

引用格式:李虹,王帅.需求侧视角下中国隐含能源消费量及强度的影响因素[J].资源科学,2021,43(9):1728-1742. [Li H, Wang S. Research on influencing factors of China's energy consumption and intensity: Based on the demand-side perspective[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1728-1742.] DOI: 10.18402/resci.2021.09.02

需求侧视角下中国隐含能源消费量及强度的影响因素

李虹,王帅

(北京大学经济学院,北京 100871)

摘要:当前中国对能耗总量和强度实行了“双控”,在需求侧改革背景下,分析中国能源消费总量与能源强度变动的影响因素是制定有效能源政策的基础。基于最终需求视角测算了2012、2015和2017年中国5类最终需求的隐含能源消费及其强度,使用结构分解分析(SDA)和双层归因分析探究影响中国能源消费总量和能源强度变动的因素,并针对求解过程中可能存在的零值与负值问题给出了两种处理方法。结果表明:①中国近一半的能源消耗是由于满足资本形成需求而产生的,资本形成和出口的隐含能源强度是全国能源强度的1.2倍以上,而消费的隐含能源强度低于全国能源强度;②能源效率效应和生产结构效应分别是导致2012—2015年和2015—2017年全国能源消费总量及强度下降的主要因素;③第一层归因分析发现各影响因素主要通过影响资本形成需求进而影响全国能源消费总量及强度;④第二层归因分析发现重制造业和建筑业是影响资本形成需求变动的主要行业。因此未来从需求侧控制能源消耗具有更大潜力,经济增长模式需要进一步从投资和出口驱动向消费驱动转变,加快促进国内大循环。同时要注重优化居民消费结构,推动其向绿色化、低碳化和节能化转变。

关键词:隐含能源消费;隐含能源强度;结构分解分析;双层归因分析;需求侧改革

DOI: 10.18402/resci.2021.09.02

1 引言

目前,中国已成为世界第一大能源消费国,且能源消费总量仍在不断增加,根据《BP世界能源统计年鉴》,2019年中国一次能源消费量占世界一次能源消费总量的1/4左右。另一方面,根据Enerdata发布的《全球能源统计年鉴2020》,若使用购买力平价法(PPP)计算,中国能源强度与世界其他国家相比仍然偏高,2019年中国的能源强度分别是美国、日本和欧盟的1.15倍、1.62倍和1.75倍,是世界平均水平的1.16倍,仍有较大下降空间。为了控制能源消费总量,提高能源综合利用效率,实现节能减排,中国对能源消费总量和能源强度实施了双重目标控制。2020年12月11日,中共中央政治局会议首次提出“注重需求侧改革”,在推动供给侧结构性改革

促进“供给创造需求”的同时,也需要进一步推动需求侧改革,实现“需求牵引供给”。因此为了全面认识中国能源消费总量与能源强度及其影响因素,更好地完成能耗与强度“双控”目标,有必要从需求角度对中国各类最终需求(消费、资本形成和出口需求)的能源消耗状况进行深入分析。

隐含能源(Embodied Energy)是指为了得到某种产品或服务从而在整个生产链中直接与间接消耗的全部能源,并且这种能源消耗是“看不见的”^[1,2]。那么,从需求角度来看,中国各类最终需求的隐含能源消费及其强度如何?影响中国能源消费总量与能源强度的因素有哪些?各类最终需求和各行业在其中起到怎样的作用?探讨这些问题有助于全面了解能源消费总量和能源强度的构成、变化与

收稿日期:2020-11-01 修订日期:2021-03-15

基金项目:国家电网有限公司科技项目(1400-202057411A0000)。

作者简介:李虹,女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,研究方向为能源经济学。E-mail: Lihong2008@pku.edu.cn

通讯作者:王帅,男,山东聊城人,博士研究生,研究方向为能源经济学。E-mail: wangs2017@econ.pku.edu.cn

2021年9月

影响因素,是实现能耗与强度“双控”目标、制定有效能源政策的基础。鉴于此,本文基于中国2012、2015和2017年可比价投入产出表,使用投入产出分析和结构分解分析(SDA)从需求侧测算了中国各类最终需求层面和各类最终需求各行业层面的隐含能源消费与隐含能源强度,并分别使用加法SDA和乘法SDA对全国能源消费总量和能源强度变动的影响因素进行分解分析,构建双层归因分析模型将全国层面的各分解效应归因至各类最终需求层面和各类最终需求各行业层面,精确识别影响全国能源消费总量与能源强度变动的生产侧和需求侧因素,具有重要的理论和现实意义。

2 文献综述

目前已有许多学者对不同类型最终需求的隐含能源消费进行研究,研究对象主要包括城乡居民消费、政府消费、投资和出口等。在城乡居民消费方面,较多学者关注居民消费的直接与间接能源消耗。Chen等^[3]使用消费者生活方式分析法量化了1996—2011年北京市城乡居民的能源消耗,发现在考虑了间接能源消耗后,北京市居民能源消费量占全市能源消费总量的比例从22.7%提高到59.2%。研究投资隐含能源消费的文献如Fu等^[4]发现1992—2007年投资需求驱动的能源消耗占中国能源消费总量的30%左右,且仍在缓慢增加。Fu等^[5]进一步发现2007年投资的隐含能源消费量中超过90%是由建筑业和制造业导致的。关于出口隐含能源消费的文献数量较多,大多考察国际贸易中隐含能源的转移情况^[6,7]。郭朝先等^[8]发现全球国际贸易相关的隐含能源消耗量占全球能源消耗总量的23%左右,且中国是隐含能源净出口国,向发达国家出口的隐含能源较多。汪艺晗等^[9]研究了“一带一路”沿线国家粮食贸易带动的虚拟水和灌溉用能流动格局。郭珊等^[10]则从中国跨省商品贸易的角度刻画了省际隐含能源流动。

在不同类型最终需求的隐含能源强度方面,部分学者基于隐含增加值研究某类最终需求的隐含能源强度,例如Su等^[11]在各类最终需求层面对隐含能源强度进行了定义,并使用乘法SDA对各类最终需求隐含能源强度的变动进行分解,通过归因分析得到了各行业对各分解效应的贡献。Su等^[12]使用

结构路径分析(SPA)和乘法SDA探究了影响中国2007—2012年间各类最终需求隐含能源强度变化的因素。Yan等^[13]测算了中国各类最终需求和各行业的隐含能源消费及其强度,分别使用加法SDA和乘法SDA对2010—2015年间中国能源消费总量和能源强度的变动进行分解,并通过归因分析将全国层面各分解效应归因至行业层面。

在研究方法上,投入产出分析可以很方便地计算某经济部门的隐含能源消费量,而无需考虑生产过程的长度和复杂性^[14,15]。基于投入产出表的结构分解分析(SDA)在分析能源消费量与能源强度的影响因素方面应用较为广泛,有加法和乘法两种形式。归因分析(Attribution Analysis)可以将全国层面分解结果进一步表示为各类最终需求层面或各行业层面相加或相乘的形式,并得到各类最终需求或各行业对全国层面分解结果的贡献。由于模型复杂度等原因,相对于加法SDA,乘法SDA的归因分析发展较晚,目前可以分为精确归因分析和近似归因分析两种^[16-18]。总的来说,投入产出分析、结构分解分析和归因分析是探究隐含能源及其影响因素的有力工具,近年来得到广泛应用^[19-21]。

综上所述,已有文献从需求侧对各类最终需求的隐含能源消费及其强度进行了较为深入的研究,并且发展和完善了乘法SDA与归因分析方法,对本文有重要的指导意义。但现有研究仍存在以下几点不足:①已有文献大多将全国层面各分解效应归因至行业层面,以探究哪些行业贡献较大,并未归因至各类最终需求层面。事实上,各类最终需求的行业结构往往差异较大,对全国能源消费总量与能源强度的影响也不相同,因此有必要考察各类最终需求对能源消费总量与能源强度变动的贡献,更有针对性地提出实现“双控”目标的需求结构调整战略。②部分文献虽然将各类最终需求层面各分解效应归因至行业层面,但没有探究不同最终需求中各行业对全国能源消费总量与能源强度的影响。基于此,本文提出双层归因分析方法,第一层归因分析将全国层面各分解效应归因至各类最终需求层面,以识别哪类最终需求对全国各分解效应的贡献更大,第二层归因分析进一步归因至各类最终需求各行业层面,以探究各类最终需求中哪些行业对全国层面各分解效应有较大影响。③在乘法SDA

