

数字经济是否增加能源消费？

——基于 ICT 应用研究的分析

王 蕾 朱 彤

摘 要 以信息和通信技术（ICT）为基础的数字化技术迅速发展，一些研究认为数字经济的发展必然对能源消费产生重要影响，也有研究从不同角度证明了 ICT 对于提高能源效率具有重要作用。那么，数字经济迅速发展是否会引致能源需求（电力需求）的剧增，从而影响我国经济社会的绿色低碳转型？为此，从理论与现实视角对数字经济与能源消费的关系进行探讨，具有重要现实意义。作者围绕“ICT 与能源消费效应”展开讨论，在厘清 ICT 与能源消费之间内在影响机制基础上，分别从 ICT 直接能源消费测算、ICT 与能源消费经验研究及反弹效应的讨论三个方面，对现有研究所涉及的模型、方法及数据进行对比分析，进而加以总结概括，在指出不足的同时，对未来研究进行了展望。

关键词 数字经济 绿色转型 ICT

【中图分类号】F426 【文献标识码】A 【文章编号】2095 - 851X（2021）03 - 0093 - 16

一、引言

随着以信息和通信技术（Information and Communication Technology, ICT）为基础的数字化技术迅速发展，世界主要国家都在快速进入“数字化”和“万物互联”时代。越来越多的用户频繁使用数字设备和网络进行交流互动，越来越多的智能电子设备融入工业、农业生产过程，ICT 已经在深刻地改变着人们的生产方式和生活方式。在这一背景下，不少人认为数字经济的发展必然对能源消费产生重要影响，最显著的

【作者简介】王蕾（1979 - ），中国社会科学院工业经济研究所副研究员，邮政编码：100006；朱彤（1970 - ），中国社会科学院工业经济研究所副研究员，邮政编码：100006。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

是,基站、网络设备、数据中心等 ICT 产业基础设施投入的大幅度增加,提高了能源消费总量。

中国是数字化发展比较快的国家之一,以 ICT 为主要手段、以数据作为关键生产要素的数字经济正在快速发展。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》强调,要“发展数字经济,推进数字产业化和产业数字化,推动数字经济和实体经济深度融合,打造具有国际竞争力的数字产业集群”。具体来说,要“加强数字社会、数字政府建设,提升公共服务、社会治理等数字化智能化水平。建立数据资源产权、交易流通、跨境传输和安全保护等基础制度和标准规范,推动数据资源开发利用”。可以预见,未来我国的数字技术和数字经济将进入更快的发展时期。那么,数字化技术经济的快速发展是否会引致能源需求(电力需求)的剧增,从而影响我国经济社会的绿色发展?这是迫切需要回答的问题。因此,从理论与现实的视角对数字经济与能源消费的关系进行研究,具有重要的现实意义,而对既有研究的梳理和总结亦是必要和有益的。

目前学术界和决策部门对 ICT 的应用所引起的能源消费问题的关注度在不断提高。

从现有研究来看,存在不同观点。一些研究认为,ICT 产品与设备的广泛应用必然增加能源消费,如有研究指出,2012 年全球通信网络、个人电脑、数据中心三个环节的电力消费份额为 4.6%,而 2009 年这一比重仅为 3.9% (Heddeghem et al., 2014)。有人对未来能源消费进行了估算,认为随着“数据海啸”的到来,ICT 基础设施产生的能源消费总量还将不断增长,2025 年中国数字新基建引发的新增电力负荷总量将达到 187 吉瓦 (GW),数字基础设施耗电量占全国耗电量的比例则为 17.8% (陈新华, 2020)。

还有一种观点认为,虽然 ICT 基础设施提高了能源消费是显而易见的,但是还不能就此判断数字经济一定能够增加未来能源消费或碳排放。不少机构和学者从不同角度证明了 ICT 对于提高能源效率的作用和潜力,如有研究认为,ICT 能够在生产和消费经济领域提高能源效率 (Romm et al., 2000; Laitner and Ehrhardt-Martinez, 2008; Elliott et al., 2012; Seidel and Ye, 2012);埃森哲预测,到 2030 年 ICT 的应用具有 20% 的温室气体减排潜力。

从统计数据来看,数字经济发展不一定增加能源消费。世界移动流量与能源消费的统计数据表明,2008—2017 年移动流量与人均能源消费之间并非单调线性关系(见图 1),在发达经济体,移动流量与人均能源消费量呈负相关关系;在新兴经济体虽然呈正相关关系,但人均能源消费并未因数字经济的迅速发展而出现大幅度增长;在相对落后经济体,移动流量与人均能源消费量呈半倒 U 型。

从中国月度数据的实证分析来看,移动流量与电力消费之间为正相关关系,但是弹性小于 1,即移动流量的“海啸式”增加并没有带来电力消费的同步增加(见图 2)。因此,数字经济的发展不一定增加能源消费。

