

能源回弹效应最新研究进展:理论与方法

查冬兰 陈 倩 王群伟*

摘要:能源回弹效应是指能源效率提高并未达到预期节能效果的经济现象,其对能源、经济与环境系统协调与可持续发展产生了不利影响。自“Khaz-zoom-Brookes(K-B)假说”提出以来,学术界试图利用新古典经济学及新兴经济学分支学科理论探究回弹效应的机制,揭示回弹效应的影响因素,旨在完善回弹效应的分析框架,为回弹效应的实证检验奠定坚实的理论与方法论基础。基于此,本文首先在宏观和微观两个层面上总结了回弹效应的内涵界定,阐明了不同界定形式的适用性;然后依据回弹效应发展脉络,系统梳理了回弹效应在新古典经济学框架下的理论机制,以及在新兴经济学分支学科视角下的拓展性阐释;进而,对回弹效应的研究方法进行了归纳,探讨了不同方法的适用范围、优缺点及其修正或改进;最后,总结了能源回弹效应研究中存在的问题并对未来需要关注的方向进行了展望。

关键词:回弹效应;能源效率;能源需求;新古典经济学;新兴经济学

一、引言

能源的开发和利用促进了经济的发展和人类文明的进步,但能源需求量的增加也会造成全球能源资源枯竭、空气污染等问题。面对能源、环境和经济之间的矛盾,世界各国不断推动技术进步,以期通过提高能源效率实现节能减排,从而确保国民经济长期可持续发展。然而,根据国际能源署(IEA)发布的《能源效率2018》,许多国家、地区和部门能源消费活动的增加抵消了能源效率带来的节能。2000—2017年间,国际能源署成员国和其他主要经济体国家的

*查冬兰(通讯作者),南京航空航天大学经济与管理学院,邮政编码:211106,电子邮箱:zdl@nuaa.edu.cn;陈倩,南京航空航天大学经济与管理学院,邮政编码:211106,电子邮箱:chenqiansdly@126.com;王群伟,南京航空航天大学经济与管理学院,邮政编码:211106,电子邮箱:wqw0305@126.com。

本文系国家自然科学基金面上项目“定制化信息反馈对个人节能行为的影响及路径研究——基于现场实验的方法”(72074111)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的宝贵修改建议,文责自负。

能源效率整体提升了15%,而终端能源消耗增长了1/3。这是由于在追求能源效率的技术改造过程中,经济主体消费行为改变可能带来另一经济现象——“回弹效应(Rebound Effect, RE)”。具体地说,能源效率提高所节约的能源可能会被经济主体的微观替代效应、收入效应、产出效应,以及宏观二次效应、转换效应、溢出效应等产生的新的能源需求部分或完全抵消,使得能源效率政策的节能效果往往要小于预期效果(Greening et al., 2000; Sorrell, 2009; Freire-González & Puig-Ventosa, 2015)。回弹效应的提出为诠释技术进步、能源效率和能源消费之间的关系提供了一种全新的视角,在低碳经济发展背景下,研究能源回弹效应对各国更好地实施能源可持续发展战略具有重要的理论指导意义(王庆一等, 2004; 林民书、杨治国, 2010; 查冬兰、周德群, 2012; 杨莉莉、邵帅, 2015)。

能源回弹效应的思想源于“杰文斯悖论(Jevons Paradox)”,杰文斯发现,能源效率提高与能源需求减少之间存在矛盾,这一现象引发了学者对能源效率政策有效性的质疑(Sorrell, 2015)。石油危机爆发后,杰文斯悖论开始备受关注,涌现出大量学者探究回弹效应的原因。发展至今,回弹效应已成为能源经济学领域的一个研究热点,相关研究日益丰富。本文通过梳理能源回弹效应的内涵界定和理论机制,回顾能源回弹效应的实证研究方法,总结归纳现有研究的不足,为回弹效应的后续研究提供借鉴与参考。

二、能源回弹效应的内涵界定

Brookes(1978, 1990)和Khazzoom(1980)认为,由能源效率提高产生的能源节约可能被经济个体的行为反应带来的能源消费增加而抵消,能源效率的提高不一定带来能源需求的减少,甚至可能导致能源需求的增加,即“Khazzoom-Brookes(K-B)假说”(Saunders, 1992)。虽有学者后续对回弹效应作出界定,但普遍是K-B假说的延伸,根据其角度的不同,可以分为宏观和微观两个层面内涵界定。

(一)宏观层面内涵界定

在宏观层面, Berkhout等(2000)将回弹效应解释为:技术进步使生产设备的能源效率得以提高,在其他条件不变的情况下,生产设备的单位生产成本降低,相关产品价格的下降导致消费者的需求增加,这些额外增加的需求意味着更多的能源消费,由此减少的预期能源节约量即为回弹效应。Haas和Biermayr(2000)将回弹效应(RE)直接表示为:

$$RE = \frac{PS - AS}{PS} \times 100\% \quad (1)$$

其中, PS 、 AS 分别表示预期节能量、实际节能量。

式(1)是回弹效应最直观的描述,公式右侧表示能源消费的回弹量与预期能源节约量的比值,但由于预期节能量和实际节能量都是绝对量,在现实中难以测量,因此式(1)在实证研

究中应用较少。

Saunders(2000a)在新古典经济学基础将生产函数设定为 $Y=f(K, L, \tau E)$: Y , K , L 和 E 分别代表产出、资本、劳动和能源, τ 代表能源效率, τE 代表实际能源服务。同时将能源效率提高导致的能源消费变化量定义为能源效率的需求弹性 η ($\eta = d \ln E / d \ln \tau$),进而将回弹效应表示为:

$$RE = 1 + \eta \quad (2)$$

由式(2),回弹效应可量化描述为:当能源效率提高1%时,能源消费量将增加 $RE\%$ 。根据 RE 的大小,回弹效应存在以下五种情形:①逆反效应(Backfire Effect), $RE > 1$, $\eta > 0$;②完全回弹效应(Full Rebound Effect), $RE = 1$, $\eta = 0$;③部分回弹效应(Partial Rebound Effect), $0 < RE < 1$, $-1 < \eta < 0$;④零回弹效应(Zero Rebound Effect), $RE = 0$, $\eta = -1$;⑤超级节约效应(Super Conservation Effect) $RE < 0$, $\eta < -1$ 。当存在逆反效应时,即能源消费的效率弹性较高时,由技术进步而提高的能源效率所带来的能源节约量小于经济体系内的反应产生的能源消费增加量,能源效率的提高反而增加了能源使用量,此时能源效率政策达到了相反的效果。相比之下,超级节约效应是一种理想情形,能源消费的实际减少量超过了预期的减少量,这种状态有利于能源可持续发展。另外,Saunders(2008)在后续研究中还指出,上述界定形式中生产函数和成本函数的设定形式直接影响到回弹效应的表现形式和测算结果。

(二)微观层面内涵界定

微观层面主要研究能源效率提高对企业和家庭的影响。能源效率提高,微观经济主体对制冷、供暖和出行等能源服务(S)需求的增加引起能源消费(E)增加,从而产生了回弹效应(Sorrell et al., 2009; Druckman et al., 2011; Chitnis & Sorrell, 2015; Hymel & Small, 2015; Stapleton et al., 2016)。回弹效应可用能源(消费)需求变动对能源效率(ε)变动的反应程度来表示:

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} \quad (3)$$

以能源效率为出发点,考虑能源效率与能源服务需求、能源价格、其他投入要素成本、时间成本的关系以及能源效率的内生性问题,微观层面回弹效应可归纳为五类(Sorrell & Dimitropoulos, 2008)。

1.基于效率弹性的界定

Berkhout等(2000)根据式(3)及 $S = \varepsilon E$,推导出:

$$\eta_\varepsilon(E) = \eta_\varepsilon(S) - 1 \quad (4)$$

其中, $\eta_\varepsilon(S)$ 表示能源服务需求对能源效率的弹性,通常被用来直接测度回弹效应。当能源服务需求对能源效率弹性为0时,能源消费的效率弹性为-1,这种情况下,能源效率提高与能源

消费减少相同的百分比;当能源服务需求对能源效率弹性较小($0 < \eta_e(S) < 1$)时,部分能源节约会被增加的需求抵消掉($-1 < \eta_e(E) < 0$);当能源服务需求对能源效率弹性较大($\eta_e(S) > 1$)时,能源效率提高导致了能源消费的增加($\eta_e(E) > 0$)。

