



# 能源经济效率、能源环境绩效 与区域经济增长

汪克亮<sup>1</sup>, 杨力<sup>1</sup>, 杨宝臣<sup>2</sup>, 程云鹤<sup>1</sup>

1 安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001

2 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072

**摘要:**以资本、劳动和能源作为投入变量,以各省份GDP为期望产出变量,以二氧化碳排放量为非期望产出变量,在全要素生产理论框架下,基于DEA方法定义能源利用的经济效率和能源利用的环境绩效两类能源效率指数;运用非径向、非角度的SBM模型测算2000年至2010年中国各省份的能源经济效率和能源环境绩效及其分解指数,分析其演变规律与地区差异性;基于环境库兹涅茨曲线理论实证分析中国能源经济效率和能源环境绩效及其分解指数与区域经济增长之间的关系。研究表明,样本期内,中国能源经济效率和能源环境绩效整体水平均较低,地区差异明显,节能减排潜力巨大;能源经济效率和能源环境绩效及其分解指数与经济增长之间存在倒U形或U形曲线关系;产业结构、人口密度、能源结构和外资利用对能源经济效率和能源环境绩效均有显著影响,但是影响机制存在差异。

**关键词:**能源经济效率;能源环境绩效;SBM模型;环境库兹涅茨曲线

**中图分类号:**F206

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1672-0334.2013.03.009

**文章编号:**1672-0334(2013)03-0086-14

## 1 引言

中国作为世界上人口最多的发展中国家,在未来相当长时期内,实现经济持续增长、稳步提高人民生活水平仍然是中国最重要的宏观经济目标。因此,在履行国际公约的同时,应充分考虑自身的发展。也就是说,在实现经济持续增长的前提下完成碳减排任务是中国经济和社会可持续发展的内在要求。据统计,在2006年中国二氧化碳排放总量已经超过美国,跃居世界第一位,并且占全球排放总量的22%<sup>[1]</sup>,这与长期以来中国粗放型经济增长模式以及以煤为主的能源消费结构密切相关。未来的工业化和城市化仍将伴随大量的煤炭资源消耗,燃煤已成为中国温室气体及众多环境污染物(如二氧化硫和烟尘等)排放最重要的来源。为了完成碳减排国际承诺,延缓气候变化,改善环境质量,提升能源效率是中国当前最现实、最有效的途径之一。因此,研究能源利用、碳减排和区域经济增长三者之间的互动关系,在中国建设两型社会、发展低碳经济的时代背

景下具有重要的现实意义和政策指导价值。

## 2 相关研究评述

化石能源利用造成二氧化碳等温室气体的过度排放是全球气候变化的主要驱动因素,事关人类社会的生存与发展。如何控制温室气体排放、发展低碳经济、延缓气候变化已经成为可持续发展新的内涵之一,早已引起全球各界的高度重视,成为各国政策关注的焦点,也是当前国内外研究极为活跃的领域之一,已经取得丰富的理论和应用成果。众多经验事实表明,二氧化碳等温室气体的影响与一国或地区的经济发展、能源利用之间存在密切联系。在这方面的早期研究中,大多数研究采用碳强度指标衡量碳排放效率,数值上等于一国或地区的碳排放量与GDP的比值,并采用因素分解法将碳强度指标拆分为能源强度指数和碳化指数,以进一步衡量生产过程中单位经济产出所消耗的能源投入强度和单位能源投入所导致的碳排放量,并以此分别衡量单位

**收稿日期:**2012-08-22 **修返日期:**2013-03-29

**基金项目:**教育部人文社会科学研究项目(13YJC790136);国家自然科学基金(71071003);安徽省哲学社会科学规划基金(AHSK11-12D017)

**作者简介:**汪克亮(1980-),男,安徽枞阳人,毕业于天津大学,获管理学博士学位,现为安徽理工大学经济与管理学院副教授,研究方向:能源经济和环境管理等。E-mail:klwang@163.com

能源利用的生产率和清洁度<sup>[2-4]</sup>,对后续研究产生极为重要的启示作用。然而,也有研究对此提出批评,认为碳强度指标的分解过于主观,缺乏理论依据,特别是能源强度作为单要素指标,无法反映生产过程中各类投入要素之间的相互作用,无法客观、准确衡量能源利用的潜在技术效率,从而导致实证测度结果出现偏差<sup>[5-7]</sup>。为了改进碳排放强度、能源强度等单要素指标的缺陷,一种基于全要素生产理论的效率衡量方法得到广泛应用,该方法源于 Farrell<sup>[8]</sup>的效率测度思想,通过利用 Charnes 等<sup>[9]</sup>提出的数据包络分析方法构建生产前沿面,实现对不同经济单元能源及环境效率的测度。Zaim 等<sup>[10]</sup>采用 DEA 方法创建 OECD 国家的环境绩效指数,并在此基础上验证环境库兹涅茨曲线假说;Hu 等<sup>[11]</sup>首次基于 DEA 方法提出全要素能源效率(TFEE)指标,并就中国各省份数据进行实证分析;Hu 等<sup>[12]</sup>利用 TFEE 指标测算 APEC 国家的全要素能源效率,并且构建能源节约目标比(ESTR)这一反映节能潜力的定量分析指标;Mukherjee<sup>[13]</sup>采用 DEA 方法实证测算印度制造业能源利用效率,并采用两阶段方法检验能源效率的影响因素;Zhou 等<sup>[14]</sup>基于环境生产技术框架,依据不同 DEA 方法建立能源效率测度模型,对 OECD 国家进行实证研究;Sueyoshi 等<sup>[15]</sup>建立新型 DEA 效率模型用于衡量美国各州燃煤电站的运营效率、环境效率以及运营-环境联合效率,并在此基础上分析环境规制的效果。类似的研究还有 Nassiri 等<sup>[16]</sup>、MacPherson 等<sup>[17]</sup>、Sueyoshi 等<sup>[18]</sup>和 Xie 等<sup>[19]</sup>。近年来,中国也有大量采用 DEA 方法研究中国能源与环境效率问题的文献。魏楚等<sup>[20]</sup>较早引入 TFEE 指标对中国各省份的能源效率进行实证考察;王群伟等<sup>[21]</sup>首次采用 Malmquist 指数分析中国各省份能源效率的动态演变特征;吴琦等<sup>[22]</sup>利用数据转换法处理环境污染变量,基于 DEA 方法测算中国各省份的能源经济效率和环境效率,并在此基础上综合分析能源利用对经济与环境系统的影响;汪克亮等<sup>[23]</sup>将二氧化碳排放和二氧化硫排放视为能源利用产生的非期望产出,基于 DEA 方法建立考虑环境效应的全要素能源效率测度模型,通过实证归纳出中国各省份能源利用效率的四类模式,并采用 Tobit 模型检验能源效率地区差异的形成原因;王兵等<sup>[24]</sup>运用 SBM 方向性距离函数以及卢恩伯格生产率指标测算中国各省份的环境效率和环境全要素生产率,分析无效率的来源,并且对影响环境效率和环境全要素生产率的因素进行实证;宋马林等<sup>[25]</sup>综合考虑期望产出最大化和非期望产出最小化双重目标,构建一类考虑非期望产出的非径向-双目标 DEA 环境效率评价模型,并通过实证验证模型的有效性。这些研究均从不同层面证实全要素方法用于研究中国能源与环境效率问题的可行性和有效性。为此,本研究将基于全要素框架研究中国能源利用效率问题。

然而,已有研究的焦点多是衡量经济单元能源利用效率水平的高低及其影响因素,大多是采用基于

径向和角度的效率测算方法,这种方法忽视了决策单元的投入和产出松弛问题,会导致效率评价结果出现偏差。现阶段尚未发现专门探讨中国省际能源利用效率与经济增长之间关系的研究,少数研究仅将经济增长作为影响中国能源效率的众多因素之一,并未深入分析它们之间的关系。实际上,经济的持续增长将通过技术进步、管理体制的改进以及制度变革等方式,对能源消费、能源转换技术以及污染排放产生显著的影响,从而进一步改变能源利用水平。考虑到中国节能减排目标能否实现与能源利用水平密切相关,如果能够实证分析中国各省份能源利用效率与经济增长之间的互动关系,对于中国相关领域节能减排政策的制定以及高效完成碳减排任务意义重大。

综上所述,本研究在全要素生产理论基础上,基于 DEA 方法定义能源利用的经济效率和能源利用的环境绩效两种能源利用效率指标,以区分环境因素对能源利用效率的影响;考虑到中国未来经济增长将面临碳减排约束,而且碳减排目标的实现与能源利用效率直接相关,将二氧化碳排放量作为能源利用的环境影响指标引入到研究体系中,采用基于非径向、非角度的 SBM 模型测算 2000 年至 2010 年中国各省份的能源经济效率和能源环境绩效,并分别基于时间和空间双重维度展开分析;以 2000 年至 2010 年中国各省份的能源经济效率和能源环境绩效及其分解指数作为因变量,以经济增长和其他相关影响因素为自变量,结合环境库兹涅茨曲线(EKC)理论构建面板计量经济模型,以捕捉中国各省份能源利用效率与经济增长之间的互动关系,为相关领域的政策制定和实施提供理论与实践依据。

### 3 研究方法

#### 3.1 能源效率指标涵义

Hu 等<sup>[11]</sup>首次基于 DEA 方法提出的全要素能源效率(TFEE)已经成为衡量能源利用效率的主流工具。传统 TFEE 指标只考虑一种产出,即经济产出,如 GDP 或工业增加值等,也被称为期望产出。近年来,随着人们对环境污染问题关注度的加大,众多学者开始将能源利用产生的环境影响(如污染或温室气体排放等)引入 TFEE 中,将其定义为考虑环境效应的 TFEE<sup>[23]</sup>或环境约束下的 TFEE<sup>[26]</sup>,丰富了 TFEE 的内涵,使能源效率的研究更加科学化和系统化,同时也更能体现可持续发展思想。然而,很少有研究将传统 TFEE 与考虑环境污染的 TFEE 置于统一的研究框架之中。为了更有效地区分两种 TFEE,根据是否引入环境因素,本研究基于全要素方法和 DEA 方法定义能源经济效率和能源环境绩效两种能源效率指标,具体定义如下。

