

中国居民能源消费的间接回弹效应分析及双碳目标下的政策启示

许光清¹, 张文丹¹, 刘海博²

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 中国社会科学院人事教育局, 北京 100732)

摘要: 鉴于居民能源消费的间接回弹效应影响广泛但现有研究不充分, 使用碳排放量结合再分配模型和20部门环境投入产出表, 测算了2002年、2007年、2012年和2017年中国居民能源消费的间接回弹效应。实证结果显示: 间接回弹效应在3.90%~12.88%之间; 间接回弹效应在时间上呈倒“U”型, 在空间上城镇大于农村。针对双碳目标可能导致三种重要因素的变化进行模拟, 分析得出间接回弹效应受居民单位碳排放的能源支出提升而增大的幅度最大, 随后向关联系数降低而减小的幅度次之, 受城镇化影响的变动最小; 在一般政策情景和长期低碳转型情景中, 2030年的间接回弹效应均>13%, 2060年的间接回弹效应在一般政策情景高达46.55%, 在长期低碳转型情景为11.77%。持续推进能源结构和整个经济系统的低碳化转型以及促进居民消费低碳化, 应是在双碳目标下降低间接回弹效应的关键对策。

关键词: 居民能源消费; 间接回弹效应; 环境投入产出表; 居民单位碳排放的能源支出; 后向关联系数

随着全球温控目标的确立和中国30·60碳达峰、碳中和目标的提出, 节能降碳迫在眉睫^[1,2]。目前主流的碳排放核算方法包括生产端核算和消费端核算两类。前者因其核算简易而被广泛使用, 但忽略了终端碳排放。本文使用消费端核算的思路, 将排放责任压实至消费者^[3], 进而逆向推动生产者的碳减排积极性^[4]。消费端节能降碳需要平衡以消费与投资共同拉动的经济增长模式与节约绿色低碳双重目标, 取舍不当将对长期可持续发展能力造成负面影响。一方面, 中国进入新消费时代, 加快构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局的关键在于扩大内需、释放14亿人的消费潜力; 另一方面, 包括生活消费在内的人类生产生活的各个环节都将消费能源, 目前很大一部分是化石燃料。随着居民消费逐渐由生存需求转为发展需求乃至享受需求, 在现有能源结构和产业结构条件下, 碳排放的增加将不可避免。在市场化条件下, 如果消费者随着收入提升不断增加高耗能产品的消费, 往往会抵消生产端技术进步带来的能源效率提升, 使碳排放总量居高不下。如何满足不断提升的消费需求又不出现供给过剩, 如何刺激消费拉动经济增长又兼顾双碳目标, 是深化经济体制改革中正在面临的问题^[3,5]。

与此同时, 提高能源效率作为节能降碳的重要措施之一, 却存在弱化其效果的“不经意后果”, 学界称之为“能源回弹效应”。能源回弹效应最早由英国经济学家Jevons^[6]提

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-04-28

基金项目: 国家电网公司总部管理科技项目(1400-202224242A-1-1-ZN)

作者简介: 许光清(1969-), 女, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事能源与气候变化经济学等研究。E-mail: xugqing@ruc.edu.cn

通讯作者: 张文丹(1992-), 女, 广东广州人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事能源与环境经济学等研究。E-mail: wzhang357@ruc.edu.cn

出, 至今已有大量实证研究证明了其存在性^[7-9]。在中国, 能源回弹效应还没有引起政策制定者的充分关注, 在一些有影响的碳中和情景研究中, 考虑能源效率的贡献时没有考虑能源回弹效应^[10]。

能源回弹效应既存在于产业领域, 也存在于居民领域。居民领域的回弹效应一般指当能源效率提升时, 会导致居民的能源支出减少, 进而会增加能源消费, 或者会增加非能源的商品和服务的消费, 从而引致了全社会能源消费量的减少不及预期的现象。据此, 能源回弹效应分为直接回弹效应和间接回弹效应^[11]。其中, 间接回弹效应比直接回弹影响的范围更广^[12,13]。直接回弹局限于能源效率提升时, 直接消费的节能量达不到预期的情况。与之对应, 间接回弹关注在该种能源以外, 所有其他消费的增长, 最终导致全社会预期节能量与实际节能量的差异^[12,14]。这个过程又称再分配效应^[15,16]。因为存在能源回弹的再分配效应, 居民能源回弹效应的研究范围还拓展到了其他原材料的需求、环境排放的影响以及就业等社会因素^[17-19], 厘清间接回弹效应能够更有效地提高全社会的节能低碳意识^[12,20]。考虑到如何从更广泛的角度评估能源效率政策, 以及体现从消费端发力实现节能降碳的重要性, 本文着重于居民能源消费的间接回弹效应的研究。

国外有关间接回弹效应的研究主要使用了再分配法、交叉价格弹性法、生命周期评价法(LCA)、近似理想需求模型(AIDS)和投入产出法(IOA)等^[12-16,19,21-23]。国内研究甚少, 主要用了两种方法: 近似理想需求模型与Slutsky分解方法^[24-26]以及再分配结合投入产出表的方法^[27,28]。使用第一种方法测算间接回弹效应的研究结果具有很大的差异。可见由于近似理想需求模型等计量经济学方法对数据的要求比较高, 测算结果有更大的不确定性, 本文选用了第二种方法, 即再分配与环境投入产出表相结合。

从测算指标看, 中国的研究中使用再分配与投入产出相结合方法的研究均以能源消费量进行居民间接回弹效应的测算。在这种模型中引入碳排放量作为测算指标是本文的一个重要贡献。文献中以能源消费量测算间接回弹效应^[27,28], 会将研究的政策涵义局限在节能领域。目前在能源消费环境外部性的量化测算比较困难的情况下, 用碳排放量测算居民能源消费的间接回弹效应, 在当前双碳背景下可提供一种简捷的政策思路: 不应该规制由于能源效率提升导致的居民非能源消费的增加, 应该将政策规制的重点放在减少居民非能源消费引致的碳排放量上, 体现了从消费端发力的政策目标。从需求侧出发, 推动消费模式升级倒逼产业结构和能源结构的低碳化转型, 除了在能源加工与转换、工业、建筑和交通等领域施行各项强制型和经济激励型政策之外, 应重视消费观念、消费偏好、消费方式等影响消费端碳排放的因素, 通过提升消费者意识、优化消费政策设计、重视非正式制度因素等途径, 从消费端推动双碳目标的实现。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

本文在Freire-Gonzalez^[22,23]方法的基础上, 定义居民单位碳排放的能源支出, 以碳排放量测算居民能源消费的回弹效应。由于居民能源消费的直接回弹效应和间接回弹效应在理论上和概念上有相互依赖性^[29], 先定义直接回弹效应 RE_D : 能源效率提升后, 居民由于能源价格下降而增加的能源有效服务导致的额外碳排放量 ΔC_D 与理论二氧化碳减排量 $|\Delta C_H|$ 的比值, RE_D 又可定义为居民能源有效服务的碳排放量对能源效率的弹性

$\eta_\varepsilon(C_S)$ ，其中 C_S 为能源有效服务的碳排放量 (万 t CO₂)； ε 为能源效率，定义公式如下：

$$RE_D \triangleq \eta_\varepsilon(C_S) \quad (1)$$

间接回弹效应定义为：居民将由于能源效率提高而节省的消费用于非能源消费和储蓄时导致的碳排放量的增加量 ΔC_I 与理论二氧化碳减排量的比值 $|\Delta C_H|$ 。间接回弹效应 RE_I 定义公式如下：

$$RE_I \triangleq \frac{\Delta C_I}{|\Delta C_H|} \quad (2)$$

当能源效率提升后，居民在能源消费上节省了支出，假设这部分节省的支出将用于非能源部门的消费或留作储蓄。非能源商品和服务在生产和提供的过程中会消耗能源并排放二氧化碳，因此居民增加非能源的消费可能间接导致碳排放量的增加。而储蓄会参与全社会再投资，间接导致能源和非能源部门的消费，进而造成碳排放量的增加。

