

# 全球能源效率的演变与启示

——基于全球投入产出数据的 SDA 分解与实证研究

林伯强 吴 微\*

**摘 要** 提升能源效率是控制能源消费和减少碳排放的关键。本文构建全球能源投入产出数据库,对 2000—2014 年间全球能源效率变动进行了结构分解。发现技术进步使能源强度下降,但由于发展中国家在全球经济中的比重提升,以及各国产业结构与投资率的变化,抵消了技术进步带来的效率提升。本文建立全球面板模型,分析经济增长与能源强度的关系。结果表明经济增速越高,能源强度下降得越快,且消费品能源强度的下降速度要快于投资品。

**关键词** 能源效率, SDA 模型, 全球面板模型

**DOI:** 10.13821/j.cnki.ceq.2020.01.13

## 一、引 言

能源是生产和生活活动中的重要投入要素,能源的使用往往与经济发展密切相关。图 1 给出了 1965 年以来全球能源消费量与 GDP 的变化。过去的几十年间,全球能源消费随着经济增长保持不断上升的趋势,二者呈现较强的同步性。期间能源消费对 GDP 的长期弹性为 0.594。较高的能源消费—GDP 弹性的背后,隐含的是较低的全球能源效率提升速度。1965—2016 年,全球能源强度<sup>1</sup>仅下降了 33.0%,年均降幅不足 0.7%。未来随着全球经济的增长,全球能源消费仍有可能不断上升。由于目前的能源结构还是以化石能源为主,能源消费的增长将给碳排放控制与环境保护带来很大的压力。

但是,主要能源消费大国的能源效率<sup>2</sup>提升速度却与全球能源效率提升速

\* 林伯强、吴微,厦门大学管理学院中国能源政策研究院,能源经济与能源政策协同创新中心。通信作者及地址:吴微,福建省厦门市思明南路 422 号,厦门大学管理学院中国能源政策研究院,361005;电话:15960259291;E-mail:weiwu\_ep@xmu.edu.cn。本文得到厦门大学“双一流”基金、教育部重大课题(10JBG013)、国家社会科学基金(17AZD013)、教育部人文社会科学研究一般项目(20YJC790148)和中央高校基本科研业务费专项资金(20720201019)资助。感谢多位专家、北京大学国家发展研究院的王敏老师以及匿名审稿人对本文提出的建设性意见。当然,文责自负。

<sup>1</sup> 能源强度是指单位 GDP 的能源消耗。

<sup>2</sup> 能源效率包括能源技术效率、单要素能源效率、全要素能源效率等类型。能源强度是单要素能源效率的衡量指标,其能够较为直观地被用来比较能源效率。国际能源署、世界银行等国际机构一般都采用能源强度来度量能源效率。因此,本文也使用能源强度表示能源效率。

度存在明显的差异。图 2 给出了部分国家能源消费量和 GDP 的变化, 其中美国、德国、英国、法国和日本等发达国家的能源消费量上升到一定水平后, 在 GDP 持续增长的同时能源消费都保持平稳甚至出现下降。如 Csereklyei and Stern (2015) 所指出的, 高收入国家的能源消费已经与经济增长脱钩。这种现象也常常被称为能源和环境库兹涅茨曲线 (Suri and Chapman, 1998)。以美国为例, 其能源消费量在 2000—2016 年间几乎没有发生变化, 但同期 GDP 总量却增长了 33.1%。而中国的能源消费虽然快速上升, 但能源强度也在持续下降。中国的单位 GDP 能耗在“十一五”期间下降了 19.1%, “十二五”期间下降了 18.2%, 降幅远高于全球平均水平。

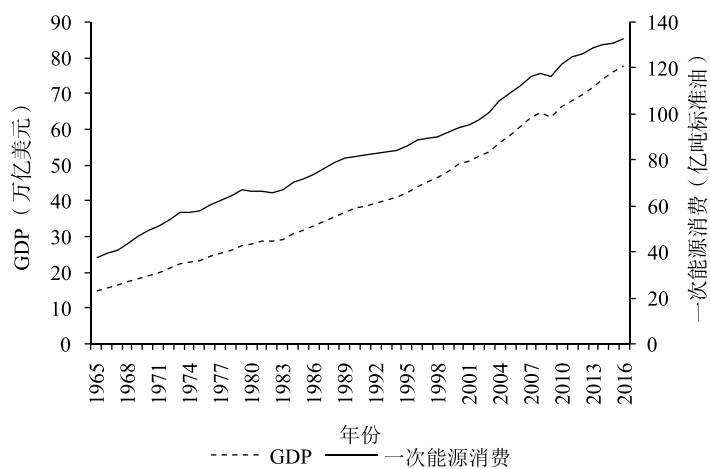


图 1 全球能源消费与经济增长

注: 图中 GDP 单位为 2010 年不变价美元。

资料来源: 一次能源消费数据来源于《BP 世界能源统计年鉴》, GDP 数据来源于世界银行公开数据。

那么, 是什么导致了全球能源效率提升速度缓慢? 为什么全球能源效率的提升速度要慢于主要能源消费大国的能源效率提升速度? 能源效率的变化是否与经济发展水平之间存在一定的规律? 解释这些问题, 对理解全球能源消费变化的特点, 合理进行能源规划有着较为重要的意义。同时, 短期内全球能源结构很难摆脱对化石能源的依赖。关于能源强度与经济增长规律的研究, 对控制全球碳排放、分配减排义务、实现可持续发展的公平性原则等议题也能提供一定的政策启示。

关于能源强度的变化, 许多研究从不同角度出发进行了解释。在这些研究中, 能源强度的影响因素主要可以归为几个方面: 第一个因素是投资率的变化。林伯强和吴微 (2018) 认为, 投资品的能源强度要高于消费品, 资本形成占总产出的比重即投资率的变化会影响到能源的消费量。Song and Zheng (2012) 对中国省级层面的能源强度变化进行研究, 发现投资率的变化对于能

源强度有着很大的影响。第二个因素是经济结构的变化。何建坤和张希良(2005)提出产业结构的变化,特别是重工业占比的提升会使中国能源强度上升。王晓和齐晔(2013)则认为加快生产性服务业的发展和工业结构的优化调整是降低能源强度的主要手段。第三个因素是技术进步和效率提升。韩志勇等(2004)将能源强度变化分解为结构份额和效率份额,并指出能源强度的改变同时受到经济结构变化和能源效率提升的影响。林伯强和杜克锐(2014)建立了一个综合的分解框架,发现技术进步是能源强度下降的主要推动力。Voigt *et al.* (2014)对1995—2007年间全球40个国家和地区能源强度变化的影响因素进行了分析,结果发现效率的提升是能源强度下降的主要因素,而结构变化的影响较小。