(1)能源利用的经济效率,简称能源经济效率(EEE)。该指标只考虑一类产出,即经济产出,不考虑经济单元在能源利用过程中产生的环境负外部性,只注重实现最大经济利益,追求的是在能源投入

既定下实现经济产出最大化,或在经济产出既定下实现能源投入最小化。需要注意的是,本研究定义的 $EEE$ 与魏一鸣等<sup>[27]</sup>提出的能源经济效率虽然在名称上一致,但涵义不同。魏一鸣等<sup>[27]</sup>提出的能源经济效率指标融入了能源的价格信息,目标是能源投入成本最小化,实质上是能源的成本效率。

(2) 能源利用的环境绩效,简称能源环境绩效( $EEP$ )。该指标实质上就是考虑环境因素的TFEE指标,其不仅注重能源利用产生最大化经济产出,而且同时要求将环境负外部性降至最低,体现了能源、经济与环境系统的协调统一。为了更好地表达该指标的涵义,本研究借用环境经济学中环境绩效概念命名该指标。

### 3.2 SBM模型

科学测度中国各省份 $EEE$ 和 $EEP$ 是本研究的基础工作,其中方法的选择非常重要。目前主要采用两种方法,一种是依靠传统的距离函数结合DEA方法测算能源效率,另一种是近年来兴起的采用Chung等<sup>[28]</sup>提出的方向性距离函数(directional distance function, DDF),该函数可以在不同的矢量方向实现投入和产出的同比例增减,对于研究资源环境约束下的经济单元效率与生产率问题非常有效。但是,上述研究基本都是利用径向的、角度的DEA方法计算距离函数,当存在投入过度或产出不足时,即存在投入和产出的非零松弛时,采用径向DEA方法可能会明显高估评价单元的效率;而基于角度DEA方法的效率测度由于无法同时考虑投入和产出两个方面,容易使效率结果出现偏差<sup>[29]</sup>。为了改进这一缺陷,Tone<sup>[29]</sup>提出一种新型的DEA模型,即SBM(slacks-based measurement)模型,这是一种基于非径向、非角度的DEA模型,充分考虑投入和产出松弛变量的存在,且可以同时从投入和产出两个角度展开效率分析,得到更为客观、准确的效率测度结果。Fukuyama等<sup>[30]</sup>和王兵等<sup>[24]</sup>提出基于SBM方向性距离函数的效率测度方法,该方法结合众多模型优点,但是必须借助复杂的计算机编程才能实现,实现难度较大。本研究采用的SBM模型和SBM-Undesirable模型均可以利用DEA-Solver软件直接计算得到,可以有效降低建模难度,提高研究的实用性。

对于 $EEE$ 的测度,本研究采用Tone<sup>[29]</sup>提出的一般SBM模型。令 $X$ 为投入矩阵, $X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in R_+^{m \times h}$ ,  $m$ 为投入指标种类, $h$ 为决策单元个数; $Y$ 为经济产出矩阵, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in R_+^{n \times h}$ ,  $n$ 为产出指标种类; $\lambda$ 为权重系数向量, $\lambda \geq 0$ ;  $s^-$ 为投入松弛向量, $s^- \geq 0$ ;  $s^+$ 为产出松弛向量, $s^+ \geq 0$ 。则待评决策单元 $EEE$ 的测度公式为

$$\min EEE_0 = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \frac{s_r^+}{y_{r0}}} \quad (1)$$

$$s. t. x_0 = X\lambda + s^-, y_0 = Y\lambda - s^+$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0$$

其中, $EEE_0$ 为待评审决策单元的能源经济效率, $x_0$ 为待评决策单元的投入向量, $x_0 = (x_{10}, \dots, x_{m0})$ ;  $y_0$ 为待评决策单元的产出向量, $y_0 = (y_{10}, \dots, y_{n0})$ ;  $s_i^-$ 为第 $i$ 个投入指标的松弛值, $s_r^+$ 为第 $r$ 个产出指标的松弛值。当且仅当 $EEE_0 = 1$ 时,该决策单元有效,此时 $s^- = 0, s^+ = 0$ ,这是一种最佳状态,没有投入和产出松弛产生;若 $0 \leq EEE_0 < 1$ ,则说明该决策单元非有效。

为了更好地解决生产过程中产生的污染负外部性问题,Tone<sup>[31]</sup>对传统SBM模型进行修正,提出基于非期望产出的SBM模型,即SBM-Undesirable模型,本研究采用该模型测算 $EEP$ 。令 $Y^g$ 为期望产出矩阵, $Y^g = (y_1^g, y_2^g, \dots, y_{n_1}^g) \in R_+^{n_1 \times h}$ ,  $n_1$ 为期望产出的种类; $Y^b$ 为非期望产出矩阵, $Y^b = (y_1^b, y_2^b, \dots, y_{n_2}^b) \in R_+^{n_2 \times h}$ ,  $n_2$ 为非期望产出的种类。则待评决策单元 $EEP$ 的测度公式为

$$\min EEP_0 = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{n_1 + n_2} \left( \sum_{r=1}^{n_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{n_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (2)$$

$$s. t. x_0 = X\lambda + s^-, y_0^g = Y^g\lambda - s^g,$$

$$y_0^b = Y^b\lambda + s^b, s^- \geq 0, s^g \geq 0,$$

$$s^b \geq 0, \lambda \geq 0$$

其中, $EEP_0$ 为待评审决策单元的能源环境绩效, $s_i^-$ 为待评决策单元的期望产出不足量, $s_r^g$ 为待评决策单元的非期望产出超标量。当且仅当 $EEP_0 = 1$ 时,即 $s^- = s^g = s^b = 0$ 时,决策单元完全有效率;若 $0 \leq EEP_0 < 1$ ,决策单元存在无效率。

由于模型(1)式和模型(2)式中没有关于权向量 $\lambda$ 的约束条件,是假设规模报酬不变,求解结果是整体技术效率指数。如果两式中均增加关于 $E\lambda$ 不同的约束条件,则转化为SBM规模报酬效应模型, $E$ 为单位向量。①若 $E\lambda = 1$ ,为规模报酬可变的SBM模型,此时(1)式和(2)式的值为纯技术效率,规模效率 = 整体技术效率;②若 $E\lambda < 1$ ,为规模报酬递减的SBM模型;③若 $E\lambda > 1$ ,为规模报酬递增的SBM模型。纯技术效率主要反映经济单元技术水平、管理模式和制度环境因素对生产效率的影响,规模效率衡量规模因素对生产效率的影响。

为了更好地挖掘中国各省份能源效率提升的推动和制约因素,考察能源利用的技术有效性和规模有效性,本研究进一步将 $EEE$ 和 $EEP$ 分解为纯技术效率和规模效率。为表述方便,将 $EEE$ 的两个分解指数称为能源经济纯技术效率( $EEEEPT$ )和能源经济规模效率( $EEEESE$ ),将 $EEP$ 的两个分解指数称为能源环境纯技术效率( $EEPT$ )和能源环境规模效率( $EEPSE$ ),则

$$EEE = EEEEEPT \cdot EEEEESE \quad (3)$$

$$EEP = EEPTE \cdot EEPSE \quad (4)$$

#### 4 样本、变量和数据

由于相关变量统计资料有限,本研究区间定为2000年至2010年,以中国28个省份(包括省、市、区,统称省份)为研究对象。为了便于资料整理,重庆归入四川,海南、西藏、台湾、香港、澳门不包括在分析范围之内。按照地理位置将所有省份归为东部、中部和西部三大地区,东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东,中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南,西部地区包括内蒙古、广西、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。由于本研究聚焦于能源利用、碳减排和经济增长等重大宏观经济问题,因此以资本、劳动和能源为投入变量,各省份GDP为期望产出变量,以碳排放量作为非期望产出变量,各变量的具体界定如下。①资本投入。参考已有研究的做法,以资本存量作为资本投入指标,由于无法准确获取中国各省份资本存量数据,采用永续盘存法进行估算,本研究直接根据单豪杰<sup>[32]</sup>的研究成果并按照2000年不变价格对2000年至2010年各省份资本存量进行换算。②劳动投入。一般认为,劳动时间的投入和劳动报酬方面的数据可以更好地反映劳动投入,但是由于诸多原因无法获得这方面的详尽数据。为此,本研究采用各省份三次产业就业人数表示劳动投入。③能源投入。能源是生产过程中一种重要的投入要素,同时也是环境污染的主要来源。根据多数研究的做法,本研究以各省份的能源消费总量表示能源投入,并进行折标煤计算。④期望产出。在众多有关能效的实证研究中对期望产出的选择较为统一,一般采用增加值意义上的指标,如地区生产总值GDP或工业增加值。本研究以中国各省份GDP为期望产出变量,并对其以2000年不变价格进行调整以保持统计口径的一致性。⑤非期望产出。在已有研究中有关非期望产出的选择自由度较大,可以是一种或多种污染物,也可以是综合意义上的污染指标。本研究关注能源利用、二氧化碳减排与经济增长之间的关系,所以选择各省份碳排放量作为非期望产出的代理变量。由于各省份二氧化碳排放量数据无法直接从相关统计年鉴获得,本研究利用化石能源消费量对其进行估测,即二氧化碳排放量=含碳能源消费量×碳折算系数×二氧化碳气化系数,含碳能源主要包括煤炭、石油和天然气,碳折算系数采用国家发改委能源研究所制定的系数0.670,二氧化碳气化系数是指碳完全氧化成为二氧化碳之后与之前的质量之比,为标准量3.667(即44:12)。本研究变量数据根据2001年至2011年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和各省份统计年鉴整理得到。