Greene等(1999)、Small和Van Dender(2005)认为能源服务可以以能源转换设备的数量(NO)、平均规格(GAP)、平均利用率($UTIL$)之积来衡量,从而能源需求对能源效率的弹性可表示如下:

$$\eta_e(E) = [\eta_e(NO) + \eta_e(GAP) + \eta_e(UTIL)] - 1 \quad (5)$$

能源服务中 NO 、 GAP 、 $UTIL$ 的相对重要性主要取决于能源转换设备提供的功能,如私家车提供的能源服务主要是行驶距离,因而以车辆数量与平均出行距离之积来衡量行驶距离,只有在研究期间内车辆的平均重量发生改变时,重量因素才需纳入到回弹效应的测算之中(Small & Van Dender, 2005)。

2. 基于价格弹性的界定

假设在能源价格不变时,提高能源效率对能源价格的影响等同于能源效率不变时,能源价格变化对能源效率的影响^①,同时假设能源效率为外生变量^②,依据能源价格(P_E)与能源服务价格(P_S)的关系($P_S = P_E/\varepsilon$)可推导出:

$$\eta_e(E) = -\eta_{P_S}(S) - 1 \quad (6)$$

即在以上两个假设条件下,能源效率变化导致能源需求的变化量为能源服务需求量对能源服务价格弹性的负值($-\eta_{P_S}(S)$)减去1(Khazzoom, 1980; Berkhout et al., 2000; Binswanger, 2001)。Roy(2000)和Bentzen(2004)也以能源需求对能源价格的弹性测度回弹效应:

$$\eta_e(E) = -\eta_{P_E}(E) - 1 \quad (7)$$

对比于(4)式的界定,能源服务需求对能源服务价格弹性的负值($-\eta_{P_S}(S)$)及能源需求对能源价格弹性的负值($-\eta_{P_E}(E)$)可看作是能源服务需求效率弹性($\eta_e(S)$)的近似值,在研究中具体选择哪种界定形式取决于数据的可得性。

3. 考虑能源效率与其他投入要素成本关系的界定

其他投入要素与能源效率并非完全无关(Henly et al., 1988; Roy, 2000; Mizobuchi, 2008),如高能效的设备比低能效的设备投入的资金成本更多、价格更高,因此资金成本与能源效率是相关联的。Roy(2000)在引入资金成本(P_K)后将回弹效应表示为:

$$\eta_e(E) = -1 - \eta_{P_S}(S) - [\eta_{P_K}(S) \eta_e(P_K)] \quad (8)$$

①即“对称性(symmetry)”假设(Sorrell & Dimitropoulos, 2008)。

②即“外生性(exogeneity)”假设(Sorrell & Dimitropoulos, 2008)。

式(8)考虑资金成本后,增加了资金成本受能源效率变动影响后对能源服务需求影响的部分。在能源效率提高后,资金成本的上升带来的能源服务需求下降,部分补偿了能源效率提高直接导致的对能源服务需求的增加。在研究中如果不考虑资本成本,容易导致回弹效应被高估,这主要是因为成本的提高会影响到消费者的购买决策,较高的购买成本倾向于减小回弹效应(Sorrell & Dimitropoulos, 2008)。

4.内生能源效率的界定

以上界定都假设能源效率为外生变量,而事实上能源效率也会受到价格等其他因素的影响(Small & Van Dender, 2005)。将能源效率视为能源价格的函数,内生能源效率后的回弹效应为:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -\frac{\eta_{P_{\varepsilon}}(E) + \eta_{P_{\varepsilon}}(\varepsilon)}{1 - \eta_{P_{\varepsilon}}(\varepsilon)} - 1 \quad (9)$$

当能源价格对能源效率的弹性为零($\eta_{P_{\varepsilon}}(\varepsilon) = 0$)时,式(9)简化为式(7)。Hanley等(2002)指出,当能源价格对能源效率的弹性不为零($\eta_{P_{\varepsilon}}(\varepsilon) \neq 0$)时,能源服务需求的价格弹性比能源需求的价格弹性要小($|\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_{\varepsilon}}(E)|$),因此,如果忽视了能源价格引起的能源效率提高,式(7)会高估回弹效应。事实上,能源效率也可能是其他变量的函数,如能源效率与能源服务价格往往呈现出正向的关系,从而形成能源服务需求(S)取决于能源服务价格(P_S),能源服务价格(P_S)取决于能源效率(ε),能源效率(ε)取决于能源服务需求(S)的内生化循环过程。如果不考虑这种情况,回弹效应也会被高估。

5.考虑能源效率与时间成本关系的界定

提供能源服务往往需要投入时间,如运输劳务(Binswanger, 2001)。时间成本(P_T)通常以单位劳务的工资率衡量,时间效率(θ)是能源效率的函数。Sorrell和Dimitropoulos(2008)认为当纳入时间成本时,回弹效应表示为:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -1 - \eta_{P_S}(S) + [\eta_{P_T}(S)\eta_{\theta}(P_T)\eta_{\varepsilon}(\theta)] \quad (10)$$

式(10)最后一项为能源服务需求对时间成本的弹性 $\eta_{P_T}(S)$ 、时间成本对时间效率的弹性 $\eta_{\theta}(P_T)$ 和时间效率对能源效率的弹性 $\eta_{\varepsilon}(\theta)$ 的乘积,即这一界定形式增加了时间成本在能源服务成本中的比例变化对回弹效应的影响这一项。多数情况下,能源效率与时间效率呈现出负向关系^①。因此,当时间成本较高时,消费者会以能源效率替代时间效率,从而能源需求相对减少。

此外,式(8)和式(10)的合并即为同时考虑资金成本和时间成本的回弹效应表示形式:

^①例如:乘坐轮船与乘坐飞机。轮船的时间效率较低,能源效率较高;而飞机的时间效率较高,能源效率较低。与能源效率和能源价格之间的关系类似,假设时间效率高,时间成本就低。

$$\eta_{\epsilon}(E) = -1 - \eta_{P_S}(S) - [\eta_{P_K}(S)\eta_{\epsilon}(P_K)] + [\eta_{P_T}(S)\eta_{\theta}(P_T)\eta_{\epsilon}(\theta)] \quad (11)$$

微观层面的回弹效应界定形式适用于研究直接回弹效应,其中,基于效率弹性的界定形式对回弹效应的测算结果较为准确,但这种形式在很大程度上受到数据的限制。在估算单一能源服务时,由于能源价格和能源服务成本的历史和截面数据往往比能源效率的数据更容易获得,因此,基于价格弹性的形式最为常用。

三、能源回弹效应理论机制

能源效率通过一系列机制作用在宏观和微观经济层面,这些特定的机制是研究回弹效应的核心问题。最初对回弹效应的探讨主要集中在其存在性方面,对其理论机制并未形成统一的认识。随着研究的深入,学术界逐渐建立起基于新古典经济学理论的回弹效应研究框架。

(一)理论萌芽

关于回弹效应的理论机制,Khazzoom(1980)最早提供了基于微观经济学供需理论的探索性解释,他认为能源效率改进使能源服务的单位成本降低,供给曲线将沿着需求曲线移动,均衡时能源服务需求增加,能源效率提高前后需求量变化的部分即为回弹效应的部分。Khazzoom(1980)忽略了需求函数的变化,讨论的仅是一个高度简化的局部均衡情形,因此其解释力不足。Brookes(1990)对回弹效应理论机制的论断侧重于宏观经济层面,主要是从能源效率、经济生产率、能源供需和经济增长之间的关系出发,对回弹效应作出解释。Brookes的观点可以概括为以下三个命题:(1)生产率命题。高质量能源使用的增加能够促进技术进步,技术进步提高全要素生产率从而推动经济增长,最终经济产出增加,能源效率与能源消费同步增长。(2)调整性命题。能源效率提高后能源价格降低,能源的供需在更高的水平上达到平衡。(3)内生性命题。如果能源效率提高是经济增长的必要条件,那么在估算能效提高后的能源消费量时,将能源强度^①看作常数是不科学的。