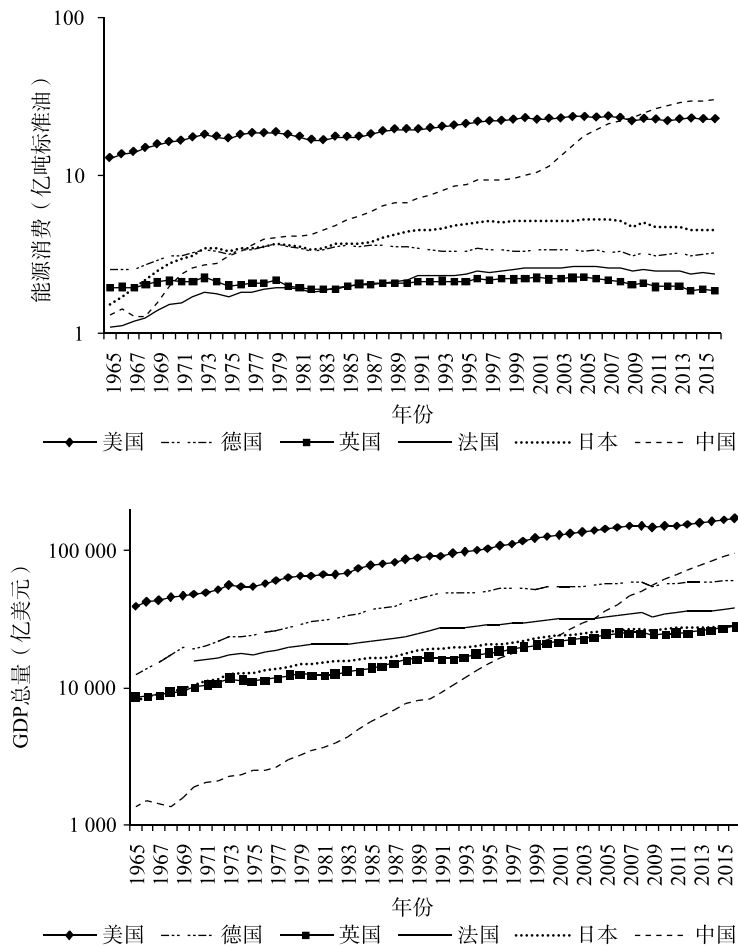


图 2 部分国家能源消费量与 GDP 总量变化

注：纵坐标为对数坐标，GDP 单位为 2010 年不变价美元。

资料来源：《BP 世界能源统计年鉴》。

此外,国际贸易与全球经济结构变动也会影响各国的能源强度。樊茂清等(2009)指出,技术变化、部门结构、贸易以及能源结构等因素都会对能源强度产生影响。Ahmad and Wyckoff(2003)分析了部分国家贸易中的隐含能源,发现经济较为发达的OECD国家,大部分是隐含能源净进口国。这也说明发达国家的能源消费下降可能受益于国际贸易所带来的能源消费转移。谢建国和姜珮珊(2014)利用OECD投入产出表,对中国的隐含能源进行了计算,发现对外贸易在1995—2005年间提升了中国的能耗水平。周申等(2014)也指出,贸易结构的变化会对能源消耗产生影响。当然,影响能源强度的因素较为复杂,其他的一些观点包括:魏楚和郑新业(2017)发现市场分割会对能源效率产生负面影响;Zeng *et al.*(2014)利用结构分解分析对中国能源强度变化的驱动力进行研究,发现出口和基础设施建设是导致能源强度上升的原因;何晓萍(2014)发现电网基础设施的发展能够促进能源强度下降。

上述研究讨论了能源强度变化的直接驱动因素,而经济发展水平则是引发这些因素变化的深层次原因。能源效率与发展水平之间有着较为密切的联系。Suri and Chapman(1998)发现,更高的收入水平往往对应着更低的能源强度。Galli(1998)对亚洲地区国家长期的收入水平和能源强度进行的研究也表明能源强度会随着人均GDP的提升而下降,但这种下降是非线性的。Metcalf(2008)对美国能源强度变化的研究同样表明能源强度会随着人均收入水平的上升而下降。Wu *et al.*(2018)对中国城市能源强度的影响因素进行研究,发现收入水平会显著影响城市的能源强度。Grossman and Krueger(1991)将库兹涅茨曲线的概念引申到环境问题的分析,发现随着收入水平的提升,污染会先上升后下降。由于能源消费与污染物排放有着很强的关联度,相关研究很快就扩展到了能源消费的库兹涅茨曲线上。林伯强和蒋竺均(2009)分析中国碳排放环境库兹涅茨曲线,指出能源强度的下降是实现碳排放达峰的重要影响因素。Rostow(1990)的经济起飞理论则认为经济在起飞阶段与走向成熟阶段,投资率会上升并维持在较高水平。而到了大众消费阶段,服务业的占比会上升。由于投资品的能源强度要高于消费品,经济发展的阶段性特点也可能是能源消费呈倒U形曲线的原因。

在分析能源强度变化时,需要综合考虑资本形成占比、经济增长、国际贸易导致的隐含能源转移以及经济结构等因素。但是,现有的研究中,大多是选择影响能源强度的一个或数个因素进行分析。虽然有部分研究从多角度对能源强度影响因素进行讨论,但是较少关注到能源强度的动态演变,从全球经济结构变化角度出发的研究也不多。同时,现有文献更多的是对生产过程的能源消耗进行测算,较少同时考虑隐含能源转移以及消费品和投资品两类不同用途商品的差异。本文在现有研究的基础上,从结构分解和面板回归两个维度出发,对影响全球能源强度的因素进行研究。具体的内容和可能的

贡献有以下几点：

第一，基于2016发布的新版世界投入产出表，将能源数据更新到2014年，并对2000—2014年间全球能源强度变化的影响因素进行分解，探讨了投资率、消费结构、投资结构以及技术进步对能源强度的影响。本文在测算的过程中，针对最终使用商品的能源强度进行分析，使结果能够包含国际贸易导致的隐含能源转移。同时，根据最终使用的不同，将商品分为了投资品和消费品，并分别考虑了二者的影响。这些切入点在现有的研究中较为少见。

第二，对消费结构和投资结构变动进行二次分解，从全球经济比重变化以及各国内部结构变化的角度解释了全球能源效率提升缓慢的原因。相关研究有助于探究全球能源消费未来的发展趋势，并说明能源结构清洁转型的紧迫性。

第三，构建了全球能源强度面板模型，对人均收入增速与能源强度演变的规律进行实证分析，说明加快经济增长速度有助于更快地降低能源强度，同时还对投资品和消费品能源效率变化的差异进行比较。相关结论对于理解后发国家的能源消费增长路径，以及合理分配碳减排义务具有一定的参考价值。

## 二、方法论与数据

### （一）全球投入产出模型

能源除了直接用于终端消费外，还有很大一部分比例是转移到其他商品中的。而随着全球化的发展，世界各国的产业结构也发生着深刻的变化。国家间投入产出模型，是研究国际产业和贸易关联以及相关的能源与环境问题的重要工具（张亚雄等，2010）。国家间投入产出模型是一国投入产出模型的扩展。利用全球投入产出表和国家间投入产出模型的建模方法，可以构建全球投入产出模型。

国家间的直接投入系数矩阵如式（1）所示。其中 $A^{k,l}$ 表示 $l$ 国对 $k$ 国的直接消耗系数矩阵， $n$ 表示国家或地区的数量。当 $k=l$ 时， $A^{k,k}$ 就表示 $k$ 国内部各产业部门间的直接消耗系数矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} A^{1,1} & A^{1,2} & \cdots & A^{1,n} \\ A^{2,1} & A^{2,2} & \cdots & A^{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{n,1} & A^{n,2} & \cdots & A^{n,n} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

直接消耗系数矩阵 $A^{k,l}$ 反映了 $l$ 国各产业部门生产过程中对于 $k$ 国各产业部门产品的需求情况。直接消耗系数矩阵可以表示为式（2），其中， $a_{i,j}^{k,l}$ 是直接消耗系数，其表示 $l$ 国 $j$ 部门每生产一单位的产品，对于 $k$ 国 $i$ 部门产品的

需求量。 $m$ 表示产业部门的数量。

$$A^{k,l} = \begin{bmatrix} a_{1,1}^{k,l} & a_{1,2}^{k,l} & \cdots & a_{1,m}^{k,l} \\ a_{2,1}^{k,l} & a_{2,2}^{k,l} & \cdots & a_{2,m}^{k,l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1}^{k,l} & a_{m,2}^{k,l} & \cdots & a_{m,m}^{k,l} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

直接消耗系数  $a_{i,j}^{k,l}$  可以根据投入产出表中  $l$  国  $j$  部门对  $k$  国  $i$  部门产品的需求量  $x_{i,j}^{k,l}$  以及  $l$  国  $j$  部门的总产出  $X_j^l$  计算(式(3))。

$$a_{i,j}^{k,l} = \frac{x_{i,j}^{k,l}}{X_j^l} \quad (i, j=1, 2, \dots, m; k, l=1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