#### 5 实证结果分析

##### 5.1 EEE、EEP及其分解指数的地区差异

本研究实证分析选择的区间为2000年至2010年,

该时期中国经济已进入新一轮经济增长期,工业化和城市化进程不断加速,同时这一时期也是经济转型的关键时期。通过以28个省份为决策单元,采用非径向、非角度的SBM模型计算得到中国2000年至2010年各省份的能源经济效率和能源环境绩效,并将其分解为纯技术效率和规模效率指数。为了解决样本点过少以及效率指数跨期比较问题,将样本期内各省份的全部投入产出数据作为当期的参考技术集,基于跨时期前沿<sup>[33]</sup>方法构建生产前沿面。表1和图1~图8给出2000年至2010年中国各省份与三大地区EEE、EEP及其分解指数EEPTTE、EEESE、EEPTE和EEPSE的均值以及动态演变趋势。

如表1所示,2000年至2010年中国能源效率水平仍然偏低,EEE和EEP的平均值分别只有0.569和0.475,相对于效率前沿存在较大的改进空间,既表现为单位能源投入的有效产出低,也表现为较多的二氧化碳排放。通过比较发现,各省份的EEP明显低于EEE,表明没有包括环境效应的EEE在某种程度上高估了经济单元的能源利用水平,而引入环境效应的EEP则是更为客观的效率测度结果。由图1和图5可知,全国平均EEE与EEP的变化趋势大体保持一致,除了极个别年份偶有下降以外,大多年份均保持了持续上升的趋势,但增速较慢,年均增长率分别只有0.522%和0.693%。2005年以后,EEE和EEP的提升速度有所加快,这主要与国家“十一五”规划中制定和实施节能减排约束性指标有关,在中央的严格监督下,各省份能源与环境规制效果开始显现。与EEE相比,EEP的提升速度更快,说明低碳经济发展理念已经渐入人心,企业和公众环保意识在不断提高,中国能源-经济-环境系统的可持续协调发展能力日益增强。

将EEE和EEP分解为纯技术效率和规模效率有助于把握当前中国能源经济、环境无效率的存在原因。如表1所示,2000年至2010年,全国EEPTTE和EEESE的平均值分别为0.666和0.836,EEPTE和EEPSE的均值分别为0.576和0.829,其中纯技术效率指数明显小于规模效率指数。因此,造成中国能源效率低下的主要原因来自于纯技术效率方面,即技术、管理和制度范畴的因素;规模效率已接近生产前沿,改进空间有限,未来中国经济增长和能源利用水平的提升不能再一味致力于能源投入规模的扩大,否则有可能适得其反。从时间演变趋势看,由图1和图5可知,样本期内中国EEPTTE和EEPTE均大致呈现先下降、后上升的变化趋势,以2006年为转折点。2000年至2005年,就全国整体而言,EEPTTE和EEPTE均呈持续下降态势。这是由于21世纪初以来,中国开始进入新一轮的经济增长期,城市化进程显著加快,能源需求强劲增长,在大规模基础设施建设的推动下,重工业化特征日益明显,促使火电、钢铁、冶金、水泥、化工等能源环境密集型工业飞速发展。然而,这些行业的节能减排技术创新不足、工艺落后、设备陈旧、管理效率低下等弊端在短期内无法得到根本改善,导致

表1 2000年至2010年中国各省份、三大地区平均能源效率及其分解指数  
Table 1 Average Energy Efficiency and Its Decomposition Indexes of Each Province in China and Three Major Regions from 2000 ~ 2010

|      | EEE   | EEEEPTTE | EEEESE | EEP   | EEPTTE | EEPSE |
|------|-------|----------|--------|-------|--------|-------|
| 北京   | 0.780 | 0.855    | 0.909  | 0.728 | 0.817  | 0.882 |
| 天津   | 0.720 | 0.914    | 0.785  | 0.616 | 0.844  | 0.727 |
| 河北   | 0.514 | 0.534    | 0.963  | 0.394 | 0.414  | 0.952 |
| 山西   | 0.471 | 0.539    | 0.876  | 0.340 | 0.397  | 0.861 |
| 内蒙古  | 0.493 | 0.624    | 0.818  | 0.369 | 0.505  | 0.784 |
| 辽宁   | 0.645 | 0.678    | 0.953  | 0.507 | 0.540  | 0.940 |
| 吉林   | 0.543 | 0.638    | 0.855  | 0.431 | 0.527  | 0.822 |
| 黑龙江  | 0.632 | 0.691    | 0.915  | 0.509 | 0.575  | 0.886 |
| 上海   | 0.865 | 0.908    | 0.950  | 0.814 | 0.865  | 0.936 |
| 江苏   | 0.728 | 0.762    | 0.956  | 0.664 | 0.694  | 0.958 |
| 浙江   | 0.716 | 0.740    | 0.969  | 0.648 | 0.677  | 0.957 |
| 安徽   | 0.512 | 0.569    | 0.900  | 0.416 | 0.479  | 0.868 |
| 福建   | 0.743 | 0.811    | 0.921  | 0.693 | 0.784  | 0.891 |
| 江西   | 0.582 | 0.682    | 0.857  | 0.496 | 0.629  | 0.797 |
| 山东   | 0.622 | 0.646    | 0.964  | 0.513 | 0.535  | 0.959 |
| 河南   | 0.516 | 0.540    | 0.958  | 0.414 | 0.441  | 0.940 |
| 湖北   | 0.659 | 0.718    | 0.919  | 0.542 | 0.611  | 0.891 |
| 湖南   | 0.576 | 0.624    | 0.924  | 0.471 | 0.530  | 0.893 |
| 广东   | 0.925 | 0.948    | 0.976  | 0.905 | 0.935  | 0.967 |
| 广西   | 0.556 | 0.644    | 0.868  | 0.462 | 0.573  | 0.815 |
| 四川   | 0.396 | 0.419    | 0.944  | 0.301 | 0.323  | 0.928 |
| 贵州   | 0.315 | 0.406    | 0.780  | 0.227 | 0.305  | 0.758 |
| 云南   | 0.453 | 0.530    | 0.856  | 0.353 | 0.434  | 0.818 |
| 陕西   | 0.469 | 0.549    | 0.854  | 0.375 | 0.463  | 0.813 |
| 甘肃   | 0.458 | 0.638    | 0.744  | 0.343 | 0.534  | 0.686 |
| 青海   | 0.325 | 0.804    | 0.413  | 0.236 | 0.719  | 0.346 |
| 宁夏   | 0.298 | 0.692    | 0.439  | 0.212 | 0.562  | 0.395 |
| 新疆   | 0.410 | 0.540    | 0.763  | 0.307 | 0.424  | 0.730 |
| 东部地区 | 0.726 | 0.780    | 0.935  | 0.648 | 0.710  | 0.917 |
| 中部地区 | 0.561 | 0.625    | 0.901  | 0.453 | 0.524  | 0.870 |
| 西部地区 | 0.417 | 0.585    | 0.748  | 0.319 | 0.484  | 0.707 |
| 全国   | 0.569 | 0.666    | 0.836  | 0.475 | 0.576  | 0.829 |

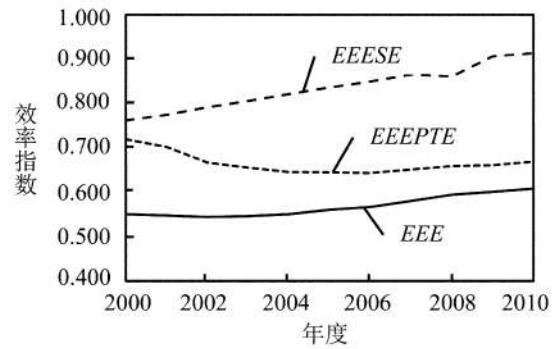


图1 中国 EEE 及其分解指数的变化趋势  
Figure 1 Evolution Trend of EEE and Its Decomposition Indexes in China

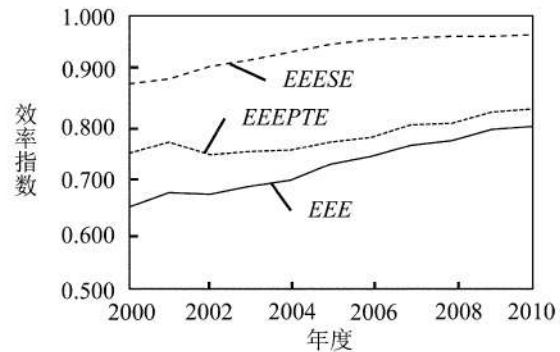


图2 东部地区 EEE 及其分解指数的变化趋势  
Figure 2 Evolution Trend of EEE and Its Decomposition Indexes in the Eastern Region

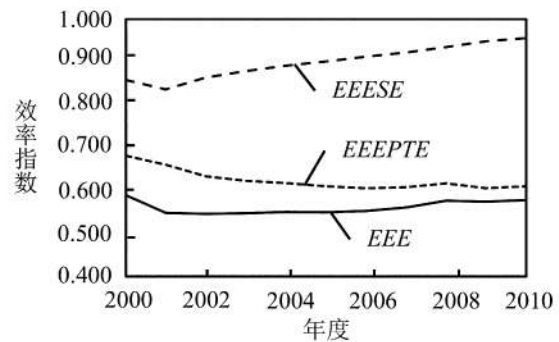


图3 中部地区 EEE 及其分解指数的变化趋势  
Figure 3 Evolution Trend of EEE and Its Decomposition Indexes in the Central Region

这一期间 EEEEEPTTE 和 EEEEEPTTE 持续下滑。2006 年以后，企业节能减排研发投入带来的技术创新效应逐渐显现，同时国家“十一五”规划又提出节能减排的约束性指标，倒逼企业进一步加大技术和管理革新力度，采用更加节能环保的生产方式。在多方因素驱动下，EEEEPTTE 和 EEEEEPTTE 下滑的势头终于得到遏制，开始逐步回升。与 EEEEEPTTE 和 EEEEEPTTE 相比，全国 EEEEESE 和 EEEEESE 在整个考察期内一直都在高位运行，是推动