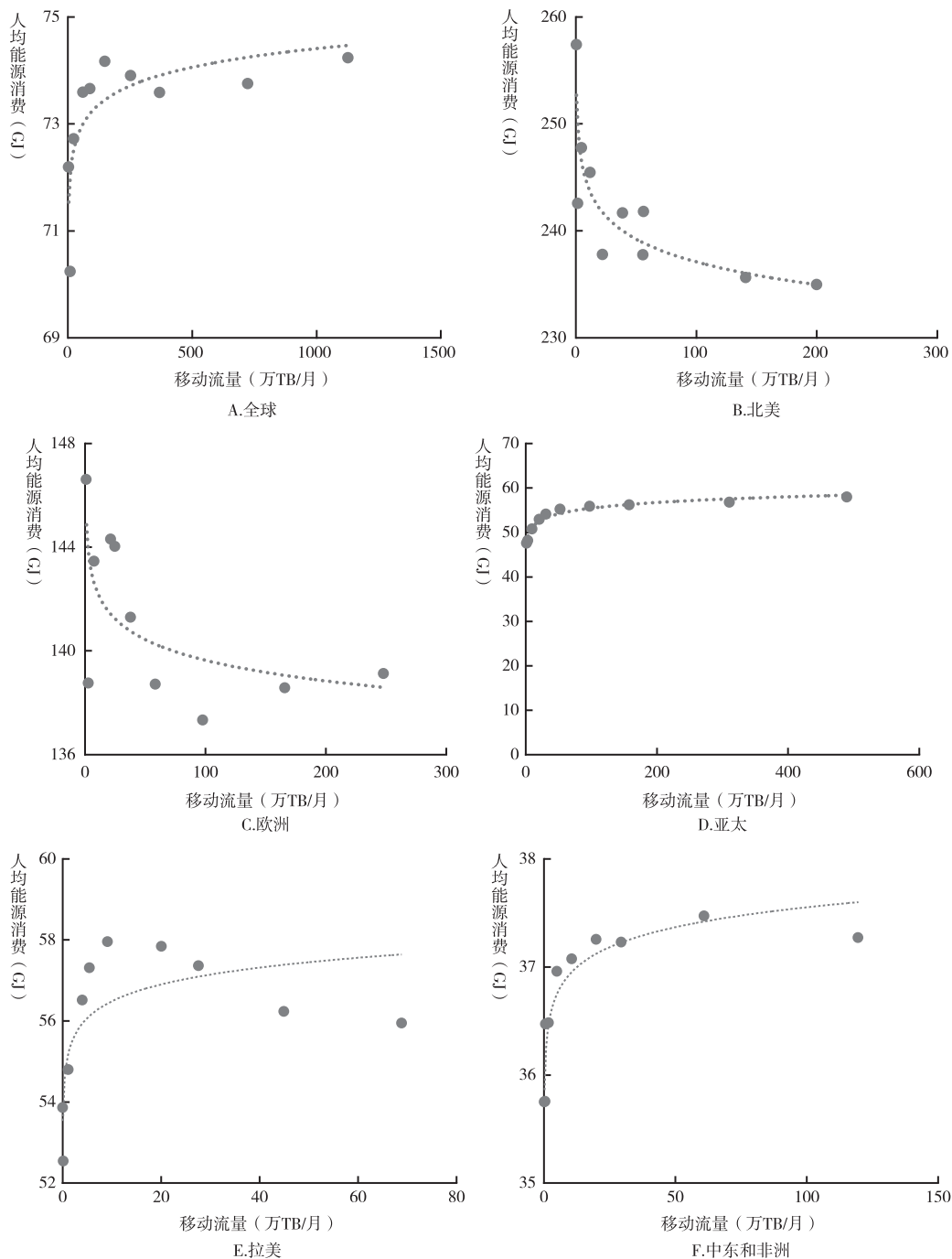


图1 移动流量与人均能源消费量的关系 (2008—2017年)

资料来源：作者根据 Wind 数据库绘制。

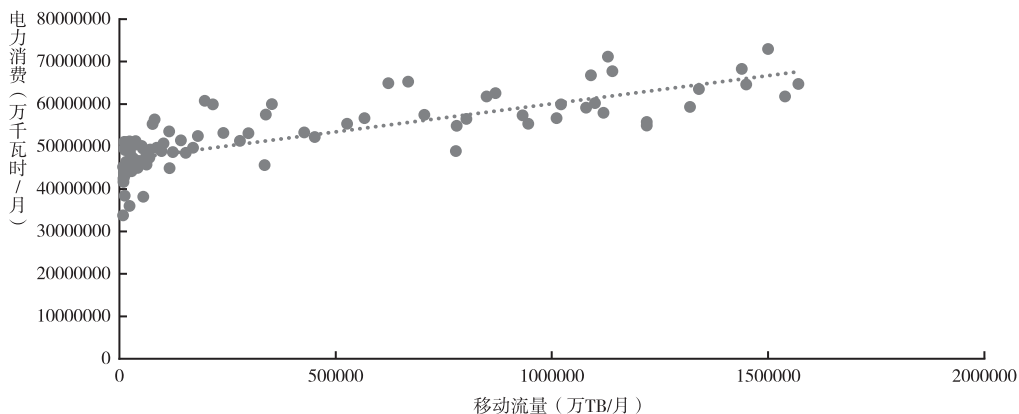


图2 中国移动流量与人均电力消费量的关系 (2008—2017年)

资料来源：作者根据 Wind 数据库绘制。

现有研究虽然存在不同观点，但也达成了三点共识：一是认为围绕数字经济的新基建将引发电力需求增加；二是 ICT 在微观领域具有节能潜力，但在不同领域节能潜力大小与实现机制差异较大；三是因反弹效应可能性的存在，以 ICT 应用为代表的数字经济是否会引发能源消费净增加，尚不明确。

发展数字经济和实现绿色发展均是国家重大战略。因此数字经济能否有助于绿色发展，是无法回避的问题，而适时地对两者之间的影响机制与效应做系统梳理，则很有必要。本文将围绕“ICT 与能源消费效应”这一主题，在厘清 ICT 与能源消费之间的内在影响机制基础之上，分别从 ICT 直接能源消费测算、ICT 与能源消费的经验研究，以及反弹效应的讨论三个方面，对现有研究进行梳理总结，通过对所涉及的模型、方法及数据进行对比，发现其不足，并探寻未来研究方向。

二、ICT 对能源消费的影响及其影响机制

ICT 对能源消费的影响可以简单划分为直接能源消费与间接能源消费两类。ICT 直接能源消费包括 ICT 设备、网络、运行、制造等基础设施环节（全生命周期）的能源消耗；ICT 间接能源消费包括 ICT 节能效应引起的能耗变化，以及 ICT 改变生产和消费方式，甚至改变经济结构所引致的能源消费变化。

（一）ICT 产业基础设施投入的大幅度增加提高了能源消费总量

基站、网络设备、数据中心等 ICT 产业基础设施对能源消费具有最为直观的影响。未来 ICT 基础设施的投资和生产以及运营的持续增加，也势必会带来能源消费水平的上升。Anders 和 Tomas（2015）对 ICT 部门可能产生的能源消费进行了模拟预测，在高、中、低三种不同情形下，ICT 部门电力消费占比区间将在 2020 年和 2030

年分别提升至6%~21%、8%~51%。如果剔除可再生能源电力部分，最不乐观的情况是2030年ICT能源消费对全球温室气体排放量的贡献约为23%。

从具体测算来看，ICT对能源消费的影响大致可分为一阶效应、二阶效应（由过程变化引起）、三阶效应（由行为和经济结构变化引起）（Berkhout and Hertin, 2004; Hilty et al., 2006）。ICT的直接能源消费（主要包括设备在运行、制造和处置过程中消耗的能源）测算方法相对比较成熟，而且测算相对简单。但是，ICT直接能源消费反映的是生产或消费环节通过使用ICT设备所引起的能源消费总量，而无法反映因生产方式和消费行为发生改变所产生的能源消费变化量。因此，有人提出，ICT直接能源消费不是研究的重点，甚至可以忽略（Allenby and Unger, 2001）。ICT直接能源消费虽然是直观的，但不能就此认为ICT应用越广能源消费越多。

