

DOI:10.3969/j.issn.1674-8131.2024.04.004

数字经济提升了生态效率吗？

——基于生态足迹的实证检验

唐平, 杨德林

(重庆工商大学 金融学院, 重庆 400067)

摘要: 实现可持续发展需要提高生态效率,即以最少的资源占用实现最大的经济产出。数字经济具有较高的经济效率和较强的绿色属性,可以在增加经济产出的同时减少资源占用,从而提高生态效率。采用 2011—2019 年 30 个省份的面板数据,以人均 GDP 与人均生态足迹之比测度生态效率,分析发现:数字经济显著提升了生态效率,生产效率和产业结构在其中发挥了部分中介作用,即数字经济能够通过提高生产效率和促进产业结构升级来提升生态效率;数字经济对生态效率的影响具有非线性特征(门槛效应),表现为随着数字经济发展水平和生产效率的提高而增强;数字经济对生态效率的影响存在地区和时间异质性,表现为对资源型地区的影响较小、在推进“数字中国”建设后(2015 年之后)影响较大。此外,数字经济对生态效率的提升作用主要源自促进人均 GDP 增长,但当数字经济发展水平较高时,其抑制人均生态足迹增加的作用也开始显现。因此,应积极推动数字经济发展,并重视和增强数字经济在减少资源占用和环境污染方面的功效,以更有效地提高生态效率。

关键词: 数字经济;生态效率;生态足迹;经济产出;资源占用;生产效率;产业结构

中图分类号: F205;F062.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8131(2024)04-0050-16

引用格式: 唐平,杨德林. 数字经济提升了生态效率吗? ——基于生态足迹的实证检验[J]. 西部论坛, 2024,34(4):50-65.

TANG Ping, YANG De-lin. Has the digital economy improved ecological efficiency? Empirical test based on ecological footprint[J]. West Forum, 2024, 34(4): 50-65.

* 收稿日期:2024-01-05;修回日期:2024-03-22

基金项目:国家社会科学基金一般项目(21BGL060);重庆市社会科学规划项目(2022NDYB44);重庆市教育委员会人文社会科学研究重点项目(23SKGH152)

作者简介:唐平(1975),男,四川南充人;副教授,硕士生导师,主要从事数字经济与生态经济研究;E-mail: 515510622@qq.com。杨德林(1998),男,重庆永川人;硕士研究生,主要从事数字经济研究。

一、引言

自然资源和生态环境是人类生存发展的物质基础,但人类社会财富的积累又往往要以消耗自然资源和牺牲生态环境为代价(Pannayotou, 1993)^[1]。受技术条件和生产方式的限制,目前,人类社会的发展总体上会使生态承载能力变得更加脆弱、敏感,加剧了生态足迹扩张的“蝴蝶效应”(Kwakwa et al., 2021)^[2]。面对日益恶化的生态环境,人类的环境保护意识也不断增强,自1972年《斯德哥尔摩宣言》发布后,越来越多的国家积极参与环境保护,为实现可持续发展这一人类共同目标而不懈努力。在此背景下,由于自然资源是有限的,如何提高生态效率,即如何在发展过程中实现资源占用和污染排放的最小化,成为社会各界关注的焦点问题之一。生态效率与技术水平密切相关,随着数字技术的快速发展和广泛应用,数字经济成为新兴的经济形态,并对人们的生产生活方式产生了深刻影响。理论上讲,数字经济以数据资源和数字技术为关键要素,与工业经济相比,其本身具有更高的绿色属性,能够对生态效率的提升产生积极作用。那么,在实际的经济实践中,数字经济能否有效提高生态效率以及如何提高生态效率就成为需要深入探究的重大课题。

近年来,数字经济对生态环境和绿色发展的影响成为学界研究的热点问题,其中一些文献关注到数字经济对生态效率的影响。梁琦等(2021)^[3]研究发现,数字经济发展通过促进产业结构升级提升了城市生态效率;何维达等(2022)^[4]分析表明,数字经济发展显著促进了我国绿色生态效率提升;盛皓炜和王如忠(2023)^[5]对长三角城市群的分析结果显示,数字经济发展水平较低时不利于自主创新,但发展到一定程度后会促进自主创新,从而使数字经济与工业生态效率之间呈现U型关系;初丽霞和岳远媛(2023)^[6]研究发现,数字经济通过促进创新发展、协调发展、绿色发展、共享发展等显著提升了黄河流域的生态效率;孔令章和李金叶(2023)^[7]分析表明,数字经济发展通过集聚效应、创新效应和结构效应显著提升了区域生态效率;孙欣和陈乃惠(2024)^[8]研究表明,数字经济发展显著促进了生态效率的提升,并存在以数字经济水平、环境规制强度为门槛变量的门槛效应。此外,还有研究考察了数字金融(黄恒君等,2024;于志慧等,2024)^[9-10]、数字基础设施(钞小静等,2023)^[11]等对生态效率的影响。在这些文献的经验分析中,对生态效率的测度,均是基于投入与产出分析框架采用SBM模型或DEA模型来进行的。