投入产出表的行平衡关系如式(4)所示。各国各部门的产品,最终被用于各个国家部门的中间投入,以及各国的最终消费。其中  $y_j^{l,k,f}$  表示  $l$  国  $j$  部门的产出中用于  $k$  国  $f$  类最终使用的数量。 $u$  为最终使用的种类,其可以包括不同主体的消费、资本形成以及存货等。

$$X_j^l = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m x_{j,i}^{l,k} + \sum_{k=1}^n \sum_{f=1}^u y_j^{l,k,f}. \quad (4)$$

投入产出表的列平衡关系则如式(5)所示,其中  $Va$  表示增加值,  $Tax$  表示税收,  $Mar$  表示国际贸易带来的收益。

$$X_i^k = \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m x_{j,i}^{l,k} + Va_i^k + Tax_i^k + Mar_i^k. \quad (5)$$

令  $y_j^{l,k}$  表示  $l$  国  $j$  部门产品用于  $k$  国最终使用的向量(式(6)),  $Y$  表示最终使用矩阵(式(7))。 $Y$  共有  $n \times m$  行,  $n \times c$  列。其中各行对应所有国家的产品部门,各列对应所有国家的最终使用。对  $Y$  的各个行向量求和,得到最终使用向量  $FU$ 。

$$y_j^{l,k} = [y_j^{l,k,1} \quad y_j^{l,k,2} \quad \cdots \quad y_j^{l,k,c}], \quad (6)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1^{1,1} & y_1^{1,2} & \cdots & y_1^{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_m^{1,1} & y_m^{1,2} & \cdots & y_m^{1,n} \\ y_1^{2,1} & y_1^{2,2} & \cdots & y_1^{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_m^{n,1} & y_m^{n,2} & \cdots & y_m^{n,n} \end{bmatrix}_{(n \times m) \times (n \times c)}. \quad (7)$$

令  $X^l = [X_1^l \quad X_2^l \quad \cdots \quad X_m^l]^T$  表示  $l$  国各部门的产出向量,再将各国的产出向量合并为全球的产出向量  $X = [X^{1T} \quad X^{2T} \quad \cdots \quad X^{nT}]^T$ 。根据直接消耗系数矩阵,也可以把式(4)表示为式(8)的形式。

$$X = A \times X + FU. \quad (8)$$

利用直接消耗系数矩阵,还可以计算列昂剔夫逆矩阵(式(9))。列昂剔夫逆矩阵  $B = \{b_{i,j}^{l,k}\}$  中的元素  $b_{i,j}^{l,k}$  表示对  $k$  国  $j$  部门产出每增加一单位的

最终使用，所产生的对  $l$  国  $i$  部门的产品需求。

$$B = (I - A)^{-1}. \quad (9)$$

对列昂剔夫逆矩阵与最终使用矩阵求矩阵乘积，就可以得到各国各部门的产品被最终用于各个国家最终使用的数量。如式 (10) 所示，矩阵  $C$  表示最终使用的完全消耗量。 $C = \{c_{ij}^{l,k,f}\}$  同样是一个  $n \times m$  行， $n \times c$  列的矩阵，其元素  $c_{ij}^{l,k,f}$  表示  $k$  国  $l$  类最终使用对于  $l$  国  $i$  类商品的消耗量。

$$C = B \times Y. \quad (10)$$

各国各部门的产出，最后都是直接或间接地用于最终使用。因此最终使用的数量也满足式 (11) 的平衡关系。

$$X_i^l = \sum_{k=1}^n \sum_{f=1}^m c_{ij}^{l,k,f}. \quad (11)$$

## (二) 完全能源强度与结构分解模型

在传统的能源强度评价中，一般是从生产的角度，计算单位产出的能源消耗水平。但是，这样的评价机制也存在一些不足：一方面，在全球化不断深化的背景下，国家间的经济联系越来越紧密。各国的产出中有很大大一部分比例是作为其他国家的投入。而如果仅仅从生产侧出发，对能源强度进行评价，有可能忽略了国家间的隐含能源转移。这将导致高估或低估一个国家真正用于发展自身（投资）和满足消费需求（消费）的能源消费量。另一方面，不同国家的发展阶段不同，资本积累占总产出的比例也不相同。投资品和消费品特点的不同导致其能源强度存在差异。简单地用经济总体的能源强度来衡量能源使用效率无法反映出该差异性。

如果从需求侧出发，利用完全能源强度来评价能源效率，则可以更好地反映出最终使用需求的实际能源消耗。完全能源强度表示每提供一单位的最终使用商品，直接和间接的能源消耗的总和。完全能源强度的计算方法如式 (12)，其中  $ei_j^k$  表示  $k$  国  $j$  部门提供每单位最终使用的能源消耗量，其可以根据列昂剔夫逆矩阵中能源部门的消耗系数计算。因为投入产出表最终是以货币价值来衡量各部门的产出的，因此要计算能源消耗的实物量，还需要对各国能源部门产出进行价值量到实物量的换算。换算系数  $et_i^l$  表示  $l$  国  $i$  能源部门每单位价值量产出，对应的能源实物量，具体计算如式 (13)，其中， $ER_i^l$  表示  $l$  国  $i$  能源部门的能源实物产量， $X_i^l$  则对应该部门的总产出价值。

$$ei_j^k = \sum_{l=1}^n \sum_{i \in Energy} b_{ij}^{l,k} et_i^l, \quad (12)$$

$$et_i^l = ER_i^l / X_i^l, \quad i \in Energy. \quad (13)$$

结构分解分析 (Structural Decomposition Analysis, SDA) 是利用投入产出分析方法中的一项重要分解技术 (Zeng *et al.*, 2014)。通过建立 SDA 模型，可对能源强度的变动进行分解分析 (Wang *et al.*, 2017)。投资品和消费

品的能源强度有着较大的差异,因此投资率的变化会影响到总体的能源强度。此外,不同的投资品和消费品的能源强度也不相同,投资品和消费品内部结构的变化会对总体的能源强度产生影响。随着技术进步,商品在生产过程中的能源投入,以及通过中间投入品消耗的能源投入也会下降,这最终也会影响到整体的能源强度。本文构建的 SDA 模型,考虑了投资率<sup>3</sup>、消费品内部结构、投资品内部结构以及技术进步四方面的影响。能源强度可以表述为式(14),其中, $EI^T$ 表示全球总体的能源强度; $s$ 表示投资率; $EI^{Inv}$ 表示投资品的能源强度; $EI^{Coms}$ 表示消费品的能源强度; $\epsilon^I$ 表示投资品的内部结构,即不同国家不同部门的最终产品在投资品中所占的比重; $\epsilon^C$ 表示消费品的内部结构。

$$\begin{aligned} EI^T &= sEI^{Inv} + (1-s)EI^{Coms} \\ &= s\epsilon^I ei + (1-s)\epsilon^C ei. \end{aligned} \quad (14)$$

$\epsilon^I$ 和 $\epsilon^C$ 都是 $n \times m$ 列的行向量,其计算公式如式(15)和式(16)。其中, $\epsilon_j^{Ik}$ 表示 $k$ 国 $j$ 部门的产出,在全球投资品最终使用中所占的比重; $\epsilon_j^{Ck}$ 表示 $k$ 国 $j$ 部门的产出,在全球消费品最终使用中所占的比重。

$$\epsilon_j^{Ik} = \sum_{k=1}^n \sum_{f \in Inv} y_j^{I,k,f} / \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{f \in Inv} y_j^{I,k,f}, \quad (15)$$

$$\epsilon_j^{Ck} = \sum_{k=1}^n \sum_{f \in Coms} y_j^{I,k,f} / \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{f \in Coms} y_j^{I,k,f}. \quad (16)$$