具体而言，增加的非能源消费的碳排放量 ΔC_I 按照以下思路测算：

(1) 借由直接回弹效应计算由于居民能源效率的提高而节省的支出，亦即居民由于能源效率提升导致的能源消费支出额的变化量 ΔY_E (万元)，计算公式如下：

$$|\Delta Y_E| = |\Delta C_E| P_{CE} = [1 - RE_D] |\Delta C_H| P_{CE} \quad (3)$$

式中： C_E 为居民能源消费的碳排放量 (万 t CO₂)； P_{CE} 为居民能源消费导致的单位碳排放量的支出额 (元/t CO₂)，本文将命名为居民单位碳排放的能源支出。

(2) 通过再分配模型，分别将所节省的支出分配给储蓄或其他非能源的商品和服务，储蓄用于再投资，本文考虑了收入弹性分配和支出比例分配两种再分配情景。

首先是收入弹性分配情景。记 Y 为居民总支出 (万元)， X_i 为居民消费 i 部门的商品和服务量， $\eta_y(X_i)$ 为 i 部门的收入弹性， μ_i 表示 i 部门再投资在全社会再投资中的占比， ρ 为根据收入弹性计算的储蓄占可支配收入的比例， $\rho = 1 - \sum_i \eta_y(X_i) \frac{Y_i}{Y}$ ， NE 为非能源部门集合，则最终部门 i 增加的支出 ΔY_i (万元) 可表示为：

$$\Delta Y_i = \left[\eta_y(X_i) \frac{Y_i}{Y} 1_{\{i \in NE\}} + \rho \mu_i \right] (1 - RE_D) |\Delta C_H| P_{CE} \quad (4)$$

其次是支出比例分配情景。假设居民按全国消费与储蓄占可支配收入的比例进行消费与储蓄分配。分配到消费的部分，按照各部门消费支出 Y_i 占总非能源消费支出 Y_{NE} 的比例获得节省的支出 ΔY_E 的再分配；而分配到储蓄的部分，则同收入弹性情景，按全社会再投资比例进行再分配。以 α 表示全国消费占可支配收入的比例，则储蓄部分占比为 $1 - \alpha$ 。记 W_i 为部门 i 的支出占总非能源部门支出的比例，则有：

$$\Delta Y_i = [\alpha W_i + (1 - \alpha) \mu_i] (1 - RE_D) |\Delta C_H| P_{CE} \quad (5)$$

其中：

$$W_i = \begin{cases} \frac{Y_i}{Y_{NE}} = \frac{X_i P_i}{\sum_{j \in NE} X_j P_j}, & i \in NE \\ 0, & i \in E \end{cases} \quad (6)$$

(3) 利用环境投入产出表，将非能源的各部门增加的支出转换为增加的碳排放量。定义后向关联系数向量 L 为各部门的碳排放强度向量和列昂惕夫逆矩阵的乘积，代

表示了经济系统完全消耗的碳排放强度；记部门*i*的消费支出额为 ΔY_i （万元），部门*i*的后向关联系数 L_i （t CO₂/元），则其所带来的碳排放量的变化量为 ΔC_i （万 t CO₂）。最后，所有部门消费支出的变动所带来的碳排放量的总增加量 ΔC_I （万 t CO₂）为：

$$\Delta C_I = \sum \Delta C_i = \sum L_i \Delta Y_i \quad (7)$$

综上，间接回弹效应的测算公式如下：

$$RE_I = \frac{\sum L_i \Delta Y_i}{|\Delta C_H|} = (1 - RE_D) P_{CE} \times \begin{cases} \sum L_i \left[\eta_y(X_i) \frac{Y_i}{Y} 1_{\{i \in NE\}} + \rho \mu_i \right], & \text{收入弹性分配情景} \\ \sum L_i \left[\alpha W_i 1_{\{i \in NE\}} + (1 - \alpha) \mu_i \right], & \text{支出比例分配情景} \end{cases} \quad (8)$$

由上述公式可知，间接回弹效应 RE_I 的大小取决于以下因素：第一是由能源价格决定的居民单位碳排放的能源支出 P_{CE} ，在其余项为正的情况下， P_{CE} 越大， RE_I 越大，反之相反；第二是直接回弹效应 RE_D 的大小，同样在其余项为正的情况下， RE_D 越小， RE_I 越大；第三是表征了经济系统低碳化程度的各部门碳排放强度 c_i 和后向关联系数 L_i ，后向关联系数向量的模越大， RE_I 越大；第四是经济发展阶段，即随着收入水平的提高，收入弹性 $\eta_y(X_i)$ 在不同的产品上会有变化，这亦会影响间接回弹效应的大小；第五是居民的消费行为即支出比例 W_i ，居民将由于能源效率提升所节省的支出更多地用在高碳产品上还是更多地用在低碳产品上，会影响间接回弹效应的大小。最后两个影响因素分别代表了再分配的收入弹性和支出比例情景。

最后，针对双碳目标下，未来能源价格变化、产业和能源结构调整以及居民消费习惯变化的可能情景，本文使用情景模拟的方法进行探讨。具体研究三种因素对能源回弹的影响：第一种是能源价格，第二种是城镇化率，第三种是假定支出比例较高部门的后向关联系数减半的间接回弹效应模拟。情景模拟以2017年的支出比例情景的计算结果为基准，根据已计算的农村和城镇部门*i*的支出占总非能源部门支出的比例 W_i^j ，支出占总支出的比例 $\frac{Y_i^j}{Y^j}$ ，储蓄按全社会再投资于部门*i*的比例 α^j ， j =城镇或农村。接下来假设农村居民按比例逐渐城镇化，并计算该过程的间接回弹效应。记 λ 为2017年的农村居民转化为城镇居民的比例， $\lambda=100\%$ 即为2017年的农村居民全部转化为城镇居民，反之 $\lambda=0$ 为2017年的农村居民全部还是农村居民。模拟分别选取 $\lambda=0$ 、25%、50%、75%和100%的格点，从而尽可能全面地反映从2017年农村渐变到2017年城镇的环境下，回弹效应的变化过程。

将前述所有变量均按 $\lambda \times \text{城镇} + (1 - \lambda) \times \text{农村}$ 的比例组合成一个假想的农村居民向城镇居民渐变的情景，计算该过程的间接回弹效应如下：

$$RE_I^m = [1 - RE_D] \times M \times P_{CE} \times \sum N_i L_i \left[\alpha^m W_i^m 1_{\{i \in NE\}} + (1 - \alpha^m) \mu_i \right] \quad (9)$$

式中： M 为居民单位碳排放能源支出的价格倍数，目前中国主要能源价格维持稳定，即 M 基本维持在1； m 表示不同的城镇化情景；用 N_i 表示 L 的值在部门*i*的模拟倍数，当 $i=1、3、18、20$ 时， $N_i=0.5$ ，对其余*i*， $N_i=1$ 。考虑到双碳目标下碳排放交易市场将能源

消费的社会成本内化,致使居民单位碳排放的能源支出价格上涨,以及未来居民能源消费的进一步市场化和国际化会提升居民能源消费价格,本文分别取 $M=1$ 、1.5、2、2.5,以研究不同能源价格情景下的回弹效应变化大小。其他线性组合计算如下:

$$\begin{aligned}\alpha^m &= \lambda \alpha^{\text{城镇}} + (1-\lambda) \alpha^{\text{农村}} \\ W_i^m &= \lambda W_i^{\text{城镇}} + (1-\lambda) W_i^{\text{农村}}\end{aligned}\quad (10)$$

在支出比例情景中,本文选取支出比例最高的四个主要消费部门:农林牧渔业(1)、食品和烟草加工制造业(3)、批发零售和住宿餐饮业(18)和第三产业其他服务业(20)进行模拟研究。模拟实验目的在于展示这些主要的消费部门对最终回弹效应改变的影响大小,进而比较双碳目标下,未来随着产业结构和能源结构的调整,主要消费部门的碳排放效率变化对回弹效应导致的碳排放的影响大小。