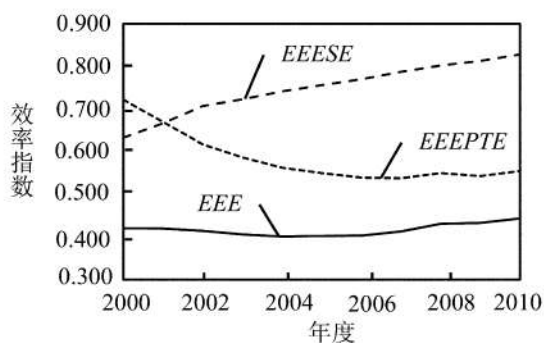


图4 西部地区 EEE 及其分解指数的变化趋势  
Figure 4 Evolution Trend of EEE and Its Decomposition Indexes in the Western Region

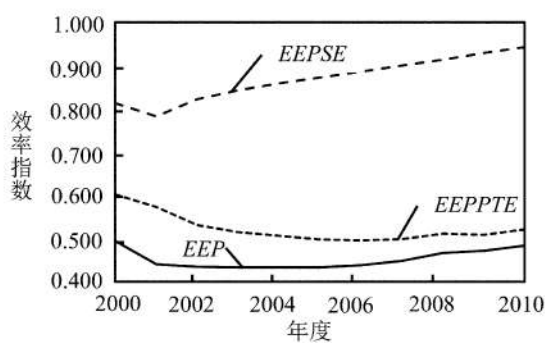


图7 中部地区 EEP 及其分解指数的变化趋势  
Figure 7 Evolution Trend of EEP and Its Decomposition Indexes in the Central Region

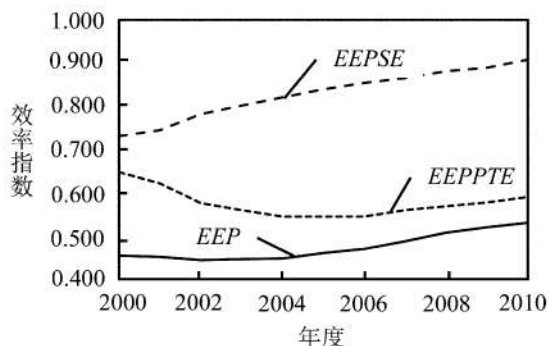


图5 中国 EEP 及其分解指数的变化趋势  
Figure 5 Evolution Trend of EEP and Its Decomposition Indexes in China

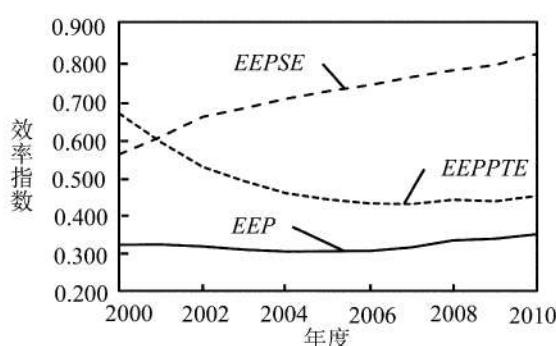


图8 西部地区 EEP 及其分解指数的变化趋势  
Figure 8 Evolution Trend of EEP and Its Decomposition Indexes in the Western Region

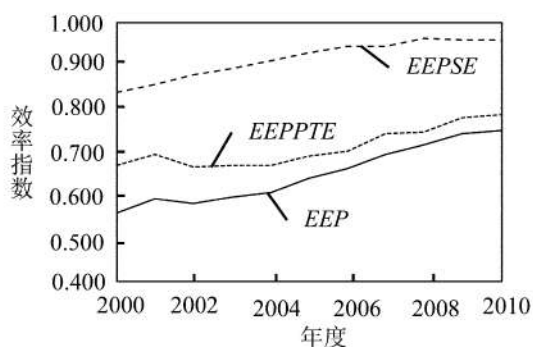


图6 东部地区 EEP 及其分解指数的变化趋势  
Figure 6 Evolution Trend of EEP and Its Decomposition Indexes in the Eastern Region

能源利用整体水平提高的主要力量。经历了20世纪90年代中期以来相当长一段有效需求不足后,到21世纪初中国社会有效需求开始重新高涨,各地区生产规模均不断扩大,带来了显著的规模效应,有效推动了经济增长与能源利用水平的提升。然而,这种趋势是难以持续的,在要素边际报酬递减规律制约下,以扩大生产规模推动经济增长的模式终会难以继,适当减小要素投入规模,通过节能减排、要素重置驱动经济集约型增长乃是大势所趋。

从单个省份看,如表1所示,在2000年至2010年,EEE和EEP平均值最高的5个省份分别为广东、上海、北京、福建和江苏,这些省份的生产最接近生产前沿,能源利用和碳排放都处于相对最优水平,起到示范带动作用。进一步观察发现,这些省份均是来自东部沿海地区,优越的地理位置、较高的开放水平使这些省份的经济、技术实力明显高于其他地区,为节能减碳提供了优越的技术支撑环境;EEE和EEP均值最低的5个省份分别为宁夏、贵州、青海、四川和新疆,这些省份全部来自西部经济欠发达地区,与生产前沿相比,这些省份的EEE和EEP均存在60%~70%以上的改进空间,突显了西部地区能源利用的低效率水平,节能减排潜力巨大。形成这种状况的原因极为复杂,是多种因素互相作用、共同推动的结果,这些因素包括技术条件、开放水平、管理方式、制度环境、人力资源和交通条件等。从三大地区看,如表1所示,东部地区的EEE和EEP指数都是最高的,均值分别为0.726和0.648,中部地区分别为0.561和0.453,西部地区分别为0.417和0.319,中、西部地区EEE和EEP均低于全国平均水平。由图2~图4和图6~图8可知,在样本期内,东部地区除2001年至2002年度以外,其他年份EEE和EEP都在稳步提升,整体增幅为22.590%和33.385%(利用2000年至2010年各省份EEE和EEP计算

得到,下同),充分表明东部地区是推动中国能源效率整体水平提升的主要力量;在样本期内,中部地区的 $EEE$ 和 $EEP$ 不仅未上升,反而下降,降幅分别为1.850%和4.562%,其中2000年至2001年的 $EEE$ 和 $EEP$ 降幅最大;西部地区的 $EEE$ 和 $EEP$ 在样本期内也没有明显改进,增长幅度仅为5.348%和8.452%。从指数分解层次看,2000年至2010年期间,三大地区中,只有东部地区的 $EEEEPTE$ 和 $EEPPTE$ 指数整体是上升的,尤其是2006年以后的上升趋势更为明显,彰显了东部地区在经济、技术、制度和开放条件等方面的绝对优势,是中国经济发展与节能减排的“标杆”和制高点。而中西部地区在样本期内 $EEEEPTE$ 和 $EEPPTE$ 在样本期内的持续下降趋势非常明显,整体降幅分别达到10.517%和13.380%,直到2006年以后这种趋势才得以缓和,这与近年来中部地区较为疲软的经济发展趋势是保持一致的。长期以来,中部地区的发展受制于统筹协调、水平低下的二元经济,在新一轮区域经济竞争格局中,其经济实力、技术条件、政策环境等各方面均处于竞争弱势,经济转型难度较大。然而,西部地区 $EEEEPTE$ 和 $EEPPTE$ 在整个样本期内降幅分别高达23.180%和34.531%,形势更为严峻。形成这种局面的原因可能在于,在承接东部产业转移的过程中,西部地区有些地方盲目追求经济增长,忽视资源节约和环境保护,为了鼓励内资及外资进入,人为放松了一些高耗能、高污染项目的准入条件,导致区内能源环境密集型工业过度发展,外界污染不断向区内迁移,在很大程度上限制了西部地区能源利用水平的提高,必须切实采取措施加以扭转。在样本期内,三大地区的 $EEESE$ 和 $EEPSE$ 都在高位运行,效率值都在0.700以上,明显高于 $EEEEPTE$ 和 $EEPPTE$ 值。其中,东部地区最高, $EEESE$ 和 $EEPSE$ 均值分别达到0.935和0.917,中部地区次之,分别为0.901和0.870,西部地区最低,分别为0.748和0.707。三大地区 $EEESE$ 和 $EEPSE$ 的整体趋势均是上升的,东部地区的整体增幅分别为10.383%和14.207%,中部地区的整体增幅分别为11.416%和16.024%,西部地区的整体增幅分别为30.823%和47.101%。其中,西部地区增幅最大,中部地区和东部地区增幅相当。这是由于,当前中东部地区很多省份的能源利用已处于规模收益递减阶段,仅依靠增加要素投入已无法再维持经济高质量增长。为此,中东部地区各省份应该适当减小能源投入规模,优化能源配置,实现能源的集约式利用,从而达到节能减排目标;而西部地区很多省份的能源利用仍处于规模收益递增阶段,其产出增长与二氧化碳减排的空间较大,还可以通过适当加大能源投入规模来进一步提升能源利用水平。

## 5.2 能源效率与经济增长:基于EKC的经验分析

为了更好地分析中国各省份 $EEE$ 、 $EEP$ 与经济增长之间的关系,本研究采用Grossman等<sup>[34]</sup>提出的环境库兹涅茨曲线(EKC)模型。EKC模型是研究环境质量与经济增长关系最常用的理论工具,国内外学

者选择不同的环境污染物,基于不同国家或地区的经验数据考察环境库兹涅茨曲线的存在性、形状及拐点<sup>[35-41]</sup>。特别是自《京都议定书》签署以来,碳排放与经济增长关系的实证检验成为EKC研究的热点问题<sup>[42-43]</sup>,有关中国碳排放与经济增长关系的研究也涌现出大量文献,得出的结论不尽相同<sup>[44-47]</sup>,这些研究采用的碳排放指标大多是人均碳排放量或是碳强度,而采用能源与环境效率或生产率指标作为因变量的研究并不多见<sup>[10,48-49]</sup>。本研究以EKC理论为基础,分别以 $EEE$ 、 $EEP$ 及其分解指标 $EEEEPTE$ 、 $EEESE$ 、 $EEPPTE$ 和 $EEPSE$ 为因变量,基于2000年至2010年的省级面板数据,探讨能源效率与经济增长之间的定量关系,为中国节能与碳减排问题的研究提供一个全新的视角。

