

中国产业数字化对经济系统 和总能耗的影响

——基于能源效率视角的分析

陈素梅 赵健烽

摘要 在数字化绿色化协同转型过程中，不能只关注产业自身能效变化，还应从能效提升的视角出发，审视产业数字化对经济和总能耗的影响。本文引入不同行业数字化转型与不同能源种类能效改善的差异化考量，基于动态 CGE 模型模拟分析了不同转型情景下中国经济和总能耗的变化程度。结果表明，通过能效提升，产业数字化对实际 GDP、总产出、居民消费及社会福利可产生正面影响，但总能耗不降反增；在同等水平的能效改善下，当所有行业数字化转型对各类能效改进时，经济拉动效果最为可观。进一步研究发现，此情景下能源回弹效应主要来自消费端；其余情景下回弹效应主要来自生产端，并在高耗能制造业、其他工业和交通运输业上更为明显。研究结果可为推动产业数字化绿色化协同转型提供一定的启示。

关键词 产业数字化 能源回弹效应 宏观经济 CGE 模型

〔中图分类号〕X22 〔文献标识码〕A 〔文章编号〕2095-851X (2025) 06-0027-11

一、引言

中国正在通过数字化绿色化协同转型发展，努力实现以数字化技术赋能产业绿色转型的节能目标。2024 年 7 月 31 日，中共中央、国务院《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》指出，要加快数字化绿色化协同转型发展，推进产业数字化智能化同绿色化的深度融合。2024 年 8 月 24 日，中央网信办等十部门组织实施数字化绿色化协同行动计划，联合印发了《数字化绿色化协同转型发展实施指南》。由此可见，如何通过产业数字化绿色化协同转型发展促进我国经济实现高质量发展，成为各界关注的重要话题。需要注意的是，产业数字化对于能源使用效率往往具有促进作用，对于能源消耗可能产生回弹效应。这意味着以数字化技术驱动的能源效率政策，因回弹效应可能导致节能绩效欠佳，进而通过经济系统中各方面的关联互动对宏观经济产生影响。也就是说，产业数字化驱动绿色转型，在经济系统和总能耗层面的效果需要进行更为全面的评估。

【基金项目】国家社会科学基金项目“低碳消费的界定、行为度量及其对低碳创新的引致效应研究”（批准号：23BJY248）；中国社会科学院实验室孵化专项资助项目“中国包容性绿色发展政策评估实验室”（批准号：2024SYFH004）；中国社会科学院创新工程项目“产业融合与推动经济体系优化升级研究”（批准号：GJSCX2021-02）；中国社会科学院学科建设“登峰战略”资助计划（批准号：DF2023YS24）。

【作者简介】陈素梅，中国社会科学院工业经济研究所，邮政编码：100006，本文通讯作者，电子邮箱：chensumei.1234@163.com；赵健烽，中国社会科学院大学应用经济学院，邮政编码：102488，电子邮箱：zhaojianfeng@ucass.edu.cn。

所谓回弹效应，是指能源效率提高所节约的能源因其他经济效应所产生的新能源需求而被部分甚至完全抵消。这种论断最早可以追溯至“杰文斯悖论”，Jevons（1865）发现技术进步在提高能源效率的同时，能源使用成本也在下降，从而导致能源需求快速增加。已有研究表明，能源回弹效应在现实中显著存在，并且在需求侧、生产侧以及不同生产部门有较大的不同（Zhou et al.，2018；胡秋阳，2014）。由此可见，若要更好地推动产业数字化绿色化协同转型，就不能仅仅关注产业数字化带来的自身能源效率改善，而应全面地考察回弹效应及其差异，同时不能只片面地关注个别产业，还应从系统的视角出发，分析其对经济和总能耗的影响。

关于产业数字化对经济的影响，现有文献大多从经济增长、产业发展、企业经营等视角展开。例如，在经济增长方面，Czernich 等（2011）证实了互联网发展能够显著促进经济增长。在产业发展方面，郭凯明等（2024）基于数据要素的非竞争性和正外部性特征，认为数据要素在达到一定规模后才能对不同要素密集程度的产业产生不同程度的规模效应，由此推动产业结构和分配结构转型并提升劳动生产率。关于企业经营的影响也成为近年来的研究热点，金星晔等（2024）研究发现，企业数字化转型能够显著提高财务绩效。

关于产业数字化对能耗的影响，现有研究尚未得出一致结论。一些文献认为，产业数字化因技术进步带来能源的回弹效应，使其节能效果往往小于预期。王香艳和李金叶（2022）发现，数字经济发展水平和能源消费规模存在正 U 型关系，与能源消费效率存在倒 U 型关系；Peng 等（2023）运用面板向量自回归模型进行测算，认为中国城市数字经济至少会带来 22% 的能源回弹效应；Wang 等（2023）基于 2008—2019 年中国地级市面板数据研究发现，尽管工业机器人的使用会减少碳排放，但能源回弹效应的存在使其碳减排效果被部分抵消。然而，张三峰和魏下海（2019）根据世界银行 2012 年对中国制造业企业的调查数据，发现企业提高应用信息与通信技术程度不仅会降低单位产出能源消耗，还降低了企业生产中的能源消耗总量。