1.2 数据来源

中国的投入产出表每5年发布一次,2017年为最新数据。本文分别测算了2002年、2007年、2012年和2017年的居民间接回弹效应,将《中国能源统计年鉴》中全国能源平衡表和工业分行业终端能源消费量表与国家统计局发布的149部门的投入产出表分别合并为划分标准一致的20个部门,如表1所示。

部门消费总支出、总产值来自投入产出表,部门人均消费支出为部门消费总支出除以年末总人口;人均可支配收入和年末总人口来自《中国统计年鉴》;本文利用各地区居民生活某能源品种消费量计算各地区该能源品种的加权平均值作为全国该能源品种的估计值,然后以全国居民各能源品种的消费比例估算居民加权能源价格。居民能源消费量来自《中国能源统计年鉴》中的各年全国能源平衡表,将各品种能源单位统一转换为标准煤,其中电力以发电煤耗法转换。各年居民消费的各品种能源的价格来自各省发展和改革委员会网站上的文件等。

居民能源消费碳排放量的核算依据各年全国居民各种化石能源消费量及电力、热力消费量,其数据来源于《中国能源统计年鉴》中的全国能源平衡表。综合考虑能源品种和碳排放因子的相近性,本文将所有能源品种合并为8种一次化石能源(包括煤合计、煤矸石、焦炭、煤气、油品、液化石油气、天然气和其他能源),以及二次能源电力和热力。

一次化石能源的二氧化碳排放因子来源于《IPCC2006年国家温室气体清单指南

表1 中国20部门投入产出行业分类

Table 1 China's 20 sector input-output table

部门代码	部门	部门代码	部门
1	农林牧渔业	11	交通运输设备制造业
2	采选业	12	电气机械、电子及通信设备制造业
3	食品和烟草加工制造业	13	废弃资源利用、修理和其他制造业
4	纺织服装制造业	14	电力、热力生产和供应业
5	木材和家具制造业	15	燃气生产和供应业
6	造纸和文教用品制造业	16	水的生产和供应业
7	石油、炼焦和核燃料加工业	17	建筑业
8	化学工业和非金属制品业	18	批发零售和住宿餐饮业
9	金属压延加工和金属制品业	19	交通运输、仓储和邮政业
10	专用和通用设备制造业	20	第三产业其他服务业

2019修订版》，电力和热力的排放依据全国能源平衡表供电栏和供热栏的一次化石能源投入与对应的二氧化碳排放因子相乘计算电力和热力的碳排放量，并除以当年电力和热力生产量得到电力和热力的二氧化碳排放因子。各行业碳排放量的计算方法同居民能源消费的碳排放量的计算方法，依据《中国能源统计年鉴》中2017年各行业各种化石能源消费量以及电力、热力的消费量核算各部门碳排放量。

2 结果分析

2.1 居民单位碳排放的能源支出

居民单位碳排放的能源支出测算反映了居民能源价格的变化和居民能源消费结构的变化，2002年、2007年、2012年和2017年居民单位碳排放的能源支出及测算过程的中间变量见表2，表中数据以2002年为基年依据历年消费者物价指数（CPI）对其余年份进行平减。

由表2可见，从各能源品种的价格来看，煤炭、油类、天然气、热力和其他能源的价格均表现为2002—2012年间逐年增加，其中2002—2007年涨幅较大，但2017年相比2012年有明显下降；电力价格在2002—2017年间逐年减小，反映居民用电价格长期施行低电价政策的现实。从各品种能源消费比例看，尽管中国能源消费结构依然以煤为主^[30]，但居民煤炭消费比例逐年下降，2017年仅占12.3%，油类、天然气、电力、热力的消费比例逐年上升，电力消费比例2017年达到了47.4%，说明能源消费结构逐渐优化。电力碳排放因子逐年下降，表明中国电源结构中煤炭比例逐年降低，可再生能源比例逐渐提高。热力碳排放因子变化不明显。居民消费的加权能源价格2002—2012年间逐年上升，2017年相比2012年没有变化。居民生活碳排放量逐年增加，表明中国居民能源消费量逐年增加，与中国能源消费碳排放量逐年上升一致。居民单位碳排放的能源支出逐年增

表2 居民单位碳排放的能源支出及中间变量

Table 2 Residential unit carbon emission expenses and intermediary variables

能源支出		2002年	2007年	2012年	2017年
煤炭及制品	价格/(万元/tce)	0.039	0.057	0.074	0.061
	消费比例	0.378	0.246	0.187	0.123
油类	价格/(万元/tce)	0.106	0.229	0.269	0.251
	消费比例	0.133	0.145	0.158	0.198
天然气	价格/(万元/tce)	0.148	0.171	0.181	0.167
	消费比例	0.034	0.058	0.089	0.096
电力	价格/(万元/tce)	0.168	0.146	0.129	0.124
	消费比例	0.358	0.450	0.460	0.474
热力	价格/(万元/tce)	0.047	0.070	0.095	0.094
	消费比例	0.050	0.060	0.063	0.063
其他能源	价格/(万元/tce)	0.039	0.057	0.074	0.061
	消费比例	0.049	0.042	0.043	0.047
电力的碳排放因子/[万 t CO ₂ /(亿 kW·h)]		7.825	7.435	6.339	5.676
热力的碳排放因子/(万 t CO ₂ /百万 kJ)		0.115	0.120	0.123	0.117
加权能源价格/(万元/tce)		0.098	0.129	0.141	0.141
居民生活碳排放量/亿 t CO ₂		4.245	7.332	9.347	12.027
居民碳排放中电力热力的间接排放占比		0.398	0.507	0.526	0.531
居民单位碳排放的能源支出/(万元/t CO ₂)		0.042	0.058	0.064	0.068

加,但是变化率在降低,2017年仅比2012年略微上升。

2.2 各部门的碳排放强度和后向关联系数

利用环境投入产出表测算的各部门碳排放强度和后向关联系数反映了各部门单位总产出直接消耗能源的碳排放和单位总产出完全消耗能源的碳排放,可以反映中国经济系统对高碳能源的依赖程度,2002—2017年间的变化趋势,本质上反映了中国经济系统从高碳向低碳化的转型。表3列出了2002年、2007年、2012年和2017年各部门的碳排放强度和后向关联系数,表中数据以2002年为基年对其余年份进行平减,其中工业部门的平减依据历年生产者价格指数(PPI)、其他部门的平减依据历年GDP指数。由表3可知,绝大部分部门的碳排放强度随时间推移下降明显,仅农林牧渔业(1)的碳排放强度2007年相较2002年有所上升。2007年的后向关联系数相较2002年下降不明显,有10个部门不降反升;2012年和2017年的后向关联系数都相较前一年度大幅下降。后向关联系数的变化反映中国经济系统完全消耗碳排放强度低碳化的趋势,自2012年以来低碳化程度加快,反映中国“十八大”以来高度重视生态文明建设的态势,但后向关联系数依然有比较大的下降空间,2017年有8个部门的后向关联系数 $> 2 \text{ t CO}_2/\text{万元}$ 。

2.3 居民消费的收入弹性

再分配模型中需要测算居民消费支出比例与收入弹性,本文使用各部门的消费支出额代替消费量以估算居民消费支出比例。根据国家统计局有关居民消费占可支配收入比例数据,本文以2002年为基准年,使用历年实际分部门支出和实际人均可支配收入分别进行回

表3 部门碳排放强度 c 和后向关联系数 L

Table 3 CO_2 emission intensity c and the backward relating coefficient L by sector (t $\text{CO}_2/\text{万元}$)