### (1) 计量模型的建立

本研究以中国各省份 $EEE$ 和 $EEP$ 及其分解指数 $EEEEPTE$ 、 $EEESE$ 、 $EEPPTE$ 和 $EEPSE$ 为因变量,选取人均GDP及其他相关影响因素作为自变量,基于环境库兹涅茨曲线分析中国能源利用、碳排放及经济增长之间的关系,设定面板计量回归模型为

$$EE_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 GDP_{i,t} + \beta_2 GDP_{i,t}^2 + \beta_3 GDP_{i,t}^3 + \beta_4 INDUS_{i,t} + \beta_5 POP_{i,t} + \beta_6 ES_{i,t} + \beta_7 FDI_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

其中, $i$ 为省份; $t$ 为年份; $EE$ 为各省份的能源效率, $l$ 取不同值表示能源效率以不同的指标测度, $l=1, 2, \dots, 6$ , $l=1$ 时(5)式的因变量为 $EEE$ , $l=2$ 时(5)式的因变量为 $EEP$ , $l=3$ 时(5)式的因变量为 $EEEEPTE$ , $l=4$ 时(5)式的因变量为 $EEESE$ , $l=5$ 时(5)式的因变量为 $EEPPTE$ , $l=6$ 时(5)式的因变量为 $EEPSE$ ;  $\beta_i$ 为回归系数, $i=0, \dots, 7$ ;GDP为经济增长变量,用人均GDP表示, $GDP^2$ 和 $GDP^3$ 也包含在回归模型之中,这样可以通过回归系数符号判断能源效率与经济增长之间是线性关系、还是U(倒U)形或N形曲线关系。

大多数研究在利用EKC研究环境质量与经济增长的关系时都只以GDP作为唯一的自变量,没有考虑到其他因素对环境质量的影响,这种做法存在一定缺陷。为了使研究更系统和更科学,本研究建立的EKC模型的自变量除人均GDP之外,还引入其他影响因素。根据经验分析,并借鉴相关研究的做法,本研究引入以下因素。

① 产业结构( $INDUS$ ),以第二产业产值占省份GDP的比重表示。由于第二产业中包含众多资源与环境密集型产业,与其他产业相比,第二产业的发展方式更为粗放,能源资源消耗更多,碳排放量更大。因此,第二产业在国民经济中所占的比重越高,能源利用效率越低,碳排放水平越高。预期该变量的系数为负。

② 人口密度( $POP$ )。一般来说,人口密度的大小直接影响到经济活动的规模和能源需求的大小,因而影响到能源利用及碳排放水平的高低。但是这种效应为正还是为负,目前尚无定论。一种观点认为人

口密度低的地区因为经济规模较小,环境影响较弱,因而这些地区不太关注降低污染排放,而人口密度高的地区,城市化水平以及居民受教育程度一般也较高,对优良的环境质量更加渴求,因而环境保护意识也较高<sup>[35]</sup>;另一种观点认为,人口密度更高的地区,经济规模更大,能源需求更高,也面临更大的环保压力,因而高人口密度可能是造成环境质量下降的主要原因之一<sup>[50]</sup>。因此,人口密度对能源利用及碳排放的影响可能存在地区差异,预期该变量系数正负不定。

③ 能源结构(*ES*),以煤炭消费总量占能源消费总量的比重表示。与石油和天然气等其他优质、高效能源相比,煤炭燃烧效率低、含碳量高,已经成为环境污染的主要因素。当前,全球碳排放总量的70%都来自于燃煤,因而优化能源结构,提升石油和天然气等优质高效能源以及水电、太阳能和风能等清洁能源的消费比例,对于改进能源利用效率和提升碳减排水平以及构建资源节约、低碳经济社会意义重大<sup>[23]</sup>。因此,在控制其他影响因素的情况下,地区煤炭消费总量占能源消费总量的比重越大,*EEE*和*EEP*越低。预期该变量的系数为负。

④ 外资利用(*FDI*),以外商直接投资占省份*GDP*的比重衡量地区外资利用水平。外资利用对能源利用和碳减排的影响机制较为复杂,并且存在两种针锋相对的观点。一种观点认为,外资引入存在技术和管理溢出效应,为东道国带来先进的节能减排技术、工艺设备、研发能力和管理经验,外商直接投资有利于东道国能源利用水平的提升和环境质量的改善<sup>[34,51]</sup>;另外一种观点(著名的“污染避难所”假说)认为发达国家的环境规制较严,外商会将污染强度较高的产业转移到环境规制较弱的发展中国家,于是发展中国家将成为发达国家的“污染避难所”,外商直接投资不利于改善东道国的环境质量<sup>[52-53]</sup>。因此,*FDI*对东道国能源效率的影响存在地区差异,预期该变量的系数正负不定。

需要指出的是,这里预期影响系数的正负主要是针对*EEE*和*EEP*而言,至于各影响因素对*EEEPTE*、*EEESE*、*EEPTE*和*EEPSE*的影响还得具体情况具体分析。此外,为了消除物价波动的影响,本研究以2000年为基期对相关解释变量进行缩减。

## (2) 计量结果分析

本研究分别采用固定效应模型和随机效应模型对回归方程进行估计,*Hausman*检验结果显示,固定效应模型的估计结果优于随机效应模型,回归结果如表2和表3所示。由表2可知,各回归方程的人均*GDP*变量三次项系数均没有通过5%水平的显著性检验,而人均*GDP*变量的二次项系数在5%水平下都通过了显著性检验,说明3种效率指数与经济增长之间不存在*N*形曲线关系,而是存在*U*形或倒*U*形曲线关系。在认定*GDP*三次项系数为0的条件下,对*EEE*与经济增长之间的关系进行*U*形或倒*U*形曲线检验,发现人均*GDP*一次项、二次项系数均通过了1%

水平的显著性检验,其余解释变量的系数也均通过了5%水平的显著性检验,修正的可决系数在0.800以上,方程整体回归效果较好。在控制除经济增长以外其他因素的前提下,得到全国*EEE*与经济增长之间的关系式为 $EEE = 0.341GDP - 0.048GDP^2$ ,表明在全国范围内*EEE*与经济增长之间存在倒*U*形曲线关系,曲线拐点在3.552万元处。也就是说,在人均*GDP*低于3.552万元时,随着经济增长,*EEE*趋于提高,而当人均*GDP*迈过该转折点后,伴随经济增长,*EEE*反而趋于下降。在全国所有省份中,至2010年,只有北京、天津、上海、江苏和广东5个省份的人均*GDP*已超过3.552万元。因此,到目前为止只有这5个省份迈过倒*U*形曲线的拐点,这表明随着经济的增长,这5个省份*EEE*将会下降。总体而言,目前中国*EEE*与经济增长关系所处的是倒*U*形曲线的上升阶段,即伴随经济增长,*EEE*将趋于上升。同理,在控制其他解释变量不变的前提下,也可分析全国*EEEPTE*、*EEESE*与经济增长关系的*EKC*曲线并计算得到曲线拐点。研究发现,*EEEPTE*与经济增长之间存在*U*形曲线关系,人均*GDP*一次项、二次项系数在1%水平通过了显著性检验,曲线的拐点为5.782万元,即在人均*GDP*低于5.782万元时,随着经济的增长,*EEEPTE*趋于下降,只有当人均*GDP*迈过5.782万元的转折点后,*EEEPTE*才随着经济的增长而不断提升。然而,到目前为止,全国所有省份中仅有上海越过*U*形曲线的转折点,其余省份均还处于*U*形曲线的下降阶段,即*EEEPTE*与经济增长之间呈现反向变动关系,表明中国企业节能减排技术条件落后、管理水平低下、制度模式存在缺陷。为了使*U*形曲线的拐点尽快到来,必须进一步加强技术创新、合理安排制度、提高管理效率,这是实现中国能源经济系统协调发展极为重要的途径。根据表2的计算结果,中国*EEESE*与经济增长之间存在倒*U*形曲线关系,人均*GDP*一次项、二次项系数在1%水平通过了显著性检验,*U*形曲线的拐点为2.205万元,表明人均*GDP*处于2.205万元以下时,*EEESE*与经济增长之间呈现正相关,若人均*GDP*超过2.205万元,随着经济的增长,*EEESE*将趋于下降。在全国28个省份中,当前已经有16个省份的人均*GDP*超过2.205万元,说明中国已经有超过一半的省份越过*U*形曲线的转折点。这是由于中国众多省份的能源利用已经处于规模报酬递减状态,规模效率开始下降,从一个侧面说明中国经济增长过于依赖资源投入,粗放性特征明显。

由表3可知,根据人均*GDP*一次项、二次项、三次项系数的显著性检验,中国*EEP*、*EEPPTE*、*EEPSE*与经济增长均不存在显著的*N*形曲线关系,但是存在*U*形或倒*U*形曲线关系。*EEP*与经济增长之间存在明显的倒*U*形曲线关系,拐点为2.333万元。这表明当人均*GDP*低于2.333万元时,*EEP*与经济增长之间的变动呈现正向变动,拐点到来之前,随着经济增长,*EEP*也将上升,当人均*GDP*超过该拐点后,*EEP*反而趋于下降,这与传统*EKC*的含义恰好相反。主要原因



