成了动态均衡。

5.4.3. 从能源消费到经济增长的双向因果关系分析

从能源消费到经济增长的双向因果关系证明了能源消费与经济增长关系的反馈假说，反馈假说位于 ECK 曲线顶端的两侧。而上文的论述证明了我国长期中的经济发展水平还处于 EKC 曲线的左边，二者结合可以说明在长期中，我国经济已经站上 EKC 曲线的拐点，处于 EKC 曲线的第 II 阶段。

除了传统理论上能源可以视为一种生产要素驱动经济增长而产生的从能源消费到经济增长的单向因果关系外，从经济增长到能源消费的单向因果关系有力地说明了我国经济长期发展正在摆脱对能源的消耗，这同样是源于通过加大对能源产业的投资产生了规模效应或者对能源技术的研发生产出了传统能源的替代产品(如新能源等)使得能源使用效率得到了提升。

同样，能源消费总量滞后项的系数有正有负，这说明了能源消费和经济增长的动态均衡机制已经建立起来。短期内，能源消费的增长驱动经济增长，经济增长又逐渐在摆脱对能源的依赖使得能源消费下降，能源消费下降也会控制经济增长速度，让其保持在合理的范围内，实现可持续性的稳定增长

综上所述，从能源消费到经济增长的双向因果关系加上从环境污染到经济增长的单向因果关系证明了我国经济发展在长期中已经站上 EKC 曲线的拐点，处于 EKC 曲线的第 II 阶段。我国长期的经济增长正在逐渐摆脱对能源的依赖，能源产业的快速发展将成为我国经济发展的内生动力。而在短期中，能源消费与经济增长之间也处于动态均衡状态。

6. 结论

根据上文的分析可以看出我国能源消费、环境污染与经济增长在整体上保持良性发展的趋势，具体而言得出以下几个结论：1) 我国经济发展水平在长期中处于 ECK 曲线的左边，但已站上 ECK 曲线的拐点，处于 ECK 曲线的第 II 阶段；2) 我国的经济增长正在逐渐摆脱对能源的依赖和对环境的破坏，能源产业和环保产业的发展将会成为我国经济发展的内生动力；3) 经济发展方式的转变已经构建起能源消费、环境污染与经济增长的动态均衡机制。

参考文献 (References)

- [1] 陈耀辉, 汪古月 (2011) 能源消费、环境污染与经济增长的实证分析——以江苏省为例. *理论建设*, 6, 58-60.
- [2] 宋香荣, 王依军 (2011) 新疆经济增长中的能源消费与环境污染. *新疆财经大学学报*, 3, 5-9.
- [3] 付博君, 杨新吉勒图 (2012) 内蒙古能源消费、环境污染与经济增长的关系研究——基于 3E 模型. *知识经济*, 17, 22-25.
- [4] 肖涛, 张宗益, 汪锋 (2012) 我国区域能源消耗与经济增长关系——基于能源输入省与输出省面板数据的实证分析. *管理工程学报*, 3, 74-78.
- [5] Soytas, U. and Sari, R. (2006) Can China contribute more to the fight against global warming? *Journal of Policy Mod-*

- eling*, **8**, 837-846. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpolmod.2006.06.016>
- [6] Zhao, Z. and Yuan, J. (2008) Income growth, energy consumption and carbon emissions in China. *The 2008 International Conference on Risk Management & Engineering Management*, 373-377. <http://dx.doi.org/10.1109/icrmem.2008.99>
- [7] Apergis, N. and Payne, J.E. (2009) CO₂ emissions, energy usage, and output in central america. *Energy Policy*, **8**, 3282-3286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.048>
- [8] Grossman, G.M. and Krueger, A.B. (1991) Environmental impacts of a north American free trade agreement. *NBER Working Papers No. W3914*.
- [9] 张宝山, 袁晓玲, 张小妮 (2012) 环境污染、能源消费与经济增长. *科学决策*, **11**, 20-38.
- [10] Lee, C.C. and Chang, C.P. (2008) Energy consumption and economic growth in Asian economies: A more comprehensive analysis using panel data. *Resource and Energy Economics*, **1**, 50-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.reseneeco.2007.03.003>
- [11] Huang, B.N., Hwang, M.J. and Yang, C.W. (2008) Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. *Ecological Economics*, **1**, 41-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.11.006>
- [12] Akarca, A.T. and Long, T.V. (1979) Energy and employment: A time series analysis of the causal relationship. *Resources and Energy*, **2**, 151-162. [http://dx.doi.org/10.1016/0165-0572\(79\)90027-6](http://dx.doi.org/10.1016/0165-0572(79)90027-6)
- [13] Wietze, L. and Montfort, K.V. (2007) Energy consumption and GDP in Turkey: Is there a cointegration relationship? *Energy Economics*, **6**, 1166-1178.
- [14] Yang, H.Y. (2000) A note on the causal relationship between energy and GDP in Taiwan. *Energy Economics*, **3**, 309-317. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-9883\(99\)00044-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-9883(99)00044-4)
- [15] Altinay, G. and Karagol, E. (2004) Structural break, unit root, and the causality between energy consumption and GDP in Turkey. *Energy Economics*, **6**, 985-994. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2004.07.001>
- [16] Stekhoven, D.J. and Buhlmann, P. (2012) Miss forest—Non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics*, **28**, 112-118. <http://dx.doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597>
- [17] Arellano, M. and Bond, S. (1991) Some test of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *Review of Economic Studies*, **1**, 277-297. <http://dx.doi.org/10.2307/2297968>
- [18] Blundell, R. and Bond, S. (1989) Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, **1**, 29-51.