部门代码	2002年		2007年		2012年		2017年	
	c	L	c	L	c	L	c	L
1	0.387	1.528	0.418	1.527	0.314	1.279	0.309	0.941
2	2.174	3.958	1.818	4.214	1.764	3.532	1.057	2.118
3	0.731	2.296	0.506	2.137	0.269	1.518	0.183	1.072
4	0.636	2.845	0.494	2.829	0.371	2.226	0.301	1.689
5	0.325	2.692	0.323	2.951	0.26	2.337	0.139	1.534
6	1.067	3.485	0.803	3.679	0.453	2.906	0.329	1.978
7	2.872	6.153	2.589	6.073	2.392	5.314	2.319	3.998
8	1.798	4.849	1.313	4.73	1.585	4.623	1.175	3.084
9	4.833	9.767	4.534	9.951	2.64	6.561	2.414	4.926
10	0.565	4.556	0.414	5.147	0.203	3.366	0.154	2.133
11	0.666	4.313	0.302	4.452	0.148	3.009	0.11	1.9
12	0.176	3.627	0.123	4.482	0.09	3.19	0.067	2.056
13	1.951	3.284	0.319	2.545	0.593	2.289	0.362	1.36
14	2.402	4.301	0.859	3.606	0.721	3.033	0.681	1.991
15	2.84	6.027	1.077	4.372	0.465	3.014	0.325	1.785
16	2.168	4.223	1.854	3.841	1.986	3.52	1.849	2.929
17	0.191	3.841	0.18	4.407	0.162	3.282	0.14	2.153
18	1.091	2.45	1.2	2.399	1.002	1.665	0.888	1.371
19	0.616	2.609	0.559	2.818	0.484	2.375	0.378	1.345
20	0.275	1.663	0.319	1.796	0.272	1.376	0.233	0.934

归估算居民收入弹性，测算的居民消费支出比例与收入弹性结果见表4。

由于本文定义的间接回弹效应为非能源消费的回弹，因此后续间接回弹效应测算中不考虑与居民直接能源消费相关的采选业(2)、石油、炼焦和核燃料加工业(7)、电力、热力生产和供应业(14)以及燃气生产和供应业(15)，另外中国投入产出表中居民消费支出中建筑业的支出额为0。

在收入弹性方面，除了采选业(2)和金属压延加工和金属制品业(9)的收入弹性为负，其他部门的收入弹性均为正，收入弹性 >1 的部门有食品和烟草加工制造业(3)、造纸和文教用品制造业(6)、石油、炼焦和核燃料加工业(7)、专用设备和通用设备制造业(10)、交通运输设备(11)、燃气生产和供应业(15)、水的生产和供应业(16)、交通运输、仓储和邮政业(19)及第三产业其他服务业(20)，表明随着收入水平的

提高，中国居民在绝大多数部门上的消费会增加。从城乡比较来看，除采选业(2)、金属压延加工与金属制品业(9)和交通运输设备制造业(11)外，农村居民收入弹性的绝对值均大于城镇居民，可见随着收入水平的提高农村居民有更大的消费需求。

2.4 居民消费的支出比例

居民消费的支出比例和储蓄再投资比例的四年分布情况见图1，在支出比例方面，2002—2017年间，农林牧渔业(1)、食品和烟草加工制造业(3)、批发零售和住宿餐饮业(18)和第三产业其他服务业(20)占比较大，四个年份均在10%以上。其中第三产业其他服务业(20)占比超过30%，食品和烟草加工制造业(3)和第三产业其他服务业(20)的支出比例呈现上升趋势，而农林牧渔业(1)与批发零售和住宿餐饮业(18)则略呈下降趋势。居民消费的支出比例整体呈现出明显地从第一产业向第二产业和第三产业迁移的趋势。

从城乡比较来看，城镇居民在纺织服装制造业(4)、交通运输设备制造业(11)、电器机械、电子及通信设备制造业(12)、批发零售和住宿餐饮业(18)、交通运输、仓储和邮政业(19)及第三产业其他服务业(20)的支出比例高于农村居民。其中纺织服装制造业(4)和交通运输、仓储和邮政业(19)的城乡差距在减小，而交通运输设备制造业(11)的城乡差距2012年后显著增大。农村居民在农林牧渔业(1)和食品和烟草加工制造业(3)的支出比例高于城镇居民。由于间接回弹效应的直接部分计算时只考虑非能源部门，四个能源类型部门的支出比例均为空白。

表4 各部门居民消费的收入弹性

Table 4 Residential income elasticity by sector

部门代码	是否能源部门	全国	城镇	农村
1	NE	0.381	0.291	0.441
2	E	-0.827	-1.781	-0.009
3	NE	1.250	1.177	1.472
4	NE	0.765	0.569	0.947
5	NE	0.875	0.624	1.373
6	NE	1.244	1.068	1.696
7	E	1.949	2.124	1.358
8	NE	0.839	0.740	0.847
9	NE	-0.100	-0.412	-0.047
10	NE	1.194	0.939	2.079
11	NE	1.791	1.942	1.291
12	NE	0.658	0.367	1.160
13	NE	0.376	0.205	0.546
14	E	0.422	0.129	0.771
15	E	1.600	1.475	1.561
16	NE	1.096	0.960	1.150
17	NE	0.000	0.000	0.000
18	NE	0.914	0.775	0.998
19	NE	1.243	1.147	1.449
20	NE	1.178	1.126	1.205

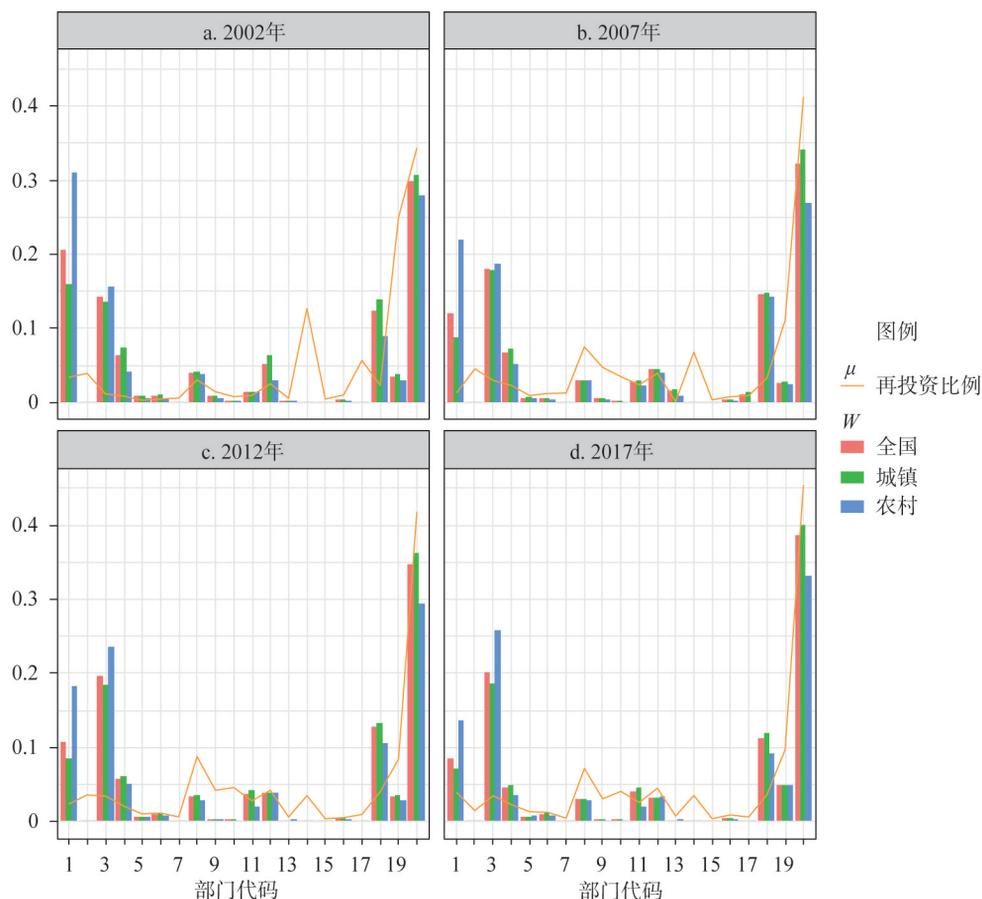


图1 非能源部门支出比例和20部门再投资比例

Fig. 1 The non-energy sectors' expenses ratio and the 20 sectors' reinvestment ratio