表2 中国能源经济效率及其分解指标与经济增长关系的 EKC 检验结果

Table 2 EKC Test Results of the Relationship between *EEE* and Its Decomposition Indexes and Economic Growth in Chi

| 变量                         | <i>EEE</i>           |                      |                      | <i>EEEPTE</i>        |                      |                      | <i>EEESE</i>        |                      |                      |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                            | 线形                   | (倒)U形<br>曲线          | N形曲线                 | 线形                   | (倒)U形<br>曲线          | N形曲线                 | 线形                  | (倒)U形<br>曲线          | N形曲线                 |
| <i>GDP</i>                 | 0.197***<br>(0.000)  | 0.341***<br>(0.006)  | 0.938*<br>(0.074)    | 0.186**<br>(0.022)   | -0.962***<br>(0.000) | 0.319<br>(0.159)     | 0.388**<br>(0.035)  | 0.247***<br>(0.004)  | 1.937*<br>(0.091)    |
| <i>GDP</i> <sup>2</sup>    |                      | -0.048***<br>(0.000) | -0.134<br>(0.178)    |                      | 0.078***<br>(0.001)  | -0.019<br>(0.325)    |                     | -0.056***<br>(0.002) | -0.192**<br>(0.017)  |
| <i>GDP</i> <sup>3</sup>    |                      |                      | 0.003<br>(0.466)     |                      |                      | -0.001<br>(0.179)    |                     |                      | 0.009<br>(0.181)     |
| <i>INDUS</i>               | -0.006***<br>(0.001) | -0.004***<br>(0.000) | -0.007**<br>(0.025)  | -0.005***<br>(0.001) | -0.006***<br>(0.000) | -0.005***<br>(0.000) | 0.003**<br>(0.036)  | 0.001***<br>(0.008)  | 0.002**<br>(0.027)   |
| <i>POP</i>                 | 0.004***<br>(0.000)  | 0.002***<br>(0.003)  | 0.003***<br>(0.003)  | 0.001**<br>(0.037)   | 0.001***<br>(0.008)  | 0.000<br>(0.451)     | 0.002<br>(0.239)    | -0.004***<br>(0.000) | -0.002***<br>(0.000) |
| <i>ES</i>                  | -0.001***<br>(0.000) | -0.003***<br>(0.000) | -0.001***<br>(0.000) | -0.003***<br>(0.000) | -0.004***<br>(0.000) | -0.002***<br>(0.000) | 0.003***<br>(0.000) | 0.004***<br>(0.000)  | 0.003***<br>(0.000)  |
| <i>FDI</i>                 | 0.241***<br>(0.009)  | 0.202**<br>(0.018)   | 0.196***<br>(0.002)  | 0.217***<br>(0.000)  | 0.259***<br>(0.000)  | 0.195**<br>(0.000)   | 0.047<br>(0.332)    | 0.019<br>(0.256)     | 0.014<br>(0.217)     |
| 常数项                        | 2.134***<br>(0.000)  | -0.559***<br>(0.001) | -2.078**<br>(0.032)  | 3.007***<br>(0.000)  | -2.295***<br>(0.000) | 0.487<br>(0.562)     | 1.775***<br>(0.000) | 0.083**<br>(0.045)   | -3.156***<br>(0.000) |
| <i>Adj-R</i> <sup>2</sup>  | 0.831                | 0.826                | 0.774                | 0.826                | 0.811                | 0.823                | 0.784               | 0.813                | 0.825                |
| <i>F</i> 值                 | 50.123***            | 53.267***            | 54.128***            | 57.320***            | 54.268***            | 65.443***            | 47.654***           | 60.249***            | 47.265***            |
| <i>Hausman</i><br>$\chi^2$ | 78.362***            | 113.472***           | 115.234***           | 63.210***            | 85.477***            | 100.238***           | 72.402***           | 50.235***            | 65.430***            |
| 样本数                        | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                 | 308                  | 308                  |

注：\*为10%的显著性水平，\*\*为5%的显著性水平，\*\*\*为1%的显著性水平；括号内数据为检验的真实概率 *p* 值；下同。

在于，随着经济的增长，技术改进、设备更新以及环境监管的机会成本也将越来越大，很容易导致企业及地方政府丧失节能减排动力，很多企业宁愿多缴纳排污费，也不愿意及时更新设备和技术，同时有些地方政府片面注重经济增长，对环境监管不力，在某种程度上纵容了企业的污染排放行为，使二氧化碳的进一步减排更加困难。然而，在本研究有限的样本资料中，由于人均 *GDP* 三次项系数没有通过显著性检验，因此无法获悉中国 *EEP* 与经济增长之间是否存在明确的 N 形曲线关系，如果这种关系存在，那么 *EEP* 与经济增长之间还存在第二个拐点，届时随着经济的进一步增长，*EEP* 也将趋于上升。在全国 28 个省份中，截至 2010 年已有 12 省份的人均 *GDP* 越过 2.333 万元的拐点，形势不容乐观，说明中国整体已经逐渐迈入倒 U 形曲线的下降阶段，应该引起地方各级政府和环保决策部门的重视。由表 3 可知，由于人均 *GDP* 一次项和二次项均没有通过显著性检验，因此中国 *EEPPTE* 与经济增长之间并不存在明显的 U 形

曲线关系。由于系数不显著，本研究无法对 *EEPPTE* 与经济增长之间的关系做出明确判断。由表 3 可知，中国 *EEPSE* 与经济增长之间存在较为显著的倒 U 形曲线关系，曲线的拐点在 2.324 万元处。中国已有众多省份越过倒 U 形曲线的拐点，也就是说，随着经济的增长，*EEPSE* 开始下降。这些省份由于规模收益递减，能源投入过多，导致能源利用水平下降，碳排放量也随之增加，必须要转变经济增长方式，提高资源配置效率，走集约型增长道路，否则大规模的资源投入终会带来资源耗竭和环境崩溃。

### (3) 其他影响因素的作用机制

① 产业结构与 *EEE*、*EEEPTE*、*EEP* 和 *EEPPTE* 的估计结果均在 5% 的检验水平下显著为负，意味着第二产业比重的提高对能源效率存在显著的负效应，第二产业比重越高，*EEE* 和 *EEEPTE* 均越低，说明增加第二产业比重对节能减排具有显著的负向作用。这是由于第二产业中包含众多的资源、环境密集型产业，与第三产业相比，第二产业的资源消耗更多，污染排

表3 中国能源环境绩效及其分解指标与经济增长关系的 EKC 检验结果

ble 3 EKC Test Results of the Relationship between *EEP* and Its Decomposition Indexes and Economic Growth in Chi

| 变量                        | <i>EEP</i>           |                      |                      | <i>EEPTE</i>         |                      |                      | <i>EEPSE</i>         |                      |                     |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
|                           | 线形                   | (倒)U形曲线              | N形曲线                 | 线形                   | (倒)U形曲线              | N形曲线                 | 线形                   | (倒)U形曲线              | N形曲线                |
| <i>GDP</i>                | 0.213***<br>(0.000)  | 0.196***<br>(0.000)  | 2.031<br>(0.210)     | 0.120<br>(0.156)     | -0.055<br>(0.127)    | 2.985*<br>(0.062)    | 0.032**<br>(0.041)   | 0.172***<br>(0.001)  | -1.830*<br>(0.073)  |
| <i>GDP</i> <sup>2</sup>   |                      | -0.042***<br>(0.000) | -0.210*<br>(0.056)   |                      | 0.006<br>(0.472)     | -0.367*<br>(0.095)   |                      | -0.037***<br>(0.000) | 0.206*<br>(0.063)   |
| <i>GDP</i> <sup>3</sup>   |                      |                      | 0.011<br>(0.226)     |                      |                      | 0.012<br>(0.387)     |                      |                      | -0.009<br>(0.258)   |
| <i>INDUS</i>              | -0.002***<br>(0.000) | -0.002***<br>(0.000) | -0.003***<br>(0.000) | -0.001***<br>(0.000) | -0.002***<br>(0.001) | -0.000***<br>(0.002) | 0.001***<br>(0.000)  | 0.002***<br>(0.000)  | 0.001***<br>(0.000) |
| <i>POP</i>                | 0.001***<br>(0.002)  | 0.003**<br>(0.015)   | 0.002**<br>(0.032)   | 0.001*<br>(0.084)    | 0.001**<br>(0.042)   | 0.000*<br>(0.057)    | -0.002***<br>(0.006) | -0.001<br>(0.421)    | -0.000<br>(0.223)   |
| <i>ES</i>                 | -0.001***<br>(0.000) | -0.001***<br>(0.001) | -0.002***<br>(0.000) | -0.002***<br>(0.000) | -0.001***<br>(0.000) | -0.002***<br>(0.000) | 0.001***<br>(0.001)  | 0.001***<br>(0.004)  | 0.002***<br>(0.000) |
| <i>FDI</i>                | -0.002<br>(0.236)    | 0.000*<br>(0.092)    | 0.001<br>(0.112)     | -0.018<br>(0.207)    | 0.037<br>(0.149)     | -0.025<br>(0.230)    | 0.019*<br>(0.069)    | 0.043**<br>(0.044)   | 0.029***<br>(0.004) |
| 常数项                       | 1.069***<br>(0.000)  | 1.450***<br>(0.000)  | 2.017*<br>(0.067)    | 0.485***<br>(0.000)  | 1.036***<br>(0.000)  | -1.477***<br>(0.000) | 0.956***<br>(0.000)  | 2.003***<br>(0.000)  | 2.985***<br>(0.000) |
| <i>Adj-R</i> <sup>2</sup> | 0.838                | 0.792                | 0.825                | 0.806                | 0.879                | 0.833                | 0.854                | 0.723                | 0.901               |
| <i>F</i> 值                | 54.214***            | 67.505***            | 49.362***            | 77.369***            | 58.447***            | 62.511***            | 40.237***            | 56.526***            | 60.322***           |
| Hausman $\chi^2$          | 23.639***            | 19.455***            | 24.297***            | 30.256***            | 24.160***            | 32.125***            | 22.147***            | 28.650***            | 29.564***           |
| 样本数                       | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                  | 308                 |

放也更为严重。然而,产业结构对 *EEESE* 和 *EEPSE* 的回归系数显著为正,说明第二产业比重的提高在一定程度上有利于规模效应的发挥。21世纪以来,中国重工业化趋势再度显现,第二产业的比重进一步提高,资源投入进一步加大,在短期内产生较为明显的规模效应,一定程度上促进了能源利用规模效率的提升。但是这种乐观形势不会持续太久,随着经济的增长,中国众多省份的资源投入规模已经逐渐达到最优水平,开始进入规模收益递减阶段,如果仍然继续增加第二产业的比重,能源利用规模效率必将趋于下降。