(二)理论拓展

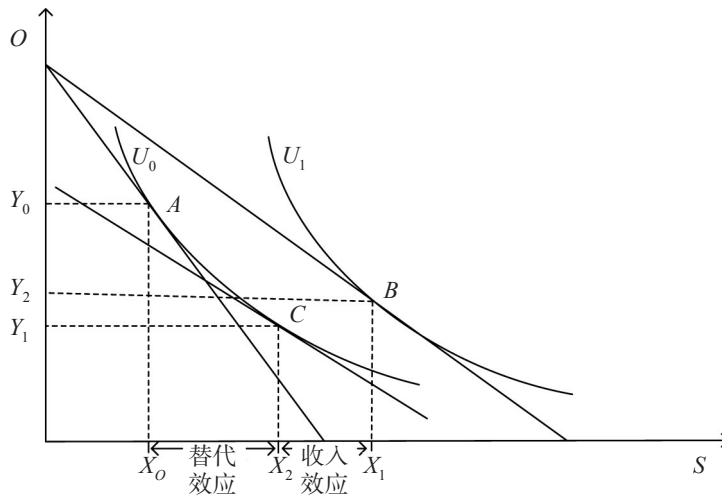
在新古典经济学框架下,学者们基于不同的经济分析工具和经济理论从宏观和微观层面对 Khazzoom(1980)和 Brookes(1990)的观点作出了更为详尽的阐述与拓展,扩充了这一框架下的研究思路和方法。

1.基于消费者行为理论的拓展

Greening等(2000)基于 Khazzoom(1980)的研究,在微观层面用消费者行为理论解释回弹效应:当能源利用技术改进时,在其他条件不变的情况下,单位服务所需的能源投入减少,能源服务价格降低,价格的下跌刺激需求使需求曲线发生移动,消费者对能源的需求将增加。

^①该文献中,能源强度指单位货币产品所投入的能源。

他们将能源效率改进引起能源(服务)价格降低进而导致能源需求增加的过程称为直接回弹效应。Sorrell和Dimitropoulos(2007)对这种变化进一步作出了说明。如图1,在仅考虑两种产品的情况下,能源利用效率提高之前,A点为消费的均衡点,此时对S的消费量为 X_0 。能源利用效率提高后,S的价格下跌,消费者将调整两种产品的消费数量以实现效用最大化,消费均衡点由A点右移到B点,对S的消费量增加了 X_0X_1 。其中, X_0X_2 是在效用水平不变的条件下,消费者利用相对廉价的S替代O而产生的能源产品或服务的消费,被称为替代效应; X_2X_1 的产生是由于能源利用效率提高后,能源价格降低使消费者的真实收入增加,消费者消费更多产品以提高其效用水平,这部分消费被称为收入效应。



注: S表示能源产品或能源服务消费, O表示其他无能源投入的产品消费。

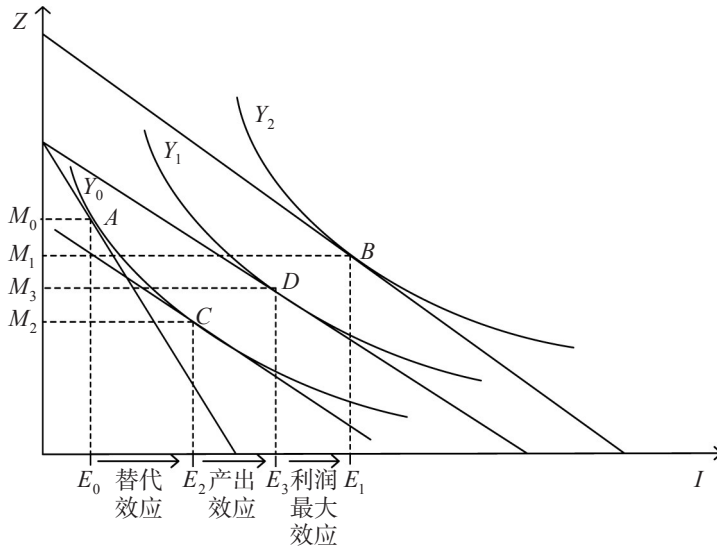
图1 基于消费者行为理论的直接回弹效应发生机制

当消费者名义收入不变时,能源价格下跌后消费者对能源服务的支出减少,节余的资金可能会被消费者用于购买其他产品或服务(Hertwich, 2005; Druckman et al., 2011; Chitnis & Sorrell, 2015)。Hertwich(2005)将这种由能源价格下降引起消费者对收入分配的重新调整称为“再消费效应”。消费者将能源消费上节省下的资金再消费于其他产品或服务,而这些产品或服务同样需要消耗能源,因此能源需求进一步增长,从而产生了间接回弹效应(Greening et al., 2000; Sorrell & Dimitropoulos, 2007)。

2.基于生产者行为理论的拓展

Sorrell和Dimitropoulos(2007)认为从生产者角度而言,能源效率的提高也伴随着直接回弹效应的产生,并且可根据其作用过程划分为替代效应和产出效应(图2)。能源作为生产的投入要素,与其他投入要素之间存在替代关系。假设生产的投入要素只有I和其他要素Z,能源效率提高之前,在生产成本的约束下,A点为生产的均衡点,此时,生产者对I的需求量

为 E_0 。能源效率提高后,生产的单位成本相对降低,生产者将通过调整生产投入及市场以实现利润最大化,生产的均衡点最终落在 B 点,对 I 的消耗量为 E_1 。其中, E_0 增加到 E_2 , M_0 减少到 M_2 的原因是: I 的单位成本下降,生产者在产量不变的情况下为实现生产成本最小化,利用 I 替代 Z 而使得 I 的使用量增加,其他要素的投入减少,这一过程称为替代效应。此外,能源效率提高节省了生产者的生产成本,因此生产者可以在原成本下提高产出水平,从而 I 及 Z 的投入增加,称为产出效应。产出效应使能源和其他要素投入分别从 E_2 、 M_2 上升到 E_3 、 M_3 。以上分析仅对单个生产者而言。然而,在一个完全竞争市场中,将会有更多的生产者受到生产利润的驱使进入该行业,使市场上产品供给增加,投入要素的使用量也因此增加,这一过程可称为利润最大效应。



注: I 表示能源或相关服务投入, Z 表示其他要素投入。

图2 基于生产者行为理论的直接回弹效应发生机制

在生产中,能源投入成本的降低也会导致其他需要能源投入的产品或服务产出增加,引起间接回弹效应。Sorrell(2007)认为生产者角度的间接回弹效应产生可通过二次效应来解释。二次效应主要包括能源效率提高和价格下降带来的三种影响:(1)总体经济的生产力提高,产出增加,从而消耗更多的能源。(2)实际收入提高,刺激投资,产出增加,能源用量增加。(3)能源密集型产品和服务的价格降低,消费者需求向能源密集型产品或服务转移,生产者生产能源密集型产品消耗更多的能源。这三种影响又分别称为产出效应、能源市场效应和复合效应(Sorrell, 2009)。

3.基于一般均衡理论的拓展

能源效率提高后整个经济的状态会随着时间的推移而发生变化,如技术的变化可能会引

起消费者行为、社会制度、生产组织以及时间分配发生改变,这些改变将会促使市场价格做出调整,经济组织或个体对价格的反应会产生额外的能源消耗。在能源的供给量、消费者偏好、生产函数一定的情况下,能源和其他产品的价格便会在不同市场的相互作用下调整到唯一的均衡值,市场将会保持在稳定的状态,系统中任何因素的变化都会打破这一状态。由于经济中存在复杂的动态调整过程,回弹效应理论研究不应仅在局部均衡的静态框架之下。

基于此,Greening等(2000)对回弹效应进行了一般均衡分析,他们认为能源效率提高会引起相应的能源产品与服务价格下降,促使经济系统内所有相关中间产品和最终产品的价格、产量随之发生调整,带动微观层面产品和服务的需求增加及宏观层面生产规模的扩张和经济增长,最终引致能源需求增加,从而产生经济范围回弹效应。而Chang等(2018)对整体经济回弹效应理论机制的描述强调长期财富(资本)积累及整个行业的能源配置,他们指出,技术改进除了使生产端和消费端产生替代效应外,还影响家庭的劳动供给和家庭收入,并且促使企业在各部门之间重新分配资源,即而改变了总产出及污染水平,影响整体经济回弹效应的大小。总体来说,一般均衡框架下回弹效应研究描述的是影响生产与消费的因素相互作用,并达到均衡时的能源需求,但由于其作用过程的复杂性及作用结果的难辨识性,存在的争议也最多。