关于能源回弹效应的测算，归纳起来，现有文献主要采用计量方法、几近理想的需求系统（Almost Ideal Demand System，简称 AIDS）、投入产出分析法、可计算一般均衡（Computable General Equilibrium，简称 CGE）分析等方法。计量方法主要运用能源消耗与经济增长的计量关系，估算出国家、地区或产业层面的直接回弹效应；AIDS 方法是基于需求系统模型，重点分析居民消费层面的直接回弹效应和间接回弹效应；投入产出分析法是基于局部均衡的视角，引入社会经济系统中部门之间的联系，重点测算整体经济以及分行业的回弹效应；CGE 方法则是从一般均衡的视角，引入产业关联、收入水平、要素替代等影响能源消耗的因素，模拟分析能源效率改善对未来宏观经济、各行业产出及其能耗等方面的影响，进而测算出直接回弹、间接回弹和宏观经济总回弹效应。

综上，现有研究主要从城市、产业、企业等单一视角展开，在一定程度上探讨了产业数字化对能源效率、宏观经济的影响，但难以反映经济各层面受到的冲击以及不同行业数字化影响的差异，更无法顾及产业间联动和社会福利的变化。而产业数字化所带来的能源效率改善会影响经济系统的各个环节，这需要使用综合分析方法进行系统评估。再者，现有关于产业数字化的能源回弹效应研究主要集中于产业自身回弹或总回弹分析，尚未从总回弹效应中识别出需求侧、供给侧及其不同行业的回弹贡献，而这种深入识别有助于指导产业数字化绿色化协同转型实践。此外，不同行业能效提升的回弹效应存在差异（胡秋阳，2014），而且不同能源种类能效提升的回弹效应也存在区别（查冬兰、周德群，2010）。我国数字化技术赋能绿色转型政策倾向于以冶金、石化等高能耗行业作为重点领域，现有研究缺乏不同行业数字化转型对总体能耗的影响分析，也尚未对产业数字化引致不同能源种类能效提升后的回弹效应进行深入研究。

本文在借鉴以往文献的基础上，引入不同行业数字化转型与不同能源种类能效改善的差异化考量，通过动态 CGE 模型模拟分析了各种数字化转型情景下主要宏观经济变量与各行业产出的变动

程度；并在测算出各情景下总能源回弹效应的基础上，进一步分解出消费端、生产端及各行业的回弹贡献，从而为推动产业数字化绿色化协同转型提供政策启示。

二、模型构建

（一）动态 CGE 模型的构建

1. 基本结构

本文构建了一个中国动态 CGE 模型，主要用于模拟产业数字化提升能效所导致的经济影响和能源回弹效应。模型基本结构如图 1 所示。

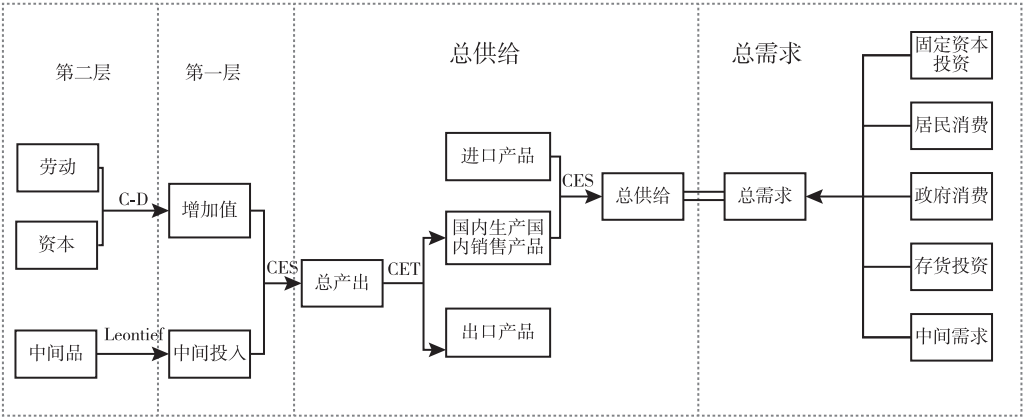


图 1 动态 CGE 模型基本结构

资料来源：由本文作者自行绘制。

生产模块。模型假定企业遵循利润最大化原则进行生产决策，生产过程采用两层函数嵌套而成。第一层，由中间投入和增加值以常替代弹性（Constant Elasticity of Substitution，简称 CES）函数形式构成部门总产出。第二层，劳动要素与资本要素以柯布一道格拉斯（Cobb-Douglas，简称 C-D）函数形式构成增加值；假定各中间投入品之间替代弹性为 0，即采用列昂惕夫函数形式，各中间投入品需求由固定比例系数确定。参考胡秋阳（2014）的做法，关于提升能源效率的模拟情景，在本模型中表现为下调生产部门对能源品的固定比例投入系数。