（二）ICT引致的间接能源消费具有不确定性

若要系统地认识ICT发展对能源消费和排放的影响，就不能只简单地看生产环节的直接影响。实际上，较多的研究已经从不同角度证明了ICT对提高能源效率具有重要作用。

从经济学视角来看，ICT应用引致的间接能源消费主要通过技术进步与对经济社会的渗透两种机制。

一是技术进步。ICT应用提高了能源使用效率，从而产生节能效应。最初研究ICT与能源消费之间的影响机制，主要是讨论以ICT为代表的技术变革对工业能源需求的影响。主要观点是，通过提高产业内效率改善能源利用效率，从而产生节能效应。Wing（2008）区分了包括IT资本在内的五种不同类型资本，认为产业内效率改善是1980年以后美国能源强度下降的重要原因，而产业内效率改善主要归因于准固定资本投入的调整和以ICT为代表的非实体的技术变革。一些智库机构也发布报告，对ICT的节能效应表示乐观。如埃森哲曾预测2030年ICT的应用将具有20%的温室气体减排潜力。现实中最常见的例子就是智能建筑技术根据居住者的实时需求调整气温以降低空调能耗，从而产生节能效应。May等（2017）提出，ICT应用促进了生产过程的自动化，从而减少了企业能耗，提高了能效。

二是ICT对经济社会的渗透。ICT对经济社会的渗透不断颠覆着“传统”生产和生活方式，引起了人类偏好和经济及社会体制的改变（Greening et al., 2000; Plepys, 2002），从而改变了终端能源消费结构，产生了能源消费部门之间的转移效应。由于不同部门能源强度差异产生了能源消费的增加或减少，如虽然远程工作和视频会议减少了交通能耗，网上订餐、购物替代了家庭炊事和线下消费，却产生了运输能耗。因此电子商务的兴起对物流业能耗产生了广泛影响（Hesse, 2002），包括城市货运车辆销售的增长和配送中心建筑面积的变化（Harrington, 2015），其结果是货运公司增加了卡车运输，使用了更专业的包装。甚至有研究认为，由于ICT的广泛应用改变了能源消费的各种路径，因此可能导致ICT对能源产生更大的间接影响，而与此相关的研究也显得更为重要（Kooimey et al., 2013）。

因影响因素众多，ICT对能源效率影响的测算较为复杂，且存在诸多不确定性，客

观上导致了无法准确估计 ICT 对能源消费净效应的影响,致使目前的研究结论无法达成一致。如 Takase 和 Murota (2004) 就认为, ICT 的应用提高了能效,在未来发展中将有利于节约能源消费总量,而 ICT 产业虽然在微观层面提高了能源效率,但总体上增加了电力消费总量。一些案例研究也认为, ICT 具有巨大的节能潜力,但这一潜力是否能实现并不确定,特别是在反弹和系统效应研究中,这种不确定性会有所增加。无法达成一致的主要原因可以概括为:第一, ICT 应用的复杂性和渗透的可变性导致研究者对 ICT 所引起的影响效应的界定不一致;第二,缺乏关于用户如何与 ICT 系统互动的经验数据,因此很难评估 ICT 应用在微观领域提高能源效率的能力;第三,随着 ICT 应用范围的扩大,特别是传统生产和消费方式的改变, ICT 对能源消费的潜在影响和不确定性急剧增加。

三、ICT 直接能源消费的测算研究

ICT 直接能源消费主要包括 ICT 设备、网络、运行、制造等基础设施环节(全生命周期)的能源消耗。一般认为, ICT 电力消费主要贡献来自三大类 ICT 产品与信息服务,即消费电子设备、数据中心与通信网络。对 ICT 电力消费定量和测算的研究基本围绕这三类或者其中一类进行。ICT 直接能源消费测算的主要思路是,通过测算平均流量强度来推算总体能耗。估算流量强度有两种模型,即自上而下(Top-down)模型和自下而上(Down-top)模型。

(一) 自上而下模型

自上而下模型是用来估算整个网络系统的全部能源使用量的模型,包括所有数据中心或者互联网通信网络(范围更广一点应该还包括终端设备)。该模型的程序,首先要对 ICT 直接能源消费进行边界界定,有研究从全生命周期来测算,在运行环节能源消耗基础上,拓展到所有设备制造能耗以及回收处理能耗;其次对各个环节能耗数据进行调查统计、汇总,然后对互联网总流量进行估算(这一数据主要来自网络运营商)。最后将前一数量除以后者,产生每单位传输数据的平均能耗。

Blazek 等(2004)采用 Top-down 模型测算了 2000 年美国互联网流量强度。其中,互联网能源消耗量采用美国办公和电信设备总能耗估算,每年约 47 太瓦时(TW·h),互联网数据流量使用了明尼苏达州互联网流量研究(MINTS)小组的估算值,每年约 348000 太字节(TB)。计算结果为,1 千兆(GB)的传输平均需要 136 千瓦时(kW·h)。而 Taylor 等在 2008 年重新估算的流量能耗强度值仅为 8.8~24.3 千瓦时/千兆(kW·h/GB)(Taylor and Koomey, 2008)。Lanzisera 等(2012)采用 Top-down 模型估算 2008 年美国和世界流量能耗强度,计算出美国所有网络设备(除光纤和终端设备)的年耗电量为 18 太瓦时(TW·h),世界每年耗电量为 50.8 太瓦时(TW·h)。流量数据则采用了思科 2010 年的流量数据^①,计算出世界平均能源强度为 0.39 千瓦

^① 2008 年全球流量约为 121 艾字节(EB),1EB=1024×1024TB。

时/千兆 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{GB}$)。从研究方法来看,上述研究结果的巨大差异主要源于对测算范围的不同界定。