4.基于新古典增长理论的拓展

Saunders(1992)基于Brookes(1990)的研究,在新古典增长理论框架下尝试对回弹效应的理论机制进行阐释。他假设能源与其他投入要素之间具有可替代性,并利用柯布-道格拉斯(C-D)生产函数和不变替代弹性(CES)生产函数进行规范的数理推导,证明了K-B假说的存在性。Saunders(1992)与Brookes(1990)思想的主要不同在于,前者强调的是来源于纯效率改进带来的逆反效应,而后者强调的是某一要素对其他投入要素生产率的影响。后有学者开始沿着Saunders(1992)的思路对回弹效应进行研究。Howarth(1997)对Saunders(1992)将能源作为生产投入提出了质疑,并建议在回弹研究中区分能源消费与能源服务。通过调整的经济增长模型,Howarth(1997)发现只有在能源成本占能源服务成本的比例很高,并且能源服务支出占经济活动支出的比例很高时,才会出现逆反效应。Saunders(2000b)根据Howarth(1997)提出的问题,再次用新古典增长理论证明了在生产函数中使用能源服务时,仍然可能会发生逆反效应。此外,Saunders(2008)还对八类生产函数的长期和短期回弹效应进行理论推导及数值分析,发现回弹效应受生产函数设定的影响,并且预先选取的要素替代弹性会对回弹效应造成影响。

Saunders(2008)及其他学者在新古典增长理论框架下对回弹效应理论机制进行剖析,并在理论上证明了回弹效应的存在性。但这一框架中隐含的前提条件导致了回弹效应研究存在局限性,例如,技术成本免费、生产规模报酬不变、市场完全竞争、充分就业以及忽略资本和

投入要素品质差异等假设使新古典增长理论对现实问题的解释力不足(Sorrell, 2009)。

(三)理论新尝试

随着回弹效应理论研究的深入及新兴经济学理论的发展,一些文献已不再局限于基于新古典经济学的能源经济学视角,开始尝试从生态经济学、心理学、演化经济学、技术经济学学科的角度考察回弹效应产生的原因(Walnum et al., 2014; Vivanco et al., 2016)。

1.生态经济学

生态经济学视角下的回弹效应研究主要将环境因素纳入分析中,或者直接在生态系统中考虑能源效率提高后经济的变化。Alcott(2010)通过IPAT方程^①解释了回弹效应理论机制,他认为人口规模、富裕程度、技术水平之间是相互作用、相互影响的,任何试图通过政策约束降低其中一个因素来减少能源消费的目标未必可行,因为通过任一个因素所产生的预期积极成效可能被同时引发的其他因素的反向作用抵消而具有产生回弹效应的风险。能源效率的提高可能会对能源消费产生直接的抑制作用,但能源效率提高往往伴随着收入、消费水平和富裕程度($P \times A$)的提高从而导致更多的能源消费和污染排放。Amado和Sauer(2012)认为,从生态经济学角度来说,Brookes(1990)的论点中隐含着经济系统中经济的增长离不开能源投入的前提假设,即能源投入是提高生产率和维持经济增长的必要条件。此外,根据Lotka(1922)的推论,有机系统的能量流入随着时间的推移而增加。因此,在长期中系统流入资金增加和经济增长必然导致杰文斯悖论的产生。

2.心理学

微观回弹效应研究中,通常具有理性人假设,即市场主体在进行经济决策时都会衡量成本和收益,然后决定对能源的需求量。但这种假设过于严格,因为现实中人们并不总是理性的,人类行为决定可能受到主观因素的影响。因此,有学者开始从心理学视角研究回弹效应。

Dütschke等(2018)主要从道德许可的角度解释回弹效应,认为人们可能做出改变而选择能源效率更高的产品或服务以减少能源消费或环境污染,但同时人们认为,这些行为为自己积累了“道德”,随后他们会消费更多的能源密集型产品或服务,最终产生了相反的效果。如果人们选择能源效率更高的产品是由于他们认为高效产品更符合个人环保观念和价值观,或者更能体现自我价值,那么回弹效应就不易发生;而如果是由于高效产品成本更低或者更安全舒适,那么很可能产生回弹效应。除了道德许可效应外,Santarius和Soland(2018)认为消费者的责任扩散心理也会导致回弹效应,当消费者购买或使用高效的产品时,他们会认为自己已经做出了有利于环境保护的行为,并将环境保护的责任扩散到其他人身上,进而自身的责任感和使命感就会减弱,这导致他们更多地使用这种产品,能源消耗量也因而增加。

^① $I = P \times A \times T$, I, P, A, T 分别表示能源消费量或环境负荷、人口规模、富裕程度(人均产品或服务消费量)、技术水平。在Alcott(2010)的文献中,技术水平表示能源效率,以单位产出的能源投入即能源强度代表。

心理学视角下回弹效应的分析,可以捕捉消费选择中的非理性因素,对能源效率变化后的行为进行评估,不失为弥补新古典经济学框架下回弹效应研究缺陷的新视角(De Haan et al.,2006;Patrick et al.,2006;Santarius et al.,2016)。

3.演化经济学

经济系统具有复杂性,一项技术创新可能改变其原有的运行状态。技术进步带来的能源效率提高往往会使经济结构和功能在一定层次上发生变化,因此,基于原始经济特征的简化分析模型不能反映能源效率提高前后经济的真正变化(Giampietro & Mayumi,2008,2018)。基于此,Ruzzenenti和Basosi(2008)较早地将进化论的思想引入到回弹效应研究中,尝试从热力学和演化经济学的理论视角解释回弹效应。他们认为能源效率提高所产生的节能潜力会驱动能源流增加,经济系统将在能源流的压力下以更复杂的方式进行自组织演化,而经济系统越复杂,其效率和能源密度率就越高。能源密度率的提高将导致系统更复杂,进而抵消能源效率提高带来的节能效果。

Giampietro和Mayumi(2018)侧重于利用复杂自适应系统理论解释杰文斯悖论产生的原因。他们认为,人和人类社会是复杂自适应系统中的一个特殊的类别,他们能够与环境中的其他个体在持续交互过程中不断演化学习,并努力争取预期的结果。在经济扩张阶段,当能源效率提高后,由于系统中存在财富分配不均的现象和强烈提高物质生活标准的愿望,他们会利用能源效率提高产生的盈余去改善生活条件或解决其他问题,此时杰文斯悖论的发生不可避免。Ruzzenenti和Basosi(2008)、Giampietro和Mayumi(2018)的研究主要基于演化经济学中的定性推理,缺乏对理论推断的定量描述,以复杂系统建模为导向的定量化方法应得到重视与发展。

4.技术经济学

在新古典经济学框架下,回弹效应研究主要基于现有产品或服务,并且假设研究范围内的经济是封闭的,因而可能忽略了引起回弹效应的外生性因素。Jenkins等(2011)和Saunders(2013)认为技术进步带来的能源效率的提高可能会催生出新产品、新应用,甚至一个全新的行业,进而导致能源消耗量的增加。Freeman(2018)对Jenkins等(2011)、Saunders(2013)的研究作出了进一步说明,并尝试从技术溢出的角度解释回弹效应。Freeman(2018)认为,在宏观层面,一种产品能源效率的提高会产生二次效应和转换效应,当多种产品的效率相互促进同时提高时,会产生新产品、新应用和新行业。此外,国家之间的技术转让使能源效率从一国向另一国流出并传播,带动了技术输入国家的经济增长与资源消耗。能源效率提高在全球范围内通过以上路径的协同作用决定了生产、消费和投资,最终引起回弹效应。虽然能源效率提高对产业发展及其他国家的具体影响并未得到充分的证实,但以上分析也不失为研究回弹效应的新思路。

四、能源回弹效应研究方法

通过实证研究可以检验回弹效应是否存在,但由于实证中假设条件、理论基础等因素的不一致,目前对不同研究对象,甚至同一个研究对象回弹效应的测算,都没有被广泛认可和使用的办法。目前定量研究回弹效应的办法主要有直接测算法、价格弹性法、投入产出法、可计算一般均衡模型、经济增长法。

(一)直接测算法

直接测算法将能源效率和能源服务需求量分别当作自变量和因变量,比较能源效率提高前后能源服务需求量的变化。由于这一办法相对简单,因此被一些学者用于研究微观层面的直接回弹效应(Fron del & Schmidt, 2005; Madlener & Hauertmann, 2011)。如 Hong 等(2006)通过追踪英格兰 1372 户家庭两个冬季的供热状况,发现能源效率提高后,集中供热家庭的燃料消耗降低了 10%,非集中供热家庭的燃料消耗降低了 17%。Hens 等(2010)基于家庭的实际调查数据,对比利时的 964 个家庭供暖能源消耗进行了直接测算,发现隔热良好的建筑中家庭的直接回弹效应要比不具有隔热性的建筑中家庭的直接回弹效应高得多。但由于他们的研究所采集的调查数据只代表了愿意参与调查的家庭能源消费情况,因此这些调查数据并不是随机的,从而可能产生选择性偏差(Fron del & Schmidt, 2005; Sorrell et al., 2009)。此外,现实中能源服务需求可能受到个人收入、经济结构变化等多种因素的影响,而在研究中又难以控制除能源效率外其他影响能源需求变化的因素,并且不易准确度量能源服务需求,导致该办法的估算结果往往出现较大偏误。正是由于这些缺陷,目前少有学者使用这种办法。