收入支出模块。模型假定居民通过向市场提供劳动要素和资本要素来获得收入。同时，居民将一部分收入按照最大化效用原则用于满足各类商品消费，剩余部分为储蓄。模型假设政府消费固定，政府收入来自直接税，收支差值为政府储蓄。

贸易模块。模型假定中国是世界市场价格的接受者，任何部门总产出以恒变换弹性（Constant Elasticity of Transformation，简称 CET）函数形式用于满足国内销售和出口。而本国产品和进口产品以 CES 函数形式构成国内总供给，从而满足本国总需求。其中，总需求由固定资本投资、中间需求、居民消费、政府消费与存货投资构成。

均衡模块与动态化模块。模型假定商品市场出清、要素市场出清、国际收支平衡、投资储蓄平衡。其中，总投资由总储蓄决定；要素价格和商品价格内生决定，劳动总供给和资本总供给外生给定，要素能够在各部门间自由流动且得到充分利用。模型采用递归动态机制，依靠资本存量积累、劳动力增长率和技术进步等设置实现动态驱动。

2. 回弹效应测算

本文借鉴 Zhou 等（2018）的做法，将能源回弹效应 R 定义为：

$$R = \left(1 + \frac{\dot{E}}{g}\right) \times 100 \quad (1)$$

其中, g 为能源效率变化率, $\dot{E}$ 为由能效提升带来的能源消耗变动率。 $R < 0$ 表示超级节能效应, 即实际节能效果高于预期; $R = 0$ 表示无能源回弹效应; $0 < R < 100$ 表示存在部分回弹效应; $R = 100$ 表示完全能源回弹效应; $R > 100$ 表明能源消耗量不降反增, 这种情况被称为“回火效应”。

假设 $\dot{E}_i$ 和 g_i 分别为单个生产部门 i 的能耗变动率和能源效率变化率, 则生产部门 i 的能源回弹效应可表示为:

$$R_i = \left(1 + \frac{\dot{E}_i}{g_i}\right) \times 100 \quad (2)$$

以集合 P 代表全部生产部门, E_p 为全部生产部门的能源消耗量。生产端回弹效应 R_p 可表示为单个生产部门回弹效应 R_i 的加权平均, 具体公式为:

$$R_p = \sum_i R_i \cdot \frac{E_i}{E_p} \quad (3)$$

假设 ΔE_H 为消费端能耗变动量, 消费端回弹效应 R_H 可表示为:

$$R_H = \frac{\Delta E_H}{g_i \cdot E_p} \quad (4)$$

基于各类生产活动和消费活动视角, 总回弹效应 R 可被分解为生产端回弹效应 R_p 、消费端回弹效应 R_H 和其他活动回弹效应 R_{ect} 。由于生产活动和消费活动以外的其他活动回弹效应 R_{ect} 极小, 故此效应可被忽略。总回弹效应可表示为生产端回弹效应与消费端回弹效应之和, 具体表达式如下:

$$R = R_p + R_H + R_{ect} \approx R_p + R_H = \sum_i R_i \cdot \frac{E_i}{E_p} + \frac{\Delta E_H}{g_i \cdot E_p} \quad (5)$$

(二) 数据基础

1. 社会核算矩阵编制

本文基于国家统计局发布的中国 2020 年竞争型投入产出表和《中国统计年鉴》等数据, 编制了社会核算矩阵 (Social Accounting Matrix, 简称 SAM)。投入产出表中原有的 139 个生产部门被合并为 11 个部门: 农业、煤炭开采业、石油和天然气开采业、精炼石油和核燃料加工业、煤炭加工业、电力热力供应业、天然气供应业、高耗能制造业^①、其他工业、交通运输业、其他服务业。借鉴胡秋阳 (2014) 的做法, 煤炭开采业、石油和天然气开采业属于一次能源供应部门, 精炼石油和核燃料加工业、煤炭加工业、电力热力供应业、天然气供应业属于二次能源供应部门。本研究模拟时段为 2020—2035 年。

2. 模型参数

居民消费份额、政府消费份额、个人所得税率等参数可由 SAM 表直接标定得来。在模型动态化设定方面, 劳动力变化率、资本回报率、折旧率、全要素生产率增长率分别取自张琼和张钟文 (2021)、刘仁和等 (2018)、陈昌兵 (2014)、尹向飞和欧阳峤 (2019) 的研究。中间投入和增加值之间替代弹性 sp_i 参照吴滨 (2021) 的成果, 国内消费品和出口品之间替代弹性 st_i 、国内生产品和进口品之间替代弹性 sa_i 均参照陈素梅 (2016) 的研究, 关键弹性参数取值详见表 1。