也有一些学者利用自上而下模型,从数据中心、消费电子设备与通信网络三个方面测算了 ICT 的直接能源消费,但未使用先测算特定范围平均流量能耗强度的“迂回”方法。Corcoran 和 Andrae (2013) 的研究涵盖了 ICT 产品与设备、通信网络和相关数据中心,预测了未来五年 ICT 设备直接用电量变化,发现在最佳案例情景下,ICT 直接用电量占全球电力消费总量将从 2012 年的 7.4% 下降到 2017 年的 6.9%;在最糟糕的情况下,ICT 用电量比重将从 7.4% 上升到 12%,五年间增长了 62%。究其原因,主要源于网络和数据中心基础设施的扩张。Malmodin 和 Lundén (2018) 计算了全球 ICT 网络(即固定和移动通信网络)的电力消耗,得出结论:2015 年全球 ICT 网络电力消耗量估计为 242 太瓦时 ($\text{TW} \cdot \text{h}$),总量相当于电网总供电量的 1.15%。IEA (2017) 的一份关于“数字化与能源”的报告显示,全球数据中心 2014 年消耗大约 194 太瓦时 ($\text{TW} \cdot \text{h}$) 的电力,约占总需求的 1%。

自上而下模型主要依赖统计的全面性和数据的可获得性。现实中,很难对数千万个分散的网络站点数据流量和能量进行统一测量,因此研究结论容易产生较大的误差。

(二) 自下而上模型

该模型是基于一个或多个案例场景,测算特定场景的能源强度值,并且对结果的普遍性加以讨论。研究思路是,通过对流量类型进行分类(包括视频流量、图片流量等),设定特定场景(如视频会议),先统计该场景下的总流量以及各环节的能耗,再计算流量能耗强度,并以此结果作为基本参数,推算出总流量能耗。自下而上的数据收集包括用户数据流量测量和来自网络设备数据库的数据。Coroama 等 (2015) 以瑞士和日本之间为期三天的互联网视频传输为案例,测算了从视频开始到结束的整个过程中数据传输系统能耗。系统边界包括网络装置、光纤设备,但不包括终端设备。

(三) 对两种模型比较及其结论差异的解释

从现有研究来看,不同学者对 ICT 直接能源消费测算的结果差异很大:从 136 千瓦时/千兆 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{GB}$) 到 0.006 千瓦时/千兆 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{GB}$),有 5 个数量级的差异。由于对 ICT 直接能源消费边界的界定存在差异,以及数据的不确定性和使用方法不同,因此很难对这些研究结论进行对比。例如,有的研究在计算单位数据流量所消耗能源时主要基于互联网能源的消耗数量和流量数;另一些研究则通过模拟给定数量互联网用户情景下的网络组件能耗参数来估算。而影响测算结果最重要的因素是系统边界的定义,如 Taylor 和 Koomey (2008)、Weber 等 (2010) 将终端设备(个人计算机、服务器等)纳入系统边界内,其他人的研究则未加以考虑。

有不少研究对测算系统边界的界定还包括数据中心的制冷能耗、ICT 设备、终端设备的生产能耗以及处置能耗。这部分能源消耗是 ICT 设备直接能源使用的重要组成部分,通常被称为内含能源。据 Williams (2011) 测算,笔记本电脑和内存芯片在制

造环节占用了其生命周期一半以上的能耗。Raghavan 和 Ma (2011) 在更广泛的层面上进行了估算,认为整个互联网基础设施的内含能量大致相当于其生命周期内的运营能耗。诸如此类的差异致使很多研究结论不具有可比性,这是 ICT 直接能源消费测算无法达成统一的重要原因。

四、ICT 应用与能源消费的关系

不少学者为了回答 ICT 应用是否增加了能源消费这个问题,对 ICT 应用与能源消费的关系进行了实证研究。综合已有研究,大致可以得出以下结论。

一是 ICT 能够减少能源或电力消费。Romm (2002) 在了一项关于互联网与美国能源经济的研究中发现,互联网不会导致电力需求的增加,相反它似乎提高了能源效率。Erdmann 和 Hilty (2010) 进行了情景分析,以探讨 ICT 对温室气体排放的宏观经济影响,认为在大多数情况下,ICT 可以减少温室气体排放。Bernstein 和 Madlener (2010) 分析了 8 个欧洲国家 1991—2005 年 ICT 资本对 5 个制造业(化工、食品、金属、制浆造纸、纺织)电力强度的影响,认为“通信技术”对生产具有节电效果,且不同行业节电效果不同。Patrick 等 (2016) 构建了一个涵盖 13 年、包括 10 个经合组织国家 27 个行业的综合性跨国跨行业面板数据集,并分析了 ICT 与能源需求的关系。他们通过对 2889 个工业部门进行观察,发现了两个现象:一是 ICT 资本投资显著减少了能源需求;二是 ICT 应用与电力需求没有显著相关性,但显著减少了非电力能源需求。由此认为,ICT 应用能够降低能源总需求和非电力能源需求。樊茂清等 (2012) 建立了一个包括 33 个部门的联立方程计量模型,研究了 ICT 投资和非 ICT 投资对中国 33 个部门能源强度的影响,认为能源价格上涨、ICT 资本投入及其体现的技术进步等因素有效降低了中国大部分部门的能源强度。

此外,一些学者从微观视角研究了 ICT 的能源效应。他们认为,企业的 ICT 投资能够有效提升能源效率。Khuntia 等 (2018) 对 300 家印度制造业企业 ICT 投资与能源消耗的关系进行了研究,认为 ICT 投资或设备能够降低能源消耗。张三峰和魏下海 (2019) 利用世界银行提供的中国制造业企业调查数据,考察了企业生产运营中应用信息与通信技术对企业能源消耗的影响及其机制,发现如果控制其他条件不变,企业在生产运营中应用 ICT 的程度与能源强度之间存在显著且稳健的负向关系。

二是 ICT 增加了能源或电力消费。Collard 等 (2005) 使用因子需求模型分析 1986 年至 1998 年期间法国六个服务业的 ICT 与电力使用之间的关系。结果表明,一旦控制了技术进步与价格,电力强度便随着“计算机和软件”的增加而增加,并随着“通信设备”的扩散而减少。Cho 等 (2007) 利用 Logistic 增长模型和 1991—2003 年的数据,分析了 ICT 投资对韩国工业用电量的影响。结果表明,ICT 投资减少了“初级金属产品”的用电量,增加了服务业和大多数制造业部门的用电量。Sadorsky (2012) 利用动态面板数据模型研究了新兴国家 ICT 与电力消费之间的关系。结果显