(二)价格弹性法

价格弹性法的理论基础是回弹效应价格弹性界定形式,它通过估算能源(服务)的价格弹性测算回弹效应的大小。此办法中所使用的数据主要是二手数据(能源价格、能源需求),数据的类型包括时间序列数据、横截面数据和面板数据。在估算价格弹性时通常使用计量经济学模型,如双对数模型(Wang & Lu, 2014; Stapleton et al., 2016)、近似理想需求系统模型(AIDS)(Brännlund et al., 2007; Lin & Liu, 2013; Moshiri & Aliyev, 2017; Zhang et al., 2017)、分位数回归模型(Gillingham et al., 2015; Fron del et al., 2019; Belaïd et al., 2020)、结构方程模型(Dillon et al., 2015; Seebauer, 2018)等。

相比于直接测算法,价格弹性法的优点在于数据可得性较强,因此被广泛应用于家庭、区域及国家层面直接回弹效应的研究。但此办法也存在高估回弹效应的可能。Dargay 和 Gately (1997)、Haas 和 Schipper(1998)分别对公路交通和家庭部门的价格弹性进行了估算。他们发现,价格上涨期的价格弹性通常高于下降期的价格弹性,他们将其解释为技术进步的不可逆

性,即能源价格的上升能够促进技术进步,而技术进步不会因能源价格下降而丢失。因此,在价格上升时期用价格弹性测算回弹效应会导致结果偏高。为解决非对称价格的问题,Dargay和Gately(1997)提出利用价格分解法将能源价格的时间序列分解成3个单调的分量序列,即最大价格序列、价格下降的序列、价格上升的序列。由于假设能源价格下降与能源效率提高的作用是相同的,因此价格下降序列的系数与回弹效应有关。此后许多文献在使用价格弹性法测算直接回弹效应时,采用这种方法对价格进行分解。如Hymel和Small(2015)基于对称和非对称的价格反应模型,测算美国50个州汽车出行的价格弹性,发现1966—2009年回弹效应呈现上升的趋势,从2003年开始,上升了2.5到2.8个百分点,并且汽油价格上升年份的回弹效应比价格下降年份的回弹效应大。此外,利用价格分解法测算回弹效应的文献还有Dargay(2007)对英国汽车出行的研究、Stapleton等(2016)对英国私人交通的研究、Wang等(2016)对北京居民用电的研究等。

除了非对称的价格弹性外,如第二节所述,由于价格弹性法不考虑能源效率与其他投入成本的正相关性、价格在能源效率改进中的推动作用、能源效率的内生性、能源效率与时间成本的负相关性等因素,回弹效应可能被高估。Mizobuchi(2008)发现在考虑了资本成本变量后,日本家庭的回弹效应从115%下降到了27%。因此,近些年一些学者开始尝试将资本成本纳入到回弹效应研究中,如Chitnis等(2014)、Li等(2018)。

(三)投入产出分析法

投入产出分析法从产品生命周期的角度,考虑了社会生产以及消费的各个部门,能够测算产品在整个供应链上的能源消费量或者碳排放量(田成诗、张诗雅,2019)。在回弹效应研究中,这一方法被广泛用于评估消费者再消费产生的能源消耗及环境影响,进而测算间接回弹效应(Druckman & Jackson, 2009; Freire-González, 2011)。投入产出分析法的基本计算公式如下:

$$e = E(I - A)^{-1}f \quad (12)$$

其中, e 为能源消耗总量; E 为能源强度,表示单位货币的产品产出所消耗的能源; $(I - A)^{-1}$ 为里昂惕夫逆矩阵; f 为消费支出。 $E(I - A)^{-1}$ 是线性算子,被称为后向关联系数。利用式(12)可计算能源效率提高后经济部门最终需求变化所引致的能源消耗总量的变化,再结合不同再消费情景下的结构化算式即可估算回弹效应的大小。Thomas和Azevedo(2013a, 2013b)使用环境扩展的经济投入产出生命周期评价模型(EIO-LCA),在直接回弹效应为10%的假设下,测得美国家庭能源消耗和CO₂排放的间接回弹效应均在5%到15%之间。投入产出分析法是较为理想的间接回弹效应测算方法,到目前仍被广泛使用。但正如Thomas和Azevedo(2013a, 2013b)所述,这种方法只能分析静态情形下的回弹效应,不能反映出消费结构动态变化的影响。

(四)可计算一般均衡模型

可计算一般均衡(CGE)模型以瓦尔拉斯一般均衡理论为基础,涉及到社会经济结构、商品市场和要素市场等各个方面,通过价格机制将各个部分联系在一起,是研究整个经济系统因能源效率提高而发生连锁变化的一个理想的方法(赵永、王劲峰,2008)。此模型在回弹效应研究中具有一定的优势:(1)考虑了各经济要素之间相互影响、相互作用的条件,在经济变量(产品、生产要素、产品价格、工资等)众多的情况下得到各个市场的均衡数量和价格,同时具有处理大量经济数据的能力。(2)将影响能源效率的可能因素都概括进去,同时兼顾到要素替代、收入和部门结构等因素的影响,不仅能估算出直接和间接回弹效应,也可以实现宏观经济回弹效应的测算。(3)反映出外界扰动项的方向,可对结果的稳定性进行敏感性分析,并考察不同回弹效应值下经济结构和行为特征上的差异。

CGE模型常被用于宏观层面回弹效应的测算(Turner & Hanley, 2011; Bataille & Melton, 2017; Khosroshahi & Sayadi, 2020)。查冬兰和周德群(2010)通过构建能源效率影响下的可计算一般均衡模型,模拟不同能源种类能源效率提高4%对能源消费的影响。模拟结果显示,煤炭、石油和电力在七部门的加权平均能源效率回弹效应分别为32.17%、33.06%和32.28%。Freire-González(2020)利用一个动态能源经济可计算均衡模型评估能源税对西班牙能源回弹效应的影响,文章假设全球的能源效率提高5%,并且不同的能源行业从价税率不同,那么能源税为3.76%时,82.82%的经济范围回弹效应将会被全部抵消。值得注意的是,在使用CGE模型时,不同的前提假设、生产函数和相关参数的设定等一些预设条件都会对回弹效应测算结果产生影响(Sorrell, 2007)。因此,模型中因素设置的合理性可能会直接影响到测算结果的可靠性。为了检验结果的稳定性,现许多研究在使用一般均衡模型时都会提供敏感性分析,如Anson和Turner(2009)、Duarte等(2018)。

(五)经济增长法

经济增长法也是测算宏观经济回弹效应的一种方法,这种方法利用生产函数来估算能源效率对经济增长的贡献,进而测算回弹效应。周勇、林源源(2007)将能源视为生产的投入要素,以全要素生产率(TFP)代表广义技术进步,利用三要素生产函数及岭回归的计量经济方法估算中国技术进步引起的回弹效应,结果显示,在宏观经济层面上,回弹效应在30%到80%之间波动,而且20世纪90年代的平均回弹效应要明显低于20世纪80年代。由于其方法克服了能源价格非市场性和数据不可得的问题,后续一些国内学者沿用了他们的思路,只是在样本数据、计量分析方法方面进行了调整或在模型上做出了改进(刘源远、刘凤朝,2008; Lin & Liu, 2012; Lin et al., 2017)。

Shao等(2014)认为周勇、林源源(2007)的模型只是建立在相关经济变量之间的逻辑关系之上,缺乏理论基础。因此,他们基于IPAT方程,并借助基于时变参数状态空间模型的潜变

量分析方法,构建了一个修正的测算模型。结果显示,中国宏观经济层面显著存在能源回弹效应,1954—2010年平均为39.73%,改革开放前均值为47.24%,且波动性较大,改革开放后均值为37.32%,且呈现出曲折下降的趋势。Lin等(2017)也基于周勇、林源源(2007)的模型,采用LMDI、Cobb-Douglas及CES生产函数、岭回归方法对中国有色金属行业的直接回弹效应进行了测算,他们发现,有色金属行业的平均回弹效应约为83.02%,且呈下降趋势。