^① 参考国家统计局《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平 (2021 年版)》, 高耗能制造业包括化学工业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业。

表 1 CGE 模型中的关键弹性参数值

行业类别	sp_i	st_i	sa_i
农业	0.5	3.6	3.0
煤炭开采业	0.3	4.0	3.0
石油和天然气开采业	0.3	4.0	3.0
精炼石油和核燃料加工业	0.3	4.0	3.0
煤炭加工业	0.3	4.0	3.0
电力热力供应业	0.8	0.5	0.9
天然气供应业	0.8	4.0	3.0
高耗能制造业	0.6	4.0	3.0
其他工业	0.6	4.0	2.0
交通运输业	0.8	4.0	2.0
其他服务业	0.8	2.8	2.0

资料来源：由作者参照陈素梅（2016）、吴滨（2021）的研究设定。

三、情景设计

如前所述，产业数字化能够提升产业自身某类能源的使用效率。Wang 和 Shao（2023）的研究发现，中国数字经济规模每提升 1 个单位可使能源效率上升 0.1754 个单位。据统计，2016—2022 年中国数字经济规模年均增长 15.99%。^① 由此估算，中国数字经济发展每年可促进能源效率上升 2.80%。

考虑到不同能源类别能效提升对回弹效应的影响存在差异，不同部门能效提升的影响也存在区别，有必要在考察产业数字化能源回弹效应时引入能源类型异质性和行业异质性的考量。具体而言，在能源类型异质性方面，本研究在设置所有能源种类能效改善情景基础上，加入了一次能源能效和二次能源能效分别改善的情景；在行业异质性方面，鉴于高耗能制造业具有较高的能耗强度基数，是当前中国产业数字化赋能绿色转型的重点领域，在模拟所有部门数字化转型影响的同时，对此类行业数字化的影响进行了单独考察。

基于上述讨论，为系统探究不同数字化转型方案对宏观经济和能源回弹的影响，本研究共设置了四种数字化转型情景。在情景 S1 中，数字化转型覆盖所有行业，使得各类能效每年提升 2.80%；在情景 S2 中，所有行业的数字化转型使得一次能源能效年均提升 2.80%；在情景 S3 中，所有行业的数字化转型使得二次能源能效年均提升 2.80%；在情景 S4 中，高耗能制造业数字化转型使得该行业各类能效年均提升 2.80%。

四、模拟结果分析

（一）对经济系统的影响

1. 主要宏观经济指标的变化

表 2 归纳了产业数字化通过能效提升对主要宏观经济指标的影响。总的来看，影响都为正。

① 资料来源：中国信息通信研究院发布的《中国数字经济发展研究报告》，2023 年。

表 2 不同情景下宏观经济变动情况（相对于基期的变化百分比）

宏观经济变量	S1		S2		S3		S4	
	2025 年	2035 年	2025 年	2035 年	2025 年	2035 年	2025 年	2035 年
实际 GDP	18.40	16.67	8.80	9.20	5.91	12.10	5.59	14.94
总产出	12.14	5.07	4.37	2.01	6.11	1.70	5.84	1.57
社会福利	7.35	7.00	3.16	5.58	2.40	5.00	2.24	5.53
总消费	18.70	18.15	7.84	13.94	5.90	12.46	5.49	18.47
总能耗	10.08	4.93	2.62	6.27	2.87	6.50	4.16	4.23

资料来源：由本文作者自行测算得来。

相对而言，在四种情景中，当所有的行业数字化改进各类能效时，经济的拉动效果最为明显。这主要是由于数字化转型覆盖的行业范围更广，改进能效涉及的能源种类越多，生产活动中用能成本降低的幅度就会越大，进而通过产业链上下游价格变化传导至整个经济系统，从而产生可观的经济带动作用。因此，从宏观经济变化来看，产业数字化转型应覆盖所有生产部门及其所有种类的能源使用活动。在情景 S1 中，与基准情形相比，2025 年和 2035 年实际 GDP 将分别增长 18.40% 和 16.67%，总产出将分别上升 12.14% 和 5.07%。^① 情景 S2 至情景 S4 中总产出和实际 GDP 也均有不同程度的增长态势。此外，表 2 还显示，产业数字化通过提升能效有助于促进居民消费、增进福利。在情景 S1 中，2025 年和 2035 年居民总消费将分别上升 18.70% 和 18.15%，社会福利将分别增进 7.35% 和 7.00%。理论上，对于企业生产活动而言，中间投入和增加值之间存在替代关系。当能源效率提升时，企业可能会倾向于用更多的能源投入替代劳动要素，进而对就业造成负面影响。但从模拟结果来看，通过能源效率改善，产业数字化能够增加企业利润、促进生产规模扩大，使得产出变动引致的正向就业效应超过负向替代效应，从而有助于增加居民就业及其总消费。