示,当使用互联网连接、移动电话或个人电脑数量作为 ICT 的工具变量时,ICT 与用电量之间存在正相关关系。Salahuddin 和 Alam (2015) 使用澳大利亚 1985—2012 年的年度时间序列数据分析了互联网使用和经济增长对电力消费的短期和长期影响,发现互联网使用和经济增长导致长期电力消耗增加,而且互联网的使用与经济增长和电力消耗之间存在单向因果关系。

从现有研究来看,那些认为 ICT 降低了能源消费或电力消费的研究,重点考察的是 ICT 是否能够提高能源效率,也就是前文提到的 ICT 的间接能源消费;而那些认为 ICT 增加了能源消费或电力消费的研究,一方面从选取的解释变量或工具变量来看,反映的是 ICT 的直接能源消费;另一方面验证了前文提到的 ICT 对能源消费影响的二阶效应和三阶效应,即 ICT 应用(因提升了能效)减少某一部门能源消费的同时,却因产业结构变化而增加了另一部门的能源消费。因此,这两种观点事实上并不矛盾,而是分别对 ICT 的直接能源消费和间接能源消费进行的不同实证研究。综合两类研究,得出结论,ICT 提高了直接能源消费,同时在微观层面也提高了能源效率。但是,ICT 是否增加了能源净消费,现有实证研究则没有给出令人信服的回答。

三是选择典型行业进行案例研究。由于 ICT 对经济活动的影响范围很广,因此很难对研究边界做出清晰划分。即使能够对研究边界做出合理假定,也很难定量估算出由 ICT 引致的生产或消费行为改变而产生的节能或耗能效应。因此很多学者化繁为简、化整为零,沿着间接能耗影响机制,选取典型行业对 ICT 引致的间接能源消费以及影响因素进行定量估计。

当前 ICT 已在经济领域广泛渗透,尤其是在电子商务、传统产品数字化、远程办公以及线上监测和控制等方面不断改变着传统产业。因此关于上述几类行业的相关研究比较丰富,下面对电子商务等相关行业的基本观点和主要结论列表加以比较(见表 1)。

表 1 行业案例研究主要观点

类别	基本观点	主要结论
电子商务	大多数研究认为,电子商务具有潜在的节能效应,但是现实中这种节能效应可能会受到抑制	由于快递公司优化了运输路线,电子商务可能会使“最后一英里”的运输效率更高。但与此同时,由于分散式家庭购买的商品需要更多包装,因此事实上电子商务在包装环节增加了能耗(Williams and Tagami,2002)。此外,电子商务将零售销售半径扩大了很多,虽然服务了更大的市场,但可能以牺牲能源效率为代价提高了成本。影响节能效应的关键因素主要包括人口密度、货运模式、产品退货率、行程分配(多用途行程比例)和包装类型。Matthews 等(2002)研究了电子商务对日本东京图书零售业能源消费的影响,结论是电子商务导致了 5 倍的能耗增加,主要原因是人口密度较高。在高人口密度城市,顾客住在书店半公里以内,因此在购物时可能步行或骑自行车,在电子商务中快递车取代了步行或骑自行车,由此使电子商务所需运输能源是传统零售业的 10 倍

续表

类别	基本观点	主要结论
传统产品的数字化	总体而言传统产品的数字化减少了能源消费	电子化在一定条件下会减少运输、制造、包装和回收。但是,提供电子替代品引致的直接能源消费会在一定程度上抑制节能效应。Gard 和 Keoleian (2002)在六种情景下比较了使用数字期刊和纸质期刊的能源消耗。结论是,在一篇数字期刊文章被阅读 1000 次的情况下,其能源使用将大幅增加。由于每次阅读电子版都会产生 ICT 直接能源消费,因此多次阅读会使电子期刊的能源消耗逐步增加,且超过纸质期刊
远程办公	许多研究对远程办公节能持乐观态度	从经验研究来看,远程办公的节能效应可能被某些效应抵消,既可能是正的,也可能是负的,这取决于参数。其中影响最大的参数是远程办公的频率(Greening et al., 2000; Plepys, 2002)
优化生产过程控制	ICT 通过优化生产过程控制 ^① 提高了能源利用效率,从而降低了能源消耗	Langer 和 Vaidyanathan (2014)认为,ICT 支持的“智能货运”能够减少货物运输中能源使用的方式。Meyers 等(2010)估计,由于效率低下,美国住宅平均浪费了大约 40% 的一次能源消耗,其中大部分可通过 ICT 干预来解决。Rogers 等(2013)估计,到 2035 年,商业和制造业部门的“智能效率”技术每年可减少 370 亿~850 亿美元的能源支出成本。虽然现代制造工艺已经与 ICT 高度集成,很难量化出实际的节能效果,但 ICT 是节能制造的关键推动因素这一结论得到了一致认可(Bunse et al., 2011; Duflo et al., 2012)

五、对 ICT 应用反弹效应的探讨

不少学者认为, ICT 通过提高效率或替代效应减少能源消费所产生的节能效应,可能受到反弹效应的制约,从而使预期节能效应被抵消。Azevedo (2014)、Borenstein (2014) 和 Gillingham 等 (2016) 全面介绍了反弹效应类型。通过对既往研究的总结概括,通常可以将反弹效应分为直接反弹、间接反弹和经济整体效应。

一是直接反弹效应。直接反弹效应是指能源本身的价格弹性效应。随着价格的下降(缘于效率或生产率的提高),替代效应和收入效应增加了消费。例如,如果一本电子书比一本传统的纸质书便宜,那么消费者可能会购买更多的电子书。Hilty 等(2009)提出了“小型化悖论”的例子,如 ICT 的进步使得 1990—2005 年瑞士单个移动电话的平均重量减少到原来的 1/4 左右,但因为用户数量激增,所有电话的总重量增加了 8 倍。较小的设备需要较小的电池,但这种效率提高可能因设备数量的成倍增加而抵消。

^① 例如,通过 ICT 应用实时监控汽车喷油器和节气门等部件,可以提高燃油经济性;联网车辆和道路基础设施传感器监控交通、优化路线;通过在自适应传动系统控制中利用路线信息,可以节省约 10% 的燃油,并可节省 1%~4% 的能源;等等。

二是间接反弹效应。当一种资源被更有效地利用，并且由这种资源生产的商品或服务的价格下降，从而导致其他资源的消费增加时，就会出现间接反弹效应。“从降低效率成本中节省的资金使更多的收入用于购买其他产品和服务”，从而消耗了更多的其他资源。在电子学习领域，Herring 和 Roy（2002）研究了三种高等教育情景的环境影响，结论是，“与印刷型远程教育相比，由于反弹效应，诸如使用计算机和家庭取暖，电子传输不会导致能源或二氧化碳排放的减少”。