归因分析中经常遇到某行业的某类最终需求为零或为负的情况,已有文献往往通过行业合并或最终需求合并来消除零值与负值问题,但这种处理方法的缺点是损失了部分细分行业与最终需求数据。尽管 Su 等^[16]已证明乘法 SDA 精确归因分析具有零值稳健性(Zero-value Robust Property),但近似归因分析的零值与负值问题目前尚未有完善的处理框架。基于此,本文在统一的框架下分析了乘法 SDA 归因分析中可能遇到的4种零值或负值类型,并提出了两种处理零值与负值的方法。

3 模型方法与数据处理

3.1 模型方法

3.1.1 需求侧隐含能源消费及其强度的定义

在非竞争性进口假设下,Leontief投入产出模型可以表示为:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}_d)^{-1} \mathbf{y} = \mathbf{L}_d (\mathbf{y}_{\text{drc}} + \mathbf{y}_{\text{duc}} + \mathbf{y}_{\text{dgc}} + \mathbf{y}_{\text{def}} + \mathbf{y}_{\text{ex}}) \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为总产出列向量; \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{A}_d 为国内直接消耗系数矩阵; \mathbf{L}_d 为国内完全需求系数矩阵; \mathbf{y} 为国内最终需求列向量,包括农村居民消费 \mathbf{y}_{drc} 、城市居民消费 \mathbf{y}_{duc} 、政府消费 \mathbf{y}_{dgc} 、资本形成 \mathbf{y}_{def} 和国内出口 \mathbf{y}_{ex} 。

令矩阵 \mathbf{F} 的元素 F_{ei} 等于行业 i 对第 e 种能源的消费量除以该行业传统增加值,则 $1'\mathbf{F}$ 为各行业传统能源强度行向量,因此全国能源消费总量 E 可以表示为:

$$E = 1'\mathbf{F}\mathbf{v} = 1'\mathbf{F}\hat{\mathbf{k}}\mathbf{L}_d \sum_f \mathbf{y}_f = \sum_f E_f = \sum_f \sum_i E_{fi} \quad (2)$$

式中: f 为5类最终需求; \mathbf{v} 是传统增加值列向量; $\hat{\mathbf{k}}$ 是增加值率列向量的对角矩阵; \mathbf{y}_f 为第 f 类最终需求列向量; E_f 为第 f 类最终需求的隐含能源消费量; E_{fi} 为第 f 类最终需求中行业 i 的隐含能源消费量。

类似地,在非竞争性进口假设下,使用生产法计算的全国总增加值 GDP 可以表示为:

$$\text{GDP} = 1'\mathbf{v} = 1'\hat{\mathbf{k}}\mathbf{L}_d \sum_f \mathbf{y}_f = \sum_f \text{GDP}_f = \sum_f \sum_i \text{GDP}_{fi} \quad (3)$$

式中: GDP_f 为第 f 类最终需求的隐含增加值; GDP_{fi} 为第 f 类最终需求中行业 i 的隐含增加值。

定义整体隐含能源强度 AEEI (Aggregate Embodied Energy Intensity) 为隐含能源消费与隐含增加值的比值^[11],则全国层面、各类最终需求层面和各

类最终需求各行业层面的隐含能源强度分别为:

$$\text{AEEI} = \frac{E}{\text{GDP}}, \text{AEEI}_f = \frac{E_f}{\text{GDP}_f}, \text{AEEI}_{fi} = \frac{E_{fi}}{\text{GDP}_{fi}} \quad (4)$$

3.1.2 全国能源消费量及强度变动的 SDA 与双层归因分析

为了探究各个因素对全国能源消费总量及强度的影响,本文分别使用加法 SDA 和乘法 SDA 分解全国能源消费总量和能源强度变动,主要有以下两点原因:一是加法 SDA 分解绝对量指标如能源消费量的绝对变化时更有优势,而乘法 SDA 分解相对量指标如能源强度的相对变化时更有优势^[22,23]。二是分别计算与中国双重目标控制相契合,且能得到更具政策指导性的分析结果。

对于全国能源消费总量与能源强度,影响其变动的因素均为4个,因此本文分别使用加法 SDA 与乘法 SDA 将全国能源消费总量与能源强度的变动分解为能源效率效应、增加值率效应、生产结构效应和最终需求效应共4个效应。虽然全国能源消费与能源强度变动的分解结果效应均为4个,其经济学解释也比较相似,但两者有以下几点差别:一是单位不同,全国能源消费总量变动的4个分解效应单位均为万t标准煤,而全国能源强度变动的4个分解效应无量纲。二是表达方式不同,全国能源消费总量变动等于其4个分解效应相加,而全国能源强度变动等于其4个分解效应相乘。三是判断的临界值不同,全国能源消费总量变动的4个分解效应临界值为0,而全国能源强度变动的4个分解效应临界值为1。

令 t_0 时刻的全国能源消费总量为 E^0 , t_1 时刻的全国能源消费总量为 E^1 ,因此从 t_0 时刻到 t_1 时刻的全国能源消费总量变化 ΔE 的加法 SDA 与双层归因分析可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta E &= 1'\mathbf{F}^1\hat{\mathbf{k}}^1\mathbf{L}_d^1\mathbf{y}^1 - 1'\mathbf{F}^0\hat{\mathbf{k}}^0\mathbf{L}_d^0\mathbf{y}^0 \\ &= \Delta E_F + \Delta E_k + \Delta E_{L_d} + \Delta E_y \\ &= \sum_f \left(1'\mathbf{F}^1\hat{\mathbf{k}}^1\mathbf{L}_d^1\mathbf{y}_f^1 - 1'\mathbf{F}^0\hat{\mathbf{k}}^0\mathbf{L}_d^0\mathbf{y}_f^0 \right) \\ &= \sum_f \left(\Delta E_{F,f} + \Delta E_{k,f} + \Delta E_{L_d,f} + \Delta E_{y,f} \right) \\ &= \sum_f \left(1'\mathbf{F}^1\hat{\mathbf{k}}^1\mathbf{L}_d^1\mathbf{y}_f^1 \cdot 1 - 1'\mathbf{F}^0\hat{\mathbf{k}}^0\mathbf{L}_d^0\mathbf{y}_f^0 \cdot 1 \right) \\ &= \sum_f \sum_i \left(\Delta E_{F,fi} + \Delta E_{k,fi} + \Delta E_{L_d,fi} + \Delta E_{y,fi} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ΔE_F 为加法 SDA 的能源效率效应; ΔE_k 为增

2021年9月

加值率效应; ΔE_{Ld} 为生产结构效应; ΔE_y 为最终需求效应; $\Delta E_{F,f}$ 、 $\Delta E_{k,f}$ 、 $\Delta E_{Ld,f}$ 和 $\Delta E_{y,f}$ 表示归因至第 f 类最终需求的结果; $\Delta E_{F,fi}$ 、 $\Delta E_{k,fi}$ 、 $\Delta E_{Ld,fi}$ 和 $\Delta E_{y,fi}$ 表示归因至第 f 类最终需求中行业 i 的结果。

类似地,令 $t0$ 时刻的全国能源强度为 $AEEI^0$, $t1$ 时刻的全国能源强度为 $AEEI^1$, 由于近似归因分析可以大幅减少计算量且计算结果与精确归因分析十分接近,参考 Choi 等^[24]提出的乘法形式 LMDI-I 方法,从 $t0$ 时刻到 $t1$ 时刻的全国能源强度变化 D 的乘法 SDA 与双层归因分析可以表示为:

$$\begin{aligned} D &= \frac{AEEI^1}{AEEI^0} = \frac{1'F^1\bar{k}^1L_d^1y^1/1'\bar{k}^1L_d^1y^1}{1'F^0\bar{k}^0L_d^0y^0/1'\bar{k}^0L_d^0y^0} = D_F \cdot D_k \cdot D_{Ld} \cdot D_y \\ &= \prod_f \left(\frac{AEEI_f^1}{AEEI_f^0} \right)^{\alpha_f} \left(\frac{w_f^1}{w_f^0} \right)^{\beta_f} = \prod_f D_{F,f} D_{k,f} D_{Ld,f} D_{y,f} \quad (6) \\ &= \prod_f \prod_i \left(\frac{AEEI_{fi}^1}{AEEI_{fi}^0} \right)^{\beta_{fi}} \left(\frac{\mu_{fi}^1}{\mu_{fi}^0} \right)^{\beta_{fi}} = \prod_f \prod_i D_{F,fi} D_{k,fi} D_{Ld,fi} D_{y,fi} \end{aligned}$$