从总能耗变动来看，尽管数字化转型会提高转型产业自身的能源效率，但其节能效果却被完全抵消，从而使得整个经济系统的总能耗有所增加，这就证实了总能源回弹效应显著存在。比如，在情景 S1 中，2025 年和 2035 年能源总消耗量将分别上升 10.08% 和 4.93%。这主要是由于数字化转型产业因其自身能效提升而扩大了生产规模，增加了包括能源在内的其他中间品的投入需求，进而带动了其他行业产出及其能源投入需求的增加。此外，居民收入增加也会带动消费侧能源品需求的上涨。

2. 各行业产出的变动

本研究进一步模拟了各种产业数字化提升能效方案对各行业产出的影响。如表 3 所示，不同数字化转型情景下，各行业产出变动存在着明显的差异。

表 3 2035 年不同情景下各行业的产出变动（相对于基期的变化百分比）

行业类别	S1	S2	S3	S4
农业	11.71	4.62	5.34	5.22
煤炭开采业	-5.64	1.07	5.43	5.15
石油和天然气开采业	4.09	-3.44	-2.25	-2.10
精炼石油和核燃料加工业	-2.83	1.11	-0.09	1.54

① 需要说明的是，情景 S1 中实际 GDP 会大幅增长，主要有三个方面原因。其一，能效改善覆盖所有行业使用的各种能源类别，这是较为理想的状态。其二，能效年均增长情形体现了能源效率提升的持续性和复利性。根据连续复利公式计算可得到情景 S1 中的 2020—2035 年各类能效变化。以 2025 年为例，与不存在产业数字化增进能效的基准情形相比，情景 S1 中能效将上升 10.84%。其三，通过将情景 S1 模拟结果与基准情形相比，得出各年份实际 GDP 的变化幅度。

续表

行业类别	S1	S2	S3	S4
煤炭加工业	-1.31	2.94	3.30	3.21
电力热力供应业	-2.56	1.90	0.20	2.24
天然气供应业	3.13	-0.23	-2.19	-1.51
高耗能制造业	-0.17	1.57	4.94	4.63
其他工业	6.53	1.84	2.54	2.32
交通运输业	-1.53	1.13	2.62	2.00
其他服务业	6.47	2.28	-1.03	-1.16

资料来源：由本文作者自行测算得来。

整体来看，通过改进能效，产业数字化能够增加大部分行业的产出，仅少部分行业产出受损。为了进一步探究不同数字化转型方案对各行业产出的影响，本研究结合行业属性，分别剖析了农业、一次能源供应业、二次能源供应业、工业和服务业的产出变动情况。

第一，农业产出变化。产业数字化对能效的提升给农业生产带来了积极影响。比较来看，当所有行业的数字化提升各类能效（情景 S1）时，农业产出增长成效最为显著。由于农业生产更多使用的是汽油和电力等二次能源^①，因此二次能源能效改善对农业产出的影响明显优于一次能源能效改善。情景 S3 中，2035 年农业产出将上升 5.34%，比情景 S2 多出 0.72 个百分点。需要说明的是，当高耗能制造业数字化转型提高了自身能源效率（情景 S4）时，农业产出增长效果也较为显著。可能的原因在于，肥料、农药等化工品是重要的农业生产资料，这类化工行业能效改善有助于降低其生产成本与产品价格，进而显著带动农业产出的增长。

第二，一次能源产出变化。不同数字化转型方案对煤炭开采业的产出产生了差异化的影响。理论上，产业数字化通过能效改善，直接减少了企业生产过程对能源的消费，表现为抑制效应；同时，生产规模扩大带动了各生产部门对能源品投入需求的上升，居民收入增加带动了能源品消费需求的上升，它们均表现为规模效应。也就是说，抑制效应与规模效应的相互作用决定了煤炭开采业产出的变动方向。当所有行业的数字化提升各类能效（情景 S1）时，抑制效应超过规模效应，煤炭开采业产出减少了 5.64%。在情景 S2 至情景 S4 中，负向的抑制效应均小于正向的规模效应，由此导致此行业产出有所增加。对于石油和天然气开采业而言，四种情景下产出的变动方向与煤炭开采业正好相反。这可能是中国当前能源消费结构以煤炭为主、石油和天然气使用比例相对较小的缘故。在情景 S1 中，当所有的行业通过数字化转型改进各类能效时，石油和天然气开采业的产出因规模效应超过抑制效应而上涨了 4.09%。在情景 S2 至情景 S4 中，该行业抑制效应超过规模效应，使得产出水平下降。