由于大量使用 ICT，远程办公也会受到反弹效应的影响。例如，如果员工知道可以远程办公，可能会决定住在离工作地点更远的地方，但当需要在办公室办公时，就会导致更长的通勤时间。又如，在运输方面，Hilty 等（2006）认为，“当 ICT 应用为运输节省时间或成本时”其实存在明显的反弹效应，例如，ICT 可以帮助司机更快地找到停车位，虽然可以避免浪费汽油，但也使人们因使用汽车更加便利而选择驾车出行，从长远来看可能会增加整体交通量。由于 ICT 在远程办公与家庭领域的应用，在丹麦一般家庭每周通勤可以节省 105 公里，但额外行驶了 77 公里，反弹率为 73%；在荷兰，每周通勤节省了 98 公里，而额外行驶了 42 公里，因此产生了 43% 的反弹效应。最低的反弹效应在意大利（通勤节省 242 公里，额外行驶 33 公里）和德国（通勤节省 283 公里，额外行驶 53 公里），分别是 14% 和 19%。

三是整体反弹效应。当一种关键资源的成本下降导致整个经济的中间产品和最终产品的价格下降，并导致生产方式和消费习惯发生结构性变化时，就会出现因经济转型而导致的反弹效应。目前，对 ICT 引起的经济社会转型导致的能源反弹效应，还没有太多的经验研究可以用来评估。Sorrell（2009）曾提出了一个关于 ICT 引起经济反弹效应的讨论，他认为，在一些通用技术导致能源效率提高的情况下，整个经济转型导致的反弹效应可能很大；另外，对于在经济范围内影响较小的技术，如专用节能技术，“Jevons 悖论”似乎不太可能成立。

当前不少机构担忧数字经济将对能源消费和电力消费产生冲击，本质上是基于经济整体的反弹效应的判断。他们“坚信”数字经济将会改变生产方式和消费习惯，大幅度增加能源与电力消费，因此呼吁增加电力系统基础设施投资，以应对未来的电力需求。

六、结论与展望

ICT 是否带来能源和电力消费增加，这是一个现实性很强的问题。普遍的认识是，ICT 具有巨大的节能潜力，但这一潜力能否实现，具有不确定性。对 ICT 能源和环境影响的学理讨论和实证分析已经进行了近 20 年。理论机制的研究已相对成熟，但针对 ICT 是否导致电力消费的增加或减少的净效应研究并没有获得一致的结论。究其原因，首先，ICT 应用的广泛性、复杂性和可变性使得研究边界很难统一；其次，缺乏经验数据，导致微观机制验证困难；最后，随着 ICT 影响范围的扩大，潜在影响

的大小和不确定性急剧增加。

虽然 ICT 的总体净效应可能仍不清楚,但不少学者为试图回答这一问题而不断改进研究方法,包括增加数据收集、通过敏感性分析加强传统的建模研究、更加科学地界定范围、更加关注用户微观行为等。总体而言,ICT 能源净效应研究亟须在以下几个方面加以突破。

一是需要做大量数据收集。通过在实证研究中收集更多的数据,可以评估 ICT 系统的实际分布和使用情况,阐明具体条件和参数如何影响能源消耗,并描述“ICT 节能差距”,即潜在的节能和实际节能之间的差距。对 ICT 能耗预测是一个大规模的、基于调查的数据收集计划,类似于 EIA 住宅能耗调查和商业建筑 IT 系统能耗调查,如果能够在住宅、商业、工业、运输部门进行大规模的数据收集,将有助于更加精确地测量基准能源消耗。

二是系统边界需要统一。ICT 应用范围和系统边界不同,结论的差异很大,甚至可能得出相反的结论。ICT 应用广泛,但基于研究目的,需要对 ICT 的系统边界进行标准化处理,以使研究具有可比性。

三是需要关注关键参数的识别,而不是总体影响。既往研究过于注重对总体影响的估计。今后研究者应着重于确定影响 ICT 能源效应的重要参数。

四是增加对 ICT 服务行为的关注。目前的研究在很大程度上依赖对系统结构和人类行为的假设,这些假设可能存在不能反映基本事实的情况。关注 ICT 引致的行为变化,对于理解 ICT 间接能源消耗的影响机制非常有利。

在 ICT 驱动的社会生产和生活日益进入“数字化”的大趋势下,经济活动与社会生活将成为影响未来电力需求不可忽视的因素,因此 ICT 与能源消费研究具有重要的现实意义。在回顾和总结现有研究的基础上,我们认为有几个问题需要研究者去回答:第一,基于中国未来经济增长和社会变化以及 5G 发展,中国 ICT 用电量究竟是无足轻重还是占有相当的比重,是不是未来影响电力需求的一个不可忽视的因素?第二,ICT 是否具有节能效应?如果有,这种节能效应是否具有持续性或者阶段性特征?第三,通过改变人的行为,能否规避 ICT 的反弹效应?第四,ICT 能源消耗如何融入传统能源统计框架之中?围绕这些问题,本文提出了未来研究的几个主要方向。

第一,应着力研究中国经济增长与 ICT 产品的需求关系,并对 ICT 产量进行预测。ICT 产品数量是分析 ICT 用电量及其增长的最基本因素,ICT 产品数量分析和预测应基于相关历史数据,挖掘两者之间的相关性及其影响程度。在挖掘过程中,既要考虑我国传统产业信息化、数字化转型升级对 ICT 产品和服务的影响,也要考虑新的技术与生产消费活动(比如数据挖掘、AI 业务等)对 ICT 产品与服务的影响。同时,在充分考虑中国经济增长进入“新常态”的特点以及 2035 年中国进入高收入国家的战略规划要求前提下,预测 2035 年之前 ICT 产品增长的幅度和规模。

