

# 能源消费、碳排放与经济增长之间的关系研究

## ——理论机制与实证检验

陈向阳 李奕君

(广州大学 经济与统计学院 广东 广州 510006)

**摘要:** 在经济新常态与环境问题突出的双重压力下,研究能源消费、碳排放与经济增长之间的关系对于转变经济增长方式和推进低碳绿色发展具有重要意义。首先对能源消费、碳排放与经济增长的关系进行理论模型分析,然后利用广东省1995—2014年的统计数据,运用协整检验、误差修正模型、脱钩模型和环境库兹涅茨曲线实证检验能源消费、碳排放与经济增长之间的关系。通过理论模型推导发现,能源消费、碳排放与经济增长之间呈现出一种先递增后递减的倒“U”型的关系。实证研究表明,能源消费与经济增长之间存在稳定的协整关系,且误差修正项的系数为负,表现为反向修正机制;碳排放与经济增长大多数处于弱脱钩状态;能源消费、碳排放与经济增长之间存在倒“U”型的关系,并得到碳排放与能源消费在未来出现的拐点。为此,必须构建低碳产业体系和低碳能源体系,并着力控制工业和交通领域的碳排放。

**关键词:** 碳排放; 能源消费; 经济增长; 脱钩分析; 环境库兹涅茨曲线

**中图分类号:** F120.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-6049(2018)05-0098-11

### 一、引言与文献综述

人类的发展需要大量能源,随着全球经济发展加快和世界各国工业化进程不断加深,使得能源需求暴增,且在工业化进程前期,各国追求经济快速发展而忽视了环境问题,造成如今全球的温室效应愈发严重和能源供给短缺。全球气候变化是当前世界各国经济社会可持续发展面对的共同风险,中国政府也高度重视应对气候变化工作,对外提交了《国家自主贡献预案》并签署了《巴黎协定》,彰显大国担当,对内出台了《国家适应气候变化战略》、《“十三五”控制温室气体排放控制方案》等系列文件。从上世纪90年代,世界各国开始重视全球气候问题,重视能源在经济发展中的地位,追求低碳经济的发展模式,追求在经济增长的同时能有效利用能源资源和降低环境污染。改革开放加快了我国工业化和城镇化的进程,使得能源消费的需求剧增,能源消费产生的碳排放量也在不断增长。“十三五”规划提出了绿色发展理念,在保持经济中高速增长的同时,使生产方式和生活方式绿色、低碳水平上升,碳排放总量得到有效控制。广东省是经济与人口大省,也是受气候变化影响较严重的省份,作为国家首批低碳试点省份,积极应对气候变化是加快生态文明建设、实现经济社会可持续发展的重要内容。如何在不影响经济增长的前提下实现碳排放和能源消费协调发展,是亟需得到重视和解决的

收稿日期:2018-06-04;修回日期:2018-06-30

基金项目:广州市哲学社会科学“十二五”规划一般课题(15Y50);广州市哲学社会科学发展规划智库课题(2016GZZK30);广东省哲学社会科学“十三五”规划一般项目(GD17CLJ01)

作者简介:陈向阳(1972—),男,湖南隆回人,广州大学经济与统计学院副教授,博士,硕士生导师,研究方向为环境经济学;李奕君(1994—),女,广东广州人,广州大学经济与统计学院学生,研究方向为环境经济学。

问题,本文利用广东省历年 GDP 和能源消费量的数据,计算由能源消费引起的碳排放量,从理论与实证上分析能源消费、碳排放和经济增长三者之间的关系,有利于广东省制定更加合理的能源管理政策,更加有效地调整产业结构和对新能源的开发利用,持续推进绿色低碳发展,实现经济增长与环境的和谐发展、生态环境质量得到总体改善。

目前,已有一些文献分别从能源消费与经济增长、碳排放与经济增长两个方面分别对此问题进行了研究。一类文献是能源消费与经济增长之间关系的研究。国内外关于能源消耗和经济发展之间关系的研究已有许多研究成果。Kraft and Kraft<sup>[1]</sup>利用 1947—1974 年美国的能源消耗和 GNP 数据,运用格兰杰检验,发现美国能源消耗不是其 GNP 的格兰杰原因,但其 GNP 是能源消耗的格兰杰原因。Yu and Jin<sup>[2]</sup>以美国为对象,利用 1974—1990 年能源消费和国民收入的数据进行协整分析,得出能源消费和国民收入并没有长期稳定的均衡关系。Yemane<sup>[3]</sup>针对上海 1952—1999 年各种工业“能源消耗”与产出数据,结合格兰杰检验方法,结果发现能源消耗是经济增长的格兰杰原因,反之不成立。Dolgo-polova *et al.*<sup>[4]</sup>分别以经合组织国家和非欧佩克国家为研究对象,对能源消耗与经济增长进行格兰杰因果关系检验,结果表明在长期和短期内,不同能源对经济增长的影响有差异。林伯强<sup>[5]</sup>利用经济增长、电力消费和资本三个变量构造了协整和误差修正模型,研究电力消费与经济增长之间的因果关系,得出三者之间存在长期的协整关系,并发现经济增长是电力消费的单向格兰杰原因。韩智勇等<sup>[6]</sup>利用自 1978 年起 22 年的中国能源消费与经济增长数据,通过协整检验和格兰杰检验,结论是二者间长期内并没有稳定的协整关系,但是短期内互为因果关系。陈浩和曾娟<sup>[7]</sup>以武汉市为对象,利用 1996 年起 12 年来当地的经济增长与能源消耗的数据,并采用 Tapio 脱钩模型对二者的脱钩状态进行探究,结果发现在这期间能源消耗是二者脱钩状态强烈波动的主要影响因素。范秋芳等<sup>[8]</sup>选取我国 29 个省市,并基于能源消费弹性系数将 29 省市划分为四个区域,通过对各区域能源消费和经济增长数据进行格兰杰检验,发现经济发展程度不同的区域,会有明显差别的因果关系。另一类文献是碳排放与经济增长之间关系的研究。Grossman and Krueger<sup>[9]</sup>将库兹涅兹曲线理论运用到环境问题的研究,利用 OLS 方法研究认为污染物的排放会随经济增长呈现先增后减的倒 U 型曲线变化。Mouez and Ousama<sup>[10]</sup>在对突尼斯进行空气污染物与经济增长的关系研究时,发现在两者之间存在格兰杰因果关系,但不存在传统的倒 U 库兹涅兹曲线关系。Mohammad *et al.*<sup>[11]</sup>选取孟加拉国为研究对象,收集其能源、电力、二氧化碳和经济增长的数据,结合格兰杰因果检验,结果发现碳排放是经济增长的单向格兰杰原因。宋德勇和卢忠宝<sup>[12]</sup>利用我国 1990—2005 的时序数据,采用 LMDI 分解法将碳排放的影响因素分解为四个,分别为经济产出、碳排放强度、能源结构和能源效率,结果发现经济产出是碳排放的主要驱动因素。武红等<sup>[13]</sup>针对河北省,通过计算和收集对 1980 年起 29 年间的 GDP、能源消费和碳排放量,从近似关系和脱钩状态分析了上述三者的关系,得出碳排放很大程度上取决于能源消费的结论。仲伟周等<sup>[14]</sup>收集我国 2000—2010 年的 GDP 和二氧化碳的时间序列数据,利用 Tapio 脱钩模型,分析二者间的脱钩关系,并将脱钩指标分解为减排脱钩和节能脱钩指标,发现影响总脱钩指标变化的主要因素是节能脱钩指标。武义青和赵亚南<sup>[15]</sup>以河北省为对象,通过对 1980—2011 年 31 年的碳排放和经济增长的相关数据收集,对河北省碳排放进行因素分解,结果发现影响碳排放量的主要因素是能源结构和产业结构。陈向阳<sup>[16]</sup>把环境资本引入生产函数和消费函数,在内生增长的框架下研究了环境库兹涅兹曲线的形成机制,并运用我国 2004—2011 年除西藏外的 30 个省份的面板数据,利用联立方程计量检验发现工业二氧化硫与人均 GDP 呈 U 型关系。