经济增长法虽然避开了一些不可控的因素,但将问题的难点引向了技术进步的估算,生产函数中要素投入数量的选择以及估计方法均可能影响技术进步对经济增长的贡献率,从而影响回弹效应的测算结果。此外,这种方法假设技术进步为能源节约型技术进步,因而忽略了由能源技术进步引起总产值增长的过程中能源投入增加的情况。

(六)其他方法

除上述方法之外,近些年来也有学者运用动态方法测算回弹效应。Barker等(2009)运用混合宏观经济(能源-经济-环境)模型模拟不同能源效率政策对全球整体经济层面回弹效应的影响,发现总回弹效应预计到2020年为31%,到2030年将升至52%。与传统静态模型不同,混合宏观经济模型注重动态和不确定性分析,能够体现不同时期不同部门之间相互作用的因素,同时不局限于新古典经济理论的严格假设条件,更加符合现实经济的运行情况。但模型的复杂程度高,对样本数据的需求量大,因此少有学者使用。

Adetutu等(2016)提出了一种两阶段估计方法,首先利用随机前沿分析法(SFA)估计能源效率,再通过广义矩估计(GMM)方法测算回弹效应。他们用这种方法探讨了1980—2010年55个国家的回弹效应,估计结果显示,在短期内,能源效率提高100%后,能源消耗回弹90%,但长期来看,能源效率提高能减少136%的能源消耗。由于这种方法主要是依据能源需求的效率弹性,其不受能源效率的对称性和外生性两个假设条件的限制,数据需求量较小,因此被Boyd和Lee(2018,2019)、Li等(2019)、Yan等(2019)所沿用。

五、总结与展望

随着能源在经济增长和社会发展中的重要性不断提升,能源短缺问题亟待解决,能源回弹效应现象引起了学者的广泛关注和研究兴趣。总体来看,国内外关于能源回弹效应的文献较为丰富,这些文献也为回弹效应的进一步研究提供了理论基础。

本文通过文献分析发现:能源回弹效应以杰文斯悖论为研究开端,相关理论在学术争论和借鉴中不断演进。回弹效应的内涵界定普遍以K-B假说为基础,基于相关经济学理论从不同的视角展开延伸,不同的理论基础及理论假设是导致界定形式存在分歧的重要原因。宏观层面的界定建立在新古典经济增长理论之上,生产函数和成本函数的设定形式直接影响回弹效应的表现形式和测算结果。在宏观层面,回弹效应主要有两种描述:一是能源消费的回弹

量与预期能源节约量之比;二是能源效率提高1%时,能源消费量增加的百分比。微观层面的界定主要基于微观经济学中弹性的概念,依据能源效率、能源价格、能源需求、能源服务需求及其他影响能源效率的因素之间的关系推导而来,其中效率弹性界定形式是最基本的形式,其他形式多是在考虑了不同影响因素之后对效率弹性界定的扩展。对于回弹效应的理论机制,Khazzoom(1980)和Brookes(1990)最早提供了探索性解释,此后有学者在新古典经济理论框架下基于消费者行为理论、生产者行为理论、一般均衡理论、新古典增长理论对回弹效应做出了拓展性阐述。此外,一些新兴经济学分支,如生态经济学、心理学、演化经济学等学科的相关理论也被尝试纳入到回弹效应的分析框架之中。在回弹效应的研究方法中,直接测算法、价格弹性法、投入产出分析法、可计算一般均衡模型、经济增长法最为常用,前两种方法主要用于估算直接回弹效应,后三种方法被用于间接和宏观经济回弹效应的测算。不同的方法各有其优势和局限性,在回弹效应实证研究中,学者们在前人研究的基础上不断完善与修正模型,以获得更为准确的结果。

基于已有较为丰富的研究基础,本文认为目前回弹效应研究中存在的问题及未来可扩展方向主要有以下几个方面:

第一,回弹效应的微观研究主要以对称性和外生性假设为支撑,但一方面,能源价格比能源效率的直观反映性强,能源价格的变化更易被观察到,因而在不完全市场及存在价格管控下,能源价格与能源效率并不完全匹配。另一方面,能源效率的获得需要成本,并非是外生的。因此明确能源效率和能源价格之间的关系,并将影响能源效率的因素(成本)考虑到模型的构建中,是回弹效应的一个必要研究方向。

第二,经济理论中经济参与主体的消费选择主要基于成本和收益的权衡,而现实中经济参与主体的消费行为并非完全理性,因此新古典经济理论框架下回弹效应理论机制的研究往往受限于经济理论本身固有的局限。未来应当考虑到消费预期、消费观念等因素对回弹效应的影响。

第三,目前研究主要还是停留在“比较静态分析”的概念上,还未构建起完整的理论框架阐释宏观层面回弹效应的内在机制。由于经济增长及社会偏好等因素的变化也会引起能源消费的变化,这导致很难区分能源消费的增加是由能源效率提高引起的还是其他因素带来的。下一步应该以动态分析模型为核心,明确能源效率提高后消费者行为、社会制度、生产组织等因素的变化过程及其对宏观层面回弹效应的影响。

第四,除了在新古典经济学框架下关注回弹效应之外,有必要在现有经济学分支相关理论的基础之上,通过问卷调查、专题报告、仿真模拟或系统建模研究进一步探究回弹效应的机制。

第五,实证研究结果在很大程度上取决于测算方法的有效性。在进行回弹效应研究时,

为保证结果的可靠性,需根据研究对象、作用机制及数据可得性构建模型和选取方法,并通过关键参数的敏感性分析及模型修正减小偏误。

最后,能源回弹效应本质上是一个单一指标的概念,其核心问题是能源消费量,但对能源进行考察可能会导致人们忽视技术改进的另一目标——改善环境状况(Vivanco et al., 2016)。因此,以能源及环境问题为导向的回弹效应评估逐步成为继能源回弹效应之后的另一热点话题,甚至也可将能源拓展到如水资源、土地资源等其它资源进行研究。

参考文献:

- [1] 林民书,杨治国. 国外能源回弹效应研究进展评述[J]. 当代经济管理,2010,32(09):1-5.
- [2] 刘源远,刘凤朝. 基于技术进步的中国能源消费反弹效应——使用省际面板数据的实证检验[J]. 资源科学,2008,30(9):1300-1306.
- [3] 田成诗,张诗雅. 中国行业供应链碳足迹的来源分解分析——基于投入产出的生命周期评价模型[J]. 环境经济研究,2019,4(2):58-75.
- [4] 王庆一,涂逢祥,朱成章,汪邦成. 能源效率和节能[J]. 经济研究参考,2004,(84):6-11.
- [5] 杨莉莉,邵帅. 能源回弹效应的理论演进与经验证据:一个文献述评[J]. 财经研究,2015,41(8):19-38.
- [6] 赵永,王劲峰. 经济分析CGE模型与应用[M]. 北京:中国经济出版社,2008.
- [7] 查冬兰,周德群. 为什么提高能源效率没有减少能源消费——能源效率回弹效应研究评述[J]. 管理评论,2012,24(1):45-51.
- [8] 查冬兰,周德群. 基于CGE模型的中国能源效率回弹效应研究[J]. 数量经济技术经济研究,2010,27(12):40-54+67.
- [9] 周勇,林源源. 技术进步对能源消费回报效应的估算[J]. 经济学家,2007,(02):45-52.
- [10] Adetutu, M. O., A. J. Glass, and T. G. Weymanjones. Economy-Wide Estimates of Rebound Effects: Evidence from Panel Data[J]. The Energy Journal, 2016, 37(3): 251-269.
- [11] Alcott, B. Impact Caps: Why Population, Affluence and Technology Strategies Should Be Abandoned[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(6): 552-560.
- [12] Amado, N. B. and I. L. Sauer. An Ecological Economic Interpretation of the Jevons Effect[J]. Ecological Complexity, 2012, 9: 2-9.
- [13] Anson, S. and K. Turner. Rebound and Disinvestment Effects in Refined Oil Consumption and Supply Resulting from an Increase in Energy Efficiency in the Scottish Commercial Transport Sector[J]. Energy Policy, 2009, 37(9): 3608-3620.
- [14] Barker, T., A. S. Dagoumas, and J. Rubin. The Macroeconomic Rebound Effect and the World Economy[J]. Energy Efficiency, 2009, 2(4): 411-427.
- [15] Bataille, C. and N. Melton. Energy Efficiency and Economic Growth: A Retrospective CGE Analysis for Canada from 2002 to 2012[J]. Energy Economics, 2017, 64: 118-130.
- [16] Belaïd, F., A. B. Youssef, and N. Lazaric. Scrutinizing the Direct Rebound Effect for French Households Using Quantile Regression and Data from an Original Survey[J]. Ecological Economics, 2020, 176: 106755.
- [17] Bentzen, J. Estimating the Rebound Effect in US Manufacturing Energy Consumption[J]. Energy Economics, 2004, 26(1): 123-134.
- [18] Berkhout, P. H. G., J. C. Muskens, and J. W. Velthuisen. Defining the Rebound Effect[J]. Energy Policy, 198

2000, 28(6): 425–432.