②人口密度对 *EEE*、*EEPTE*、*EEP* 和 *EEPTE* 的影响显著为正,表明人口密度的提高有利于提升 *EEE*、*EEPTE*、*EEP* 和 *EEPTE*,但是不利于 *EEESE* 和 *EEPSE* 的改善。主要原因可能在于,一般而言,高人口密度地区城市化水平较高,节能减排技术、企业管理水平、人们的节能和环保意识也较高,有助于能源节约及污染减排。然而,检验结果表明,人口密度对 *EEESE* 的影响则显著为负,对 *EEPSE* 的影响虽然为

负,但是回归系数没有通过显著性检验,这表明高人口密度可能会遏制能源利用规模效率的提升。主要原因可能是,在中国人口、城市集中的区域,能源利用的规模报酬递增效应已经逐渐消失,大规模的能源投入已经开始导致能源利用水平的下降和碳排放的增加。

③能源结构对 *EEE*、*EEPTE*、*EEP* 和 *EEPTE* 的影响显著为负,表明煤炭消费占能源消费总量比例的提高明显制约了 *EEE*、*EEPTE*、*EEP* 和 *EEPTE* 的提升,这与理论预期结果一致。主要原因在于,一方面,中国煤炭资源利用率过低,中国煤炭消费量80%以上的原煤是直接燃烧,而且60%以上的煤炭是用于发电,能源转化过程中存在巨大的能量损失;另一方面,煤炭燃烧是中国大气污染的主要来源,70%以上的碳排放来自于燃煤,由于多种因素,当前中国火电行业的燃煤污染并未得到很好控制,大量技术水平低下的燃煤设备、传统的燃煤方式以及较低的煤炭品质、燃煤污染的末端治理方式和污染治理力度不够等因素均抑制了 *EEE*、*EEP* 和 *EEPTE* 的提高。能源

结构对 $EEESE$ 和 $EEPSE$ 的影响则显著为正,表明提高煤炭消费比重有利于改善能源利用规模效率,这是由中国的能源结构所决定的。近年来,中国煤炭消费占能源消费总量的比重一直在70%左右,作为最主要的能源投入形式,短期内大规模煤炭投入带来较为显著的规模效应,提升了能源利用的规模效率。同时,这个结果也表明当前中国要素驱动型的粗放型增长模式仍未得到根本转变。

④ 外资利用对 $EEE$ 、 $EEEEPTTE$ 的影响显著为正,表明外商直接投资显著提高了中国能源利用整体水平,并且存在明显的技术、管理溢出效应。然而,外资利用对 $EEP$ 、 $EEPPTTE$ 、 $EEPSE$ 和 $EEESE$ 的影响机制却存在差异。其中,外资利用对 $EEPSE$ 有显著的促进作用,对 $EEESE$ 的影响虽然为正,但是回归系数没有通过5%水平的显著性检验,对 $EEP$ 、 $EEPPTTE$ 的影响在5%的检验水平下也都没有通过显著性检验。一方面说明,外资引入壮大了中国经济实力,在一定程度上促进了能源利用规模效率的提升;另一方面也说明,外资引入对中国 $EEP$ 和 $EEPPTTE$ 的影响尚难确定,正向效应不明显,甚至在某种意义上支持了“污染避难所”假说。主要原因可能在于,中国外资利用存在显著的地区差异,东部地区省份的外资利用水平远远优于中、西部地区省份,因而外资利用的技术和管理溢出效应在全国范围内的整体表现并不明显;近些年来,中国有些地方为了片面追求经济增长和政绩,在大力引进外资时缺乏有效甄别机制,盲目引进大批污染排放高的外资项目,同时环境监管力度不足,导致地区内环境质量严重下降,在很大程度上抑制了全国 $EEP$ 和 $EEPPTTE$ 的提高。

## 6 结论

本研究利用非径向、非角度的SBM模型对2000年至2010年中国各省份的能源经济效率和能源环境绩效进行测度,基于时间和空间两个层次展开分析,然后基于环境库兹涅茨曲线实证检验能源经济效率、能源环境绩效与经济增长之间的关系,得到以下结论。

(1) 2000年至2010年,中国28个省份的平均 $EEE$ 和 $EEP$ 分别只有0.569和0.475,增幅小、增速慢,突显中国当前能源利用水平偏低和碳排放量过高的事实,节能减排形势异常严峻,经济转型任重道远。

(2) 中国能源效率提升主要受制于较低的纯技术效率,应将革新节能减排技术、优化管理模式、加强制度环境建设等置于未来各项工作的重点,而规模效率已接近最优水平,如果再延续传统的要素驱动型增长模式,不仅无法再有效推动中国经济持续增长,而且可能会引发资源环境危机。

(3) 中国不同区域能源效率呈现很强的异质性特征,东部地区的表现远优于中、西部地区,是促进中国能源效率提升的决定力量,而中、西部地区的表现则乏善可陈,是导致中国能源利用整体水平低下的主要原因。

(4) 中国 $EEE$ 、 $EEP$ 与经济增长之间存在倒U形曲线关系,但多数省份都已迈过或临近转折点,即随着经济增长,能源效率将趋于下降,中国经济社会发展即将面临极为被动的能源与环境形势。 $EEEEPTTE$ 与经济增长之间呈U形曲线关系,全国除上海外其他所有省份仍处于曲线的下降阶段,多数省份何时到达转折点还不得而知。 $EEPPTTE$ 与经济增长也存在U形曲线关系,但是系数不显著。 $EEESE$ 、 $EEPSE$ 与经济增长之间是倒U形曲线关系,但多数省份已跨过拐点,规模不经济逐渐开始显现。产业结构、人口密度、能源结构和外资利用对能源经济效率和能源环境绩效及其分解指数均有影响,但是影响的力度、方向和显著性存在差异。

本研究结论有以下启示。

(1) 努力转变中国长期以来的要素驱动式经济增长模式,强化内涵增长观念,合理控制能源投入规模,通过节能减排、要素重置推动经济集约型增长,力求在经济增长、资源节约与环境保护中实现最佳平衡,避免落入EKC曲线的“陷阱”。

(2) 继续加大节能减排领域的技术创新力度,加速淘汰落后产能,积极引导内资和外资投向生态建设、污染处理、节能减碳与清洁能源等领域,进一步放开或理顺能源市场价格改革,让能源市场真正发挥调节配置稀缺资源的功能。

(3) 加快理顺节能减排管理体制,政府机构与公共部门应该率先示范节能减排,利用碳税、硫税、生态补偿等政策实现环境成本内部化,完善污染排放权交易市场,降低节能减排的社会成本。

(4) 中国地域广阔,各区域发展条件、资源禀赋、技术水平和市场环境差异显著,对节能减排与发展低碳经济的标准、定位和要求也不同。因此,为了实现中国经济绿色转型,必须要注重不同区域的分工与合作,科学制定分区域的、差异化的能源环境政策。

除此之外,坚定不移的走新型工业化道路,强力推动经济结构优化升级、建立节能环保的现代产业体系、大力发展环境友好型能源、深化节能减排领域的对外合作等,这些途径均是促使中国能源利用模式发生根本转变的强力助推器。

## 参考文献:

- [1] 刘帅,邱晓苓. 中国出口贸易中的隐含碳估算[J]. 国际商务:对外经济贸易大学学报,2011(5):54-62.  
Liu Shuai, Qiu Xiaoling. Embodied carbon emission in China's export trade[J]. International Business, 2011(5):54-62. (in Chinese)
- [2] Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios' [R]. Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, 1990.
- [3] Mielnik O, Goldemberg J. Communication the evolu-

- tion of the "carbonization index" in developing countries [J]. *Energy Policy*, 1999, 27(5): 307-308.
- [4] Zhang Z. Decoupling China's carbon emissions increase from economic growth: An economic analysis and policy implications [J]. *World Development*, 2000, 28(4): 739-752.
- [5] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology [J]. *Human Ecology Review*, 1994, 1(2): 277-300.
- [6] Wilson B, Trieu L H, Bowen B. Energy efficiency trends in Australia [J]. *Energy Policy*, 1994, 22(4): 287-295.
- [7] York R, Rosa E A, Dietz T. The ecological footprint intensity of national economies [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 8(4): 139-154.
- [8] Farrell M J. The measurement of productive efficiency [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A*, 1957, 120(3): 253-290.
- [9] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [10] Zaim O, Taskin F. A Kuznets Curve in environmental efficiency: An application on OECD countries [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2000, 17(1): 21-36.
- [11] Hu J L, Wang S C. Total-factor energy efficiency of regions in China [J]. *Energy Policy*, 2006, 34(17): 3206-3317.
- [12] Hu J L, Kao C H. Efficient energy-saving targets for APEC economies [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 373-382.
- [13] Mukherjee K. Energy use efficiency in the Indian manufacturing sector: An interstate analysis [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(2): 662-672.
- [14] Zhou P, Ang B W. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(8): 2911-2916.
- [15] Sueyoshi T, Goto M, Ueno T. Performance analysis of US coal-fired power plants by measuring three DEA efficiencies [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(4): 1675-1688.
- [16] Nassiri S M, Singh S. Study on energy use efficiency for paddy crop using data envelopment analysis (DEA) technique [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7/8): 1320-1325.
- [17] MacPherson A J, Principe P P, Smith E R. A directional distance function approach to regional environmental-economic assessments [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(10): 1918-1925.
- [18] Sueyoshi T, Goto M. DEA radial measurement for environmental assessment and planning: Desirable procedures to evaluate fossil fuel power plants [J]. *Energy Policy*, 2012, 41(C): 422-432.
- [19] Xie B C, Fan Y, Qu Q Q. Does generation form influence environmental efficiency performance? An analysis of China's power system [J]. *Applied Energy*, 2012, 96: 261-271.
- [20] 魏楚, 沈满洪. 能源效率与能源生产率: 基于DEA方法的省际数据比较 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2007, 24(9): 110-121.  
Wei Chu, Shen Manhong. Energy efficiency and energy productivity: A comparison based on the panel data by province [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2007, 24(9): 110-121. (in Chinese)
- [21] 王群伟, 周德群. 中国全要素能源效率变动的实证研究 [J]. *系统工程*, 2008, 26(7): 74-80.  
Wang Qunwei, Zhou Dequn. An empirical study on the change of total factor energy efficiency in China [J]. *Systems Engineering*, 2008, 26(7): 74-80. (in Chinese)
- [22] 吴琦, 武春友. 基于DEA的能源效率评价模型研究 [J]. *管理科学*, 2009, 22(1): 103-112.  
Wu Qi, Wu Chunyou. Research on evaluation model of energy efficiency based on DEA [J]. *Journal of Management Science*, 2009, 22(1): 103-112. (in Chinese)
- [23] 汪克亮, 杨宝臣, 杨力. 考虑环境效应的中国省际全要素能源效率研究 [J]. *管理科学*, 2010, 23(6): 100-111.  
Wang Kelian, Yang Baochen, Yang Li. China's provincial total-factor energy efficiency considering environmental effects [J]. *Journal of Management Science*, 2010, 23(6): 100-111. (in Chinese)
- [24] 王兵, 吴延瑞, 颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长 [J]. *经济研究*, 2010, 45(5): 95-109.  
Wang Bing, Wu Yanrui, Yan Pengfei. Environmental efficiency and environmental total factor productivity growth in China's regional economies [J]. *Economic Research Journal*, 2010, 45(5): 95-109. (in Chinese)
- [25] 宋马林, 曹秀芬, 吴杰. 一个新的考虑非期望产出的非径向-双目标DEA模型 [J]. *管理科学*, 2011, 24(4): 113-120.  
Song Malin, Cao Xiufen, Wu Jie. A new non-radial and bi-objective DEA model considering undesirable outputs [J]. *Journal of Management Science*, 2011, 24(4): 113-120. (in Chinese)
- [26] 王兵, 张技辉, 张华. 环境约束下中国省际全要素能源效率实证研究 [J]. *经济评论*, 2011(4): 31-43.