生态效率是指生态资源满足人类需要的效率,其本质在于以最低的资源 and 环境投入实现最大的经济效益产出,而“生态足迹”为评估生态效率提供了一条有效路径。生态足迹最早由Rees(1992)^[12]提出,也被称为生态占用,是指某一单位(个体、城市、国家等)生存和发展所占用的生态生产性土地的总面积及水资源量,用以衡量人类生活和生产行为所占用的自然资源量。生态足迹既能够反映个人或地区的资源消耗强度,又能够反映区域的资源供给能力和资源消耗总量,揭示了人类持续发展存在的生态阈值。因此,采用单位生态足迹的经济产出水平来衡量生态效率,具有科学性和有效性。然而,在已有文献中,学者们大多基于投入与产出分析来测度生态效率(付丽娜等,2013;马晓君等,2018;Xue et al., 2021;Xiao et al., 2021)^[13-16],少有研究基于生态足迹来评估生态效率,关于数字经济对生态足迹的影响研究更为缺乏。有鉴于此,本文尝试从生态足迹的角度来探讨数字经济对生态效率的影响。

史丹和王俊杰(2016)^[17]采用人均GDP与人均生态足迹的比值来测度1991—2013年我国的生态效率,为本文提供了方法借鉴。基于此,本文以我国30个省份为研究样本,采用2011—2019年的数据,用人均GDP与人均生态足迹之比衡量地区生态效率,检验数字经济发展对生态效率的影响及其机制。相比已有文献,本文的边际贡献主要在于:一是从生态足迹角度拓展了数字经济发展的生态(环境)效应研

究,为数字经济赋能可持续发展提供了新的经验证据,并分别检验了数字经济对经济产出(人均 GDP)和生态足迹的影响,有助于明确当前数字经济发展促进生态效率提升的主要渠道;二是分析了生产效率和产业结构在数字经济影响生态效率中的中介作用、数字经济影响生态效率的非线性特征(门槛效应)及资源禀赋异质性和时间异质性,拓展了研究视角,丰富了实证思路和方法,并为进一步通过发展数字经济来提高生态效率提供了启示。

二、理论分析与研究假设

1. 数字经济对生态效率的影响

一方面,以数字技术和信息通信技术为核心的数字经济,通过数据的生成、处理、传输和应用把产品的生产、分配、交换和消费整个过程紧密融合(吴非等,2021)^[18],可以有效降低生产经营成本,提高资源利用效率,并促进技术创新和创业发展(许宪纯等,2019;赵涛等,2020)^[19-20],从而提高生产效率、增加经济产出(王开科等,2020)^[21]。另一方面,数字经济发展还可以有效提升资源配置效率(周磊等,2022)^[22],并促进生产过程绿色化,有效降低能源消耗,抑制资源浪费和污染物排放(Yi et al.,2022;Luo et al.,2022)^[23-24],从而减少生态足迹。因此,数字经济发展促进了经济产出的增加和生态足迹的减少,能够带来生态效率的显著提升。

从经济产出来看:一是数字经济打破了传统商业模式的时空限制(Bertani et al.,2021)^[25],使得企业能够通过电子商务、新媒体等平台拓展市场空间,吸引更多的消费者,促进产品销售的增长,进而增加经济产出;二是数字经济提高了信息和资金的流动性,金融数字化促进企业和个人更加方便地获取投资、融资和支付服务,优化资本的配置效率,降低资金的周转成本,从而促进经济活动和产出的增长(Abendin et al.,2022)^[26];三是数字经济可以促进新产品、新服务的研发和推广,提升企业的市场竞争力和创新能力,从而推动产业升级和转型发展,并带动经济产出的增长;四是数字技术的应用有利于生产过程的精细化管理和智能化控制,提高生产效率,并优化资源配置,从而减少生产成本(Song et al.,2019)^[27]。因此,数字经济的发展能够促进生产效率提高和生产成本降低,从而增加经济产出。