现有文献有的从国家角度、有的从不同区域的角度分析了能源消费、碳排放和经济增长之间的关系,大多文献采用单一的实证方法进行研究,缺乏理论模型研究。笔者在对能源消费、碳排放和经济增长之间的内在关系进行理论分析的基础上,以广东省为研究对象,通过协整检验、误差修正模型、脱钩分析等多种实证方法进行检验,对广东省的能源消费、碳排放和经济增长三者间的关系分别从两两分析到三者统一分析,体现了研究的全面性和区域针对性。

## 二、理论模型

世界经济运行中 86% 的能源来源于化石燃料,可见世界经济运行由化石燃料驱动。可开采的资源指开采成本小于销售收入的资源,而开采成本会因为技术的进步而降低。由于化石燃料最容易开采,因此人类会首先运用化石能源,而能源消费量也随着经济规模的增长而递增。随着化石资源存量的减少,其开采成本增加,直至化石能源出现枯竭。在该过程中,能源的投资回报率随着时间的推移而下降。根据熵定律可知,经济增长消耗的化石资源并没有消失,而是最终以废弃物的形式返回生态系统,具体表现为碳排放量的增长,可见化石能源的消耗对生态系统产生了负面影响和环境成本。如果不考虑化石能源生产和消费过程所产生的外部性成本,那么其最优配置量将由化石能源的需求曲线与供给曲线的交点决定。但随着经济规模的扩张,外部性成本不可忽视。因此,最优配置量的决定过程应将外部性成本考虑在内。另外,当期生产和消费的资源数量越多,未来可用的资源就越少,即边际使用者成本会随着经济规模扩大引起的能源消费量的增加而增加。因此,化石资源的供给曲线由边际开采成本、边际外部性成本与边际使用者成本之和决定,而最优配置量则取决于需求曲线与供给曲线的交点。

为说明能源与经济之间的关系,我们参考 Peretto<sup>[17]</sup> 和陈向阳<sup>[16]</sup> 的研究,构建一个包含家庭、生产、能源部门的经济系统。假设能源生产部门是竞争的,与面对无限大的自然资源供给弹性;家庭可在竞争性市场上无弹性地供给劳动,在信贷市场上自由借贷;生产部门雇佣劳动生产多样化的消费品,并从事研发(R&D),厂商的研发增加了公共知识的积累,减少了未来研发的成本,生产除了劳动外还需要能源;政府对购买能源征收边际外部性成本和边际使用者成本的税收,税收收入一次性返回给家庭部门。

### (一) 家庭部门

一个代表性家庭最大化如下效用函数:

$$U(t) = \int_0^{\infty} e^{-(\rho-\gamma)t} \log u(t) dt, \rho > \gamma > 0 \quad (1)$$

其预算约束为:

$$\dot{A} = rA + wL + \lambda E + \pi_E - C \quad (2)$$

以上两式中, $\rho$ 表示贴现率; $\gamma$ 表示人口增长率; $r$ 表示市场利率; $w$ 表示工资率; $L$ 表示人口规模,假设没有休闲偏好,因此它也等于劳动供给量, $L = L_0 e^{\gamma t}$ , $L_0 = 1$ ; $C$ 表示消费量。除了资产与劳动收入,家庭部门还接受政府能源税收的一次性返还 $\lambda E$ ,这里 $\lambda$ 表示单位税率, $E$ 表示能源使用量。另外家庭部门还接受从能源部门的分红收入 $\pi_E$ 。

单个家庭的即时效用函数为:

$$\log u = \log \left[ \int_0^N \left( \frac{Y_i}{L} \right)^{(\varepsilon-1)/\varepsilon} di \right]^{\varepsilon/(\varepsilon-1)}, \varepsilon > 1 \quad (3)$$