[19] Binswanger, M. Technological Progress and Sustainable Development: What about the Rebound Effect?[J]. *Ecological Economics*, 2001, 36(1): 119–132.

[20] Boyd, G. A. and J. M. Lee. Relative Effectiveness of Energy Efficiency Programs Versus Market Based Climate Policies in the Chemical Industry[R]. 2018.

[21] Boyd, G. A. and J. M. Lee. Measuring Plant Level Energy Efficiency and Technical Change in the U.S. Metal-Based Durable Manufacturing Sector Using Stochastic Frontier Analysis[J]. *Energy Economics*, 2019, 81: 159–174.

[22] Brännlund, R., T. Ghalwash, and J. Nordström. Increased Energy Efficiency and the Rebound Effect: Effects on Consumption and Emissions[J]. *Energy Economics*, 2007, 29(1): 1–17.

[23] Brookes, L. G. Energy Policy, the Energy Price Fallacy and the Role of Nuclear Energy in the UK[J]. *Energy Policy*, 1978, 6(2): 94–196.

[24] Brookes, L. G. The Greenhouse Effect: The Fallacies in the Energy Efficiency Solution[J]. *Energy Policy*, 1990, 18(2): 199–201.

[25] Chang, J. J., W. N. Wang, and J. Y. Shieh. Environmental Rebounds/Backfires: Macroeconomic Implications for the Promotion of Environmentally-Friendly Products[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 88: 35–68.

[26] Chitnis, M., S. Sorrell, A. Druckman, S. K. Firth, and T. Jackson. Who Rebounds Most? Estimating Direct and Indirect Rebound Effects for Different UK Socioeconomic Groups[J]. *Ecological Economics*, 2014, 106: 12–32.

[27] Chitnis, M. and S. Sorrell. Living up to Expectations: Estimating Direct and Indirect Rebound Effects for UK Households[J]. *Energy Economics*, 2015, 52: 100–116.

[28] Dargay, J. and D. Gately. The Demand for Transportation Fuels: Imperfect Price-Reversibility?[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1997, 31(1): 71–82.

[29] Dargay, J. The Effect of Prices and Income on Car Travel in the UK[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007, 41(10): 949–960.

[30] De Haan, P., M. G. Mueller, and A. Peters. Does the Hybrid Toyota Prius Lead to Rebound Effects? Analysis of Size and Number of Cars Previously Owned by Swiss Prius Buyers[J]. *Ecological Economics*, 2006, 58(3): 592–605.

[31] Dillon, H. S., J. Saphores, and M. G. Boarnet. The Impact of Urban Form and Gasoline Prices on Vehicle Usage: Evidence from the 2009 National Household Travel Survey[J]. *Research in Transportation Economics*, 2015, 52: 23–33.

[32] Druckman, A., M. Chitnis, S. Sorrell, and T. Jackson. Missing Carbon Reductions? Exploring Rebound and Backfire Effects in UK Households[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3572–3581.

[33] Druckman, A. and T. Jackson. The Carbon Footprint of UK Households 1990–2004: A Socio-Economically Disaggregated, Quasi-Multi-Regional Input-Output Model[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 2066–2077.

[34] Dütschke, E., M. Frondel, J. Schleich, and C. Vance. Moral Licensing: Another Source of Rebound?[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2018, 6: 38.

[35] Duarte, R., J. Sanchez-Choliz, and C. Sarasa. Consumer-Side Actions in a Low-Carbon Economy: A Dynamic CGE Analysis for Spain[J]. *Energy Policy*, 2018, 118: 199–210.

[36] Freeman, R. A Theory on the Future of the Rebound Effect in a Resource-Constrained World[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2018, 6: 81.

[37] Freire-González, J. Methods to Empirically Estimate Direct and Indirect Rebound Effect of Energy-Saving Technological Changes in Households[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 223(1): 32–40.

- [38] Freire-González, J. and I. Puig-Ventosa. Energy Efficiency Policies and the Jevons Paradox[J]. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2015, 5(1): 69–79.
- [39] Freire-González, J. Energy Taxation Policies Can Counteract the Rebound Effect: Analysis Within a General Equilibrium Framework[J]. *Energy Efficiency*, 2020, 13(1): 69–78.
- [40] Frondel, M. and C. M. Schmidt. Evaluating Environmental Programs: The Perspective of Modern Evaluation Research[J]. *Ecological Economics*, 2005, 55(4): 515–526.
- [41] Frondel, M., S. Sommer, and C. Vance. Heterogeneity in German Residential Electricity Consumption: A Quantile Regression Approach[J]. *Energy Policy*, 2019, 131: 370–379.
- [42] Giampietro, M. and K. Mayumi. The Jevons Paradox: The Evolution of Complex Adaptive Systems and the Challenge for Scientific Analysis[M]//Alcott, B. and J. Polimeni. *The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements*. London: Earthscan Research Edition, 2008.
- [43] Giampietro, M. and K. Mayumi. Unraveling the Complexity of the Jevons Paradox: The Link Between Innovation, Efficiency, and Sustainability[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2018, 6: 26.
- [44] Gillingham, K., A. Jenn, and I. L. Azevedo. Heterogeneity in the Response to Gasoline Prices: Evidence from Pennsylvania and Implications for the Rebound Effect[J]. *Energy Economics*, 2015, 52: 41–52.
- [45] Greene, D. L., J. R. Kahn, and R. Gibson. Fuel Economy Rebound Effect for U.S. Household Vehicles[J]. *The Energy Journal*, 1999, 20(3): 1–31.
- [46] Greening, L. A., D. L. Greene, and C. Difiglio. Energy Efficiency and Consumption—the Rebound Effect—a Survey[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(6–7): 389–401.
- [47] Haas, R. and L. Schipper. Residential Energy Demand in OECD-Countries and the Role of Irreversible Efficiency Improvements[J]. *Energy Economics*, 1998, 20(4): 421–442.
- [48] Haas, R. and P. Biermayr. The Rebound Effect for Space Heating Empirical Evidence from Austria[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(6–7): 403–410.
- [49] Hanley, M., J. M. Dargay, and P. B. Goodwin. Review of Income and Price Elasticities in the Demand for Road Traffic[R]. 2002.
- [50] Henly, J., H. Ruderman, and M. D. Levine. Energy Saving Resulting from the Adoption of More Efficient Appliances: A Follow-up[J]. *The Energy Journal*, 1988, 9(2): 163–170.
- [51] Hens, H., W. Parijs, and M. Deurinck. Energy Consumption for Heating and Rebound Effects[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(1): 105–110.
- [52] Hertwich, E. G. Consumption and the Rebound Effect: An Industrial Ecology Perspective[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(1–2): 85–98.
- [53] Hong, S. H., T. Oreszczyn, and I. Ridley. The Impact of Energy Efficient Refurbishment on the Space Heating Fuel Consumption in English Dwellings[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(10): 1171–1181.
- [54] Howarth, R. Energy Efficiency and Economic Growth[J]. *Contemporary Economic Policy*, 1997, 15(4): 1–9.
- [55] Hymel, K. M. and K. A. Small. The Rebound Effect for Automobile Travel: Asymmetric Response to Price Changes and Novel Features of the 2000s[J]. *Energy Economics*, 2015, 49: 93–103.
- [56] Jenkins, J., T. Nordhaus, and M. Shellenberger. *Energy Emergence: Rebound and Backfire as Emergent Phenomena*[R]. 2011.
- [57] Khazzoom, J. D. Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances[J]. *The Energy Journal*, 1980, 1(4): 21–40.
- [58] Khosroshahi, M. and M. Sayadi. Tracking the Sources of Rebound Effect Resulting from the Efficiency Improvement in Petrol, Diesel, Natural Gas and Electricity Consumption; A CGE Analysis for Iran[J]. *Energy*, 2020,

197: 117–134.