从生态足迹来看:一是数字技术的应用使得企业更加便于采用清洁能源和绿色低碳技术,从而推动企业生产绿色化转型,减少对自然资源的依赖和消耗,降低废物产生和污染物排放(邓荣荣等,2022;Wang et al.,2022)^[28-29];二是数字经济推动了共享经济的发展,通过共享平台,人们可以更加方便地分享、交换和共享物品或服务,从而减少资源的浪费,提高资源利用效率(陈晓东等,2021)^[30];三是数字技术与金融业务深度融合,推动了数字金融发展,而数字金融可以促进偏向绿色的技术进步,增加绿色信贷(Feng et al.,2022;Chen,2022)^[31-32];四是数字技术的应用能够帮助企业更好地控制和优化生产流程,采用更环保的材料和更节能的技术,生产出更多绿色创新产品,有利于保护生态环境;五是利用数字技术可以对环境数据进行更精准的分析,从而提高环境管理效率,并有效防治环境风险。因此,数字经济发展能够促进生产绿色化,提高资源利用效率,优化环境管理,进而减少生态足迹。

基于上述分析,本文提出假说 H1:数字经济发展能够显著提升生态效率。

2. 生产效率和产业结构的中介作用

(1) 生产效率提升效应。一方面,数字经济发展能够提高生产效率。一是数字技术的应用可以使企业实现生产过程的自动化和智能化,使资源的利用更加高效,从而提升生产效率(池毛毛等,2020)^[33];

二是利用大数据和数据挖掘技术,企业可以更为准确地研判资源供需状况以及环境风险,从而优化生产方案(张洁等,2019)^[34],避免资源的过度利用或闲置,从而提升生产效率;三是供应链的数字化管理有助于企业准确掌握供应链每个环节的资源使用情况(赵西三,2017)^[35],并采取相应措施提高供应链的安全性和有效性,从而提高生产效率。另一方面,生产效率的提高能够提升生态效率。从对经济产出的影响来看,生产效率提高意味着同样的投入可以生产更多的产品或服务,这将降低生产成本,提高经济效益,促使企业扩大生产,从而从供给端促进产出增加;生产效率提高也意味着产品价格的降低和产品质量的提高,这将增加有效需求,从而从需求端促进产出增加;生产效率提高还会促进整个经济系统的优化和升级,提高资源利用效率,增强创新能力和经济活力,从而推动整体经济的增长和发展。从对生态足迹的影响来看,生产效率提高意味着生产同样的产品所消耗的资源减少,从而会降低生态资源占用;同时,生产效率提高也意味着生产流程得到优化,且往往伴随着技术进步和生产方式的绿色化,这将减少生产过程中产生的废弃物和污染物(刘云强等,2018)^[36],从而减少对生态环境的损害。

(2)产业结构升级效应。一方面,数字经济发展能够促进产业结构升级。一是数字经济的发展催生了一系列以互联网和信息技术为基础的电子信息制造、软件服务等新业态,促进了新兴产业的崛起,以互联网、人工智能和大数据为基础的新兴产业推动了整体产业结构的优化升级;二是数字经济的发展不仅可以推动新兴产业发展,还能加快传统产业的转型升级,有助于产业结构的数字化升级(李晓华,2019)^[37];三是数字技术与绿色技术融合不仅可以为企业带来竞争优势,也能满足消费者对绿色产品的需求,有助于产业结构的绿色化升级。另一方面,产业结构升级能够提升生态效率。产业结构升级促进了资源利用的优化和节约,尤其是产业结构的绿色化和数字化升级有效提高了能源和资源利用效率,降低了对自然资源的消耗,并减少了对环境的污染(Chen,2022)^[32]。以劳动密集型产业、重工业为主的产业结构向以技术密集型产业、环境友好型产业为主的产业结构转变,推动了发展模式的转变,而新兴产业的发展则往往会更加注重环境保护和可持续发展,从而使产业结构升级会产生显著的生态效率提升效应(韩永辉等,2016)^[38]。此外,数字技术的应用还促进了产业发展模式的虚拟化,远程办公、远程教育和远程会议等减少了人们的出行和物流需求,不仅提高了工作时效,也减少了能源消耗和碳排放,降低了生态足迹。