上式中 $\varepsilon$ 表示生产替代弹性; $Y_i$ 表示家庭部门购买的每一种多样化产品的数量; $N$ 表示产品的种类数。

最优化消费计划的结果是,家庭在资产的收益率满足以下条件时就会储蓄:

$$r = r_A = \rho + \dot{C} - \gamma \quad (4)$$

$\dot{C}$ 表示消费的增长率,在给定这种消费时间路径下最大(3)式,其约束条件为: $C = \int_0^N P_i Y_i di$ ,得到产品 $i$ 的需求函数:

$$Y_i = C \frac{P_i^{-\varepsilon}}{\int_0^N P_i^{1-\varepsilon} di} \quad (5)$$

### (二) 生产部门: 生产与创新

生产某种消费品厂商的生产函数如下:

$$Y_i = H_i^\alpha \cdot F(L_{Y_i} - \sigma E_i) \quad , 0 < \alpha < 1 \quad , \sigma > 0 \quad (6)$$

上式中  $Y_i$  表示产出;  $L_{Y_i}$  表示生产的劳动投入量;  $\sigma$  表示固定劳动成本;  $E_i$  是能源投入量;  $H_i^\alpha$  是厂商的全要素生产率; 它是现有厂商知识积累  $H_i$  的函数。函数  $F(\cdot)$  为标准一次齐次新古典生产函数, 因此 (6) 式对如劳动、能源竞争性投入要素是规模报酬不变的, 生产过程是规模报酬递增的。厂商的成本函数如下:

$$w\sigma + V_Y(w P_E + \lambda) H_i^{-\alpha} \cdot Y_i \quad (7)$$

(7) 式中  $V_Y(\cdot)$  是标准一次齐次单位成本函数, 关于知识的单位成本递减弹性等于  $\alpha$ 。厂商的知识积累来源于研发 (R&D):

$$\dot{H}_i = \varphi K L_{H_i} \quad (8)$$

上式中  $\dot{H}_i$  表示厂商的知识增量;  $L_{H_i}$  表示时间  $dt$  内研发 (R&D) 劳动投入量;  $\varphi K$  表示 R&D 的劳动生产率, 由外生系数  $\varphi$  和公共知识存量  $K$  决定。公共知识的积累具有溢出效应, 一个厂商在研发创新提高生产率的同时产生公共知识的积累, 研发效率由不同来源的知识共同决定, 即:

$$K = \int_0^N \frac{1}{N} H_i di \quad (9)$$

(8) 和 (9) 说明了技术进步与创新对经济增长的影响, 克服了回报递减, 实现了要素回报递增, 表现为知识与劳动一起是规模报酬递增的, 而知识是规模报酬不变的, 这一特征保证了稳态的内生增长的可能性。

### (三) 能源部门

能源部门雇佣劳动, 将石油等初始自然资源生产为可消费的各种能源产品, 其生产函数和成本函数分别为:

$$E = E(L_E, O) \quad (10)$$

$$TC = TC_E(w, P_O) E \quad (11)$$

以上两式中  $L_E$  表示能源部门投入的劳动量;  $O$  为石油等初始自然资源;  $E(\cdot)$  为标准的一次齐次新古典生产函数;  $TC$  为能源部门的总成本;  $TC_E(\cdot)$  为关于工资率  $w$  和初始自然资源价格  $P_O$  的一次齐次单位成本函数; 设劳动是标准化的产品, 因此  $w \equiv 1$ 。

### (四) 市场均衡

厂商追求公司价值的最大化, 即未来净现金流量现值的最大:

$$Val_i = \int_0^\infty e^{-rt} \pi_{Y_i}(t) dt \quad (12)$$

利用厂商的成本函数 (7) 式, 其即时利润如下:

$$\pi_{Y_i} = [P_i - V_Y(1 P_E + \lambda) H_i^{-\alpha}] Y_i - \sigma - L_{H_i} \quad (13)$$

以上两式中,  $L_{H_i}$  表示研发 (R&D) 支出;  $Val_i$  为厂商的价值。厂商在 (5) 式和 (8) 式的约束下最大化其价值得到均衡条件下的要素需求函数:

$$L_Y = C \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} (1 - S_Y^E) + \sigma N \quad (14)$$

$$E = C \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \frac{S_Y^E}{P_E + \lambda} \quad (15)$$

以上两式中  $S_Y^E$  为厂商可变成本中能源的比重, 它等于:

$$S_Y^E = \frac{(P_E + \lambda) E_i}{V_Y(1 P_E + \lambda) H_i^{-\alpha} Y_i} = \frac{\partial \log V_Y(w P_E + \lambda)}{\partial \log (P_E + \lambda)} \quad (16)$$

对于能源部门的成本函数 (11), 竞争性的能源企业沿以下无限大弹性的供给曲线生产:

$$P_E = TC_E(1 P_O) \quad (17)$$

同时定义石油等初始自然资源占能源成本的比重为:

$$S_E^0 = \frac{P_0 O}{TC_E(1, P_0) E} = \frac{\partial \log TC_E(w, P_0)}{\partial \log P_0} \quad (18)$$

由式(14)和(15)得到能源部门的劳动和石油等初始自然资源的需求:

$$L_E = E \frac{\partial TC_E(w, P_0)}{\partial w} = C \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \frac{P_E S_Y^E}{P_E + \lambda} (1 - S_E^0) \quad (19)$$

$$P_0 O = E \frac{\partial TC_E(w, P_0)}{\partial P_0} = C \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \frac{P_E S_Y^E}{P_E + \lambda} S_E^0 \quad (20)$$

由式(15)和式(20)可见,能源与消费量呈正相关关系,也就是与经济增长是正相关的,同时也与厂商可变成本中能源成本的比重和能源税率 $\lambda$ 相关。在经济规模较小时,能源消费的边际外部成本与边际使用者成本低,能源税率 $\lambda$ 也较低,提高税率使厂商可变成本中能源成本的比重没有降低,导致能源使用量随经济规模的扩大而递增。随着经济规模与资源开采量的扩大,未来的资源稀缺性会日益凸显,碳排放的增加带来的“公害”即外部成本会随之增加,能源税率 $\lambda$ 将处于较高水平,厂商会采用新技术提高能源利用率,从而降低可变成本中能源成本的比重,导致能源使用量随经济规模的扩大而递减。所以,能源消费、碳排放与经济增长之间的关系呈现出一种先递增后递减的倒“U”型的关系。