第三，二次能源产出变化。从模拟结果来看，受产业数字化提升能效的影响，精炼石油和核燃料加工业、煤炭加工业、电力热力供应业的产出变化方向整体上类似于煤炭开采业。在情景 S1 中，负向的抑制效应更为突出，上述三类行业的产出分别下降了 2.83%、1.31% 和 2.56%；在情景 S2 至情景 S4 中，除情景 S3 中精炼石油和核燃料加工业的产出微弱下降以外，正向的规模效应均较为突出，使得最终产出均有所增加。此外，天然气供应业产出的变化方向类似于石油和天然气开采业。在情景 S1 中，其产出上涨了 3.13%，此行业所面临的负向抑制效应足以被正向规模效应所抵消。在情景 S2 至情景 S4 中，其产出分别减少了 0.23%、2.19% 和 1.51%。

^① 从本文 SAM 表数据来看，农业生产活动中使用的一次能源中间投入占生产端总能耗的 0.12%，而二次能源中间投入占比为 1.48%。

第四，工业和服务业产出变化。总的来看，在不同的数字化转型情形下，高耗能制造业和其他工业的产出大多有所增加。这得益于数字化转型产业降低了自身的用能成本，使得生产规模扩大、居民收入增加，从而带动了高耗能制品和其他工业品的投入需求与消费需求上涨。如，在情景 S3 中，高耗能制造业和其他工业产出水平分别上升了 4.94% 和 2.54%。此外，交通运输业产出变动方向类似于高耗能制造业，情景 S2 至情景 S4 中的产出均出现了不同程度的增加。

(二) 能源回弹效应分析

1. 总回弹效应测算及分解

如前所述，产业数字化对能效的改善使得整个经济系统的能耗量出现了不降反升的“回火效应”。本文从静态视角测算出各种情景下的总能源回弹效应^①，并根据公式（5）从生产端和消费端的视角出发对该效应进行了解析，结果如表 4 所示。需要说明的是，这种做法会剔除动态递归下要素积累、技术进步等因素的干扰，能够更清晰地对比分析出不同情景下的能源回弹效应及其构成的差异。

表 4 不同情景下总能源的回弹效应及其构成

情景类别	总效应	生产端	消费端
S1	5.63	-2.46	8.09
S2	87.35	83.10	4.25
S3	18.31	14.64	3.67
S4	70.26	69.83	0.43

资料来源：由本文作者自行测算得来。

从整体来看，当产业数字化提升能效时，总能源回弹效应显著存在。对比来看，在四种情景中，所有行业的数字化提升一次能源能效（情景 S2）的回弹效应最大，达到 87.35；其次是高耗能制造业数字化转型对各类能效的提升（情景 S4），回弹效应达到 70.26；而所有的行业数字化所提升的各类能效（情景 S1），其回弹效应最小，达到 5.63。实际上，二次能源主要是由一次能源加工转化而来，该行业对一次能源的中间投入系数很高。一次能源使用效率的改善不仅直接导致此类能源的使用成本下降、需求增加，而且将促进二次能源产出价格降低，最终影响到整个经济系统。如此一来，一次能源能效提升情形的回弹效应明显大于二次能源能效的提升情形。

进一步分解可以发现，不同数字化转型方案下回弹效应的构成存在显著差异。一方面，产业数字化通过提升能效导致大多数行业的产出增加，进而引致能源品投入需求的上升，表现为生产端的能源回弹效应；另一方面，该做法将促使居民增加收入、扩大对能源品的消费需求，表现为消费端的回弹效应。当所有的行业数字化提升各类能效（情景 S1）时，能源回弹效应主要来自居民消费端，而生产端存在负向的回弹效应。这意味着此情景中生产端节能效果比预期的要高，出现超级节能。这是由于当数字化转型覆盖所有行业及各种能源类别时，所带来的能效提升使生产端能源需求的抑制程度远远超出了其上涨程度。这也是此情景中总回弹效应最小的原因所在。在情景 S2 至情景 S4 中，生产端回弹效应更为突出，分别达到 83.10、14.64 和 69.83。综上所述，针对不同数字化转型方案，阻断回弹效应的侧重点应有所差异。

2. 分行业回弹效应分析

为进一步探究生产端能源回弹效应的构成，本文将不同情景下的生产端回弹效应按照行业类别进行了详细分解，以便为产业数字化绿色化协同转型提供翔实的参考。具体分解结果如表 5 所示。