基于上述分析,本文提出假说 H2:数字经济可以通过提高生产效率和促进产业结构升级 2 条路径来提升生态效率(见图 1)。

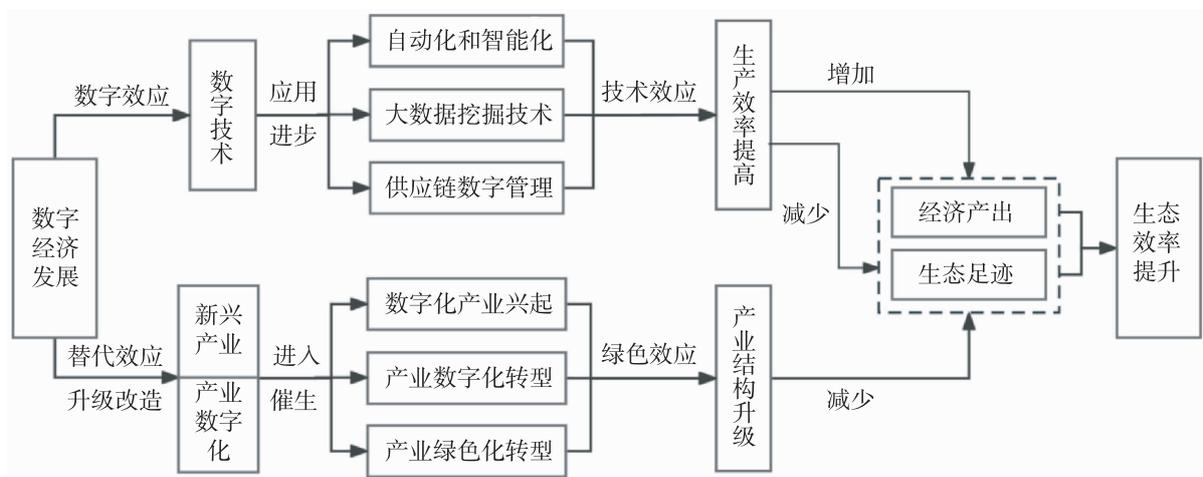


图 1 数字经济发展提升生态效率的传导机制

三、实证检验设计

1. 模型构建

为检验数字经济发展对生态效率的影响,构建如下基准回归模型:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Dig_{it} + \alpha X_{it} + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

其中,被解释变量(Y_{it})有3个(“生态效率”“人均GDP”“人均生态足迹”),核心解释变量(Dig_{it})为“数字经济”(地区数字经济发展水平), X_{it} 为控制变量集, μ_i 表示省份固定效应, ε_{it} 表示随机扰动项。

为检验生产效率和产业结构的中介作用,参考温忠麟等(2004)^[39]的研究,在基准模型的基础上构建如下中介效应模型:

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 Dig_{it} + \beta X_{it} + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

$$Y_{it} = \delta_0 + \delta_1 Dig_{it} + \delta_2 M_{it} + \delta X_{it} + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

其中,中介变量 M_{it} 有2个,即“生产效率”和“产业结构”。

2. 变量测度

(1)被解释变量。本文采用单位生态足迹的经济产出来测算样本地区的“生态效率”。借鉴史丹和王俊杰(2016)^[17]的方法,“生态效率”=“人均GDP”÷“人均生态足迹”。生态足迹(EF)的计算公式为:

$$EF = \sum_i^n (k_j S_i) = \sum_i^n \left(\frac{k_j A_i}{Y_i} \right)$$

其中, k_j 为 j 类土地的均衡因子^①, S_i 为产出第 i 种物质所占用对应类型土地的面积(hm^2), A_i 为第 i 种物质的总生产量^②, Y_i 为第 i 种物质的全球平均单位面积产量(kg/hm^2)^③。“人均生态足迹”为地区生态足迹总量与地区人口数之比。

(2)核心解释变量。参考赵涛等(2020)^[20]的方法,从数字基础设施和数字经济规模两个维度刻画数字经济发展情况。用“宽带普及率”(每百人互联网用户数)、“移动电话普及率”(每百人移动电话拥有量)2个指标衡量数字基础设施建设水平,用“计算机服务和软件从业人员占比”“人均电信业务总量”“数字普惠金融指数”3项指标衡量数字经济规模,对上述指标进行标准化处理,然后使用熵权TOPSIS法测算得到“数字经济”变量。

(3)控制变量。借鉴相关研究,本文选取以下控制变量:一是“人口规模”,采用地区年末常住人口数来衡量;二是“环境基础设施”,采用地区城镇环境基础设施建设投资来衡量;三是“对外贸易依存度”,采用进出口总额与GDP之比来衡量;四是“绿色技术创新”,采用每万人绿色专利授权量来衡量。