式中: D_F 为乘法 SDA 的能源效率效应, D_k 为增加值率效应, D_{Ld} 为生产结构效应, D_y 为最终需求效应; $D_{F,f}$ 、 $D_{k,f}$ 、 $D_{Ld,f}$ 和 $D_{y,f}$ 分别为归因至第 f 类最终需求的结果; $D_{F,fi}$ 、 $D_{k,fi}$ 、 $D_{Ld,fi}$ 和 $D_{y,fi}$ 分别为归因至第 f 类最终需求中行业 i 的结果; w_f 代表第 f 类最终需求隐含增加值占全国总增加值的比重; μ_{fi} 代表第 f 类最终需求中行业 i 隐含增加值占全国总增加值的比重; 函数 $L(a, b) = \frac{a-b}{\ln a - \ln b}$ 为对数平均函数;

$$\alpha_f = \frac{L(w_f^1 AEEI_f^1, w_f^0 AEEI_f^0)}{L(AEEI^1, AEEI^0)}, \beta_{fi} = \frac{L(\mu_{fi}^1 AEEI_{fi}^1, \mu_{fi}^0 AEEI_{fi}^0)}{L(AEEI^1, AEEI^0)}.$$

在结构分解分析方法的选择上,本文借鉴 Dietzenbacher 等^[25]使用两级分解法进行分解。

3.1.3 乘法 SDA 归因分析中零值与负值问题的处理方法

在全国能源强度变化的乘法 SDA 双层近似归因分析计算过程中,由于某行业的某类最终需求可能为零或为负, μ_{fi} 存在零值与负值,这会导致 μ_{fi}^1/μ_{fi}^0 无意义和 $L(\mu_{fi}^1 AEEI_{fi}^1, \mu_{fi}^0 AEEI_{fi}^0)$ 超出函数定义域等问题。本文首先参考 Ang 等^[26]和 Ang 等^[27]在指数分解分析(IDA)中处理零值与负值的小值策略(Small Value Strategy)和解析极限策略>Analytical

Limit Strategy),在统一的框架下处理了乘法 SDA 归因分析中的零值与负值问题;然后在分析该方法不足的基础上,提出了改进后的第二种处理方法。

具体来说, μ_{fi} 的变化中包含零值和负值的情形可以归纳为以下 4 种类型,第一种类型是 μ_{fi}^0 与 μ_{fi}^1 均为 0;第二种类型是 μ_{fi}^0 与 μ_{fi}^1 均为负值;第三种类型是 μ_{fi}^0 与 μ_{fi}^1 一个为 0 而另一个为负值或正值;第四种类型是 μ_{fi}^0 与 μ_{fi}^1 一个为负值而另一个为正值。

对于第一种类型,根据解析极限策略,第 f 类最终需求中行业 i 对全国能源强度变动无影响。此外,也可以使用小值策略,令 $\mu_{fi}^0 = \mu_{fi}^1 = 10^{-10}$ 得到收敛的结果^①。对于第二种类型,根据对数减法则改写二元函数 $L(a, b)$ 分母形式即可避免对数函数定义域问题,且计算结果仍有经济意义。对于第三

种类型,由解析极限策略, $\lim_{\mu_{fi}^0 \text{ 或 } \mu_{fi}^1 \rightarrow 0} \left(\frac{AEEI_{fi}^1}{AEEI_{fi}^0} \right)^{\beta_{fi}} = 1$, 因

此只有 μ_{fi} 变动对全国能源强度变动有影响^②。此外可以使用小值策略,令 μ_{fi}^0 或 μ_{fi}^1 等于 10^{-10} 或 -10^{-10} 得到收敛的结果。对于第四种类型,可以把零作为临界值将 μ_{fi} 的变动分为两部分,令 $\mu_{fi}^{mid} = 0$ 和 $AEEI_{fi}^{mid} > 0$ 分别为 μ_{fi} 和 $AEEI_{fi}$ 变动的中间值,由解析极限策略得只有 μ_{fi} 的变动对全国能源强度变动有影响,此外可以使用小值策略,令 μ_{fi}^{mid} 的临界值 μ_{fi}^{mid1} 与 μ_{fi}^{mid0} 等于 10^{-10} 或 -10^{-10} 得到收敛的结果。

然而,上述解析极限策略与小值策略针对第三种和第四种类型给出的结果并不十分理想,原因在于 $AEEI_{fi}$ 的变动应该也对全国能源强度变动存在影响,即 $AEEI_{fi}$ 的变动应该部分解释了 $\mu_{fi}^1 AEEI_{fi}^1 - \mu_{fi}^0 AEEI_{fi}^0$ 的变动,而解析极限策略与小值策略并不能将其分离出来。为了得到更合理的结果,本文提出了第二种处理方法,将全国能源强度的变动表示为:

$$\begin{aligned} D &= \frac{AEEI^1}{AEEI^0} \exp \left[\sum_f \sum_i \frac{\mu_{fi}^1 AEEI_{fi}^1 - \mu_{fi}^0 AEEI_{fi}^0}{L(AEEI^1, AEEI^0)} \right] = \\ &\exp \left[\sum_f \sum_i \frac{\Delta \mu_{fi} (AEEI_{fi}^1 + AEEI_{fi}^0)/2 + \Delta AEEI_{fi} (\mu_{fi}^1 + \mu_{fi}^0)/2}{L(AEEI^1, AEEI^0)} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

①将小值设置为 10^{-15} 、 10^{-20} 或更小值对结果影响不大,下同。

②类似的观点还有 Su 等^[16]对乘法 SDA 精确归因分析零值稳健性的说明。

式中: $\Delta\mu_{fi} = \mu_{fi}^1 - \mu_{fi}^0$, $\Delta AEEI_{fi} = AEEI_{fi}^1 - AEEI_{fi}^0$ 。综上所述, 本文将乘法 SDA 归因分析中所有可能的 μ_{fi} 变动情形及其处理办法归纳为表 1。

3.2 数据来源与处理

本文的投入产出数据来自国家统计局公布的中国 2012 年、2015 年和 2017 年投入产出表, 各行业能源消费数据来自《中国能源统计年鉴》中的能源平衡表与工业分行业终端能源消费量, 并折算为标准煤。由于各年投入产出表部门数差异较大, 且为了避免部门拆分时引入额外假设导致的其他潜在错误, 因此选择部门合并的方式来处理部门数量差异, 最终得到 27 个部门。为了便于展示, 参考 Wang 等^[28], 仅展示农业、采掘业、轻制造业、能源工业、重制造业、建筑业、服务业、交通运输业共 8 个行业大类的结果, 行业间对应关系见表 2。

本文使用相应的价格指数将 2015 年和 2017 年的现价投入产出表折算为以 2012 年为基期的可比价投入产出表, 相关价格指数数据均来自《中国统

计年鉴》。参考 Su 等^[29]、彭水军等^[30]的做法, 假设某行业投入各行业的中间使用产品中进口中间使用产品的比例相等, 且都等于该行业最终使用产品中进口最终使用产品的比例, 得到非竞争性投入产出表。

4 结果与分析

4.1 中国各类最终需求隐含能源消费量及强度的计算结果

2012、2015 和 2017 年中国能源消费总量不断上升, 从各类最终需求的隐含能源消费量来看, 资本形成的隐含能源消费量最大, 大约占中国能源消费总量的 46%, 表明为满足资本形成需求消耗了全国近一半的能源; 出口和城市居民消费的隐含能源消费量也比较大, 分别占中国能源消费总量的 22% 和 18% 左右。与能源消费总量先快速增加再缓慢增加不同, 中国总增加值在样本期间内始终呈现快速增加的态势, 从各类最终需求的隐含增加值来看, 资本形成、城市居民消费和出口是中国总增加值的 3 个重要组成部分, 其隐含增加值分别占中国总增加

表 1 所有可能的 μ_{fi} 变动情形及其处理方法

Table 1 Possible change scenarios of μ_{fi} and solutions

情形	处理方法
1. μ_{fi} 变动为 $+\leftrightarrow+$ 或 $-\leftrightarrow-$	无需进行额外处理, 直接使用两级分解法求解
2. μ_{fi} 变动为 $0\leftrightarrow0$	μ_{fi} 和 $AEEI_{fi}$ 的变动均不影响全国能源强度的变动。在实际操作中, 可根据解析极限策略直接得到最终结果, 也可以使用小值策略得到十分接近的结果
3. μ_{fi} 变动为 $0\leftrightarrow+$ 、 $0\leftrightarrow-$ 或 $-\leftrightarrow+$	方法 1: μ_{fi} 的变动贡献了 $\mu_{fi}^1 AEEI_{fi}^1 - \mu_{fi}^0 AEEI_{fi}^0$ 的全部变化, 而 $AEEI_{fi}$ 的变动对全国能源强度变动无影响。在实际操作中, 可根据解析极限策略直接得到最终结果, 也可以使用小值策略得到十分接近的结果 方法 2: μ_{fi} 的变动贡献了 $\Delta\mu_{fi}(AEEI_{fi}^1 + AEEI_{fi}^0)/2$, $AEEI_{fi}$ 的变动贡献了 $\Delta AEEI_{fi}(\mu_{fi}^1 + \mu_{fi}^0)/2$ 。在实际操作中, 可据此得到最终结果