通过对能源强度进行结构分解,可以得到不同部分的影响。SDA模型在分解时通常采用四种模式:第一种是包括保留交叉项的分解;第二种是不保留交叉项,但是将交叉项分配到各自变量;第三种在分解时采用加权平均方法来处理;第四种则是两极分解法(李玲等,2017)。Dietzenbacher and Los(1998)指出,两极分解法能够得到比较好的近似解。两极分析法也被广泛地用于能源强度和碳排放的分解分析中(郭朝先,2010;李玲等,2017)。本文采用两极分解法,根据公式(14),对能源强度的变化进行分解。以基期为分解基准,SDA分解结果如式(17)。

$$\begin{aligned} \Delta EI^T &= \Delta s \times \epsilon_0^I ei_0 + s_1 \Delta \epsilon^I ei_0 + s_1 \epsilon_1^I \Delta ei - \Delta s \times \epsilon_0^C ei_0 + \\ &\quad (1-s_1) \Delta \epsilon^C ei_0 + (1-s_1) \epsilon_1^C \Delta ei. \end{aligned} \quad (17)$$

以报告期为分解基准,能源强度变化的 SDA 结果如式(18)。

$$\begin{aligned} \Delta EI^T &= \Delta s \times \epsilon_1^I ei_1 + s_0 \Delta \epsilon^I ei_1 + s_0 \epsilon_0^I \Delta ei - \Delta s \times \epsilon_1^C ei_1 + \\ &\quad (1-s_0) \Delta \epsilon^C ei_1 + (1-s_0) \epsilon_0^C \Delta ei. \end{aligned} \quad (18)$$

结合式(17)和式(18),可以得出能源强度变化的分解结果为 $\Delta EI^T = (1) + (2) + (3) + (4)$ 。其中因素(1)解释的是投资率变动的影

<sup>3</sup> 本文在测算投资率时,根据各国的最终使用商品中的投资和消费进行测算。严格来讲,对于开放经济体,投资=国内投资+国外净投资。但是对全球而言,国外净投资的加和为0。因此投资率等于总投资除以总产出(总的最终使用)。



素 (2) 反映的是投资品内部结构变动的影响, 因素 (3) 反映了消费品内部结构变动的影响, 因素 (4) 对应的是技术进步的影响。各因素的计算见式 (19) — (22)。

$$(1) = \Delta s (\epsilon_0^I ei_0 - \epsilon_0^C ei_0 + \epsilon_1^I ei_1 - \epsilon_1^C ei_1) / 2, \quad (19)$$

$$(2) = \Delta \epsilon^I (s_1 ei_0 + s_0 ei_1) / 2, \quad (20)$$

$$(3) = \Delta \epsilon^C [(1-s_1) ei_0 + (1-s_0) ei_1] / 2, \quad (21)$$

$$(4) = \Delta \epsilon^I [s_0 \epsilon_0^I + (1-s_0) \epsilon_0^C + s_1 \epsilon_1^I + (1-s_1) \epsilon_1^C] / 2. \quad (22)$$

### (三) 数据来源与处理

国家间投入产出模型的核心数据是多国投入产出表 (张亚雄等, 2010)。本文使用了世界投入产出数据库 (World Input-Output Database, WIOD) 2016 年发布的世界投入产出表 (World Input-Output Table, WIOT)。WIOT 包含了全球 44 个国家和地区 56 个部门从 2000—2014 年的数据, 是目前最为完整的全球投入产出表 (Timmer *et al.*, 2015)。

WIOT 的最终使用分为五类, 分别是: 居民消费、服务居民的非盈利组织消费、政府消费、固定资本形成和存货 (Dietzenbacher *et al.*, 2013)。为了便于分析, 我们将居民消费、服务居民的非盈利组织消费与政府消费三项合并为消费品, 而将固定资本形成和存货合并为投资品。

2016 版的 WIOT 目前并未发布各国各部门的实际能源消费量, 体现在 WIOT 中的只有价值量的信息。因此, 本文又根据世界银行公开数据库 (World Bank Open Data, WBOD) 和《BP 世界能源统计年鉴》数据<sup>4</sup>, 对各国和各地区的能源生产量进行了计算。

WIOD 中包含了全球 43 个主要国家和地区的投入产出表, 同时其他的国家和地区统一并入了“世界其他地区”。因此共有 44 个国家和地区。由于 WIOD 中包含了中国台湾, 而 WBOD 中不含中国台湾的数据, 因此中国台湾的数据来自《BP 世界能源统计年鉴》。WIOD 中世界其他地区的一次能源生产量与消费量则根据全球总的一次能源生产与消费, 减去 WIOT 中的 43 个国家和地区的一次能源生产与消费数据计算得到。各国的化石能源和非化石能源生产量数据则根据 WBOD 中化石能源和非化石能源的占比与一次能源生产量计算得到。

各国人均 GDP 数据来源于 WBOD 中的 2010 年不变价美元<sup>5</sup>。考虑到各国货币对美元汇率波动可能会影响到人均 GDP 的计算, 因此, 除了 2010 年

<sup>4</sup> WBOD 数据公开数据地址: <https://data.worldbank.org.cn/>。《BP 世界能源统计年鉴》数据地址: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/excel/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-all-data.xlsx>, 访问日期: 2018 年 10 月 10 日。

<sup>5</sup> 本文的货币单位均为 2010 年不变价美元。

外,其余年份各国的人均GDP均采用GDP的实际增长率与人口数量变化进行计算。例如,2011年的人均GDP=2010年人均GDP×(1+2011年实际GDP增长率)/(1+2011年人口增长率)。

### 三、能源效率变化的SDA分解

图3给出了2000—2014年全球完全能源消耗强度的变化。其中,消费品的能源强度下降的幅度较大,投资品的能源强度则出现了上升。全球总的能源强度则是呈现出缓慢下降的趋势。在最终使用的商品中,消费品占70%以上的比重。因此消费品能源强度的下降对全球总能源强度的影响较大。

投资品和消费品能源强度变化的原因可能较为复杂。一方面,随着经济的增长,投资品和消费品的结构会发生变化。由于不同生产部门的能源强度不同,因此结构变化后投资品和消费品的能源强度相应地会出现变动。另一方面,随着能源使用效率的提升,生产过程中的能源消耗也可能不断下降,并使得最终使用商品的能源强度出现下降。

投资品的能源强度要远远高于消费品。这主要是因为投资品中包含了钢铁、水泥、机械设备等能源强度较高的重工业部门产品,而消费品中服务业和轻工业产品占了较大的比重,其能源强度也因此相对较低。投资品和消费品能源强度的差异,说明投资率的变化会直接影响到全球总体的能源强度。

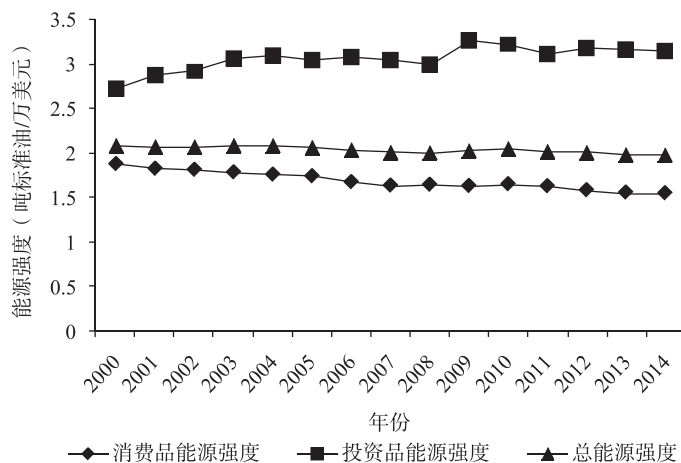


图3 全球能源强度的演变

#### (一) 投资率、结构变动、技术进步与能源效率

能源效率可能会受投资率、投资和消费结构以及技术进步的影响。为了对这些因素的影响进行定量计算,本节利用全球投入产出数据库的数据,对

2000—2014年间全球能源强度变化的影响因素进行SDA分析。

表1给出了全球能源强度变化的SDA分解结果。其中，技术进步对能源效率有明显的正向影响。技术进步的影响，反映的是在生产产品的过程中，直接和间接的能源消耗总的变化，即各部门完全能源强度的下降。技术进步的因素在2000—2014年共使能源强度下降了一0.8537万吨标准油/万美元。如果按照比例计算，技术进步使能源强度下降的幅度为42%，即每年下降3.8%。技术进步带来的能源强度下降速度要远远高于全球能源强度的变化。如果全球经济结构维持现有的结构按同比例增长，只要经济增速低于3.8%，能源消费总量就会出现下降。