(4)中介变量。“生产效率”采用DEA-Malmquist指数法计算,产出指标为以2004年为基期折算的地区GDP,投入指标包括资本存量和劳动投入,资本存量使用永续盘存法测算(张军等,2004)^[40],劳动投入为就业人员总数。将基期(2011年)的“生产效率”设为1,往后年份经计算得到的生产效率指数累

① 均衡因子可将不同类型的土地面积统一换算为以“全球公顷”度量的当量面积。基于资源生产和能源消费的不同,一般将土地被分为耕地、林地、草地、水域、建筑用地、化石能源土地等6种,根据“全球生态足迹网络”公布的生态足迹和生物承载力账户(2022年版),其均衡因子分别为2.50、1.26、0.45、0.36、2.50、1.26。

② 在生态足迹计算中,考虑进出口时总产量为“生产量+进口量-出口量”,本文侧重考察国内生产对土地的占用情况,使用国内实际生产量。

③ 基于联合国粮食及农业组织(FAO)、国际能源署(IEA)公布的数据进行计算。

乘得出(邱斌等,2008)^[41]。“产业结构”根据三次产业占比加权计算,第一、第二、第三产业的权重分别为1、2、3(刘翠花,2022)^[42],其值越大则产业结构高级化水平越高。

3. 数据说明

鉴于数据可得性及完整性^①,本文选取2011—2019年我国30个省份(不包括港澳台地区和西藏自治区)的面板数据进行实证分析。所用数据来自国家统计局数据库、各省份统计年鉴、《中国环境统计年鉴》、《知识产权统计年鉴》以及“北京大学数字普惠金融指数”。对各变量均取自然对数以消除异方差影响,主要变量的描述性统计结果见表1。

表1 主要变量描述性统计结果

	变 量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	生态效率	9.396	0.696	8.096	11.809
	人均生态足迹	4.343	2.483	1.157	15.597
	人均GDP	5.129	2.567	1.602	16.178
核心解释变量	数字经济	-1.185	0.493	-2.560	-0.110
中介变量	生产效率	1.124	0.786	0.000	3.711
	产业结构	0.868	0.051	0.758	1.043
控制变量	人口规模	8.204	0.741	6.342	9.433
	环境基础设施	4.867	0.893	1.964	6.478
	对外贸易依存度	-1.724	0.928	-4.343	0.381
	绿色技术创新	0.960	1.238	0.064	7.712

四、实证检验结果分析

1. 生态足迹与生态效率分析

图2展示了2011年和2019年各样本省份的人均生态足迹。从地理空间格局来看,北方地区(除北京外)的生态足迹普遍偏高;从时间变化来看,北方地区(除北京外)的生态足迹增长较明显。其原因在于:一是北方地区多为重工业基地(如辽宁、黑龙江、吉林),传统工业占比偏大,生产过程往往需要大量能源和原材料,同时也会产生大量污染物和废弃物,对环境造成较大的影响;二是北方地区冬季寒冷,需要大量能源供暖;三是北方的多个省份都是能源生产基地,能源开采量大(如山西、内蒙古、新疆)。图3展示了2011年—2019年样本省份的平均人均生态足迹和数字经济发展水平。可以看出,在数字经济发展水平不断提高的同时,人均生态足迹也呈现逐年增长的态势(但增长速度趋于减小),这说明我国还处于环境库兹涅茨曲线拐点的左侧,对资源的占用和消耗会随着经济的增长而增加。图4为2019年各样本省份人均生态足迹与人均GDP的散点图,各点到原点的斜率为该省份的生态效率。可以根据生态效率的大小划分出高、较高、较低、低4个区间,生态效率高的区间包含北京、上海等,江浙粤川渝等省份的生态效率也较高,而生态效率较低的省份主要分布在华北和东北地区,内蒙古和宁夏的生态效率处于低水平。

^① 文章已对少量缺失数据进行线性插值填补,而有关各省各类能源消费数据目前国家统计局暂披露至2019年,且能源消费占生态足迹比重较大,因此生态足迹计算截止时间为2019年。