表 2 行业分类与名称

Table 2 Classification and name of sectors

行业大类	行业名称
农业	S1 农林牧渔业
采掘业	S2 煤炭、石油和天然气开采业; S3 金属矿采选业; S4 非金属矿和其他矿采选业
轻制造业	S5 食品加工及烟草制造业; S6 纺织业; S7 纺织服装皮革制造业; S8 木材加工与家具制造业; S9 造纸印刷和文教体育用品制造业
能源工业	S10 石油、炼焦产品和核燃料加工业; S22 电力、热力生产和供应业; S23 燃气和水的生产供应业
重制造业	S11 化学工业; S12 非金属矿物制品业; S13 金属冶炼和压延加工业; S14 金属制品业; S15 通用设备制造业; S16 专用设备制造业; S17 交通运输设备制造业; S18 电气机械和器材制造业; S19 计算机、通信和其他电子设备制造业; S20 仪器仪表制造业; S21 废品废料、设备修理与其他制造业
建筑业	S24 建筑业
服务业	S25 批发、零售、住宿和餐饮业; S27 其他服务业
交通运输业	S26 交通运输、仓储和邮政业

2021年9月

值的37%、25%和18%左右。

2012、2015和2017年中国能源强度不断下降,表明近年来中国节能减排和提高能源利用效率等各项工作取得了较好效果^[31]。然而,各类最终需求隐含能源强度的大小与变化趋势各不相同,具体来说,资本形成和出口的隐含能源强度均高于全国能源强度,而消费的隐含能源强度均低于全国能源强度,这表明投资和出口驱动了过度消耗能源为代价的“粗放式”经济发展模式,因满足投资和出口需求产生了较高的单位增加值能源消耗,而消费驱动了“集约式”的经济发展模式^[32]。

4.2 中国各类最终需求中各行业隐含能源消费量及强度的计算结果

表3计算了2017年中国各类最终需求各行业的隐含能源消费、隐含增加值和隐含能源强度及其比例^③。具体来说,轻制造业和服务业对2017年农

村居民消费的隐含能源消费和隐含增加值贡献均比较大,其隐含能源消费分别占农村居民消费隐含能源消费的31.38%和28.67%,隐含增加值分别占农村居民消费隐含增加值的33.03%和39.78%,表明在生产这些行业用于农村居民消费的最终需求产品时消耗了较多的能源,同时也产生了较多的增加值。与农村居民消费相比,城市居民消费中大多数行业的隐含能源消费与隐含增加值更大,这与大多数行业用于城市居民消费的最终需求产品多于农村居民消费有关,故城市居民消费的隐含能源消费和隐含增加值分别是农村居民消费的4.13倍和3.93倍。在政府消费中,服务业分别贡献了91.83%和96.99%的政府消费隐含能源消费和隐含增加值,是影响政府消费的主要行业。建筑业是影响资本形成需求的主要行业,因满足建筑业的资本形成最终需求导致的隐含能源消费和隐含增加值分别占资

表3 2017年中国各类最终需求各行业的隐含能源消费、增加值与强度及其比例

Table 3 Embodied energy consumption, value added, and energy intensity of sectors' final demand categories and their proportions in 2017

行业	隐含能源消费/万t标准煤					隐含增加值/亿元					隐含能源强度/(t标准煤/万元)
	农村居民消费	城市居民消费	政府消费	资本形成	出口	农村居民消费	城市居民消费	政府消费	资本形成	出口	
农业	1895.57	3833.26	270.26	524.14	274.97	7315.38	14793.27	1042.97	2022.77	1061.16	0.26
采掘业	23.04	15.43	0.00	98.07	250.97	59.13	39.60	0.00	253.29	550.40	0.43
轻制造业	5609.78	18831.25	0.00	1554.50	15430.01	16366.45	51262.24	0.00	3665.54	27649.99	0.42
能源工业	608.09	4961.76	0.00	326.60	1410.68	868.53	6548.23	0.00	376.62	1713.05	0.77
重制造业	2772.36	13902.22	0.00	37412.92	56685.57	3574.04	19032.29	0.00	57983.33	74083.31	0.72
建筑业	0.00	0.00	0.00	122924.86	466.43	0.00	0.00	0.00	174280.20	661.30	0.71
服务业	5125.66	25089.76	23240.51	9849.63	4407.68	19710.97	96573.58	85571.18	37423.44	18336.60	0.26
交通运输业	1842.94	7126.46	1797.59	2279.21	5060.96	1650.92	6383.93	1610.29	2041.73	4533.64	1.12
总计	17877.45	73760.14	25308.36	174969.94	83987.26	49545.42	194633.14	88224.45	278046.92	128589.44	0.51
行业	隐含能源消费比例/%					隐含增加值比例/%					隐含能源强度比值
	农村居民消费	城市居民消费	政府消费	资本形成	出口	农村居民消费	城市居民消费	政府消费	资本形成	出口	
农业	10.60	5.20	1.07	0.30	0.33	14.77	7.60	1.18	0.73	0.83	0.51
采掘业	0.13	0.02	0.00	0.06	0.30	0.12	0.02	0.00	0.09	0.43	0.84
轻制造业	31.38	25.53	0.00	0.89	18.37	33.03	26.34	0.00	1.32	21.50	0.82
能源工业	3.40	6.73	0.00	0.19	1.68	1.75	3.36	0.00	0.14	1.33	1.51
重制造业	15.51	18.85	0.00	21.38	67.49	7.21	9.78	0.00	20.85	57.61	1.41
建筑业	0.00	0.00	0.00	70.25	0.56	0.00	0.00	0.00	62.68	0.51	1.39
服务业	28.67	34.02	91.83	5.63	5.25	39.78	49.62	96.99	13.46	14.26	0.52
交通运输业	10.31	9.66	7.10	1.30	6.03	3.33	3.28	1.83	0.73	3.53	2.19
总计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	1.00

③限于篇幅,本文只展示了2017年的计算结果。

本形成隐含能源消费和隐含增加值的70.25%和62.68%,这与Guo等^[33]的结论一致。在出口中,重制造业对出口隐含能源消费和隐含增加值贡献最大,表明因满足重制造业的出口需求产生了56685.57万t标准煤的能源消耗和74083.31亿元的增加值,而服务业对出口隐含能源消费和隐含增加值的贡献率较小,且其隐含能源强度约为全国能源强度的一半,表明服务业的出口需求驱动了“集约式”的经济增长。

引起2012—2017年全国能源消费总量与总增加值变动的最终需求因素见图1、图2。可以看出,城市居民消费和资本形成需求上升是导致全国能源消费总量与总增加值上升的主要因素,2015年中国因满足城市居民消费需求与资本形成需求所产生的能源消耗比2012年分别增加了17365万t和30593万t标准煤,分别占同期全国能源消费增加量的26.82%和47.25%。此外,相比于2012—2015年,2015—2017年因满足城市居民消费需求与资本形成需求所产生的单位增加值能源消耗逐渐降低。

2012—2017年间全国能源强度变动的最终需求因素见图3。可以看出,2012—2015年间各类最终需求对全国能源强度变动的影响差异较大,具体来说,2015年因满足消费需求导致中国单位增加值能源消耗比2012年更高,其中农村居民消费、城市居民消费和政府消费分别使中国单位增加值能源消耗上升0.57%、1.62%和0.16%;而因满足出口需

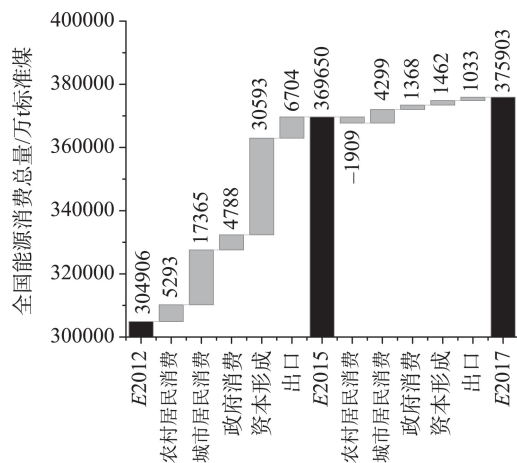


图1 2012—2017年导致全国能源消费总量变动的各类最终需求因素

Figure 1 Final demand factors leading to changes in total energy consumption, 2012-2017