既然技术进步的影响非常显著，那么为什么在2000—2014年间，全球能源效率（能源强度）的变化却较为缓慢？在样本区间内，由于消费结构变动使能源强度上升了14.0%，投资结构的变动使能源强度上升了20.7%。消费和投资结构的变动，在很大程度上抵消了技术进步带来的能源强度下降。结构的变动可以从两方面进行解释：第一，随着全球发展水平的提升，产品中的重化工工业部门产品比重增加。比如在低收入国家发展的初期，随着收入水平提升，对于交通运输、机器设备的需求会增长得更快一些。这些部门产品的能源强度往往相对较高，其占总产出比重的上升会导致总体的能源强度上升。第二，全球的经济格局发生了较大的变化，中国、印度等发展中国家在全球的经济比重不断上升，而发达国家在全球经济的比重则不断下降。一般而言，收入水平越低的国家，其能源强度越高（Galli, 1998）。而低收入国家最终使用占比的提升，则可能导致全球能源强度出现上升。

投资率对能源强度的影响并不大，这主要是因为样本区间内，全球的投资率仅从24.0%上升到26.4%。需要说明的是，投资率的边际影响较大。根据模型中的系数进行计算，可以得出投资率每上升1%，全球能源强度与能源消费将提升0.77%。投资（资本形成）是经济长期发展的动力。根据新古典经济增长模型，落后国家要实现向发达国家的趋同，人均资本存量需要快速的提升。林伯强和吴微（2018）对中国和部分发达国家的资本存量进行比较，发现人均GDP较高的国家往往有较高的人均资本存量，而且发达国家的人均资本存量水平要远远高于中国。中国要实现快速增长，可能还需要较高的投资率，相应地能源需求也将持续上升。Rostow（1990）的经济起飞理论也认为，后发展国家要实现经济的快速增长并向发达国家趋同，需要维持较高的资本形成速度。目前发达国家和发展中国家之间存在着巨大的差异。而发展中国家中，除了中国等少数国家外，投资率并不高。未来如果全球经济要实现更加均衡的发展，国家间的差距要实现缩小，总体的投资率仍然可能上升，这也会对能源效率的提升产生不利影响。

表 1 全球能源强度演变结构分解

时间段	能源强度影响 (万吨标油/万美元)				对全球能源强度的影响比例 (%)			
	投资率	投资结构	消费结构	技术进步	投资率	投资结构	消费结构	技术进步
2000—2001	-0.0084	0.0457	0.0027	-0.0536	-0.4	2.2	0.1	-2.6
2001—2002	-0.0031	-0.0042	-0.0079	0.0134	-0.1	-0.2	-0.4	0.6
2002—2003	0.0049	0.0311	-0.0038	-0.0167	0.2	1.5	-0.2	-0.8
2003—2004	0.0107	0.0321	0.0347	-0.0798	0.5	1.5	1.7	-3.8
2004—2005	0.0060	0.0458	0.0775	-0.1494	0.3	2.2	3.7	-7.2
2005—2006	0.0126	0.0547	0.0418	-0.1363	0.6	2.7	2.0	-6.6
2006—2007	0.0085	0.0272	0.0219	-0.0862	0.4	1.3	1.1	-4.2
2007—2008	0.0018	0.0444	0.0549	-0.1063	0.1	2.2	2.7	-5.3
2008—2009	-0.0333	0.0162	-0.0605	0.1003	-1.7	0.8	-3.0	5.0
2009—2010	0.0211	0.0414	0.0690	-0.1061	1.0	2.0	3.4	-5.3
2010—2011	0.0112	0.0340	0.0506	-0.1279	0.5	1.7	2.5	-6.3
2011—2012	0.0042	0.0360	0.0080	-0.0610	0.2	1.8	0.4	-3.0
2012—2013	-0.0022	0.0100	0.0080	-0.0408	-0.1	0.5	0.4	-2.0
2013—2014	0.0055	0.0067	-0.0133	-0.0032	0.3	0.3	-0.7	-0.2
合计	0.0395	0.4209	0.2836	-0.8537	1.9	20.7	14.0	-42.0

## (二) 终端结构的影响

在前文的分析中,投资品和消费品结构变动使得全球能源强度出现了较大幅度的上升。为了探究该现象的原因,同样可以利用 SDA 分解对投资品和消费品内部结构变动的影响因素进行分析。结构比例系数  $\epsilon^I$  和  $\epsilon^C$  反映的是全球的最终使用中,各国各部门产品的占比,其又可以按式 (23) 和式 (24) 进行表述。其中  $\epsilon_j^{I,l}$  代表  $l$  国  $j$  部门的产出在投资品使用中的比重。 $\lambda^{I,l}$  代表  $l$  国投资品使用占全球的比重,  $\eta_j^{I,l}$  表示  $l$  国  $j$  部门的投资品占该国投资品的比重,  $\epsilon_j^{C,l}$  代表  $l$  国  $j$  部门的产出在消费品使用中的比重。 $\lambda^{C,l}$  代表  $l$  国消费品使用占全球的比重,  $\eta_j^{C,l}$  表示  $l$  国  $j$  部门的消费品占该国消费品的比重。

$$\epsilon_j^{I,l} = \lambda^{I,l} \eta_j^{I,l}, \quad (23)$$

$$\epsilon_j^{C,l} = \lambda^{C,l} \eta_j^{C,l}. \quad (24)$$

利用两极分解法,可以将投资品和消费品的结构变动写成式 (25) 和式 (26) 的形式。其中,各国投资和消费占全球比重的变化  $\Delta\lambda^I$  和  $\Delta\lambda^C$  反映的是

各国在全球经济比重的变化，而  $\Delta\eta^I$  和  $\Delta\eta^C$  则对应行业结构的变化。

$$\Delta\epsilon^I = \Delta\lambda^I (\eta_0^I + \eta_1^I) / 2 + \Delta\eta^I (\lambda_0^I + \lambda_1^I) / 2, \quad (25)$$

$$\Delta\epsilon^C = \Delta\lambda^C (\eta_0^C + \eta_1^C) / 2 + \Delta\eta^C (\lambda_0^C + \lambda_1^C) / 2. \quad (26)$$

将式(25)和式(26)代入式(20)和式(21)中，可以对投资品和消费品结构变动进行进一步分解，具体如式(27)——(30)所示。其中，因素(5)和(7)反映的是各国总产出占全球比重变化的影响。因素(6)和(8)反映了各国产业结构变化的影响。

$$(5) = \Delta\lambda^I (\eta_0^I + \eta_1^I) (s_1 ei_0 + s_0 ei_1) / 4, \quad (27)$$

$$(6) = \Delta\eta^I (\lambda_0^I + \lambda_1^I) (s_1 ei_0 + s_0 ei_1) / 4, \quad (28)$$

$$(7) = \Delta\lambda^C (\eta_0^C + \eta_1^C) [(1-s_1) ei_0 + (1-s_0) ei_1] / 4, \quad (29)$$

$$(8) = \Delta\eta^C (\lambda_0^C + \lambda_1^C) [(1-s_1) ei_0 + (1-s_0) ei_1] / 4. \quad (30)$$

表2给出了投资品和消费品内部结构SDA分解的结果。其中，各国经济比重的变化，对全球能源强度的影响最大。2000—2014年间共使全球能源强度上升了28.9%。这说明全球的经济结构在这期间发生了很大的变化：能源效率相对较低的发展中国家，在全球经济的比重不断上升；而能源效率相对较高的发达国家在全球经济的比重则不断下降。产业结构的变化也对能源强度有着一定的影响，2000—2014年间共使能源强度上升了5.7%。产业结构的变化，反映的是最终使用对于不同部门产品需求的变化。在经济发展的不同阶段，终端需求结构存在较大的差异。当发展水平较低时，随着工业化的推进，能源强度较高的重化工业的产品需求占比会上升，并使整体能源强度上升。