全社会的再投资比例方面, 2002年的储蓄再投资主要集中在采选业(2)、化学工业和非金属制品业(8)、电力、热力生产和供应业(14)、交通运输、仓储和邮政业(19)和第三产业其他服务业(20)。其中化学工业和非金属制品业(8)和第三产业其他服务业(20)在其后三个年份的再投资比例较2002年呈现增加的趋势, 相反, 采选业(2)、电力、热力生产和供应业(14)和交通运输、仓储和邮政业(19)呈现减小的趋势。

2.5 间接回弹效应

以往文献中对居民直接回弹效应的测算结果集中在16%~47%^[27,31,32], 测算模型相对直接回弹效应是线性的, 所以本文分别取直接回弹效应为15%和50%进行间接回弹效应的测算, 结果见图2。两种情景计算结果差别不大, 收入弹性情景的间接回弹效应在3.90%~11.95%之间, 支出比例情景的间接回弹效应在4.28%~12.88%之间。不同年份、城乡和直接回弹效应值假设下的收入弹性情景皆略低于支出比例情景。直接回弹效应为15%时的间接回弹效应均高于直接回弹效应为50%时的结果。从时间纵向来看, 四年的间接回弹效应呈倒“U”型, 2007年达到峰值, 2017年为四年中最小。间接回弹效应在不同年份的变化是能源价格、后向关联系数、支出比例和储蓄再投资比例等因素综合作用的结果, 随着时间推移, 能源价格逐渐增大, 后向关联系数逐渐减小, 支出比例和再

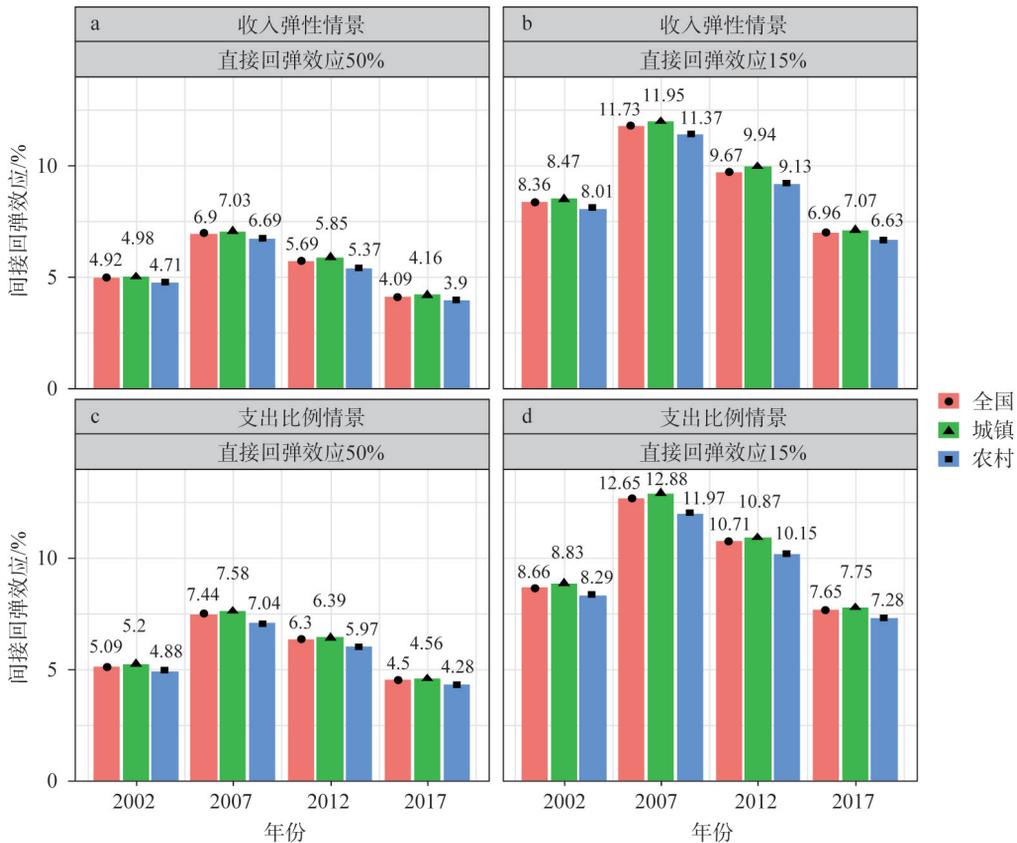


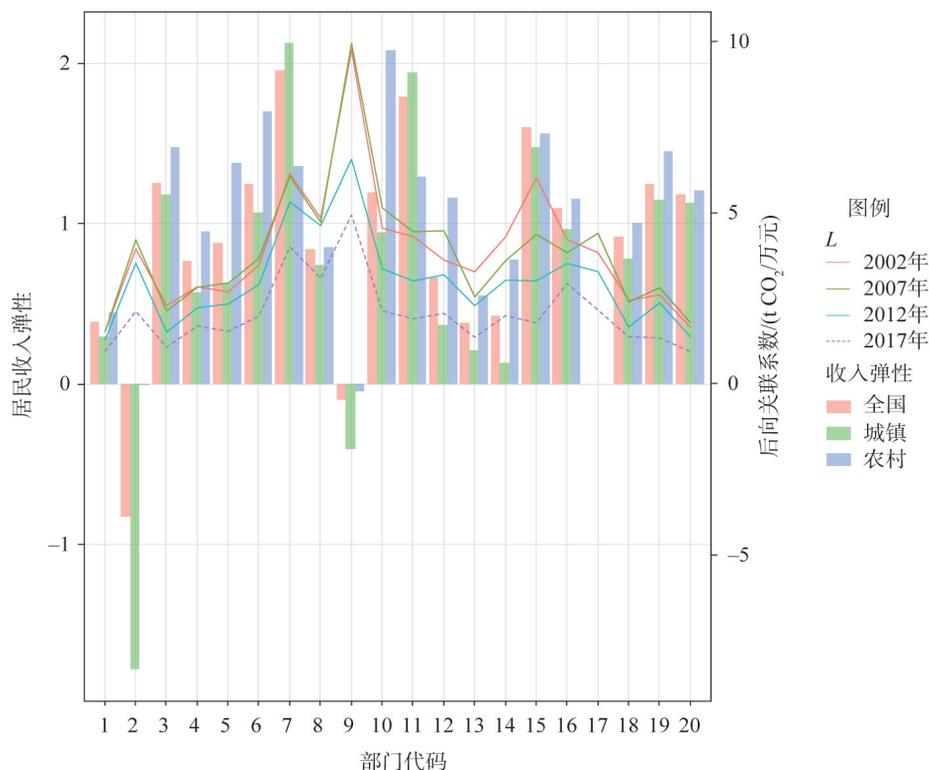
图2 居民间接回弹效应

Fig. 2 Residential indirect rebound effects

投资比例在不同部门也发生了变化。从城乡比较来看，城镇的间接回弹效应均大于农村。间接回弹效应城乡居民的不同主要受城乡不同的收入弹性、支出比例和储蓄再投资比例的影响。

在影响间接回弹效应的主要因素方面。图3展示了与收入弹性情景相关的变量：四个年份内非能源部门的全国、城镇和农村的居民收入弹性及整体后向关联系数 L 。由图3可见，非能源部门中收入弹性高的部门与后向关联系数高的部门不尽相同，以2017年为例，在后向关联系数 $> 2 \text{ t CO}_2/\text{万元}$ 的部门中，仅有造纸和文教用品制造业（6）、专用和通用设备制造业（10）、交通运输设备制造业（11）和水的生产和供应业（16）的收入弹性 > 1 。从城乡比较来看，在众多非能源部门中，仅金属压延加工与金属制品业（9）和交通运输设备制造业（11）两个部门的收入弹性绝对值城镇大于农村。其中金属压延加工与金属制品业（9）的后向关联系数 L 是所有非能源部门中最大的，交通运输设备制造业（11）的 L 值也较大，这对间接回弹效应的直接部分有一定的影响。根据收入弹性的分布情况，可算得每年度城镇的储蓄率高于农村。储蓄的部分按全社会再分配的比例投资到包括能源部门在内的20个部门，对最终的间接回弹效应产生了间接影响。