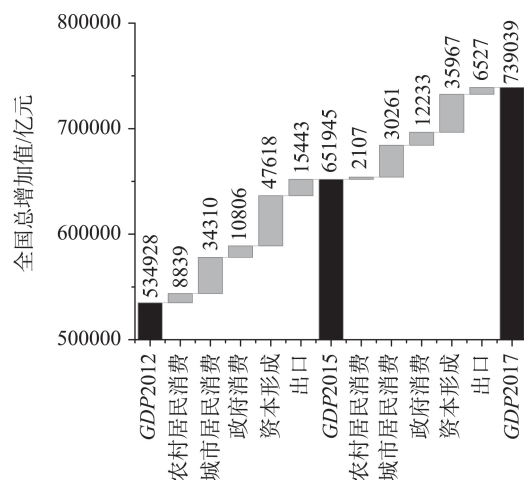


图2 2012—2017年导致全国总增加值变动的各类最终需求因素

Figure 2 Final demand factors leading to changes in total value added, 2012-2017

求使中国单位增加值能源消耗相较于2012年下降2.66%。2015—2017年间各类最终需求均导致了全国能源强度的下降,贡献最大的是资本形成,表明中国在促进投资项目能源高效利用方面取得了一定成效。

4.3 全国能源消费总量变动的加法SDA与归因分析

通过对全国能源消费总量变动进行加法SDA

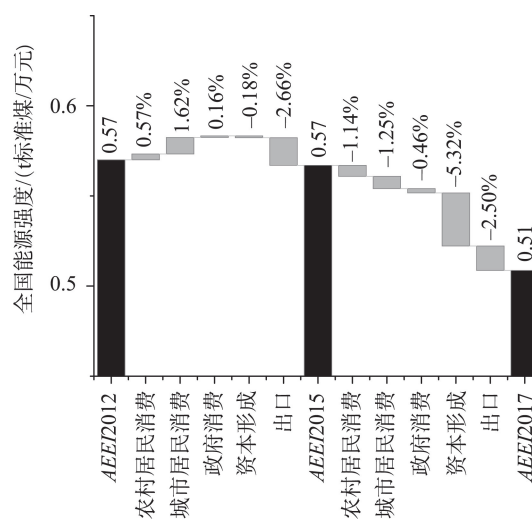


图3 2012—2017年导致全国能源强度变动的各类最终需求因素

Figure 3 Final demand factors leading to changes in national energy intensity, 2012-2017

2021年9月

可以得到4个分解效应,再将各个分解效应使用双层归因分析归因至各类最终需求和各类最终需求

各行业层面,2012—2015年的结果见表4,2015—2017年的结果见表5,2012—2017年的结果限于篇

表4 2012—2015年全国能源消费总量的加法SDA双层归因分析结果(单位:万t标准煤)

Table 4 Two-level attribution analysis results of the additive structural decomposition analysis (SDA) of total energy consumption changes, 2012-2015 (unit: 10⁴tce)

行业	农村居民消费	城市居民消费	政府消费	资本形成	出口	总计
能源效率效应						
农业	-12.06	-23.76	-2.50	-5.94	-2.05	-46.32
采掘业	-21.94	-12.68	0.00	-55.51	-49.14	-139.27
轻制造业	-184.16	-634.82	0.00	-129.67	-1104.27	-2052.92
能源工业	152.92	1142.70	0.00	32.93	-100.05	1228.50
重制造业	-233.93	-973.12	0.00	-2503.76	-3828.05	-7538.85
建筑业	0.00	0.00	0.00	-3160.59	-18.48	-3179.07
服务业	64.06	272.56	206.29	92.01	104.39	739.30
交通运输业	160.54	639.51	219.32	232.92	682.23	1934.52
总计	-74.57	410.38	423.11	-5497.60	-4315.43	-9054.10
增加值率效应						
农业	-85.72	-142.59	-9.30	-64.10	-10.26	-311.96
采掘业	-1.00	-0.61	0.00	3.60	-23.25	-21.25
轻制造业	-227.78	-683.30	0.00	-137.12	-579.21	-1627.41
能源工业	-365.20	-2089.12	0.00	-46.85	-40.46	-2541.63
重制造业	-144.08	-535.99	0.00	-1920.87	-2182.45	-4783.39
建筑业	0.00	0.00	0.00	-10284.85	-60.67	-10345.52
服务业	-394.86	-1646.90	-1619.70	-534.77	-395.97	-4592.20
交通运输业	-198.56	-787.99	-268.03	-283.18	-835.06	-2372.82
总计	-1417.20	-5886.50	-1897.02	-13268.13	-4127.33	-26596.18
生产结构效应						
农业	165.13	280.10	19.66	118.95	20.65	604.49
采掘业	0.53	0.30	0.00	-5.29	16.49	12.03
轻制造业	119.47	373.45	0.00	137.22	487.44	1117.58
能源工业	211.22	818.15	0.00	10.13	72.46	1111.95
重制造业	196.84	748.75	0.00	2973.94	3549.14	7468.68
建筑业	0.00	0.00	0.00	12071.82	71.06	12142.88
服务业	691.10	2860.06	3069.67	922.49	547.76	8091.08
交通运输业	87.25	342.35	113.51	117.94	355.38	1016.43
总计	1471.54	5423.17	3202.84	16347.19	5120.37	31565.11
最终需求效应						
农业	-464.47	-293.07	104.22	-747.03	23.33	-1377.02
采掘业	63.74	32.46	0.00	-117.89	-6.67	-28.36
轻制造业	1553.89	4404.91	0.00	1050.30	396.10	7405.20
能源工业	937.69	1514.57	0.00	-509.31	-51.04	1891.91
重制造业	1998.31	6966.79	0.00	-2624.76	9280.81	15621.15
建筑业	0.00	0.00	0.00	35339.16	188.09	35527.25
服务业	1028.99	4536.44	3258.86	1205.53	910.02	10939.84
交通运输业	195.43	256.23	-303.52	-584.53	-714.56	-1150.95
总计	5313.57	17418.33	3059.56	33011.47	10026.08	68829.01

表5 2015—2017年全国能源消费总量的加法SDA双层归因分析结果(万t标准煤)

Table 5 Two-level attribution analysis results of the additive structural decomposition analysis (SDA) of total energy consumption changes, 2015-2017 (unit: 10⁴tce)

行业	农村居民消费	城市居民消费	政府消费	资本形成	出口	总计
能源效率效应						
农业	-42.69	-85.67	-6.20	-13.05	-6.22	-153.84
采掘业	-4.14	-2.49	0.00	-7.26	-30.00	-43.89
轻制造业	-64.21	-7.06	0.00	10.81	942.75	882.29
能源工业	-211.81	-1084.29	0.00	-29.30	45.18	-1280.21
重制造业	-93.56	-337.07	0.00	540.90	185.25	295.52
建筑业	0.00	0.00	0.00	-3460.71	-11.97	-3472.67
服务业	-24.72	-178.53	-104.09	-94.42	-45.72	-447.49
交通运输业	397.57	1508.36	410.45	447.69	1245.01	4009.07
总计	-43.55	-186.76	300.15	-2605.35	2324.28	-211.23
增加值率效应						
农业	173.62	340.16	26.64	68.55	25.62	634.58
采掘业	8.28	4.88	0.00	13.32	47.95	74.44
轻制造业	487.44	1512.47	0.00	207.09	1094.37	3301.37
能源工业	352.35	1762.89	0.00	36.64	108.93	2260.81
重制造业	569.21	2446.35	0.00	5580.98	8754.76	17351.29
建筑业	0.00	0.00	0.00	19426.12	90.46	19516.58
服务业	379.29	1749.71	1715.71	646.60	309.21	4800.52
交通运输业	-198.92	-752.54	-207.02	-220.75	-634.18	-2013.41
总计	1771.28	7063.91	1535.33	25758.55	9797.11	45926.18
生产结构效应						
农业	-250.91	-488.76	-38.99	-104.37	-37.13	-920.15
采掘业	-14.16	-8.25	0.00	-22.13	-63.15	-107.69
轻制造业	-543.65	-1518.80	0.00	-307.81	-956.27	-3326.53
能源工业	-301.96	-1289.93	0.00	-16.15	-218.14	-1826.18
重制造业	-757.70	-3490.12	0.00	-11926.11	-12941.12	-29115.05
建筑业	0.00	0.00	0.00	-32294.24	-155.79	-32450.03
服务业	-869.46	-3890.41	-4042.18	-1394.58	-618.29	-10814.92
交通运输业	-117.44	-446.51	-120.50	-133.68	-362.76	-1180.90
总计	-2855.28	-11132.77	-4201.67	-46199.07	-15352.66	-79741.46
最终需求效应						
农业	526.12	1301.06	34.09	-299.87	66.96	1628.36
采掘业	-49.51	-24.71	0.00	52.35	71.66	49.79
轻制造业	127.01	2361.76	0.00	-1184.87	1520.92	2824.83
能源工业	-779.31	162.06	0.00	506.18	671.83	560.76
重制造业	-1189.67	-1446.48	0.00	4453.65	2351.23	4168.73
建筑业	0.00	0.00	0.00	16809.94	-167.71	16642.24
服务业	63.34	4009.87	3332.97	3255.60	-732.01	9929.76
交通运输业	520.20	2190.92	367.36	915.33	481.49	4475.31
总计	-781.82	8554.49	3734.42	24508.30	4264.38	40279.77