^① 此处的测算是指不考虑 2020—2035 年资本积累、劳动力变动、折旧和技术进步等因素迭代变化，只考虑情景 S1 至情景 S4 下能效提升的影响。

表 5 不同情景下分行业能源回弹效应

行业类别	S1	S2	S3	S4
农业	28. 64	104. 98	24. 09	106. 92
煤炭开采业	- 116. 11	- 66. 59	48. 67	48. 4
石油和天然气开采业	- 152. 38	0. 51	- 57. 23	66. 15
精炼石油和核燃料加工业	- 47. 67	41. 64	9. 62	82. 09
煤炭加工业	- 40. 64	46. 02	12. 35	24. 5
电力热力供应业	- 56. 13	93. 7	- 49. 44	73. 99
天然气供应业	23. 23	81. 89	41. 41	102. 31
高耗能制造业	35. 55	86. 88	49. 17	15. 81
其他工业	25. 18	102. 02	23. 53	107. 94
交通运输业	41. 55	114. 83	27. 36	106. 67
其他服务业	24. 6	106. 62	18. 37	105. 49

资料来源：由本文作者自行测算得来。

当所有行业数字化提升各类能效（情景 S1）时，大部分能源生产部门出现了超级节能。其中，石油和天然气开采业、煤炭开采业、电力热力供应业、精炼石油和核燃料加工业、煤炭加工业的能源回弹效应分别达到 - 152. 38、- 116. 11、- 56. 13、- 47. 67 和 - 40. 64。此外，高耗能制造业和交通运输业因其能耗强度基数较高，能源回弹效应也较大，分别为 35. 55 和 41. 55。

当所有行业数字化转型分别提升一次能源能效（情景 S2）和二次能源能效（情景 S3）时，大部分行业能源消耗量存在正向的回弹效应。在情景 S2 中，仅有煤炭开采业的能源回弹效应为负（- 66. 59），其余行业回弹效应均为正，这在交通运输业上最为明显。在情景 S3 中，石油和天然气开采业、电力热力供应业能源回弹效应均为负，分别为 - 57. 23 和 - 49. 44；其余行业回弹效应均为正，这在高耗能制造业上最为明显。

此外，当高耗能制造业数字化转型提升各类能效（情景 S4）时，所有行业能耗均存在正向的回弹效应。其中，其他工业的回弹效应最大。此外，需要说明的是，回弹效应最小的是高耗能制造业，主要原因是此行业能效提升显著降低了自身对能源品投入的需求，从而部分地抵消了产出扩大所增加的能源需求。

五、结论和建议

基于动态 CGE 模型，本文模拟分析了不同产业数字化提升能效方案对中国经济和能源消耗的影响。研究发现，无论采用何种方案，中国实际 GDP、总产出、居民消费及社会福利都会增加，但总能耗却不降反增。在相同幅度的能效改善下，当所有行业数字化转型对各类能效改进时，经济拉动效果最为可观。从分行业来看，绝大多数行业的产出增加了，仅少数行业产出受损。进一步研究发现，当所有的行业数字化转型改进各类能效时，能源回弹效应主要来自消费端；其余情景下，回弹效应主要来自生产端，并在高耗能制造业、其他工业和交通运输业上更为明显。

为更好地推动产业数字化绿色化协同发展，本文提出如下政策启示。

一是要加快数字化技术对能源效率提升的全方位驱动。从经济拉动效果来看，所有行业的数字化对各类能效提升的影响最为可观。因此，数字化转型应该覆盖所有生产部门及其所有类别的能源使用活动。一方面，应鼓励农业、工业、服务业等各行业的数字化转型，以此作为提升能源效率的重要驱动力。积极利用互联网、大数据、人工智能等数字化技术，促进企业生产方式绿色转型，提

升智慧农业、智能制造、智慧能源、智慧交通等关键领域的实数融合水平。另一方面，应充分发挥中国超大规模市场优势，积极探索产业数字化驱动各类能效改善的多元化应用场景，全方位挖掘一次能源和二次能源的能效提升潜力，形成一批可复制可推广的应用场景和典型案例，从而以能效提升推动宏观经济总量的增长。

二是要科学审视产业数字化赋能绿色转型与能源回弹效应的关系。尽管产业数字化能够提升能源效率，但也可能引起整个宏观经济系统总耗能量的增加。尤其在短期内以煤炭为主的能源结构难以改变的背景下，会在一定程度上违背产业数字化绿色化协同发展的初衷。这也意味着在宏观层面，产业数字化很难在经济增长和节约能源两个方面实现平衡。因此，政策制定者不应仅仅将协同发展政策的焦点放在产业数字化驱动能效的改进上，而应采取在协同转型过程中配套降低或阻断能源回弹效应的措施。

三是根据数字化转型特点采用差异化策略。考虑到不同数字化转型方案的回弹效应及其构成存在显著差异，解决回弹效应问题须针对性施策。短期来看，当高耗能制造业数字化转型提升各类能效时，阻断能源回弹的重点应放在其他工业等行业上，可探索采用环境税、能源税、碳交易等措施。长期来看，当所有行业数字化转型提升各类能效时，政策重点应放在居民低碳消费模式的引导上，为此可探索实施低碳宣传、碳普惠、碳标签等措施。