[59] Li, J., A. Li, and X. Xie. Rebound Effect of Transportation Considering Additional Capital Costs and Input–Output Relationships: The Role of Subsistence Consumption and Unmet Demand[J]. *Energy Economics*, 2018, 74: 441–455.

[60] Li, J., H. Liu, and K. Du. Does Market–Oriented Reform Increase Energy Rebound Effect? Evidence from China's Regional Development[J]. *China Economic Review*, 2019, 56: 101304.

[61] Lin, B. and X. Liu. Dilemma Between Economic Development and Energy Conservation: Energy Rebound Effect in China[J]. *Energy*, 2012, 45(1): 867–873.

[62] Lin, B., and X. Liu. Electricity Tariff Reform and Rebound Effect of Residential Electricity Consumption in China[J]. *Energy*, 2013, 59: 240–247.

[63] Lin, B., Y. Chen, and G. Zhang. Technological Progress and Rebound Effect in China's Nonferrous Metals Industry: An Empirical Study[J]. *Energy Policy*, 2017, 109: 520–529.

[64] Lotka, A. J. Contribution to the Energetics of Evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1922, 8(6): 147–151.

[65] Madlener, R. and M. Hauertmann. Rebound Effects in German Residential Heating: Do Ownership and Income Matter?[R]. 2011.

[66] Mizobuchi, K. An Empirical Study on the Rebound Effect Considering Capital Costs[J]. *Energy Economics*, 2008, 30(5): 2486–2516.

[67] Moshiri, S. and K. Aliyev. Rebound Effect of Efficiency Improvement in Passenger Cars on Gasoline Consumption in Canada[J]. *Ecological Economics*, 2017, 131: 330–341.

[68] Patrick, H., M. Michael, and O. Toshisuke. Happiness and Sustainable Consumption: Psychological and Physical Rebound Effects at Work in a Tool for Sustainable Design[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(1): 105–115.

[69] Roy, J. The Rebound Effect: Some Empirical Evidence from India[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(6–7): 433–438.

[70] Ruzzenenti, F. and R. Basosi. The Rebound Effect: An Evolutionary Perspective[J]. *Ecological Economics*, 2008, 67(4): 526–537.

[71] Santarius, T., H. J. Walnum, and C. Aall. Rethinking Climate and Energy Policies: New Perspectives on the Rebound Phenomenon[M]. Switzerland: Springer, Cham, 2016.

[72] Santarius, T. and M. Soland. How Technological Efficiency Improvements Change Consumer Preferences: Towards a Psychological Theory of Rebound Effects[J]. *Ecological Economics*, 2018, 146: 414–424.

[73] Saunders, H. D. The Khazzoom–Brookes Postulate and Neoclassical Growth[J]. *The Energy Journal*, 1992, 13(4): 131–148.

[74] Saunders, H. D. A View from the Macro Side: Rebound, Backfire, and Khazzoom–Brookes[J]. *Energy Policy*, 2000a, 28:439–449.

[75] Saunders, H. D. Does Predicted Rebound Depend on Distinguishing Between Energy and Energy Services?[J]. *Energy Policy*, 2000b, 28(6–7): 497–500.

[76] Saunders, H. D. Fuel Conserving (and Using) Production Functions[J]. *Energy Economics*, 2008, 30(5): 2184–2235.

[77] Saunders, H. D. Is What We Think of as "Rebound" Really Just Income Effects in Disguise?[J]. *Energy Policy*, 2013, 57: 308–317.

[78] Seebauer, S. The Psychology of Rebound Effects: Explaining Energy Efficiency Rebound Behaviours with

Electric Vehicles and Building Insulation in Austria[J]. *Energy Research and Social Science*, 2018, 46: 311–320.

[79] Shao, S., T. Huang, and L. Yang. Using Latent Variable Approach to Estimate China's Economy-Wide Energy Rebound Effect over 1954–2010[J]. *Energy Policy*, 2014, 72: 235–248.

[80] Small, K. A. and K. Van Dender. A Study to Evaluate the Effect of Reduce Greenhouse Gas Emissions on Vehicle Miles Travelled[R]. 2005.

[81] Sorrell, S. and J. Dimitropoulos. UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect[R]. 2007.

[82] Sorrell, S. The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-Wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency[R]. 2007.

[83] Sorrell, S. and J. Dimitropoulos. The Rebound Effect: Microeconomic Definitions, Limitations and Extensions[J]. *Ecological Economics*, 2008, 65(3): 636–649.

[84] Sorrell, S., J. Dimitropoulos, and M. Sommerville. Empirical Estimates of the Direct Rebound Effect: A Review[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(4): 1356–1371.

[85] Sorrell, S. Jevons' Paradox Revisited: The Evidence for Backfire from Improved Energy Efficiency[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(4): 1456–1469.

[86] Sorrell, S. Reducing Energy Demand: A Review of Issues, Challenges and Approaches[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 74–82.

[87] Stapleton, L., S. Sorrell, and T. Schwanen. Estimating Direct Rebound Effects for Personal Automotive Travel in Great Britain[J]. *Energy Economics*, 2016, 54: 313–325.

[88] Thomas, B. A. and I. L. Azevedo. Estimating Direct and Indirect Rebound Effects for US Households with Input-Output Analysis. Part 1: Theoretical Framework[J]. *Ecological Economics*, 2013a, 86: 199–210.

[89] Thomas, B. A. and I. L. Azevedo. Estimating Direct and Indirect Rebound Effects for US Households with Input-Output Analysis. Part 2: Simulation[J]. *Ecological Economics*, 2013b, 86: 188–198.

[90] Turner, K. and N. Hanley. Energy Efficiency, Rebound Effects and the Environmental Kuznets Curve[J]. *Energy Economics*, 2011, 33(5): 709–720.

[91] Vivanco, D. F., W. McDowall, J. Freire-González, R. Kemp, and E. van der Voet. The Foundations of the Environmental Rebound Effect and Its Contribution Towards a General Framework[J]. *Ecological Economics*, 2016, 125: 60–69.

[92] Walnum, H. J., C. Aall, and S. Løkke. Can Rebound Effects Explain Why Sustainable Mobility Has Not Been Achieved?[J]. *Sustainability*, 2014, 6(12): 9510–9537.

[93] Wang, Z. and M. Lu. An Empirical Study of Direct Rebound Effect for Road Freight Transport in China[J]. *Applied Energy*, 2014, 133: 274–281.

[94] Wang, Z., B. Han, and M. Lu. Measurement of energy rebound effect in households: Evidence from residential electricity consumption in Beijing, China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 852–861.

[95] Yan, Z., X. Ouyang, and K. Du. Economy-Wide Estimates of Energy Rebound Effect: Evidence from China's Provinces[J]. *Energy Economics*, 2019, 83: 106706.

[96] Zhang, Y. J., Z. Liu, C. X. Qin, and T. D. Tan. The Direct and Indirect CO₂ Rebound Effect for Private Cars in China[J]. *Energy Policy*, 2017, 100: 149–161.

Progress of Theories and Methods on Energy Rebound Effect

Zha Donglan, Chen Qian and Wang Qunwei

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract: Energy rebound effect refers to the economic phenomenon that the improvement of energy efficiency does not achieve the expected effect of energy conservation, which has a negative impact on coordinated and sustainable development of Energy–Economy–Environment System. Since the “K–B hypothesis” was put forward, many scholars have tried to explore the mechanism and influencing factors of rebound effect using the theories of neoclassical economics and emerging economics branches, aiming to improve the analytical framework of rebound effect and lay a solid theoretical and methodological foundation for the empirical study. This paper firstly discusses the definition of rebound effect and the applicability of different definition forms at the macro and micro levels, and systematically combs the theoretical mechanism of the rebound effect under the framework of neoclassical economics, as well as its expanded interpretation from the perspective of emerging economics branches. Then, this paper summarizes the research methods of rebound effect, discusses the application range, the advantages and disadvantages, as well as the improvement of different methods. And finally points out the existing problems in the study of energy rebound effect and looks forward to the issues that deserve attention in the future.

Keywords: Rebound Effect; Energy Efficiency; Energy Demand; Neoclassical Economics; Emerging Economics

JEL Classification: P18, Q41, Q43

(责任编辑:朱静静)