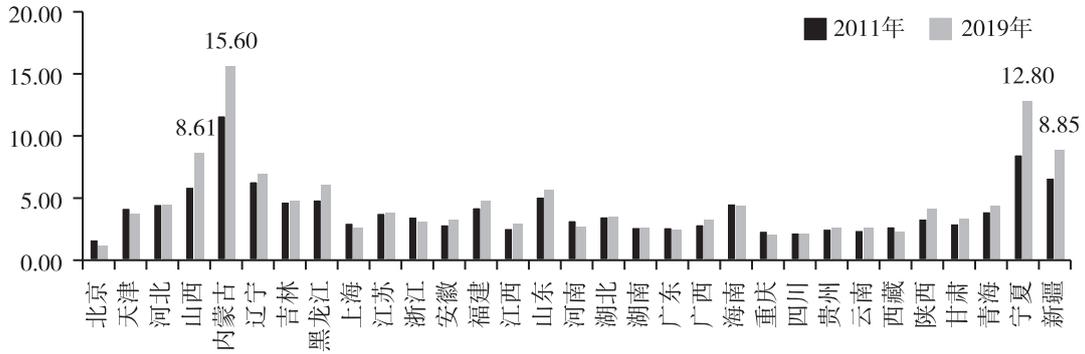


图2 2011和2019年样本省份人均生态足迹

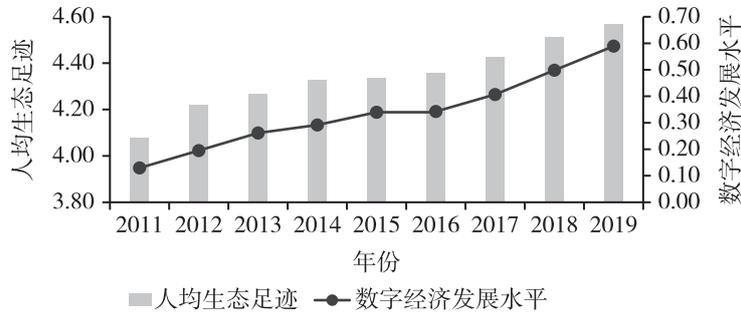


图3 2011—2019年样本省份平均人均生态足迹与数字经济发展水平

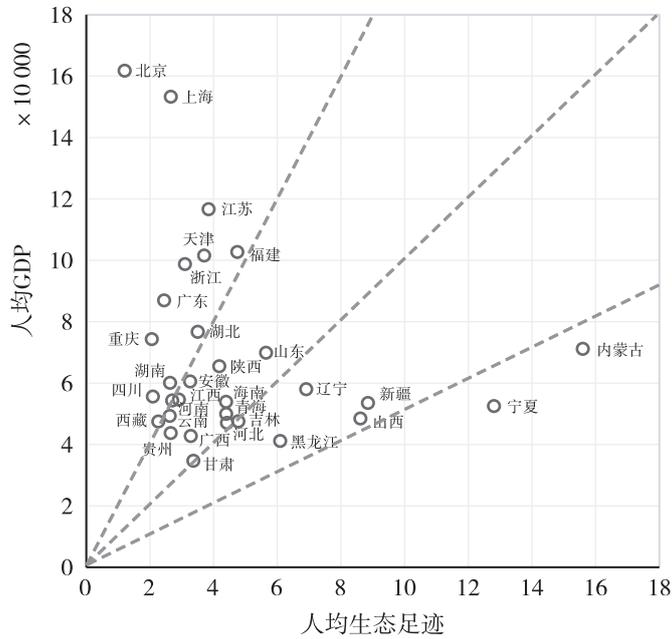


图4 2019年样本省份的人均生态足迹和人均GDP

2. 基准模型回归

表2为基准模型回归结果。“数字经济”对“生态效率”的回归系数在1%的水平上显著为正,表明数字经济发展水平的提高对生态效率提升具有显著的正向影响,假说H1得到验证。考虑到生态效率取

决于经济产出和生态足迹两个方面,进一步分析“数字经济”对“人均 GDP”和“人均生态足迹”的影响。“数字经济”对“人均 GDP”的回归系数显著为正,而对“人均生态足迹”的回归系数为负但不显著,表明数字经济发展显著促进了经济产出增长,但对生态足迹的增长还未能产生显著的抑制作用,也就是说,在样本期间,数字经济发展主要是通过增加经济产出来提升生态效率的。这是由于在样本期间,我国经济规模持续增长,且消费结构不断升级,导致在产出增长的同时资源占用也有所增加。总体上看,一方面,数字经济带动的经济增长速度比其导致的资源占用增加速度更快,从而提升了生态效率;另一方面,如何充分发挥数字经济在资源节约方面的积极作用也应引起重视,需要采取积极措施不断增强数字经济发展对生态足迹增加的抑制作用。