参考文献

- 陈昌兵：《可变折旧率估计及资本存量测算》，《经济研究》2014 年第 12 期，第 72—85 页。
- 陈素梅：《中国燃油税“双重红利”研究》，北京：中国农业大学博士学位论文，2016 年。
- 冯烽：《能效改善与能源节约：助力还是阻力——基于中国 20 个行业能源回弹效应的分析》，《数量经济技术经济研究》2018 年第 2 期，第 82—98 页。
- 郭凯明、王钰冰、杭静：《数据要素规模效应、产业结构转型与生产率提升》，《中国工业经济》2024 年第 8 期，第 5—23 页。
- 胡秋阳：《回弹效应与能源效率政策的重点产业选择》，《经济研究》2014 年第 2 期，第 128—140 页。
- 金星晔、左从江、方明月等：《企业数字化转型的测度难题：基于大语言模型的新方法与新发现》，《经济研究》2024 年第 3 期，第 34—53 页。
- 刘仁和、陈英楠、吉晓萌等：《中国的资本回报率：基于 q 理论的估算》，《经济研究》2018 年第 6 期，第 67—81 页。
- 王香艳、李金叶：《数字经济是否有效促进了节能和碳减排？》，《中国人口·资源与环境》2022 年第 11 期，第 83—95 页。
- 吴滨：《我国先进制造业发展的政策效应》，天津：天津财经大学博士学位论文，2021 年。
- 尹向飞、欧阳晓：《中国全要素生产率再估计及不同经济增长模式下的可持续性比较》，《数量经济技术经济研究》2019 年第 8 期，第 72—91 页。
- 查冬兰、周德群：《基于 CGE 模型的中国能源效率回弹效应研究》，《数量经济技术经济研究》2010 年第 12 期，第 39—53 页、第 66 页。
- 张琼、张钟文：《我国人力资本变迁 70 年：人口转型与教育提升的双重视角》，《统计研究》2021 年第 11 期，第 47—59 页。
- 张三峰、魏下海：《信息与通信技术是否降低了企业能源消耗——来自中国制造业企业调查数据的证据》，《中国工业经济》2019 年第 2 期，第 155—173 页。
- Czernich, N., O. Falck and T. Kretschmer, et al. (2011), “Broadband Infrastructure and Economic Growth”, *The Economic Journal*, 121 (552), 505–532.
- Jevons, W. S. (1865), *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*, London: Macmillan and Co.
- Peng, H. R., Y. J. Zhang and J. Y. Liu (2023), “The Energy Rebound Effect of Digital Development: Evidence

From 285 Cities in China”, *Energy*, 270, 126837.

Wang, J. , W. Wang and Y. Liu, et al. (2023), “Can Industrial Robots Reduce Carbon Emissions? Based on the Perspective of Energy Rebound Effect and Labor Factor Flow in China”, *Technology in Society*, 72, 102208.

Wang, L. and J. Shao (2023), “Digital Economy, Entrepreneurship and Energy Efficiency”, *Energy*, 269, 126801.

Zhou, M. , Y. Liu and S. Feng, et al. (2018), “Decomposition of Rebound Effect: An Energy-Specific, General Equilibrium Analysis in the Context of China”, *Applied Energy*, 221, 280 – 298.

The Effects of China’s Industrial Digitalization on the Economic System and Total Energy Consumption: From the Perspective of Energy Efficiency

CHEN Sumei¹, ZHAO Jianfeng²

(1. Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100006, China;
2. Faculty of Applied Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China)

Abstract: The transition towards digitalization and greening cannot be confined to the energy efficiency changes of industries itself. It is imperative to consider the broader impact of industrial digitalization on the economic system and overall energy consumption from the perspective of energy efficiency enhancement. With the considerations for digital transformation in different industries and efficiency improvement in various energy types, this paper employs a dynamic Computable General Equilibrium (CGE) model to simulate the potential changes of China’s economy and total energy consumption under the different scenarios about industrial digitalization. The findings indicate that the industrial digitalization has a positive impact on the real GDP, total output, consumption, and social welfare with the enhanced energy efficiency. However, the total energy consumption shows an increase, instead of a decrease. Under the same shock of energy efficiency, the economic stimulation effect is most significant when the digitalization of all industries enhances the efficiency of all types of energy. Further research reveals that the energy rebound effect mainly comes from the consumption side in this scenario; the rebound effect mainly comes from the production side in other scenarios, and this effect is relatively obvious in energy-intensive manufacturing, other industries, and transportation. Consequently, the results provide an important implication for pushing the synergistic development between industrial digitalization and greening in China.

Key Words: Industrial Digitalization; Energy Rebound Effect; Macroeconomics; CGE Model

责任编辑：薛亚玲