### 三、实证分析

我们选取广东省1995—2014年的一次能源消费总量、GDP的数据进行实证分析,数据来源于2015年《广东统计年鉴》,包括1995—2014年GDP,一次能源消费总量,煤炭、石油、电力、天然气能源消费占能源消费总量的百分比数。其中,1995—2014年GDP按1995年不变价格计算得到,碳排放量的测算借鉴武红等<sup>[13]</sup>的研究,测算公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^3 E_i F_i = \sum_{i=1}^3 E \frac{E_i}{E} F_i \quad (21)$$

(21)式中的 $C$ 表示由一次能源消费产生的碳排放量; $E$ 表示能源消费总量; $E_i$ 表示各类能源消费量,由于电力的碳排放系数很小,可以忽略不计,所以本文只计算煤炭、石油、天然气三种一次能源的消费量, $i=1, 2, 3$ 分别表示上述三类能源, $F_i$ 表示我国各类能源的碳排放系数。本文借鉴徐国泉<sup>[18]</sup>的研究结果,煤炭的碳排放系数为0.7476、石油为0.5854、天然气为0.4479。利用式(20)即可测算出各能源消费引起的碳排放量。

#### (一) 能源消费与经济增长的协整检验和误差修正检验

对一次能源消费总量、GDP的对数进行ADF检验的结果,变量LGDP和变量LNYXF的原时间序列不平稳,在1%、5%显著水平下都不通过检验,而一阶差分后,在5%的显著水平t统计量都大于5%水平下的值,且P值大于0.05,表明都未通过平稳性检验;二阶差分后的结果显示二阶差分后的时间序列的t统计量都小于1%和5%水平下的值,且P值小于0.01,表明时间序列在二阶差分后通过了平稳性检验,即LGDP和LNYXF是二阶单整,且原数据是不平稳的,因此接下来可以进行协整检验。

采用更适合两个变量协整检验的E-G两步法,首先对以LNYXF为被解释变量、LGDP为解释变量,进行OLS回归,得到回归结果如表1。

表1 变量LGDP和变量LNYXF的OLS回归结果

	$C$	$LGDP$	$LNYXF(-1)$	$LNYXF(-2)$	Adj-R <sup>2</sup>	$D.W$	$F$ -statistic
$LNYXF$ (无滞后)	1.843 *** (9.555)	0.778 *** (39.44)			0.988	0.632	1555.204
$LNYXF$ (有滞后)	1.203 *** (3.897)	0.633 *** (4.074)	0.516 ** (2.045)	-0.299 9 (-1.696)	0.983	1.843	849.351

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别代表1%、5%、10%的显著性水平,括号内为t统计值。

从表1可见,LGDP的系数为正值,LNYXF和LGDP存在正相关,无滞后项的DW=0.632,表明残

差序列存在自相关,可以通过适当加入滞后项来改善。对带滞后项的回归模型进行残差序列自相关的 LM 检验,LM 检验结果显示:  $LM = TR^2 = 1.1745$ ,其 P 值为 0.5558,远大于检验水平 0.05,表明加入适当的滞后项的模型作 OLS 估计得到的残差序列不存在自相关。然后对残差序列进行 ADF 检验,结果为:检验值  $t$  统计量为  $-4.1706$ ,小于 1% 水平下的临界值,且根据麦金农双变量协整 ADF 检验临界值表,样本容量小于 25、显著性水平为 0.05 的临界值  $-3.59$ ,因此残差序列是平稳的,说明 LGDP 和 LNYXF 存在(2,2)阶协整关系,即两者存在长期稳定的均衡关系,可以得到 LNYXF 关于 LGDP 的长期弹性为  $0.6329 / (1 - 0.5160 + 0.2999) = 0.8074$ 。

通过协整检验,发现广东省的能源消费和 GDP 存在协整,表明二者之间存在长期均衡关系,但从短期来看,可能会受到短期波动影响而出现失衡,因此需要分析长期均衡过程中的短期波动影响,建立 LNYXF 和 LGDP 之间的误差修正模型,建立的模型形式为:

$$\Delta LNYXF_t = \alpha_1 \Delta LNYXF_{t-1} + \beta_1 \Delta LGDP_t + \beta_2 \Delta LGDP_{t-1} + \lambda ECM_{t-1} + \varepsilon_t \quad (22)$$

其中,  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为参数系数,  $ECM_{t-1}$  是滞后一期的误差修正项。使用最小二乘法得到误差修正模型结果如表 2。

表 2 误差修正模型的估计结果

	$\Delta LNYXF_{t-1}$	$\Delta LGDP$	$\Delta LGDP_{t-1}$	$ECM_{t-1}$	Adj-R <sup>2</sup>	D. W
$\Delta LNYXF$	0.334 8* (1.806 3)	2.447 3*** (3.639 1)	-1.942 1** (-2.840 4)	-0.246 0* (-1.978 0)	0.641	1.87

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平,括号内为  $t$  统计值。

由表 2 的估计结果可见,各变量的回归系数都通过了显著性检验。结果表明 LNYXF 的变化不仅受当前 LGDP 变化的影响,还受到了 LGDP 前一期和自身前一期的非均衡程度的影响。本期 LGDP 增加 1 个单位,则本期的 LNYXF 同向增加 2.447 3 个单位,即 LNYXF 关于 LGDP 的短期弹性;上期的 LNYXF 增加 1 个单位,则本期的 LNYXF 同向变动 0.334 8 个单位;上期的 LGDP 增加 1 个单位,则本期的 LNYXF 反向变动 1.942 1 个单位。误差修正项的系数为  $-0.246 0$ ,调整方向为负,与误差修正机制相符,上期的非均衡误差以 24.6% 的比率对本期的 LNYXF 做出反向修正。

## (二) 碳排放与经济增长的脱钩分析

### 1. 建立碳排放和经济增长的 Tapio 脱钩模型

OECD 脱钩模型和 Tapio 脱钩模型是目前运用在经济研究中最主要的两种脱钩模型,而 Tapio 脱钩模型是参考 OECD 脱钩模型并加以改进发展起来的,克服了 OECD 脱钩模型对基期选择上的缺陷,脱钩状态也比 OECD 模型的分类型更精细。所以本文通过 Tapio 脱钩模型来构建广东省的碳排放与经济增长的脱钩模型:

$$e_{(C,GDP)} = \frac{\% \Delta C}{\% \Delta GDP} = \frac{\% \Delta C}{\% \Delta E} \cdot \frac{\% \Delta E}{\% \Delta GDP} = e_{(C,E)} \cdot e_{(E,GDP)} \quad (23)$$