第二,研究 ICT 产品与信息服务使用频率的特点并预测未来的变化趋势。从使用角度看,数据流量是影响用电量的关键变量。ICT 产品和信息服务使用频率直接决定

了数据流量的产生量与交互量。相对于 ICT 产品生产，使用频率各国差异较大，因为不同国家的文化和社会结构不同，用户对交互的需求强度也不同。

第三，对 ICT 用电能效提升与反弹效应进行分析与预测。能效提升和反弹效应是未来预测 ICT 用电量变化程度与方向的重要变量。反弹效应的大小更多地与非技术因素有关。不同国家的反弹效应不同，与用户消费行为特征以及用电量在用户收入中所占比重等因素均有关联。能否从实证研究中发现我国用户在 ICT 产品与服务消费行为方面的反弹效应参数及其变化特征，对预测未来 ICT 总用电量的变化非常关键。

参考文献

- 陈新华 (2020):《数字新基建将引发电力需求剧增, 如何应对?》,《财经》第 14 期, <http://magazine.caijing.com.cn/20210419/4757833.shtml> [2021-08-18]。
- 樊茂清、郑海涛、孙琳琳、任若恩 (2012):《能源价格、技术变化和信息化投资对部门能源强度的影响》,《世界经济》第 5 期, 第 22—45 页。
- 张三峰、魏下海 (2019):《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》第 2 期, 第 155—173 页。
- Allenby, B. and D. Unger (2001), “Information Technology Impacts on the U. S. Energy Demand Profile”, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.454.1451> [2021-08-18]。
- Anders, A. and E. Tomas (2015), “On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030”, *Challenges*, 6 (1), pp. 117 - 157.
- Azevedo, I. M. L. (2014), “Consumer End-use Energy Efficiency and Rebound Effects”, *Annual Review of Environment and Resources*, 39, pp. 393 - 418.
- Berkhout, F. and J. Hertin (2004), “De-materialising and Re-materialising: Digital Technologies and the Environment”, *Futures*, 36 (8), pp. 903 - 920.
- Bernstein, R. and R. Madlener (2010), “Impact of Disaggregated ICT Capital on Electricity Intensity in European Manufacturing”, *Applied Economics Letters*, 17 (17), pp. 1691 - 1695.
- Blazek, M. , H. Chong and W. Loh, et al. (2004), “Data Centers Revisited: Assessment of the Energy Impact of Retrofits and Technology Trends in a High-density Computing Facility”, *Journal of Infrastructure Systems*, 10 (3), pp. 98 - 104.
- Borenstein, S. (2014), “A Microeconomic Framework for Evaluating Energy Efficiency Rebound and Some Implications”, *The Energy Journal*, 36 (1), pp. 1 - 21.
- Bunse, K. , M. Vodicka and P. Schoensleben, et al. (2011), “Integrating Energy Efficiency Performance in Production Management-Gap Analysis Between Industrial Needs and Scientific Literature”, *Journal of Cleaner Production*, 19 (6 - 7), pp. 667 - 679.
- Cho, Y. , J. Lee and T. Y. Kim (2007), “The Impact of ICT Investment and Energy Price on Industrial Electricity Demand: Dynamic Growth Model Approach”, *Energy Policy*, 35 (9), pp. 4730 - 4738.
- Collard, F. , P. Feve and F. Portier (2005), “Electricity Consumption and ICT in the French Service Sector”, *Energy Economics*, 27 (3), pp. 541 - 550.
- Coroama, V. C. , A. Moberg and L. M. Hilty (2015), “Dematerialization Through Electronic Media?”, in Hilty, L. M. and B. Aebischer (eds.), *ICT Innovations for Sustainability*, Cham: Springer

International Publishing, pp. 405 – 421.

Corcoran, P. M. and A. Andrae (2013), “Emerging Trends in Electricity Consumption for Consumer ICT”, https://www.researchgate.net/profile/Anders-Andrae/publication/255923829_Emerging_Trends_in_Electricity_Consumption_for_Consumer_ICT/links/00b7d520df6b552e5f000000/Emerging-Trends-in-Electricity-Consumption-for-Consumer-ICT.pdf [2021-08-18].

Duflou, J. R. , J. W. Sutherland and D. Dornfeld, et al. (2012), “Towards Energy and Resource Efficient Manufacturing: A Processes and Systems Approach”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61 (2), pp. 587 – 609.

Elliott, N. , M. Molina and D. Trombley (2012), “A Defining Framework for Intelligent Efficiency”, <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/e125.pdf> [2021-08-18].

Erdmann, L. and L. M. Hilty (2010), “Scenario Analysis: Exploring the Macroeconomic Impacts of Information and Communication Technologies on Greenhouse Gas Emissions”, *Social Science Electronic Publishing*, 14 (5), pp. 826 – 843.

Gard, D. L. and G. A. Keoleian (2002), “Digital Versus Print: Energy Performance in the Selection and Use of Scholarly Journals”, *Journal of Industrial Ecology*, 6 (2), pp. 115 – 132.

Gillingham, K. , R. David and W. Gernot (2016), “The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy”, *Review of Environmental Economics and Policy*, 10 (1), pp. 68 – 88.

Greening, L. A. , D. L. Greene and C. Difiglio (2000), “Energy Efficiency and Consumption — the Rebound Effect — A Survey”, *Energy Policy*, 28 (6 – 7), pp. 389 – 401.

Harrington, D. (2015), “From First Mile to Last Mile: Global Industrial & Logistics Trends”, <https://max.book118.com/html/2017/0527/109491579.shtm> [2021-08-18].

Heddeghem, W. V. , S. Lambert and B. Lannoo, et al. (2014), “Trends in Worldwide ICT Electricity Consumption from 2007 to 2012”, *Computer Communications*, 50 (1), pp. 64 – 76.

Hesse, M. (2002), “Shipping News: The Implications of Electronic Commerce for Logistics and Freight Transport”, *Resources Conservation & Recycling*, 36 (3), pp. 211 – 240.

Herring, H. and R. Roy (2002), “Sustainable Services, Electronic Education and the Rebound Effect”, *Environmental Impact Assessment Review*, 22 (5), pp. 525 – 542.

Hilty, L. M. , P. Arnfalk and L. Erdmann, et al. (2006), “The Relevance of Information and Communication Technologies for Environmental Sustainability-A Prospective Simulation Study”, *Environmental Modelling & Software*, 21 (11), pp. 1618 – 1629.

Hilty, L. M. , V. Coroama and M. Eicker, et al. (2009), “The Role of ICT in Energy Consumption and Energy Efficiency”, <https://www.researchgate.net/publication/267411194> [2021-08-18].

Khuntia, J. , T. J. V. Saldanha and S. Mithas, et al. (2018), “Information Technology and Sustainability: Evidence from an Emerging Economy”, *Production and Operations Management*, 27 (4), pp. 756 – 773.