- Wang Bing, Zhang Jihui, Zhang Hua. Total-factor energy efficiency and influencing factors across provinces in China in the presence of environmental regulation [J]. *Economic Review*, 2011(4):31-43. (in Chinese)
- [27] 魏一鸣, 廖华. 能源效率的七类测度指标及其测度方法 [J]. *中国软科学*, 2010(1):128-137. Wei Yiming, Liao Hua. Seven energy efficiency indicators and their measurement approaches [J]. *China Soft Science*, 2010(1):128-137. (in Chinese)
- [28] Chung Y H, Färe R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3):229-240.
- [29] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3):498-509.
- [30] Fukuyama H, Weber W L. A directional slacks-based measure of technical inefficiency [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2009, 43(4):274-287.
- [31] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure (SBM) approach [EB/OL]. ftp://220.130.147.155/UndesirableOutputs.pdf, 2003:1-17.
- [32] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952~2006 年 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2008, 25(10):17-31. Shan Haojie. Reestimating the capital stock of China: 1952-2006 [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, 25(10):17-31. (in Chinese)
- [33] Tulkens H, Van Den Eeckaut P. Non-parametric efficiency, progress and regress measures for panel data: Methodological aspects [J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 80(3):474-499.
- [34] Grossman G M, Krueger A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement [R]. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 1991.
- [35] Selden T M, Song D. Environmental quality and development: Is there a Kuznets Curve for air pollution emissions? [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1994, 27(2):147-162.
- [36] Kaufmann R K, Davidsdottir B, Garnham S, Pauly P. The determinants of atmospheric SO<sub>2</sub> concentrations: Reconsidering the environmental Kuznets Curve [J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(2):209-220.
- [37] Hettige H, Mani M, Wheeler D. Industrial pollution in economic development: The environmental Kuznets Curve revisited [J]. *Journal of Development Economics*, 2000, 62(2):445-476.
- [38] Perman R, Stern D I. Evidence from panel unit root and cointegration tests that the environmental Kuznets Curve does not exist [J]. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2003, 47(3):325-347.
- [39] 赵细康, 李建民, 王金营, 周春旗. 环境库兹涅茨曲线及在中国的检验 [J]. *南开经济研究*, 2005(3):48-54. Zhao Xikang, Li Jianmin, Wang Jinying, Zhou Chunqi. Study on the EKC and its test in China [J]. *Nankai Economic Studies*, 2005(3):48-54. (in Chinese)
- [40] 王志华, 温宗国, 闫芳, 陈吉宁. 北京环境库兹涅茨曲线假设的验证 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(2):40-47. Wang Zhihua, Wen Zongguo, Yan Fang, Chen Jining. Verifying the environmental Kuznets Curve hypothesis and its conditions in Beijing [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(2):40-47. (in Chinese)
- [41] 苏为华, 张崇辉. 关于异质性假说的中国 EKC 再检验 [J]. *统计研究*, 2011, 28(12):66-71. Su Weihua, Zhang Chonghui. The inspection of EKC hypothesis in China based on heterogeneity [J]. *Statistical Research*, 2011, 28(12):66-71. (in Chinese)
- [42] Richmond A K, Kaufmann R K. Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions? [J]. *Ecological Economics*, 2006, 56(2):176-189.
- [43] Lantz V, Feng Q. Assessing income, population, and technology impacts on CO<sub>2</sub> emissions in Canada: Where's the EKC? [J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(2):229-238.
- [44] 陆虹. 中国环境问题与经济发展的关系分析: 以大气污染为例 [J]. *财经研究*, 2000, 26(10):53-59. Lu Hong. An analysis on China's economy development and on statespace model of environment: Take air pollution as an example [J]. *The Study of Finance and Economics*, 2000, 26(10):53-59. (in Chinese)
- [45] 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 Baiqiang, Jiang Zhujun. A forecast for China's environmental Kuznets Curve for CO<sub>2</sub> emission, and an analysis of the factors affecting China's CO<sub>2</sub> emission [J]. *Management World*, 2009(4):27-36. (in Chinese)
- [46] 许广月, 宋德勇. 中国碳排放环境库兹涅茨曲线的实证研究: 基于省域面板数据 [J]. *中国工业经济*, 2010(5):37-47. Xu Guangyue, Song Deyong. An empirical study of

- the environmental Kuznets Curve for China's carbon emissions; Based on provincial panel data [J]. *China Industrial Economics*, 2010(5):37-47. (in Chinese)
- [47] 李国志, 李宗植. 中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(5):22-27.  
Li Guozhi, Li Zongzhi. Regional difference and influence factors of China's carbon dioxide emissions [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(5):22-27. (in Chinese)
- [48] Managi S, Jena P R. Environmental productivity and Kuznets Curve in India [J]. *Ecological Economics*, 2008, 65(2):432-440.
- [49] 袁鹏, 程施. 中国工业环境效率的库兹涅茨曲线检验 [J]. *中国工业经济*, 2011(2):79-88.  
Yuan Peng, Cheng Shi. Examining Kuznets Curve in environmental efficiency of China's industrial sector [J]. *China Industrial Economics*, 2011(2):79-88. (in Chinese)
- [50] Cropper M, Griffiths C. The interaction of population growth and environmental quality [J]. *The American Economic Review*, 1994, 84(2):250-254.
- [51] Hatzipanayotou P, Lahiri S, Michael M S. Can cross-border pollution reduce pollution? [J]. *The Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne d'Economie*, 2002, 35(4):805-818.
- [52] Copeland B R, Taylor M S. North-South trade and the environment [J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1994, 109(3):755-787.
- [53] Akbostanci E, Tunc G I, Türüt-Asik S. Pollution haven hypothesis and the role of dirty industries in Turkey's exports [J]. *Environment and Development Economics*, 2007, 12(2):297-322.

## Energy Economic Efficiency, the Energy Environmental Performance and Regional Economic Growth

Wang Keliang<sup>1</sup>, Yang Li<sup>1</sup>, Yang Baochen<sup>2</sup>, Cheng Yunhe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

<sup>2</sup> College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract:** Taking capital, labor and energy consumption as input variables, the GDP of each province as expected output variables, carbon dioxide emissions as unexpected output, this study defines two kinds of energy efficiency indexes, namely the energy economic efficiency (*EEE*) and the energy environmental performance (*EEP*), based on total factor production theory and DEA method. The research employ the non-radical and non-angled SBM model to calculate China's provincial *EEE* and *EEP* as well as decomposition indexes from 2000 to 2010, and then analyzes their evolution rules and regional differences. We empirically analyze the relationships among the *EEE*, the *EEP*, decomposition indexes and the regional economic growth by environmental Kuznets Curve (EKC) theory. The results show that the *EEE*, the *EEP* and the decomposition index are in a low level in the sample period. The regional difference is significant and there is large potential of energy conservation and emissions reduction. There are inverted U-shaped and U-shaped curvilinear relationships between the *EEE*, the *EEP*, their decomposition indexes and China's regional economic growth. The industrial structure, the population density, the energy structure and the utilization of foreign investment exert remarkable impacts on the *EEE* and the *EEP* through differentiated influencing mechanism.

**Keywords:** energy economic efficiency; energy environmental performance; slacks-based measurement model; environmental Kuznets Curve

**Received Date:** August 22<sup>nd</sup>, 2012      **Accepted Date:** March 29<sup>th</sup>, 2013

**Funded Project:** Supported by the Ministry of Education Foundation of Humanities and Social Sciences (13YJC790136), the National Natural Science Foundation of China (71071003) and the Philosophy and Social Science Foundation of Anhui (AHSK11-12D107)

**Biography:** Dr. Wang Keliang, an Anhui Zongyang native (1980 - ), graduated from Tianjin University and is an associate professor in the School of Economics and Management at Anhui University of Science and Technology. His research interests include energy economics and environmental management, etc. E-mail: klwang@163.com

□