(23) 式中  $e_{(C,GDP)}$  表示碳排放和经济增长的脱钩弹性;  $\% \Delta C$  表示碳排放量的变化率;  $\% \Delta GDP$  表示 GDP 的变化率;  $\% \Delta E$  表示一次能源消费量的变化率。根据 Tapio 脱钩模型,利用因果链分解,将碳排放与经济增长的脱钩弹性分解为碳排放与能源消费的脱钩因子和能源消费与经济增长的脱钩因子两种,前者即  $e_{(C,E)}$  简称为结构减排脱钩弹性,后者即  $e_{(E,GDP)}$  简称为能耗脱钩弹性。碳排放与经济增长的脱钩类型与含义见表 3。

### 2. 建立脱钩因子影响力评价模型

影响力评价函数采用对以脱钩因子乘积作为底数,对各脱钩因子取对数的方法作为评价各脱钩因子影响力的方法,其影响力评价函数式:

$$W_i = \begin{cases} -\log_{e_{(C,GDP)}}^i, & \text{IF } e_{(C,GDP)} > 1 \\ \log_{e_{(C,GDP)}}^i, & \text{IF } e_{(C,GDP)} < 1 \end{cases} \quad (24)$$

(24) 式中,  $e_i$  为  $e_{(C,E)}$ ,  $e_{(E,GDP)}$ 。由于是取对数, 所以底数必须大于零, 对于脱钩弹性的影响力评价模型中, 将不考虑  $e_{(C,GDP)} < 0$  的情况。

表3 碳排放与经济增长的脱钩类型与含义

脱钩弹性值	% ΔGDP	% ΔC	脱钩类型	含义
$e < 0$	$> 0$	$< 0$	强脱钩	经济增长, GDP 增加, 而碳排放量降低
$0 \leq e \leq 0.8$	$> 0$	$> 0$	弱脱钩	GDP 与碳排放量均增长, 但 GDP 增长率大于碳排放量增长率
$0.8 \leq e < 1.2$	$> 0$	$> 0$	扩张连接	表示经济增长与碳排放量仍处于不脱钩状态
$e > 1.2$	$> 0$	$> 0$	扩张负脱钩	GDP 与碳排放量均增长, 但碳排放量增长率大于 GDP 增长率
$e < 0$	$< 0$	$> 0$	强负脱钩	经济衰退, GDP 绝对量降低, 但碳排放绝对量增加
$0 \leq e \leq 0.8$	$< 0$	$< 0$	弱负脱钩	GDP 与碳排放量均降低, 但 GDP 下降率大于碳排放量下降率
$0.8 \leq e < 1.2$	$< 0$	$< 0$	衰退连接	主要防止过度解释轻微变化
$e > 1.2$	$< 0$	$< 0$	衰退脱钩	GDP 与碳排放量均降低, 但碳排放量下降率大于 GDP 的下降率

### 3. 碳排放和经济增长的脱钩关系分析

根据 1996—2014 年广东 GDP 的变化率和总碳排放量的变化率, 并利用式(22) 可计算出碳排放和经济增长的脱钩弹性, 见表 4。广东省经济增长和碳排放的脱钩值大多数处于弱脱钩状态, 在 2000 年到 2001 年间, 碳排放的增长率为 1.56%, 小于同期的 GDP 增长率 10.49%, 碳排放和经济增长处于弱脱钩状态; 在 2002 年, GDP 和碳排放均比上年有所增长, 但脱钩状态仍处于弱脱钩, 说明这两年广东省政府采取一定的节能减排措施, 并且政策有效, 使得经济增长快于碳排放的增长。在 2003 年, 碳排放的增长率突然激增到 15.53%, 超过了同期的 GDP 增长率, 造成了 2002 年到 2003 年间经济增长和碳排放量处于扩张连接的状态, 这主要是因为“十五规划”实施前期, 受到国家宏观经济调控政策的影响, 广东省政府实施了加快经济增长的措施, 加快产业结构转变和深化国有企业改革, 大力推进基础设施的建设, 在经济增长的同时也增加了碳排放量。而 2006 年和 2007 年经济增长和碳排放增长幅度相当, 造成了经济

增长和碳排放量处于不脱钩状态。而 2008 年之后, 脱钩状态处于弱脱钩和扩张负脱钩两种状态, 这是因为在“十一五”期间, 随着广东省城镇化的进程不断加快和工业适度重型化的发展趋势以及各类重大项目的建设投产, 节能减排工作面临挑战, 而且当时还受到国际金融危机的影响, 经济增长和碳排放处于不稳定增长状态。但仍需要继续贯彻落实节能减排措施, 转变能源消费结构, 继续发展低碳经济。其中 1998、2012 和 2014 年呈现出强脱钩, 即经济增长的同时碳排放量却减少, 如果 1998 年出现强脱钩是一种偶然现象, 那么 2012 和 2014 年呈现的强脱钩现象, 主要是由于党的“十八大”以来, 政府把生态文明建设摆上了更加重要的战略地位, 把生态文明建设融入经济发展, 从制度设计、生态文化培育和协同治理创新三个层面推动绿色发展, 试点推行碳排放权交易, 对经济结构进行顶层设计, 在各产业和各区域推广清洁生产, 创新清洁生产技术, 发展低碳经济。