根据世界银行数据，2017年高收入国家的人口占全球总人口的比重仅为16.6%。<sup>6</sup>大部分人口都仍然生活在收入水平较低的发展中国家。而发展权是最基本的人权，也理应是所有国家所平等拥有的权利。随着发展中国家不断向发达国家趋同，其占全球经济的比重仍将上升。由于发展中国家的能源强度要高于发达国家，未来全球总体的能源效率将很难提升。与之对应的，全球能源消费也将保持中高速增长。目前全球能源结构是以化石能源为主。根据《BP世界能源统计年鉴2018》的数据，2017年全球能源结构中化石能源的比重高达85.2%，此外水能和核能的占比为11.2%，可再生能源的比重仅为3.6%。水能的发展受到自然资源禀赋的约束，核能增长往往会受到民意、政治以及安全顾虑的制约，二者均较难有大的增长。单纯依靠可再生能源增长，在较长的一段时间内很难满足增量的能源需求。因此，在当前的条件下，全球实际上面临着在经济发展与碳排放控制之间进行抉择的困局。

<sup>6</sup> 世界银行公开数据，<https://data.worldbank.org.cn/>。

表2 投资与消费结构变动分解

时间	各国经济比重 (%)			产业结构 (%)		
	投资品	消费品	合计	投资品	消费品	合计
2000—2001	1.0	1.0	2.0	1.2	-0.8	0.3
2001—2002	1.2	-0.1	1.1	-1.4	-0.3	-1.7
2002—2003	0.8	-0.1	0.7	0.7	-0.1	0.6
2003—2004	1.0	0.6	1.6	0.6	1.0	1.6
2004—2005	1.2	1.5	2.7	1.0	2.3	3.3
2005—2006	1.6	1.3	2.9	1.1	0.8	1.8
2006—2007	1.7	1.5	3.2	-0.4	-0.4	-0.8
2007—2008	2.2	1.0	3.2	0.0	1.8	1.7
2008—2009	2.7	0.4	3.2	-1.9	-3.5	-5.4
2009—2010	1.1	1.4	2.5	1.0	2.0	2.9
2010—2011	0.8	0.9	1.7	0.9	1.6	2.5
2011—2012	1.3	0.9	2.2	0.5	-0.5	0.0
2012—2013	0.5	1.0	1.5	0.0	-0.6	-0.6
2013—2014	0.4	0.1	0.5	-0.1	-0.8	-0.9
合计	17.6	11.4	28.9	3.1	2.6	5.7

#### 四、全球能源强度演变的实证分析

SDA 分解定量地测算了各项因素的影响大小,但是对于驱动能源强度变化的深层次原因,SDA 分解并没有办法做出解释。事实上,经济结构和技术进步等因素与经济发展水平都有着十分紧密的联系。不同的经济发展阶段,会有着不同的投资率需求 (Rostow, 1990)。随着经济发展水平的提升,对于商品的需求结构也可能会发生变化。同时,发展水平越高的国家,也更有能力使用更先进的技术,以抑制能源消费。为了探究发展水平对能源强度的影响,本部分建立全球能源强度面板模型,对各国能源强度的变化规律进行实证分析。

投资品和消费品能源强度的大小以及变化规律存在差异。因此,模型将投资品和消费品的能源强度都作为被解释变量,分别进行回归。从各国的截面数据来看,能源强度与人均 GDP 水平有着很强的负相关关系。一般而言,人均 GDP 越高,能源强度就越低 (Galli, 1998)。从时间趋势上看,能源强度是缓慢下降的。这说明除了经济发展水平提升外,能源效率在全球范围内也

有可能随着时间推移存在普遍性的提升。因此，在构建回归模型时，选取人均 GDP 和时间趋势项作为能源强度的解释变量。

在分析能源强度的变化时，还需要考虑能源强度下降速度可能存在的递减的现象。一方面，随着经济发展水平的提升，经济增长带来的投资品和消费品的内部结构调整的影响可能逐渐变弱，要降低能源强度也会越来越困难。另一方面，随着能源效率的提升，各国的能源技术效率逐渐接近技术前沿，能源强度的下降可能会变得更加困难。为了检验能源效率的提升速度是否存在递减效应，在对照模型中加入了人均 GDP 的平方项和时间的平方项。

为了考察能源强度的弹性，本部分对能源强度和人均 GDP 变量进行对数化处理。样本的描述性统计见表 3。其中变量  $\ln EI_{coms}$  表示消费品的能源强度的对数值， $\ln EI_{inv}$  是投资品能源强度的对数值，能源强度的单位为“吨标准油/万美元”。 $\ln GDP$  表示人均 GDP 的对数， $\ln GDP^2$  表示人均 GDP 对数的平方项，人均 GDP 单位为“万美元/人”。

表 3 样本描述性统计

变量名称	$\ln EI_{coms}$	$\ln EI_{inv}$	$\ln GDP$	$\ln GDP^2$
均值	0.597	0.785	0.710	1.485
中间值	0.516	0.798	0.815	1.191
最大值	2.223	4.010	2.416	6.625
最小值	-0.522	-6.634	-2.574	0.000
标准差	0.549	0.715	0.991	1.434
偏度	0.405	-1.091	-0.820	1.031
峰度	2.494	22.187	3.429	3.740
观测值数量	660	653	660	660
截面	44	44	44	44

表 4 给出了消费品能源强度的回归结果。考虑到各国经济规模、结构和特性有很大的不同，为控制横截面异方差的影响，回归选择截面加权估计法 (Cross Section Weights)。模型 1 控制了国家和地区固定效应与年份固定效应，考察人均 GDP 增长对于消费品能源强度的影响。其中能源强度对于人均 GDP 的弹性系数为 -0.709，说明人均 GDP 每上升 1%，消费品能源强度会下降 0.709%，人均 GDP 与能源强度有着很强的相关性。同时，系数的  $t$  值为 -14.068，显著水平较高，说明回归结果是较为稳健的。

为了考察能源强度随着时间推移而下降的速度，以及这种下降作用是否显著，模型 2 未对年份固定效应进行控制，而是加入了时间趋势项。结果中人均 GDP 的系数并没有太大的变化，而时间趋势项的系数为 -0.019，即每年的能源强度会下降 1.9%。模型 3 进而考察能源强度的下降随着时间的推移

是否会有递减的作用。时间的平方项虽然在10%的显著水平上为正,但是系数数值很小。这说明能源强度随时间推移其下降速度存在微弱的递减效应。模型4加入了人均GDP的平方项。从结果来看,人均GDP的平方项的系数数值很小,但显著水平较高。这说明消费品能源强度的下降速度会随着人均GDP水平的提升而递减,但递减的速率较慢。

表4 消费品完全能源消耗强度回归结果

	模型1	模型2	模型3	模型4
lnGDP	-0.709** (-14.068)	-0.742*** (-19.367)	-0.722*** (-18.339)	-0.761*** (-19.401)
lnGDP <sup>2</sup>				0.008*** (4.406)
T		-0.019*** (-19.322)	-0.025*** (-6.941)	-0.020*** (-18.919)
T <sup>2</sup>			0.000* (-1.689)	
国家与地区	是	是	是	是
年份	是	否	否	否
R <sup>2</sup>	0.957	0.955	0.955	0.956
样本数	660	660	660	660

注:\*、\*\*、\*\*\*分别表示在10%、5%、1%水平上显著,括号中数据是t统计量。以下各表与本表相同,不做重复说明。

表5给出了将投资品能源强度作为被解释变量的回归结果。其中,模型1控制了国家和地区固定效应与年份固定效应。回归结果表明人均GDP每上升1%,投资品的能源强度就会下降0.316%。投资品能源强度对人均GDP的弹性要低于消费品能源强度的弹性。这可能是由于随着收入水平的提升,消费品中服务业等能源强度低的商品占比会有较大的提升。而投资品主要还是以实物的形式来形成资本,因此能源强度的下降更为困难。