图4展示了与支出比例情景相关的变量：非能源部门支出比例 W 和后向关联系数 L 。非能源部门中支出比例高的部门与后向关联系数高的部门同样不尽相同，支出比例大的

图3 居民收入弹性与后向关联系数 L Fig. 3 Residential income elasticity and the backward relating coefficient L

部门主要是农林牧渔业(1)、食品和烟草加工制造业(3)、批发零售和住宿餐饮业(18)和第三产业其他服务业(20),而这四个主要消费部门的后向关联系数 L 都较小,在2017年这些部门的 L 都 $< 1.5 \text{ t CO}_2/\text{万元}$ 。在直接贡献部分,城镇在若干低碳和高碳的部门均有比农村支出比例高,在间接贡献部分,与收入弹性情况类似,由于城镇储蓄率高于农村,再投资部分对间接回弹效应的贡献也是城镇高于农村。

2.6 影响因素的渐变模拟

现探讨几种影响因素的渐变模拟:第一种是基于不同能源价格倍数的间接回弹效应模拟,第二是基于不同城镇化率的间接回弹效应模拟,第三种是基于支出比例较高部门的后向关联系数减半的间接回弹效应模拟。由于收入弹性情景和支出比例情景的间接回弹效应差别不大,影响因素的渐变模拟在支出比例情景的基础上展开。现有研究发现发展中国家和低收入人群具有更高的直接回弹效应^[33-35],因为他们的能源消费远没有达到饱和,当能源效率提高从而能源支出下降后,倾向于消费更多的能源以提高生活水平。由于中国已实现全面脱贫,本文认为中国的直接回弹效应会逐渐减少,因此仅考虑直接回弹效应为15%的情况。

基于中国当前国情与“双碳”目标,考虑能源价格特别是电价上升对间接回弹效应的影响很有现实意义。为刺激宏观经济增长并稳定物价,中国的电价政策长期采用低价模式。与发达国家比较,中国电价存在明显的价格扭曲,电价涨幅明显低于煤炭价格和企业燃料成本的上涨幅度^[36-38]。近年来,煤炭、石油和天然气价格持续停留在较高的位

图4 居民消费支出比例 W 与后向关联系数 L Fig. 4 Residential expenses percentage W and the backward relating coefficient L

置且有再升高的可能，2021年10月，国家发展和改革委员会《关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知》中提出要建立市场化电价机制，未来中国电价会有较大的上涨空间。而且，中国正处于城镇化快速发展阶段，探索农村城镇化进程中间接回弹效应的变化会对相关政策有所启示。此外，中国经济系统未来会进一步向着低碳化的方向演变，工业、建筑和交通等终端用能中电力比例会大幅上升，同时电源结构会演变为以新能源为主体的新型电力系统。因此，本文对能源价格持续增长、不同城镇化率以及支出比例较高部门的后向关联系数下降等主要影响因素进行渐变模拟分析。

根据研究方法中所述的渐变模拟步骤及式(9)和式(10)，计算出支出比例情景的间接回弹效应见图5。由图5可知，居民单位碳排放的能源支出影响较大。当主要消费部门的后向关联系数不变，2.5倍于当前居民单位碳排放的能源支出的情景下，间接回弹效应会增大很多，最高可达19.37%。 λ 为75%、1.5倍于当前居民单位碳排放的能源支出的模拟下，间接回弹效应为11.48%。主要消费部门的后向关联系数减半时，间接回弹效应显著下降，由2017年初始值7.28%下降为5.01%，2.5倍于当前居民单位碳排放的能源支出的情景下，间接回弹效应的最高值下降到14.18%。 λ 为75%、1.5倍于当前居民单位碳排放的能源支出的模拟下，间接回弹效应下降到8.27%。

综上分析，随着中国双碳目标的确立和现代化建设的发展，未来可能发生的能源价

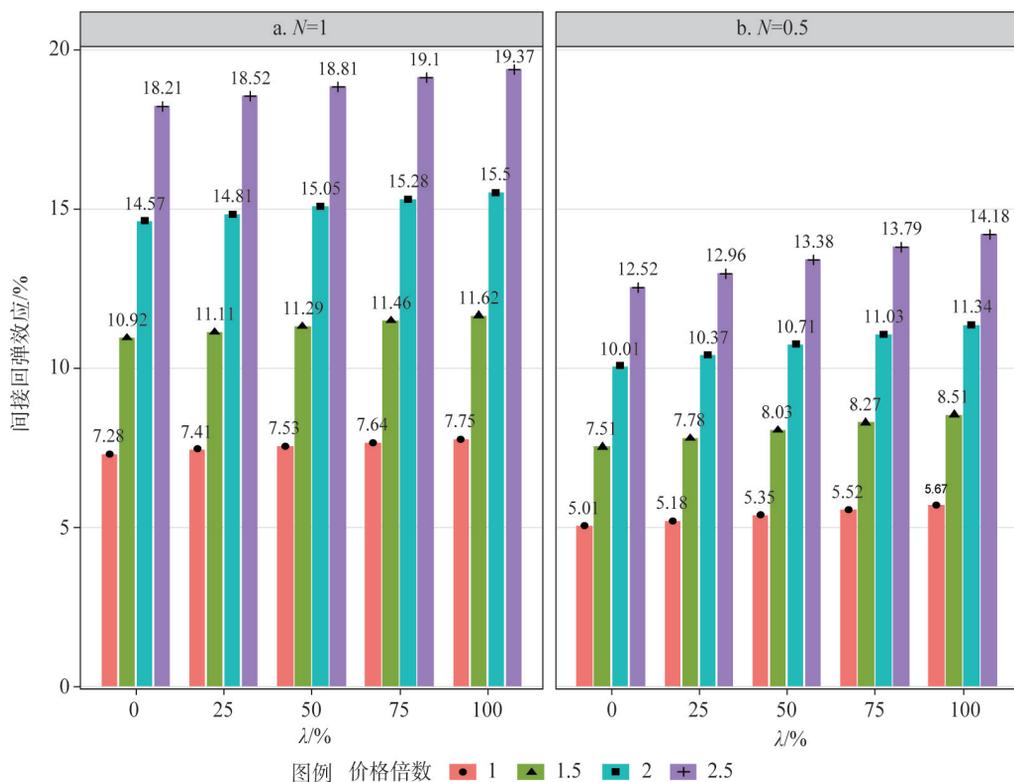


图5 间接回弹效应模拟

Fig. 5 Indirect rebound effect simulation

格上涨、农村城镇化率提升以及能源结构调整造成的部门后向关联系数下降这三种情景对间接回弹效应的影响方向与直观预期一致，但影响大小不尽相同。其中，能源价格上升带来的间接回弹效应提升较大，这是因为能源价格越高，由于能源效率提升而节约的能源支出越多，因而消费到非能源部门的支出就越多，引致的间接回弹效应就越大。随着城镇化率提高，间接回弹效应平缓上升，这是因为随着城镇化率提高，农村人口转变为城镇人口的过程中，居民支出结构发生变化，导致间接回弹效应增大。而四个主要消费部门的后向关联系数减半代表了这四个部门的完全消耗碳排放强度下降到50%，代表了经济系统持续低碳化情景，显然会导致以二氧化碳排放量测算的间接回弹效应的减小，减小幅度约为标准值的30%。