表4 广东省 1996—2014 年碳排放和经济增长的脱钩弹性

年份	% ΔGDP%	% ΔC	$e_{(C,GDP)}$	脱钩类型
1996	0.1127	0.0363	0.0041	弱脱钩
1997	0.1119	0.0231	0.0026	弱脱钩
1998	0.1080	-0.002	-0.0002	/
1999	0.1012	0.0703	0.0071	弱脱钩
2000	0.1147	0.1597	0.0184	扩张负脱钩
2001	0.1049	0.0156	0.0016	弱脱钩
2002	0.1237	0.0649	0.0080	弱脱钩
2003	0.1484	0.1553	0.0231	扩张连接
2004	0.1479	0.1142	0.0169	弱脱钩
2005	0.1413	0.0843	0.0119	弱脱钩
2006	0.1481	0.1403	0.0208	扩张连接
2007	0.1487	0.1564	0.0233	扩张连接
2008	0.1043	0.0120	0.0012	弱脱钩
2009	0.0970	0.0693	0.0067	弱脱钩
2010	0.1245	0.1847	0.0230	扩张负脱钩
2011	0.1000	0.1241	0.0124	扩张负脱钩
2012	0.0818	-0.0310	-0.0025	/
2013	0.0846	0.0079	0.0007	扩张连接
2014	0.0776	-0.0136	-0.0011	/

#### 4. 脱钩因子的影响力评价分析

由以上的分析我们可知,广东省的碳排放和经济增长大多数年份处于弱脱钩状态,但通过脱钩弹性指标和脱钩类型,很难深入分析经济增长和碳排放脱钩关系变化的深层次原因,所以我们对脱钩指标采用式(22)的方法分解为结构减排脱钩因子和能耗脱钩因子两个脱钩弹性,并利用式(23)以二者乘积为底数分别对二者取对数的方法对脱钩弹性的影响力进行评价分析,从而分析脱钩指标变化的深层原因。由于采用取对数的方法,排除  $e_{(C,GDP)} < 0$  的情况,所以不能得到 1998、2012 和 2014 年的脱钩因子影响力,得到的结果如表 5。

从表 5 可见,1996—2014 年期间,在 16 年数据中有 9 年数据表明结构减排脱钩弹性值大于能耗脱钩弹性值,即前者的影响力大于后者的影响力。如 2002 年的结构减排脱钩弹性值呈现的是弱脱钩,其影响力为 0.7619,而能耗脱钩弹性呈现的脱钩类型是扩张连接,其影响力为 0.2381,最终使得经济增长与碳排放呈现为结构减排脱钩弹性的状态—弱脱钩,其他年份也依此解释,有 1996、1997、1999、2000、2001、2003、2005、2008 和 2010 年。另外通过计算两个脱钩弹性影响力的均值,得到结构减排脱钩弹性影响力的均值为 0.6610,能耗脱钩弹性影响力的均值为 0.3389,由此可见,影响广东省碳排放与经济增长脱钩状态的主要因素是结构减排脱钩弹性。说明仍需要加强技术创新,提高能源利用率,开发新能源和清洁能源。陈向阳<sup>[19]</sup>通过计量研究发现第二产业比重与污染排放量负相关,说明产业结构确实是影响污染排

表 5 广东省 1996—2014 年脱钩因子影响力

年份	$e_{(C,E)}$	$e_{(E,GDP)}$	$e_{(C,E)}$ 影响力	$e_{(E,GDP)}$ 影响力
1996	0.9434	0.3412	0.0541	0.9459
1997	0.7269	0.2841	0.2022	0.7978
1998	0.7825	-0.0236	/	/
1999	1.6697	0.4157	-1.4038	2.4038
2000	0.9617	1.4478	-0.1180	1.1180
2001	0.6681	0.2223	0.2115	0.7885
2002	0.6114	0.8575	0.7619	0.2381
2003	0.9846	1.0628	-0.3416	1.3406
2004	0.7701	1.0025	1.0095	-0.0095
2005	0.9436	0.6325	0.1125	0.8876
2006	0.8366	1.1326	3.3087	-2.3087
2007	1.1585	0.9082	2.8928	-1.8929
2008	0.6191	0.1851	0.2214	0.7786
2009	0.7870	0.9077	0.7122	0.2878
2010	1.1527	1.2869	0.3604	0.6396
2011	1.5265	0.8128	1.9605	-0.9605
2012	14.8741	-0.0255	/	/
2013	0.2233	0.4171	0.6317	0.3685
2014	-0.4798	0.3644	/	/

放的重要因素。张伟和王韶华<sup>[20]</sup>通过构建反映各区域不同产业产值变动与碳强度动态关系的数理模型,并且测算了各区域产业结构变动的全局和局部动态累积碳减排效应,研究发现:第一产业产值增加促进碳强度降低的作用最大,第三产业产值增加的碳减排作用稍差于第一产业,而第二产业产值增加对于对 CO<sub>2</sub> 排放总量的影响要大于 GDP 的贡献。陈向阳<sup>[16]</sup>通过理论模型和实证分析认为产业结构通过结构性的环境污染和对能源的消耗来影响经济增长,产业结构中第一、二和三产业的比重和第二产业中高污染、高能耗产业与高技术产业的比重直接影响环境污染和能源消费水平。

#### (三) 碳排放、能源消费与经济增长的库兹涅茨曲线分析

由理论模型的分析可知,能源消费、碳排放与经济增长之间的关系呈现出一种先递增后递减的倒“U”型的关系。那么,广东省的能源消费、碳排放的库兹涅茨曲线是否存在,则可采集相关数据加以验证。选取人均能源消费和人均碳排放量为因变量,人均 GDP 为自变量,产业结构和能源强度为控制变量,其中产业结构用第二产业产值占 GDP 的比重来度量,能源强度用万元 GDP 的一次能源消费(吨标准煤/万元)来度量,数据来源于 1994—2014 年《广东统计年鉴》。

设人均 GDP 记为 RJ\_GDP,单位为万元/人;人均能源消费量记为 RJ\_NYXF,单位为吨标准煤/人;人均碳排放量记为 RJ\_TPF,单位为吨/人;产业结构记为 CYJG;能源强度记为 NYQD。计量方程如下:

$$RJ\_NYXF_t = \beta_0 + \beta_1 RJ\_GDP_t + \beta_2 RJ\_GDP_t^2 + \beta_3 CYJG_t + \beta_4 NYQD_t + \varepsilon_t \quad (25)$$



$$RJ\_TPF_t = \beta_0 + \beta_1 RJ\_GDP_t + \beta_2 RJ\_GDP_t^2 + \beta_3 CYJG_t + \beta_4 NYQD_t + \varepsilon_t \quad (26)$$