模型2只控制国家和地区固定效应,且加入时间趋势项,以考察投资品能源强度随时间的下降速度。结果表明,随着时间的推移,投资品能源强度每年会下降2.7%。模型3和模型4分别考虑投资品能源强度的下降速度是否会递减。其中,时间的平方项和人均GDP的平方项均不显著。这说明投资品能源强度能够随着时间的推移以及发展水平的提升而持续地下降。



表 5 投资品完全能源消耗强度回归结果

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
lnGDP	-0.316** (-2.169)	-0.279*** (-5.392)	-0.272*** (-5.235)	-0.316*** (-5.140)
lnGDP <sup>2</sup>				-0.0021 (-0.971)
T		-0.027*** (-18.770)	-0.026*** (-5.216)	-0.026*** (-16.719)
T <sup>2</sup>			-0.000 (-0.042)	
国家与地区	是	是	是	是
年份	是	否	否	否
R <sup>2</sup>	0.769	0.952	0.951	0.951
样本数	653	653	653	653

WIOT 中各个国家和地区的 GDP 总量也有很大的差异。2014 年，经济规模最大的美国 GDP 总量为 16.2 万亿美元，而经济规模最小的爱沙尼亚和塞浦路斯 GDP 总量仅为 230 亿美元左右。小国的经济往往对外依存度更高，波动性也更高。在面板回归中包含所有的国家和地区，并赋予其相同的权重是不合理的。因此，在基本模型的基础上，根据 GDP 总量的不同，进行了分子样本回归。其中，高 GDP 总量样本选取 2014 年 GDP 总量在 1 万亿美元以上的 17 个经济体，包括澳大利亚、巴西、加拿大、中国<sup>7</sup>、德国、西班牙、法国、英国、印度、意大利、日本、韩国、墨西哥、俄罗斯、土耳其、美国以及世界其他地区。中 GDP 总量的样本选择 GDP 总量在 1 千亿美元到 1 万亿美元的 17 个国家和地区，包括奥地利、比利时、瑞士、捷克共和国、丹麦、芬兰、希腊、匈牙利、印度尼西亚、爱尔兰、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、瑞典以及中国台湾地区。其余的样本则归类到低 GDP 总量的分组中。

分子样本回归的结果如表 6 所示。对于消费品，高 GDP 总量样本和中 GDP 总量样本的能源强度随 GDP 增长而下降的速度要低于总体样本，而低 GDP 总量分组的下降速度则要高于总体样本的回归结果。而对于投资品，高 GDP 总量样本的系数与总样本十分接近，但低 GDP 总量样本的下降速度要远远快于其他样本。这可能是由于小型经济体的经济结构更容易调整，也能够在更短的时间内采用节能技术。此外，全球化带来的专业分工对于小型经济

<sup>7</sup> WIOT 中的中国仅包含中国大陆，中国台湾地区作为一个单独的地区统计。

体的影响往往更大,这可能是小型经济体能源强度下降得更快的原因。

表6 分子样本回归结果

	消费品能源强度			投资品能源强度		
	高GDP总量	中GDP总量	低GDP总量	高GDP总量	中GDP总量	低GDP总量
lnGDP	-0.610*** (-16.180)	-0.352*** (-4.123)	-1.227*** (-16.852)	-0.241*** (-4.253)	-0.067 (-0.629)	-0.845*** (-5.640)
T	-0.016*** (-10.578)	-0.022*** (-15.685)	-0.017*** (-6.782)	-0.019*** (-10.359)	-0.023*** (-9.434)	-0.049*** (-9.899)
国家与地区	是	是	是	是	是	是
R <sup>2</sup>	0.973	0.975	0.959	0.976	0.940	0.919
样本数	255	255	150	255	255	144

当然,上述模型只能说明发展水平与能源强度具有很强的相关性。但是能源强度变化的内在机理仍然有待进一步的研究。对能源强度弹性测度的结果,隐含了一个重要的结论:经济增长速度越高,能源强度也会下降得越快。对于包括中国在内的发展中国家而言,往往会面临增长和控制能源消费的权衡。而加快发展速度,在长期上可能是控制能源消费、实现资源集约型发展的更为有效的手段。

利用实证模型的结果,不妨进一步对中国未来的能源需求增长进行讨论。中国的经济规模属于高GDP总量的分组。根据相应的模型结果,以及式(14)的计算方法,可以预测未来中国能源需求的变化。在投资率不发生变化的情况下,如果中国的GDP保持6.5%的增速,人均GDP的增长为5.85%<sup>8</sup>。每年能源强度的下降幅度为4%,一次能源消费增速仅为2.2%。这说明如果未来经济维持中高速增长,能源消费的增速将比前期大幅下降。

## 五、结论与启示

全球能源消费在最近几十年一直保持上升的趋势,这给环境保护和碳排放控制带来了很大的压力。降低能源强度,提升能源效率是抑制能源消费的重要手段。但长期来看,全球总体能源效率的提升速度却十分缓慢。本文构建了全球能源投入产出模型,对全球能源强度的演变进行了分析。主要的研究结论包括以下几点:

<sup>8</sup> 根据国务院《国家人口发展规划(2016—2030年)》中的规划,2015—2020年人口的年均增速为0.65%。根据模型外推,2017年中国消费品的能源强度为1.5626吨标准油/万美元GDP,投资品能源强度为3.6201吨标准油/万美元GDP,投资率为44.4%,假设净出口比重与对外贸易的隐含能源转移保持不变。

第一，2000—2014年间，技术进步使全球能源强度下降了42%，其对能源消费和能源强度有着明显的抑制作用。但投资品和消费品结构的变化，很大程度上抵消了技术进步带来的能源效率提升。样本区间内，投资品结构变化使得能源强度上升了20.7%，消费品结构变化使能源强度上升了14.0%。此外，投资率的上升也使能源强度上升了1.9%。

第二，结构变化主要体现为各国经济比重的变化。样本区间内，各国经济比重的变化使全球能源强度上升了28.9%。主要原因是能源强度相对较高的发展中国家在全球经济的比重不断提升。此外，由于各国内部产业结构的变动，使全球能源强度上升了5.7%。

第三，投资品和消费品的能源强度存在较大的差异。实证分析的结果表明，随着人均GDP的提升，各国的消费品和投资品的能源强度都会出现显著的下降。样本区间内消费品能源强度对人均GDP的弹性为-0.742，而投资品能源强度对人均GDP的弹性为-0.279。相比于投资品，消费品的能源强度更容易降低。随着时间的推移，消费品的能源强度每年会下降1.6%，投资品的能源强度每年下降1.9%。但是，消费品能源强度的下降速度存在微弱的递减。这可能是由于消费品能源强度较低，且更靠近技术前沿水平，要提升其能源效率会更为困难。

本文的研究发现，可以为中国以及其他国家能源与环境政策的制定提供一定启示：

首先，投资品的能源强度远高于消费品。随着投资率的上升，经济总体的能源强度也会增加。在过去十几年间，中国处于快速工业化的过程，投资率从2000年的34.3%上升到了2014年的46.8%，这是中国能源消费快速增长的重要原因之一。而目前中国的投资率已经达到较高的水平。未来如果投资率保持稳定，能源需求增长速度将较前期大幅降低。当GDP保持6.5%的增速时，能源需求的年增速将仅为2.2%。

其次，后发国家在向发达国家追赶的起飞阶段，经济增长速度会快于能源强度的下降速度，同时需要通过提升投资率来加快资本的积累，能源需求相应地会快速上升。但是随着收入水平的提升，经济增长速度会下降。且随着经济发展进入大众消费阶段，投资率也会降低。这使得能源需求在达到某个拐点后会稳定或出现下降。相关的研究为能源消费的库兹涅兹曲线提供了实证支撑。