Koomey, J. G. (2008), “Worldwide Electricity Use in Data Centers”, *Environmental Research Letters*, 3 (3), pp. 220 – 236.

Koomey, J. G. , H. S. Matthews and A. E. Williams (2013), “Smart Everything: Will Intelligent Systems Reduce Resource Use?”, *Annual Review of Environment & Resources*, 38, pp. 311 – 343.

- Laitner, J. and K. Ehrhardt-Martinez (2008), “Information and Communication Technologies: The Power of Productivity (Part I)”, *Environmental Quality Management*, 18 (2), pp. 47 – 66.
- Langer, T. and S. Vaidyanathan (2014), “Smart Freight: Applications of Information and Communications Technologies to Freight System Efficiency”, <https://www.aceee.org/files/pdf/white-paper/smart-freight-ict.pdf> [2021-08-18].
- Lanzisera, S., B. Nordman and R. E. Brown (2012), “Data Network Equipment Energy Use and Savings Potential in Buildings”, *Energy Efficiency*, 5 (2), pp. 149 – 162.
- Malmodin, J. and D. Lundén (2018), “The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010 – 2015”, *Sustainability*, 10 (9), pp. 3027 – 3058.
- Matthews, H. S., E. Williams and T. Tagami, et al. (2002), “Energy Implications of Online Book Retailing in the United States and Japan”, *Environmental Impact Assessment Review*, 22 (5), pp. 493 – 507.
- May, G., B. Stahl and M. Taisch, et al. (2017), “Energy Management in Manufacturing: From Literature Review to a Conceptual Framework”, *Journal of Cleaner Production*, 167 (11), pp. 1464 – 1489.
- Meyers, R. J., E. D. Williams and H. S. Matthews (2010), “Scoping the Potential of Monitoring and Control Technologies to Reduce Energy Use in Homes”, *Energy & Buildings*, 42 (5), pp. 563 – 569.
- Patrick, S., H. Welsch and S. Rexhäuser (2016), “ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries”, *Environmental and Resource Economics*, 63, pp. 119 – 146.
- Plepyš, A. (2002), “The Grey Side of ICT”, *Environmental Impact Assessment Review*, 22 (5), pp. 509 – 523.
- Raghavan, B. and J. Ma (2011), “The Energy and Emergy of the Internet”, *Proceedings of the 10th ACM Workshop*, 9, pp. 1 – 6.
- Rogers, E. A., R. N. Elliott and S. Kwatra, et al. (2013), “Intelligent Efficiency: Opportunities, Barriers, and Solutions”, http://www.exqheat.com/images/intelligent_efficiency.pdf [2021-08-18].
- Romm, J. (2002), “The Internet and the New Energy Economy”, *Resources Conservation & Recycling*, 36 (3), pp. 197 – 210.
- Romm, J., A. Rosenfeld and S. Herrmann, et al. (2000), “The Impact of E-commerce on Energy and the Environment”, *Strategic Planning for Energy & the Environment*, 20 (2), pp. 35 – 41.
- Ronald, B. and M. Reinhard (2010), “Impact of Disaggregated ICT Capital on Electricity Intensity in European Manufacturing”, *Applied Economics Letters*, 17 (17), pp. 1691 – 1695.
- Sadorsky, P. (2012), “Information Communication Technology and Electricity Consumption in Emerging Economies”, *Energy Policy*, 48 (9), pp. 130 – 136.
- Salahuddin, M. and K. Alam (2015), “Internet Usage, Electricity Consumption and Economic Growth in Australia: A Time Series Evidence”, *Telematics & Informatics*, 32 (4), pp. 862 – 878.
- Seidel, S. and J. Ye (2012), “Leading by Example: Using Information and Communication Technologies to Achieve Federal Sustainability Goals”, <https://www.c2es.org/wp-content/uploads/2012/09/federal-sustainability-ict.pdf> [2021-08-18].
- Sorrell, S. (2009), “Jevons’ Paradox Revisited: The Evidence for Backfire from Improved Energy Efficiency”, *Energy Policy*, 37 (4), pp. 1456 – 1469.
- Takase, K. and Y. Murota (2004), “The Impact of It Investment on Energy: Japan and US

Comparison in 2010”, *Energy Policy*, 32 (11), pp. 1291 – 1301.

Taylor, C. and J. Koomey (2008), “Estimating Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Internet Advertising”, <https://www.researchgate.net/publication/238738581> [2021 – 08 – 18].

Weber, C. L., J. G. Koomey and H. S. Matthews (2010), “The Energy and Climate Change Implications of Different Music Delivery Methods”, *Journal of Industrial Ecology*, 14 (5), pp. 754 – 769.

Williams, E. (2011), “Environmental Effects of Information and Communications Technologies”, *Nature*, 479 (11), pp. 354 – 358.

Williams, E. and T. Tagami (2002), “Energy Use in Sales and Distribution Via E-Commerce and Conventional Retail: A Case Study of the Japanese Book Sector”, *Journal of Industrial Ecology*, 6 (2), pp. 99 – 114.

Wing, I. S. (2008), “Explaining the Declining Energy Intensity of the U. S. Economy”, *Resource & Energy Economics*, 30 (1), pp. 21 – 49.

Does the Digital Economy Increase Energy Consumption? —Based on the Analysis of ICT Application Research Literature

WANG Lei, ZHU Tong

(Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of
Social Sciences, Beijing 100006, China)

Abstract: Digital technology based on ICT is developing rapidly, and many organizations believe that the development of the digital economy will inevitably have an important impact on energy consumption. There are also many institutions and scholars proving the important role and potential of ICT in improving energy efficiency from different perspectives. Then, will the rapid development of the digital economy lead to a sharp increase in energy demand (electricity demand), thereby affecting the low-carbon and green transition of China’s economy and society? Therefore, it is of great practical significance to sort out the issues of digital economy and energy consumption from a theoretical and practical perspective. This article focuses on the theme of “ICT and energy consumption effects”, and first clarifies the internal influence mechanism between ICT and energy consumption. Then, from the three aspects of direct energy consumption estimation of ICT, empirical research on ICT and energy consumption, and discussion of rebound effect, compare the models, methods and data involved in the existing research, and try to summarize the consensus and shortcomings reached in the existing research, and further propose the research direction.

Key Words: digital economy; green transformation; ICT

责任编辑：薛亚玲