各变量 ADF 检验的结果表明,人均 GDP 及其平方项、人均能源消费量、人均碳排放量、产业结构和能源强度的原时间序列和一次差分均不平稳,在二次差分时平稳。由于残差存在序列自相关的现象,需要加入 AR(1) 进行修正,OLS 回归结果如表 6。

由表 6 可知,广东省能源消费、碳排放与经济增长之间存在一种先递增收后递减的倒“U”型的关系,验证了理论模型的结论。通过 1995—2014 年的人均 GDP 的数据计算其增长率,并以此为基础可计算出人均碳排放量和人均能源消费分别达到拐点时所需要的时间,人均碳排放量为 2.46 年、人均能源消费量为 4.42 年。但是碳排放并不会因经济增长而自动得到控制,必须进一步转变增长方式,开发和利用清洁生产技术和清洁能源,能源强度与人均碳排放量、人均能源消费量显著正相关,说明提高人均 GDP 的能源利用效率可降低碳排放量,1995—2014 年期间广东省万元 GDP 的一次能源消费量呈现递减趋势,对碳排放量的降低起了显著作用。而产业结构与人均碳排放量显著负相关,这一结果与预期结果相反,说明广东省碳排放的产业结构效应已经出现,第二产业中清洁产业的比重大,在经济总产出中的贡献率在提高,减少了能源消耗,进而降低了碳排放量。

#### 四、结论与对策建议

通过理论模型与利用广东省的一次能源消费量、碳排放量和经济增长等数据进行实证分析得到以下结论:

1. 理论模型推导表明,能源消费、碳排放与经济增长之间的关系呈现出一种先递增收后递减的倒“U”型的关系,实证分析也验证了这种关系的存在,并且发现广东省的人均碳排放量在 2.46 年后会达到倒“U”型曲线的拐点、人均能源消费在 4.42 年后会达到拐点。但是,碳排放量的降低不是经济增长所内生的结果,更不会通过经济增长自动得到降低,只有通过能源消费税和碳排放税等政府规制措施的实施,提高企业可变成本中能源成本的比重,来倒逼企业开发与推广利用清洁能源以及清洁生产技术。

2. 能源消费、碳排放与经济增长之间的倒“U”型的关系的内在机制是:经济系统只是生态系统的子系统,在经济规模较低时,规模效应起主要作用,能源需求量会随着产出规模的扩大而增加,进而导致能源消费量和二氧化碳排放量均出现增长,使得利用化石能源推动经济增长的同时过度排放了二氧化碳,导致气候不稳、农业生产下降,化石能源消费的边际外部性成本和边际使用者成本递增,经济增长的机会成本提高,当它们等于边际收益时,宏观经济规模达到了最优规模。为了减少经济增长带来的负外部效应,政府加大了对清洁能源的开发和碳排放的减排技术创新与应用,同时也加大了规制措施的介入,导致技术效应和制度效应起主要作用,二氧化碳排放量随经济增长而降低。

3. 通过对广东省能源消费与经济增长的数据进行 ADF 单位根检验及 E-G 两步法的协整检验,得出二者之间存在长期稳定的协整关系,能源消费对经济增长的长期弹性为 0.8074;误差修正模型估算

表 6 碳排放、能源消费的库兹涅茨曲线回归估计结果

模型类型	RJ_TPF 修正前	RJ_NYXF 修正前	RJ_TPF 修正后	RJ_NYXF 修正后
C	-0.119 5 (-0.358 5)	-0.801 7*** (-2.815 4)	-0.833 5* (2.044 7)	-1.550 4*** (-4.373 1)
RJ_GDP	0.712 9*** (5.579 2)	1.109 1*** (10.156 3)	0.653 8*** (4.832 1)	1.072 3*** (9.816 5)
RJ_GDP <sup>2</sup>	-0.074 5*** (-3.497 1)	-0.097 9*** (-5.378 0)	-0.061 0*** (-2.624 8)	-0.084 7*** (-4.502 6)
CYJG	-1.810 0 (-1.504 5)	-1.047 4 (-1.018 8)	-0.644 3*** (-4.074 0)	-0.352 7 (-0.383 3)
NYQD	0.962 8*** (3.873 0)	1.309 4*** (6.162 9)	1.255 4*** (3.390 9)	1.910 2*** (6.849 0)
AR(1)	-	-	0.540 1*** (2.532 3)	0.575 3*** (4.623 6)
Adj-R <sup>2</sup>	0.984 9	0.997 2	0.967 3	0.958 1
D.W	1.26	1.39	1.69	1.83
F-statistic	310.712 9	1 674.282	1 037.350 5	1 922.547
曲线形状	倒 U 型	倒 U 型	倒 U 型	倒 U 型
拐点	-	-	5.359 0	6.330 0

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平,括号内为 t 统计值。

的结果表明,能源消费对经济增长的短期弹性为 2.447 3,上一期的非均衡误差以 24.6% 的比率对本期的能源消费量做出反向修正,使得能源消费和经济增长的长期均衡能够收敛。

4. 通过对广东省碳排放和经济增长之间的脱钩分析发现经济增长与碳排放的脱钩关系大多数处于弱脱钩状态,并且碳排放和经济增长的脱钩变化主要由结构减排脱钩弹性决定,说明广东省在能源消费结构中主要以煤炭和石油为主,减排政策的调控、减排技术创新和应用等方面虽然有一定成效,但仍未达到强脱钩状态,所以必须进一步推进绿色发展、加快产业结构的转型升级和大力发展先进制造业,加大清洁能源的开发和利用,改变能源消费结构,推动节能减排技术的创新,提高能源利用效率,使碳排放量得到控制。

根据本文基本结论,可提出如下对策建议:

1. 构建低碳产业体系。一是要加快传统产业低碳改造,有序淘汰过剩产能,结合绿色制造产业体系的构建,通过在家电、建材、化工和纺织等行业建设绿色工厂、发展绿色园区、开发绿色产品和打造绿色供应链等方式,推进传统产业低碳化、清洁化、高效化和循环化改造;二是大力发展绿色产业,积极发展绿色低碳特征明显的战略新兴产业,推动新兴电子信息、新能源及节能环保产业、新能源汽车、高端设备制造和新材料等产业成为新的支柱产业,加快现代服务业基地和集聚区建设,推动金融、科技服务、物流、总部经济、文化创意和信息服务等现代服务业的发展。