幅未给出。

2012—2015年间和2015—2017年间全国层面能源效率效应均为负,表明从生产侧提高各行业能

源利用效率可以有效降低能源消费总量。从双层归因分析结果来看,2012—2015年间资本形成和出口对全国能源效率效应的下降作出了较大贡献,分

2021年9月

别为60.72%和47.66%,意味着各行业能源效率变动大幅降低了因满足资本形成和出口需求所消耗的能源。在行业层面,重制造业和建筑业是使资本形成的能源效率效应(即全国能源效率效应归因至资本形成的部分)下降的主要因素,且重制造业是使出口的能源效率效应下降贡献最大的行业,贡献率为88.71%。在2015—2017年间,资本形成和出口分别是促使能源效率效应下降和上升的主要因素,其中资本形成使能源效率效应下降2605.35万t标准煤,出口使能源效率效应上升2324.28万t标准煤。行业层面,尽管能源效率变动使因满足建筑业资本形成需求所产生的能源消耗降低3472.67万t标准煤,但交通运输业主要通过城市居民消费和出口需求使全国能源效率效应大幅增加4009.07万t标准煤,最终能源效率变动仅降低了全国211.23万t标准煤的能源消耗。

增加值率效应在2012—2015年间和2015—2017年间差异较大,但其主导因素均为资本形成、出口和城市居民消费需求。在行业层面,两个时间段内增加值率变动分别使因满足建筑业资本形成需求所消耗的能源变动了-10284.85万t和19426.12万t标准煤,分别占全国增加值率效应的38.67%和42.30%。进一步研究发现,这是由于2012—2015年间S12非金属矿物制品业的增加值率从0.25下降到0.20,因此使得该行业在生产建筑业用于资本形成需求最终产品的中间投入品时能耗降低了5387.79万t标准煤,而2017年S12非金属矿物制品业的增加值率上升至0.27,导致因满足建筑业资本形成需求所消耗的该行业能源上升了7840.80万t标准煤。

从生产结构效应来看,2012—2015年生产结构变化增加了因满足各类最终需求中绝大部分行业最终需求所产生的能源消耗,而在2015—2017年恰恰相反,这与2012、2015和2017年中国各行业平均完全需求系数先增加后下降的变化趋势有关。在行业层面,2012—2015年建筑业、服务业和重制造业对生产结构效应的贡献较大,贡献率分别为38.47%、25.63%和23.66%,2015—2017年建筑业和重制造业仍为全国生产结构效应的主导行业,贡献率分别为40.69%和36.51%,而服务业下降为13.56%。

2012—2017年最终需求效应均为正,表明中国

最终需求不断增加导致了能源消费总量的上升,其中城市居民消费和资本形成需求对全国最终需求效应的影响较大,分别使全国最终需求效应上升25972.82万t和57519.77万t标准煤。在行业层面,2012—2015年对全国最终需求效应影响最大的行业是建筑业,建筑业使最终需求效应上升35527.25万t标准煤。对城市居民消费最终需求效应影响较大的前3个行业分别为重制造业、服务业和轻制造业,而建筑业资本形成需求变动是导致资本形成最终需求效应增加的主要因素,重制造业是对出口最终需求效应影响最大的行业。2015—2017年建筑业和服务业最终需求变动分别使全国能源消费总量增加了16642.24万t和9929.76万t标准煤,分别占全国最终需求效应的41.32%和24.65%。

4.4 全国能源强度变动的乘法SDA与归因分析

图4显示了2012—2017年全国能源强度变动的乘法SDA第一层归因分析结果。

2012—2015年能源效率效应下降主要是由资本形成和出口引起的,即能源效率变动使中国在满足资本形成需求和出口需求时能源强度分别降低了1.55%和1.25%,而在满足消费需求时全国能源强度则有不同程度的上升。在行业层面,重制造业主要通过资本形成需求和出口需求对全国能源效率效应产生影响,而建筑业则通过资本形成需求使全国能源效率效应下降0.85%。2015—2017年能源效率效应对全国能源强度影响较小,资本形成和出口分别使能源效率效应下降0.59%和上升0.65%。在行业层面,引起能源效率效应下降的主要行业为资本形成需求中的建筑业,而导致其上升的行业较多,如出口需求中的轻制造业和交通运输业等。

2012—2015年增加值率效应影响较小,除出口使增加值率效应上升了0.66%之外,其余各类最终需求均使增加值率效应下降。在行业层面,增加值率变动导致全国能源强度在满足重制造业的出口需求时上升了0.65%。2015—2017年增加值率效应的主导因素为资本形成,其次是出口,两者分别使全国能源强度上升2.82%和0.68%。在行业层面,重制造业的资本形成需求和出口需求、建筑业的资本形成需求是影响增加值率效应的主要因素,分别使全国增加值率效应上升0.61%、1.02%和2.35%。