表 2 基准模型回归结果

变 量	生态效率	生态效率	人均 GDP	人均生态足迹
数字经济	0.408 *** (30.47)	0.368 *** (21.87)	0.355 *** (20.00)	-0.021 (-1.19)
环境基础设施		0.084 *** (5.78)	0.026 ** (2.45)	-0.028 *** (-2.65)
对外贸易依存度		-0.026 (-1.15)	-0.024 (-1.53)	0.033 ** (2.06)
人口规模		0.593 ** (2.52)	0.865 *** (5.01)	0.411 ** (2.39)
绿色技术创新		0.086 *** (8.30)	0.054 *** (2.88)	-0.043 ** (-2.31)
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	270	270	270	270
R ²	0.789	0.898	0.932	0.170

注:***表示 $p < 0.01$, **表示 $p < 0.05$, *表示 $p < 0.1$, 括号中数值为 t 值,下表同。

3. 稳健性检验

为进一步验证基准模型回归结果的可靠性,进行如下稳健性检验^①:第一,替换被解释变量。采用《中国绿色发展指数报告》中的“经济增长绿化度指数”替代“生态效率”,重新进行回归,结果见表 3 的(1)列。第二,替换核心解释变量。使用“北京大学数字普惠金融指数”替代“数字经济”,重新进行回归,结果见表 3 的(2)列。第三,解释变量滞后处理。为缓解可能存在的反向因果问题,采用“数字经济”的滞后一期项作为核心解释变量,重新进行回归,结果见表 3 的(3)列。第四,数据缩尾处理。对被解释变量和核心解释变量进行前后 2% 的缩尾处理以排除异常值干扰,回归结果见表 3 的(4)列。第五,分样本检验。将样本划分为“东部地区”“中部地区”“西部地区”3 个子样本,分别进行模型检验,回归结果见表 4 的(1)(2)(3)列。上述检验中,“数字经济”的回归系数均在 1% 的水平上显著为正,表明基准模型

^① 本文也对“数字经济”对“人均 GDP”和“人均生态足迹”的影响进行了稳健性检验,检验结果均支持基准模型的回归结果,限于篇幅,未予汇报,感兴趣的读者可联系作者获取。

的分析结果是稳健的。

此外,为缓解模型可能存在的遗漏变量等内生性问题,参考刘强等(2022)^[43]、黄群慧等(2019)^[44]的做法,采用各省份1984年的电话机拥有量与上一年全国信息技术服务收入的交乘项作为“数字经济”的工具变量,进行2SLS检验,回归结果见表4的(4)(5)列。工具变量通过了识别不足和弱识别检验,表明工具变量选取有效;第一阶段的估计结果显示,工具变量与“数字经济”显著正相关;第二阶段的估计结果显示,工具变量拟合的“数字经济”对“生态效率”的回归系数显著为正,表明在缓解内生性问题后,本文的核心结论——“数字经济发展显著提升了生态效率”依然成立。

表3 稳健性检验结果1

变 量	(1) 替换被解释变量	(2) 替换解释变量	(3) 解释变量滞后	(4) 数据缩尾
数字经济	0.030*** (3.18)	0.100*** (5.38)		0.370*** (21.95)
L ₁ . 数字经济			0.262*** (10.14)	
控制变量和固定效应	控制	控制	控制	控制
N	270	270	240	270
R ²	0.852	0.768	0.812	0.894

表4 稳健性检验结果2

变 量	分样本检验			工具变量法(2SLS)	
	(1) 东部	(2) 中部	(3) 西部	(4) 数字经济	(5) 生态效率
数字经济	0.464*** (13.03)	0.427*** (6.93)	0.416*** (6.86)		0.406*** (13.53)
工具变量				0.765*** (33.54)	
控制变量和固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
K-P rk LM					64.511***
K-P rk Wald F					1151.274 (16.38)
N	99	81	90	270	270
R ²	0.891	0.879	0.816	0.974	0.985

4. 中介效应检验

中介效应模型的检验结果见表5。“数字经济”对中介变量(“生产效率”和“产业结构”)的回归系数均显著为正,表明数字经济发展促进了生产效率提高和产业结构升级;将中介变量加入基准模型后,“数字经济”的回归系数依然显著为正,但比基准模型有所减小,同时中介变量的回归系数显著为正,表明中介变量发挥了显著的部分中介作用。具体来讲,“生产效率”的中介效应值为0.064,其中介效应占总效应的25.90%;“产业结构”的中介效应值为0.059,其中介效应占总效应的18.29%。进一步通过Sobel检验和Bootstrap检验(1000次抽样)进行验证,结果均显示中介效应显著。由此,假说H2得到验