再次，随着收入水平的提升，需求结构会发生变化，并对能源强度和能源消费产生抑制。能源强度的下降速度与经济的增长速度有着很强的相关性，提高经济增长速度可能是后发国家加快实现资源集约型发展的重要途径。对刻意限制高耗能行业发展的产业政策和环境政策的制定需要更加谨慎。

最后，发展中国家要实现经济快速增长，需要以较高的资本积累速度为支撑，同时其发展阶段对应的能源强度也相对较高。全球大多数人口当前生

活在发展中国家,只要发展中国家追赶发达国家这一趋势没有停止,全球能源消费仍然会保持较高的增速。由于现有的能源结构是以化石能源为主导,在能源需求保持中高速增长的情况下,要实现全球碳排放控制目标将十分困难。因此,需要倡导在全球层面加快能源结构的清洁转型。同时,发展中国家进行碳减排要承担较高的能源成本,可能对经济增长造成负面影响。在某种程度上存在能源使用权(排放权)和发展权之间的权衡。在应对气候变化的挑战时,中国所承担的义务应该与自身发展阶段相适应。同时,如果要加强全球碳排放的控制,人均累积碳排放较高的发达国家应该承担更多的责任,并为发展中国家的能源转型提供支持。

## 参考文献

- [1] Ahmad, N., and A. Wyckoff, "Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods", *OECD Science Technology & Industry Working Papers*, 2003, 25 (4), 1-22.
- [2] Csereklyei, Z., and D. I. Stern, "Global Energy Use: Decoupling or Convergence?", *Energy Economics*, 2015, 51 (9), 633-641.
- [3] Dietzenbacher, E., and B. Los, "Structural Decomposition Techniques: Sense and Sensitivity", *Economic Systems Research*, 1998, 10 (4), 307-324.
- [4] Dietzenbacher, E., B. Los, and R. Stehrer, "The Construction of World Input-Output Tables in the Wiod Project", *Economic Systems Research*, 2013, 25 (1), 71-98.
- [5] 樊茂清、任若恩、陈高才, "技术变化、要素替代和贸易对能源强度影响的实证研究", 《经济学》(季刊), 2009年第9卷第1期, 第237—258页。
- [6] Galli, R., "The Relationship Between Energy Intensity and Income Levels: Forecasting Long Term Energy Demand in Asian Emerging Countries", *The Energy Journal*, 1998, 19 (4), 85-105.
- [7] Grossman, G. M., and A. B. Krueger, "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement", *Social Science Electronic Publishing*, 1991, 8 (2), 223-250.
- [8] 郭朝先, "中国碳排放因素分解: 基于LMDI分解技术", 《中国人口·资源与环境》, 2010年第12期, 第4—9页。
- [9] 韩智勇、魏一鸣、范英, "中国能源强度与经济结构变化特征研究", 《数理统计与管理》, 2004年第1期, 第1—6页。
- [10] Hausman, J. A., "Specification Tests in Econometrics", *Econometrica*, 1978, 46 (6), 1251-1272.
- [11] 何建坤、张希良, "我国产业结构变化对GDP能源强度上升的影响及趋势分析", 《环境保护》, 2005年第12期, 第43—47页。
- [12] 何晓萍, "基础设施的经济增长效应与能耗效应——以电网为例", 《经济学》(季刊), 2014年第13卷第4期, 第1513—1532页。
- [13] 李玲、张俊荣、汤铃, "我国能源强度变动的影响因素分析——基于SDA分解技术", 《中国管理科学》, 2017年第9期, 第125—132页。
- [14] 梁巧梅、魏一鸣、范英, "中国能源需求和能源强度预测的情景分析模型及其应用", 《管理学报》, 2004年第1期, 第62—66页。
- [15] 林伯强、杜克锐, "理解中国能源强度的变化: 一个综合的分解框架", 《世界经济》, 2014年第4期, 第69—87页。

- [16] 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”，《管理世界》，2009 年第 4 期，第 27—36 页。
- [17] 林伯强、吴微，“中国现阶段经济发展中的煤炭需求”，《中国社会科学》，2018 年第 2 期，第 141—161 页。
- [18] Metcalf, G. E., “An Empirical Analysis of Energy Intensity and Its Determinants at the State Level”, *The Energy Journal*, 2008, 29 (3), 1-26.
- [19] Rostow, W. W., *The Stages of Economic Growth: A Non-Communist Manifesto*. Cambridge University Press, 1990.
- [20] Song, F., and X. Zheng, “What Drives the Change in China’s Energy Intensity: Combining Decomposition Analysis and Econometric Analysis at the Provincial Level”, *Energy Policy*, 2012, 51 (12), 445-453.
- [21] Suri, V., and D. Chapman, “Economic Growth, Trade and Energy: Implications for the Environmental Kuznets Curve”, *Ecological Economics*, 1998, 25 (2), 195-208.
- [22] Timmer, M. P., E. Dietzenbacher, and B. Los, “An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: The Case of Global Automotive Production”, *Review of International Economics*, 2015, 23 (3), 575-605.
- [23] Voigt, S., E. D. Cian, and M. Schymura, “Energy Intensity Developments in 40 Major Economies: Structural Change or Technology Improvement?”, *Energy Economics*, 2014, 41 (1), 47-62.
- [24] Wang, H., B. W. Ang, and B. Su, “Assessing Drivers of Economy-Wide Energy Use and Emissions: IDA versus SDA”, *Energy Policy*, 2017, 107 (8), 585-599.
- [25] Wang, H., B. W. Ang, and B. Su, “Multiplicative Structural Decomposition Analysis of Energy and Emission Intensities: Some Methodological Issues”, *Energy*, 2017, 123 (3), 47-63.
- [26] 王晓、齐晔，“经济结构变化对中国能源消费的影响分析”，《中国人口·资源与环境》，2013 年第 1 期，第 49—54 页。
- [27] 魏楚、郑新业，“能源效率提升的新视角——基于市场分割的检验”，《中国社会科学》，2017 年第 10 期，第 90—111 页。
- [28] Wu, J., Y. Wu, and T. S. Cheong, “Distribution Dynamics of Energy Intensity in Chinese Cities”, *Applied Energy*, 2018, 211 (2), 875-889.
- [29] 谢建国、姜珮珊，“中国进出口贸易隐含能源消耗的测算与分解——基于投入产出模型的分析”，《经济学》（季刊），2014 年第 13 卷第 4 期，第 1365—1392 页。
- [30] Zeng, L., M. Xu, and S. Liang, “Revisiting Drivers of Energy Intensity in China During 1997-2007: A Structural Decomposition Analysis”, *Energy Policy*, 2014, 67 (2), 640-647.
- [31] 张亚雄、赵坤、王飞，“国家间投入产出模型方法、研制与应用”，《统计研究》，2010 年第 11 期，第 9—16 页。
- [32] 周申、李可爱、任希丽，“贸易结构变动对我国能源消耗的影响”，《数量经济技术经济研究》，2014 年第 3 期，第 82—88 页。

## The Implication of Global Energy Efficiency Evolution —SDA and Empirical Study Based on Global Input-Output Data

BOQIANG LIN WEI WU\*

(*Xiamen University*)

**Abstract** In this paper we establish a global energy input-output model and adopts SDA model to analyze the variation of global energy efficiency from 2000 to 2014. The technological advances have led to a significant decline in energy intensity, but the increase in the proportion of developing countries in the global economy and the changes in the industrial structure have offset the effectiveness of technological progress. A global panel model is established and the result reveals that accelerating economic growth can increase energy efficiency at a faster rate, and the energy intensity of consumer goods declines faster than investment goods.

**Key Words** energy efficiency, SDA model, global panel model

**JEL Classification** Q43, R15, O13

---

\* Corresponding Author: Wei Wu, School of Management, China Institute for Studies in Energy Policy, Xiamen University, No. 422, Siming South Road, Xiamen, Fujian, 361005, China; Tel: 86-15960259291; E-mail: weiwu\_ep@xmu.edu.cn.