2012—2015年导致全国生产结构效应大于1的

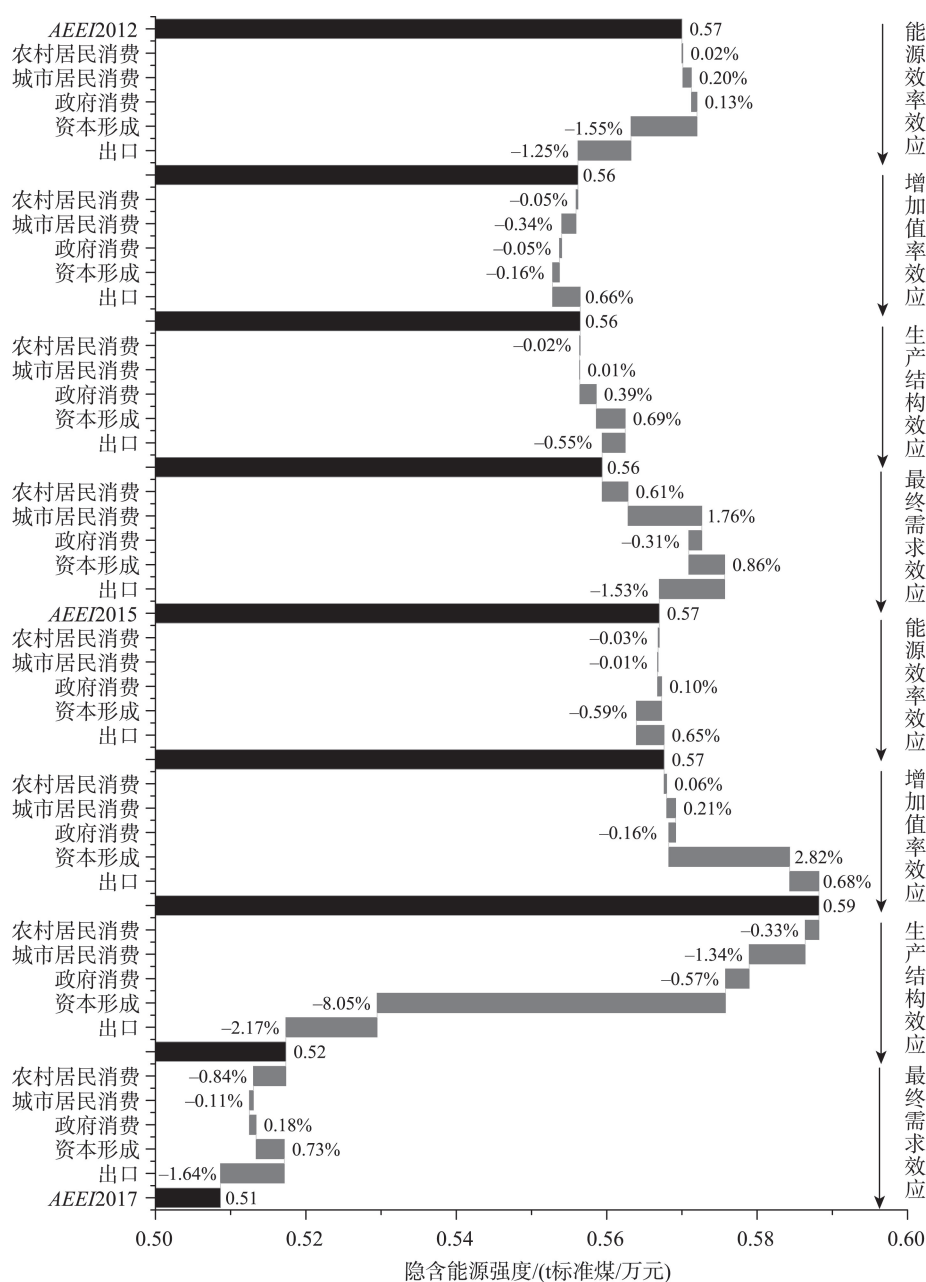


图4 2012—2017年全国能源强度的乘法SDA第一层归因分析结果^④

Figure 4 First level attribution analysis results of the multiplicative structural decomposition analysis (SDA) of national energy intensity changes, 2012-2017

主要因素为政府消费和资本形成,分别使其上升0.39%和0.69%,表明各行业生产结构变动主要通过政府消费需求 and 资本形成需求来影响全国能源强度,而出口使全国生产结构效应下降0.55%。在行业层面,全国生产结构效应为正主要是由于政府消费中的服务业和资本形成中的建筑业推动的,分别

导致全国生产结构效应上升0.40%和0.79%。2015—2017年间,各类最终需求均使生产结构效应下降,其中资本形成引起生产结构效应大幅下降了8.05%,且资本形成中仅建筑业就导致全国生产结构效应下降5.49%。

2012—2015年最终需求效应大于1,其中主要

^④第二层归因分析结果限于篇幅未给出。

2021年9月

的推动因素为城市居民消费,尽管资本形成中重制造业和建筑业分别大幅降低和增加了全国最终需求效应,但整体上资本形成仅导致全国最终需求效应增加了0.86%,小于城市居民消费的1.76%,这主要是由于城市居民消费中重制造业使最终需求效应增加了1.31%。2015—2017年农村居民消费和出口的最终需求变动对全国最终需求效应影响较大,且重制造业的出口需求变动使最终需求效应下降幅度最大,为1.29%。

总的来说,由于全国能源强度等于全国能源消费总量除以总增加值,因此全国能源消费总量变动和能源强度变动的分解结果之间具有一定相关性。比较两者可以发现,在分解结果效应方面,2012—2015年能源效率效应是导致全国能源消费总量与能源强度下降的主要因素,而2015—2017年生产结构变动大幅降低了全国能源消费总量与能源强度;在第一层归因分析方面,各影响因素主要通过影响资本形成需求进而影响全国能源消费总量与能源强度;在第二层归因分析方面,重制造业和建筑业则是影响资本形成需求变动的主要行业。

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文从需求侧出发,分别使用加法SDA和乘法SDA对影响中国能源消费总量与能源强度变动的因素进行分解分析,并通过双层归因分析将全国层面各分解效应归因至各类最终需求层面和各类最终需求各行业层面,根据本文的实证结果,主要得出以下结论:

(1)中国近一半的能源消耗是由于满足资本形成需求产生的,这与Fu等^[4]和Su等^[11]的结论相似。在已有文献的基础上,本文进一步分析了各类最终需求以及各行业对中国能源消费总量变动的贡献,发现城市居民消费和资本形成是2012—2017年间中国能源消费总量上升的主要推动因素,其中城市居民消费隐含能源消费量的上升主要是由于轻制造业和服务业导致的,而建筑业是引起资本形成隐含能源消费量上升的主导行业。

(2)资本形成和出口的隐含能源强度是全国能源强度的1.2倍以上,表明因满足资本形成需求和出口需求导致了以过度消耗能源为代价的“粗放

式”经济增长,而消费需求则驱动了“集约式”的经济增长模式。本文在行业层面的分析发现,2012—2017年资本形成和出口隐含能源强度的大幅下降均主要由重制造业推动,而建筑业仅在2015—2017年对资本形成隐含能源强度的下降作出了较大贡献。

(3)在能源消费方面,2012—2017年能源效率和生产结构变动降低了全国能源消费总量,而增加值率和最终需求变动增加了全国能源消费总量。从第一层归因分析结果来看,各影响因素主要通过影响资本形成进而影响全国能源消费总量变动,这与资本形成的隐含能源消费量较高有关;第二层归因分析结果显示,建筑业和重制造业是影响各个分解效应的主要行业。在能源强度方面,2012—2015年全国能源强度下降的主导因素是能源效率效应,第一层归因分析结果显示资本形成需求是使能源效率效应小于1的主要因素,第二层归因分析进一步发现重制造业和建筑业是使资本形成需求促进能源效率效应下降的主要行业。在2015—2017年间,全国能源强度下降主导因素为生产结构效应,双层归因分析结果显示生产结构变动大幅降低了建筑业资本形成需求的隐含能源强度,从而降低了全国能源强度。

5.2 政策建议

基于以上发现,本文提出如下政策建议:

(1)在需求侧改革的背景下,中国的经济增长模式需要从投资和出口驱动向消费驱动转变,扩大内需比例,尤其是要提振城乡居民消费需求,改善消费环境,增强消费对国民经济发展的基础性作用。然而,由于目前中国资本形成需求仍然巨大,因此政府要加强对固定资产投资项目的节能评估,淘汰能耗大和效率低的投资项目,同时要扩大对新兴产业和高新技术产业的投资,加大新型基础设施投资力度,增强经济发展新动能。

(2)尽管在生产侧提高各行业能源利用效率与优化生产结构的各项政策仍然是十分有效的,但通过需求侧方法控制能源消耗在未来具有较大潜力^[34]。要针对各类最终需求和各行业实际情况制定差异化的能源节约高效利用政策:由于建筑业的资本形成需求较高,应注重延长建筑物的使用年限,避免

盲目的重复建设,防止资源浪费和能源过度消耗,合理控制建筑业的资本形成需求,可以有效抑制资本形成隐含能源消耗的快速上升。对于出口需求,降低对高能耗制造业最终产品的出口需求,提高高新技术产业和服务业等低能耗高增加值行业最终产品在出口中的占比,可以促进出口隐含能源消费量及其强度进一步下降。对于交通运输业等隐含能源强度较高的行业,应重点关注其需求侧的能源利用效率,努力降低不必要的需求。

(3)由于因满足居民消费需求所消耗的能源占全国能源消费总量的1/4左右,且已有相关文献表明中国居民的节能减排意识仍有待加强,因此需要引导居民以合理的方式节约使用能源和使用清洁能源。同时,注重优化居民消费结构,促进消费结构绿色化、低碳化和节能化,增加对农业、轻制造业和服务业等隐含能源强度较低行业产品的消费,降低对能源工业和重制造业等隐含能源强度较高行业产品的消费,因此,鼓励居民消费低能耗产品,以需求牵引供给,可以倒逼企业提高能源利用效率和优化能源消费结构。由于交通运输业的隐含能源强度较高,倡导居民乘坐公共交通工具也是十分必要的^[35]。

(4)推动中国产业努力向全球价值链中高端攀升,改变以过度消耗能源为代价的“粗放式”经济增长模式和隐含能源净出口大国的现状,支持中国企业自主研发创新,将中国拥有自主知识产权的高新技术产品辐射和扩散出去并形成国际影响力,最终降低因满足出口需求所导致的单位增加值能源消耗。此外,还应积极探索可以促进能源节约高效利用的其他途径,例如发展能源节约技术和分布式能源系统、促进新能源和清洁能源使用、建设智慧能源体系与智慧城市等。

参考文献(References):