基于渐变模拟分析，本文参考中国社会经济和低碳发展情景的相关研究^[39,40]，设计了2030年和2060年一般政策情景和长期低碳转型情景。一般政策情景考虑各项节能降碳政策和二氧化碳排放强度下降的趋势，并在2030年前二氧化碳排放总量达峰，但没有考虑在2060年前实现碳中和。在一般政策情景中，预计2030年和2060年的完全消耗碳排放强度即后向关联系数相比2017年分别下降到63.8%和26.1%^[39]，城镇化率分别达到70%和85%^[40]。参考有关能源比价研究，中国居民用天然气和电力价格水平仅为国际水平的43%左右^[41]，以国际水平为基准，预计2030年中国居民能源支出相比2017年上升到2.5倍，2060年上升到4倍，估算中国2030年和2060年的间接回弹效应为15.18%和46.55%。

长期低碳转型情景考虑2060年前实现碳中和，强调经济社会系统性变革。在长期低

碳转型情景中，预计2030年和2060年的完全消耗碳排放强度即后向关联系数相比2017年分别下降到56.4%和6.6%^[39]，城镇化率和能源价格与自主贡献政策情景相同，估算中国2030年和2060年的间接回弹效应为13.41%和11.77%。

3 结论与讨论

本文通过构建居民能源消费间接回弹效应的理论模型，测算了2002年、2007年、2012年和2017年中国居民的间接回弹效应，并进行了影响因素的渐变模拟，用碳排放量进行间接回弹效应的测算具有重要的意义。首先，通过测算居民能源消费的间接回弹效应从而对能源效率政策进行了综合评价，体现了从消费端节能降碳的政策导向。其次，本文的测算拓宽了政策思路：一方面可通过提高消费者和生产商的低碳意识，引导居民低碳消费、商家低碳营销等政策措施，减少居民在高碳产品和服务上的消费；另一方面要大力转变产业结构和能源结构，促进能源结构和整个经济系统的低碳化转型，才能切实将间接回弹效应控制在一个较低的水平上。最后，研究显示能源效率政策必须与促进产业结构和能源结构转型的政策相结合。本文得到以下结论：

(1) 目前中国居民能源消费的间接回弹效应呈现倒“U”型，2007年最大，2017年最小。出现倒“U”型的原因在于：第一，相较于2002年，2007年后向关联系数下降不明显，而能源支出上涨，导致2007年的间接回弹效应增大；2012年和2017年后向关联系数下降明显，而能源支出上涨较慢，即能源支出上涨的影响低于完全消耗碳排放强度下降的影响，导致2012年和2017年的间接回弹效应逐年减小。第二，城镇居民的间接回弹效应略高于农村居民。第三，在渐变模拟实验中，当能源支出增大时，间接回弹效应会明显增大；当居民主要消费部门的后向关联系数即完全消耗碳排放强度下降时，间接回弹效应会大幅减小。第四，参考相关研究对后向关联系数、城镇化率和能源价格等关键参数值进行设定，一般政策情景和长期低碳转型情景在2030年的间接回弹效应都会反弹到高于2007年的情况。不考虑碳中和的一般政策情景下，2060年的间接回弹效应高达46.55%，可见，仅有碳达峰目标不能避免间接回弹效应的大幅增加。考虑碳中和目标的长期低碳转型情景下，2060年的间接回弹效应为11.77%，在实现碳中和目标时，仍要全方位采取宣传教育等多种方式，促进居民的消费行为低碳化，才能有效避免居民间接回弹效应的过快增大。

(2) 针对中国的双碳目标，以碳排放量定义和测算的居民能源消费的间接回弹效应有以下政策涵义：第一，由于存在回弹效应，能源效率政策使居民减少了部分能源消费量的同时，节省的支出用在了更多的非能源商品和服务的消费上。本文使用渐变模拟比较不同因素对间接回弹效应的影响大小，总结出能源价格上升和能源结构低碳化对间接回弹效应分别有正、负向的影响。因此与能源效率政策相配套的还应该是能源结构和整个经济系统的低碳化转型，才可能在能源价格不断上升和居民消费不断增长的同时，使居民消费的二氧化碳排放减下来。第二，现阶段大力推行能源效率政策的同时，对居民能源消费的间接回弹效应的规制，应以降低居民非能源消费的低碳化程度为政策目标。在具体实施方面，首先在电力结构中大量增加可再生能源和核能比例；其次在制造业和服务业中进一步提高电气化程度，并大力发展公共交通、低碳建筑和可再生能源在建筑中的利用等，注重服务业和交通运输业的低碳化程度；最后，在中国全面促进消费、中等收入群体显著扩大的发展目标下，应尽快全方位采取宣传教育等多种方式，促进居民

的消费行为低碳化。

未来研究可以重视以下几个维度：首先由于目前中国有关居民收入和消费支出的统计数据还不够系统全面，例如在居民消费支出中没有将居民自有住房的年化建购房支出考虑在内，在一定程度上低估了间接回弹效应，今后应重点开展相关调查研究；其次，从心理学与经济学相结合的视角测算回弹效应的研究在国内还处于空白，除了能源效率的提高会引起间接回弹，居民自发采取的节能低碳行为也可能引起更大的间接回弹，这些非正式制度因素应该引起研究者和政策制定者的关注。

参考文献(References):

- [1] 邓祥征, 蒋思坚, 刘冰, 等. 全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系的统计分析. 自然资源学报, 2021, 36(4): 934-947. [DENG X Z, JIANG S J, LIU B, et al. Statistical analysis of the relationship between carbon emissions and temperature rise with the spatially heterogenous distribution of carbon dioxide concentration. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 934-947.]
- [2] 田云, 林子娟. 巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究. 自然资源学报, 2021, 36(4): 921-933. [TIAN Y, LIN Z J. Provincial distribution of China's carbon emission rights and assessment of its emission reduction potential under the Paris Agreement. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 921-933.]
- [3] 庄贵阳. 碳中和目标引领下的消费责任与政策建议. 人民论坛·学术前沿, 2021, (14): 62-68. [ZHUANG G Y. The consumption responsibility and policy suggestions under the guidance of the target of carbon neutralization. *People's forum·Frontiers*, 2021, (14): 62-68.]
- [4] 钟茂初. “双碳”目标有效路径及误区的理论分析. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2022, 22(1): 10-21. [ZHONG M C. A theoretical analysis on the effective path and the misunderstanding of "Dual Carbon" goal. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2022, 22(1): 10-21.]
- [5] 刘伟, 蔡志洲. 经济周期与长期经济增长: 中国的经验和特点(1978—2018). 经济学动态, 2019, (7): 20-36. [LIU W, CAI Z Z. Economic cycle and long-term economic growth: China's experience and characteristics (1978-2018). *Economic Perspectives*, 2019, (7): 20-36.]
- [6] JEVONS W S. *The Coal Question: Can Britain Survive?* London: Macmillan, 1866: 4-22.
- [7] KHAZZOOM J D. Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances. *Energy Journal*, 1980, 1(4): 21-40.
- [8] BROOKS L G. The greenhouse effect: The fallacies in the energy efficiency solution. *Energy Policy*, 1990, 18(2): 199-201.
- [9] SAUNDERS H D. The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth. *Energy Journal*, 1992, 13(4): 131-148.
- [10] LIU Z, DENG Z, HE G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(2): 141-155.
- [11] GREENING L A, GREEN D L, DIFIGLIO C. Energy efficiency and consumption: The rebound effect—a survey. *Energy Policy*, 2000, 28(6-7): 389-401.
- [12] CHITNIS M, SORRELL S, DRUCKMAN A, et al. Turning lights into flights: Estimating direct and indirect rebound effects for UK households. *Energy Policy*, 2013, 55: 234-250.
- [13] DRUCKMAN A, CHITNIS M, SORRELL L S, et al. Missing carbon reductions? Exploring rebound and backfire effects in UK households. *Energy Policy*, 2011, 39(6): 3572-3581.
- [14] THOMAS B A, AZEVEDO I L. Estimating direct and indirect rebound effects for U.S. households with input-output analysis: Part 2: Simulation. *Ecological Economics*, 2013, 86: 188-198.
- [15] CHALKLEY A M, BILLET E, HARRISON D. An investigation of the possible extent of the re-spending rebound effect in the sphere of consumer products. *The Journal of Sustainable Product Design*, 2001, 1(3): 163-170.
- [16] ANTAL M, JEROEN C J M, VAN D B. Re-spending rebound: A macro-level assessment for OECD countries and emerging economies. *Energy Policy*, 2014, 68(5): 585-590.
- [17] HERTWICH E G. Consumption and the rebound effect: An industrial ecology perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9: 85-98.