2. 构建低碳能源体系。一是强化能源节约,实施能源消费总量和强度目标控制制度,构建能源计量监管和服务体系,实施全民节能计划和重点节能工程;二是优化能源结构,调整化石能源结构,控制煤炭消费和增加天然气的消费,开发利用风电、太阳能和生物质能等可再生能源,提高非化石能源消费比重。

3. 控制工业和交通领域的碳排放。加强工业的清洁生产技术研发,提高绿色技术的自主创新能力,提高能源利用效率;通过发展新能源汽车、绿色货运和现代物流、优化运输结构等手段,提高交通运输能源利用效率;推进建设公交城市,建设城际轨道交通网、提供多样化公交服务和绿道网络,完善“共享单车”管理制度,倡导绿色低碳出行。

#### 参考文献:

- [1] KRAFT A, KRAFT J. On the relationship between energy and GNP[J]. The journal of energy and development, 1978, 3(2): 401 - 403.
- [2] YU S H, JIN J C. Cointegration tests of energy consumption, income, and employment[J]. Resource and energy economics, 1992, 14(3): 259 - 266.
- [3] YEMANE W R. Disaggregated industrial energy consumption and GDP: the case of Shanghai[J]. Energy economics, 2004, 26(2): 69 - 75.
- [4] DOLGOPOLOVA I, HYE Q A M, STEWART I T. Energy consumption and economic growth: evidence from non-OPEC oil producing states[J]. Quality & quantity, 2014, 48(2): 887 - 898.
- [5] 林伯强. 电力消费与中国经济增长: 基于生产函数的研究[J]. 管理世界, 2003(11): 18 - 27.
- [6] 韩智勇, 魏一鸣, 焦建玲. 中国能源消费与经济增长的协整性与因果关系分析[J]. 系统工程, 2004(12): 17 - 21.
- [7] 陈浩, 曾娟. 武汉市经济发展与能源消耗的脱钩分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2011(6): 90 - 95.
- [8] 范秋芳, 崔珊, 刘兰廷. 基于 Granger 检验的能源消费与经济增长区域差异性研究[J]. 工业技术经济, 2015(3): 44 - 48.
- [9] GROSSMAN G M, KRUGER A B. Environmental impact of north American free trade agreement[J]. NBER working paper, 1991, 11(3): 1120 - 1145.
- [10] MOUEZ F, OUSSAMA Z. Economic growth and pollutant emissions in Tunisia: an empirical analysis of the environmental Kuznets Curve[J]. Energy policy, 2010(38): 1150 - 1156.
- [11] MOHAMMAD J A, ISMAT A B, JEROEN B, HUYLENBROECK G V. Energy consumption, carbon emissions and economic

- growth nexus in bangladesh: cointegration and dynamic causality analysis [J]. *Energy policy*, 2012(45): 217 – 225.
- [12] 宋德勇, 卢忠宝. 中国碳排放影响因素分解及其周期波动性研究 [J]. *中国人口·资源与环境* 2009(3): 18 – 24.
- [13] 武红, 谷树忠, 周洪, 王兴杰, 董德坤, 胡咏君. 河北省能源消费、碳排放与经济增长的关系 [J]. *资源科学* 2011(10): 1897 – 1905.
- [14] 仲伟周, 孙耀华, 庆东瑞. 经济增长、能源消耗与二氧化碳排放脱钩关系研究 [J]. *审计与经济研究* 2012(11): 99 – 105.
- [15] 武义青, 赵亚南. 河北省碳排放与能源消费和经济增长 [J]. *河北经贸大学学报* 2015(1): 123 – 129.
- [16] 陈向阳. 环境成本内部化下的经济增长研究 [M]. 北京: 社会科学文献出版社 2017.
- [17] PERETTO P F. Energy taxes and endogenous technological change [J]. *Journal of environmental economics and management*, 2009(57): 269 – 283.
- [18] 徐国泉, 栾昊. 江苏能越过碳排放库兹涅茨曲线拐点吗? ——基于江苏碳排放的二阶段因素分解模型分析 [J]. *国土资源科技管理* 2016(3): 22 – 28.
- [19] 陈向阳. 环境库兹涅茨曲线的理论与实证研究 [J]. *中国经济问题* 2015(3): 51 – 62.
- [20] 张伟, 王韶华. 产业结构变动的碳减排效应: 动态累积与空间差异 [J]. *经济评论* 2015(4): 31 – 44.

(责任编辑: 黄明晴; 英文校对: 陈芙蓉)

## A Study on the Relationship between Energy Consumption , Carbon Emissions and Economic Growth: Theoretical Mechanism and Empirical Test

CHEN Xiangyang , LI Yijun

( School of Economics and Statistics , Guangzhou University , Guangzhou 510006 , China)

**Abstract:** Under the double pressure of economic new normal state and environmental problems it is of great significance to study the relationship between energy consumption , carbon emissions and economic growth to implement the low-carbon development and the green development. Firstly , this paper studies the relationship of energy consumption , carbon emissions and economic growth in a three-sector growth model , then empirically studies on the situation of energy consumption , carbon emissions and economic growth of Guangdong Province based on statistical data of Guangdong Province between 1995 and 2014 by applying co-integration test , error correction model , decoupling model , and Kuznets curve. The theoretical study has found that there is an inverted U-shaped relationship between energy consumption , carbon emissions and economic growth. The empirical results show that there exists a stable co-integration relationship between energy consumption and economic growth , and the coefficient of the error correction term is negative in line with the reverse correction mechanism; carbon emissions and economic growth in most of Guangdong Province are in a weak decoupling state; there is an inverted U-shaped relationship between energy consumption , carbon emissions and economic growth and an inflection point of carbon emissions and energy consumption appearing in the future is obtained. In view of the conclusion , this paper has put forward the policy of construction of low carbon industrial system and low carbon energy system.

**Key words:** carbon emissions; energy consumption; economic growth; decoupling analysis; EKC