- [1] 王锋,高长海. 中国产业部门隐含能源的测度、分解与跨境转移: 基于CRIO模型的研究[J]. 经济问题探索, 2020, (9): 1-11. [Wang F, Gao C H. Measurement, decomposition, and cross-border transfer of embodied energy of China's industrial sectors: Based on the CRIO model[J]. Inquiry into Economic Issues, 2020, (9): 1-11.]
- [2] 韩梦瑶,熊焦,刘卫东. 中国跨境能源贸易及隐含能源流动对比: 以“一带一路”能源合作为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(11): 2674-2686. [Han M Y, Xiong J, Liu W D. China's cross-border energy relations between direct trade and embodied transfers: Based on "the Belt and Road" energy cooperation[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(11): 2674-2686.]
- [3] Chen C C, Liu G Y, Meng F X, et al. Energy consumption and carbon footprint accounting of urban and rural residents in Beijing through consumer lifestyle approach[J]. Ecological Indicators, 2019, 98: 575-586.
- [4] Fu F, Liu H T, Polenske K R, et al. Measuring the energy consumption of China's domestic investment from 1992 to 2007[J]. Applied Energy, 2013, 102: 1267-1274.
- [5] Fu F, Ma L W, Li Z, et al. The implications of China's investment-driven economy on its energy consumption and carbon emissions [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85: 573-580.
- [6] Wiedmann T, Lenzen M. Environmental and social footprints of international trade[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(5): 314-321.
- [7] Song Z Y, Zhu Q L, Han M Y. Tele-connection of global crude oil network: Comparisons between direct trade and embodied flows[J]. Energy, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2020.119359.
- [8] 郭朝先,胡雨朦. 全球生产分工体系下隐含能源跨境转移研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 26-35. [Guo C X, Hu Y M. Research on the cross-border transfer of embodied energy under global production division system[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 26-35.]
- [9] 汪艺晗,杨瑾,刘其芸,等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 974-986. [Wang Y H, Yang J, Liu Q Y, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the "Belt and Road"[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 974-986.]
- [10] 郭珊,韩梦瑶,杨玉浦. 中国省际隐含能源流动及能效冗余解析[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 733-744. [Guo S, Han M Y, Yang Y P. Multiregional embodied energy flows and energy efficiency redundancy in China[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 733-744.]
- [11] Su B, Ang B W. Multiplicative structural decomposition analysis of aggregate embodied energy and emission intensities[J]. Energy Economics, 2017, 65: 137-147.
- [12] Su B, Ang B W, Li Y Z. Structural path and decomposition analysis of aggregate embodied energy and emission intensities[J]. Energy Economics, 2019, 83: 345-360.
- [13] Yan J N, Su B. What drive the changes in China's energy consumption and intensity during 12th Five-Year Plan period?[J]. Energy Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111383.
- [14] 高鹏,岳书敬. 中国产业部门全要素隐含能源效率的测度研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(11): 61-80. [Gao P, Yue S J. Measurement of total-factor embodied energy efficiency of Chi-

2021年9月

- na's industry sectors[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2020, 37(11): 61–80.]
- [15] Shepard J U, Pratson L F. Hybrid input–output analysis of embodied energy security[J]. Applied Energy, 2020, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115806.
- [16] Su B, Ang B W. Attribution of changes in the generalized Fisher index with application to embodied emission studies[J]. Energy, 2014, 69: 778–786.
- [17] Su B, Ang B W. Demand contributors and driving factors of Singapore's aggregate carbon intensities[J]. Energy Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111817.
- [18] 李虹, 王帅. 中国行业隐含能源消费及其强度的变动与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(5): 47–57. [Li H, Wang S. Changes and influencing factors of embodied energy consumption and intensity in China's industries[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(5): 47–57.]
- [19] Li Y L, Chen B, Chen G Q, et al. An embodied energy perspective of urban economy: a three-scale analysis for Beijing 2002 – 2012 with headquarter effect[J]. Science of The Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139097.
- [20] Zheng H M, Li A M, Meng F X, et al. Energy flows embodied in China's interregional trade: Case study of Hebei Province[J]. Ecological Modelling, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109061.
- [21] Guo S, Han M Y, Yang Y P, et al. Embodied energy flows in China's economic zones: Jing-Jin-Ji, Yangtze-River-Delta and Pearl-River-Delta[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121710.
- [22] Ang B W, Mu A R, Zhou P. Accounting frameworks for tracking energy efficiency trends[J]. Energy Economics, 2010, 32(5): 1209–1219.
- [23] 张中华, 赵玉焕, Su Bin, 等. 能源需求与碳排放驱动因素分解模型发展评述[J]. 生态经济, 2019, 35(4): 13–19 [Zhang Z H, Zhao Y H, Su B, et al. Review on the decomposition analysis of driving factors applied to energy demand and carbon emission[J]. Ecological Economy, 2019, 35(4): 13–19.]
- [24] Choi K H, Ang B W. Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: Ratio and difference[J]. Energy Economics, 2003, 25(6): 615–624.
- [25] Dietzenbacher E, Los B. Structural decomposition techniques: Sense and sensitivity[J]. Economic Systems Research, 1998, 10(4): 307–324.
- [26] Ang B W, Liu N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach[J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 238–246.
- [27] Ang B W, Liu N. Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach[J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 739–742.
- [28] Wang Q, Song X X, Liu Y. China's coal consumption in a globalizing world: Insights from multi-regional input–output and structural decomposition analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134790.
- [29] Su B, Huang H C, Ang B W, et al. Input – output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: The effects of sector aggregation[J]. Energy Economics, 2010, 32(1): 166–175.
- [30] 彭水军, 刘安平. 中国对外贸易的环境影响效应: 基于环境投入–产出模型的经验研究[J]. 世界经济, 2010, 33(5): 140–160. [Peng S J, Liu A P. Environmental impacts of foreign trade in China: An input–output analysis[J]. The Journal of World Economy, 2010, 33(5): 140–160.]
- [31] Shi X H, Chu J H, Zhao C Y. Exploring the spatiotemporal evolution of energy intensity in China by visual technology of the GIS [J]. Energy, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2021.120650.
- [32] Zhu B Z, Su B, Li Y Z, et al. Embodied energy and intensity in China's (normal and processing) exports and their driving forces, 2005– 2015[J]. Energy Economics, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104911.
- [33] Guo S, Zheng S P, Hu Y H, et al. Embodied energy use in the global construction industry[J]. Applied Energy, 2019, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113838.
- [34] 林伯强. 能源革命促进中国清洁低碳发展的“攻关期”和“窗口期”[J]. 中国工业经济, 2018, (6): 15–23. [Lin B Q. The period of carrying out energy revolution to promote low carbon clean development in China[J]. China Industrial Economics, 2018, (6): 15–23.]
- [35] Guo S, Li Y, Hu Y, et al. Embodied energy in service industry in global cities: A study of six Asian cities[J]. Land Use Policy, 2020, 91: 104264.

Research on influencing factors of China's energy consumption and intensity: Based on the demand-side perspective

LI Hong, WANG Shuai

(School of Economics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: At present, China has implemented the “double control” on total energy consumption and energy intensity. Under the background of demand-side reform, analyzing the influencing factors of total energy consumption and energy intensity is the basis for formulating effective energy policy in China. Based on the perspective of final demand, this study measured the embodied energy consumption and embodied energy intensity of five types of final demand in China in 2012, 2015, and 2017. Structural decomposition analysis (SDA) and two-level attribution analysis were used to explore the factors that affect China's total energy consumption and energy intensity. Two methods were proposed to deal with the problem of zero value and negative value. The results show that: (1) Nearly half of China's energy consumption is due to meeting the demand for capital formation. The embodied energy intensity of capital formation and export is more than 1.2 times that of the country average, while the embodied energy intensity of consumption is lower than that of the average. (2) The energy efficiency effect and the production structure effect are the main factors leading to the decline of the total energy consumption and its intensity in 2012-2015 and 2015-2017 respectively. (3) The first level of attribution analysis found that the influencing factors mainly affect the capital formation demand, and then affect the total energy consumption and its intensity. (4) The second level of attribution analysis found that heavy manufacturing and construction industries are the main industries that affect the change of capital formation demand. Therefore, it has greater potential to control energy consumption from the demand side in the future, the economic growth model needs to be further changed from investment and export-driven to consumption-driven, and to speed up the promotion of domestic circulation. At the same time, we should pay attention to optimizing the consumption structure of residents, and promote its transformation to green, low-carbon, and energy-saving.

Key words: embodied energy consumption; embodied energy intensity; structural decomposition analysis; two-level attribution analysis; demand-side reform