- [18] SANTARIUS T, WALNUM H J, AALL C. From unidisciplinary to multidisciplinary rebound research: Lessons learned for comprehensive climate and energy policies. *Frontiers in Energy Research*, 2018, 6: 1-10.
- [19] CHITNIS M, SORRELL L S. Living up to expectations: Estimating direct and indirect rebound effects for UK households. *Energy Economics*, 2015, 52: S100-S116.
- [20] BORENSTEIN S. A microeconomic framework for evaluating energy efficiency rebound and some implications. *Energy Journal*, 2015, 36(1): 1-21.
- [21] ALFREDSSON E C. 'Green' consumption-no solution for climate change. *Energy*, 2004, 29: 513-524.
- [22] FREIRE-GONZALEZ J. Methods to empirically estimate direct and indirect rebound effect of energy-saving technological changes in households. *Ecological Modelling*, 2011, 223: 32-40.
- [23] FREIRE-GONZALEZ J. Evidence of direct and indirect rebound effect in households in EU-27 countries. *Energy Policy*, 2017, 102: 270-276.
- [24] YU L, ZHANG J, FUJIWARA A. Evaluating the direct and indirect rebound effects in house hold energy consumption behavior: A case study of Beijing. *Energy Policy*, 2013, 57: 441-453.
- [25] 孙涵, 申俊, 成金华. 基于LA-AIDS模型的中国居民能源消费回弹效应研究. *软科学*, 2016, 30(3): 94-97. [SUN H, SHEN J, CHENG J H. Rebound effect of residential energy consumption in China based on LA-AIDS model. *Soft Science*, 2016, 30(3): 94-97.]
- [26] LIN B Q, YANG F, LIU X. A study of the rebound effect on China's current energy conservation and emissions reduction: Measures and policy choices. *Energy*, 2013, 58: 330-339.
- [27] WANG Z H, HAN B, LU M L. Measurement of energy rebound effect in households: Evidence from residential electricity consumption in Beijing, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 852-861.
- [28] 刘朝, 周宵宵, 张欢, 等. 中国居民能源消费间接回弹效应测算: 基于投入产出和再分配模型的研究. *中国软科学*, 2018, (10): 142-157. [LIU C, ZHOU X X, ZHANG H, et al. Assessing the indirect rebound effect of Chinese residential energy consumption: Based on the input-output model and re-spending model. *China Soft Science*, 2018, (10): 142-157.]
- [29] REIMERS H, JACKSOHN A, APPENFELLER D, et al. Indirect rebound effects on the consumer level: A state-of-the-art literature review. *Cleaner and Responsible Consumption*, 2021, 3: 1-16.
- [30] 王长建, 汪菲, 叶玉瑶, 等. 基于供需视角的中国煤炭消费演变特征及其驱动机制. *自然资源学报*, 2020, 35(11): 2708-2723. [WANG C J, WANG F, YE Y Y, et al. Evolving characteristics and driving mechanism of coal consumption in China: Based on the perspective of supply and demand. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(11): 2708-2723.]
- [31] 王兆华, 卢密林. 基于省际面板数据的中国城镇居民用电直接回弹效应研究. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(7): 1678-1686. [WANG Z H, LU M L. Direct rebound effect of urban residential electricity use: An empirical evidence from China. *System Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(7): 1678-1686.]
- [32] YANG Q R, ZHANG K, YUAN X Y, et al. Evaluating the direct rebound effect of China's urban household energy demand. *Energy Procedia*, 2019, 158: 4135-4140.
- [33] TAYLOR L. Fuel poverty: From cold homes to affordable warmth. *Energy Policy*, 1993, 21(10): 1071-1072.
- [34] WADUD Z, GRAHAM D J, NOLAND R B. Modelling fuel demand for different socio-economic groups. *Applied Energy*, 2009, 86(12): 2740-2749.
- [35] BOARDMAN B, MILNE G. Making cold homes warmer: The effect of energy efficiency improvements in low-income homes. *Energy Policy*, 2000, 28(6-7): 411-424.
- [36] 唐要家. 电价管制刚性的政治经济学逻辑. *中国地质大学学报: 社会科学版*, 2014, 14(4): 1-6, 139. [TANG Y J. Political economics logic of electricity price regulation rigidity. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2014, 14(4): 1-6, 139.]
- [37] 叶泽, 袁玮志, 李湘祁. 低电价陷阱: 电价水平与经济发展的关系实证研究. *中国工业经济*, 2013, (11): 44-56. [YE Z, YUAN W Z, LI X Q. The trap of low electricity price: Empirical research on the relationship between price level and economic development. *China Industrial Economics*, 2013, (11): 44-56.]
- [38] 何凌云, 程怡, 金里程, 等. 国内外能源价格对中国能源消耗的综合调节作用比较研究. *自然资源学报*, 2016, 31(1): 1-16. [HE L Y, CHENG Y, JIN L C, et al. Comparison of the regulatory effects of domestic and foreign energy prices on energy consumption of China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(1): 1-16.]
- [39] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1-25. [Project Synthesis Report Writing Team. Comprehensive report on China's Long-term Low-carbon Development

Strategy and Transformation Path. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(11): 1-25.]

- [40] 谢伏瞻, 刘伟, 王国刚, 等. 奋进新时代 开启新征程: 学习贯彻党的十九届五中全会精神笔谈(上). *经济研究*, 2020, 55(12): 4-45. [XIE F Z, LIU W, WANG G G, et al. Striving for a New Era and opening a new journey: Studying and implementing the spirit of the Fifth Plenary Session of the 19th Central Committee of the Communist Party of China (Part I). *Economic Research Journal*, 2020, 55(12): 4-45.]
- [41] 赵茜. 国际能源比价分析. *商业经济*, 2016, (10): 30-31, 42. [ZHAO X. The international energy price comparison analysis. *Business & Economy*, 2016, (10): 30-31, 42.]

Indirect rebound effect analysis of Chinese residential energy consumption and policy recommendations for the carbon peak and carbon neutrality goals

XU Guang-qing¹, ZHANG Wen-Dan¹, LIU Hai-bo²

(1. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. Personnel Education Bureau, China Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China)

Abstract: The residential energy consumption indirect rebound effect has a wide impact but limited research. This paper estimates the indirect rebound effect of China's residential energy consumption in 2002, 2007, 2012, and 2017 using a combination of the redistribution model and the 20 sectors' environmental Input-Output table, with CO₂ emission being the measure. The results show that the indirect rebound effect of residential energy consumption is between 3.90% and 12.88%. The indirect rebound effect shows an inverse U-shape across the time dimension. Besides, the urban indirect rebound effect is consistently higher than the rural indirect rebound effect. This study conducts simulations focusing on three important factors that may change under the carbon peak and carbon neutrality goals to compare their impact on the indirect rebound effect. The analyses show that the indirect rebound effect increases the most when the residential unit carbon emission expenses increase. The indirect rebound effect decreases but not as much when the backward relating coefficients decrease and is affected the least by the simulated urbanization rate. In both general policy scenario and long-term low-carbon transition scenario, the indirect rebound effect in 2030 is greater than 13%, the general policy scenario in 2060 is as high as 46.55%, and the long-term low-carbon transition scenario is 11.77%. We discussed key policy recommendations for the carbon peak and carbon neutrality goals, including pushing forward policies to transform the energy structure as well as the whole economic system, and promote low-carbon residential consumption to offset the increasing trend of indirect rebound effect.

Keywords: residential energy consumption; indirect rebound effect; environmental Input-Output table; residential unit carbon emission expenses; backward relating coefficients