证,即数字经济发展可以通过提高生产效率和促进产业结构升级两条路径来提升生态效率。

表 5 中介效应检验结果

变 量	基准模型	生产效率提升效应		产业结构升级效应	
	生态效率	生产效率	生态效率	产业结构	生态效率
数字经济	0.368*** (21.87)	0.813*** (8.64)	0.259*** (8.12)	0.036*** (9.87)	0.264*** (7.89)
生产效率			0.079*** (4.11)		
产业结构					1.661*** (3.26)
控制变量和固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	270	270	270	270	270
R ²	0.898	0.815	0.842	0.750	0.838
中介效应		0.064		0.059	
中介效应占比		25.90%		18.29%	
Sobel 检验		0.064*** (3.71)		0.059*** (3.10)	
Bootstrap 检验 95%置信区间		[0.020,0.109]		[0.013,0.105]	
Bootstrap 检验中介效应值		0.064*** (2.84)		0.059** (2.50)	

五、进一步的研究:非线性特征与异质性

1. 数字经济对生态效率的非线性影响

作为一种新型经济形态,数字经济对生态效率的影响并非一蹴而就,而是呈现出非线性特征。具体而言,在数字经济发展初期,由于存在技术的适应成本(潘宏亮,2022)^[45],数字经济对生态效率的影响可能较弱,甚至有可能增加资源消耗和环境污染,例如数字垃圾和电力消耗增加。但随着数字经济的深入发展,数字技术的广泛使用使其对生态效率提升的促进作用逐渐增强。一方面,数字经济的持续发展将推动产业结构升级,促使传统产业向高附加值、高技术含量产业转型(陈晓东等,2021)^[30],降低资源消耗和环境污染;另一方面,随着数字经济的深化发展,数字经济与实体经济深度融合,会进一步提高企业的生产经营水平,在提升企业生产效率的同时,也能够降低生产成本,减少资源浪费和环境污染,实现生态效率的较大提升。此外,数字经济对生态效率的影响在不同技术水平和产业结构下也可能呈现出差异性。在生产效率较低、产业结构高级化水平不高时,数字经济发展对生态效率的提升作用主要通过推动传统产业转型升级来实现;随着生产效率的提升以及产业结构的优化,清洁能源、智能交通、大数据等新兴产业快速发展,而这些产业具有高技术含量、高附加值、低污染等特点,有助于进一步提高生态效率(曾刚等,2021)^[46]。

基于上述思考,本文运用门槛效应模型来检验数字经济发展对生态效率的影响是否具有非线性特征。构建如下门槛回归模型(以单门槛为例):

$$Y_{it} = \theta_0 + \theta_1 Dig_{it} \times I(m_{it} \leq \gamma) + \theta_2 Dig_{it} \times I(m_{it} > \gamma) + \theta X_{it} + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

其中,被解释变量为“生态效率”;门槛变量 m_{it} 有 3 个,即“数字经济发展水平”“生产效率”“产业结构升级”; γ 表示门槛值。 $I(\cdot)$ 为示性函数,若括号内表达式成立取值为 1,否则取值为 0。门槛检验结果(见表 6)显示,“数字经济”存在双门槛,“生产效率”存在单门槛,而“产业结构”不存在门槛。在此基础上,分别以“数字经济”和“生产效率”为门槛变量进行双门槛和单门槛模型回归,结果见表 7。在不同的“数字经济”门槛下,“数字经济”的回归系数均在 1% 的水平上显著为正,且随着门槛值的提高,系数逐步增大,表明随着数字经济自身发展水平的提高,数字经济发展对生态效率的提升作用不断增强。当“生产效率”低于门槛值时“数字经济”的回归系数为 0.331(通过 1% 水平显著性检验),当“生产效率”高于门槛值时“数字经济”的回归系数升至 0.423(通过 1% 水平显著性检验),表明随着生产效率的提高,数字经济发展对生态效率的提升作用也会增强。

进一步以“人均 GDP”和“人均生态足迹”为被解释变量,“数字经济”为门槛变量进行分析(均为单门槛),回归结果显示(见表 7):“数字经济”对“人均 GDP”的回归系数,在“数字经济”小于门槛值时为 0.471,大于门槛值时为 0.512,表明随着数字经济发展水平的提高,数字经济发展对经济产出增长的促进作用会增强;“数字经济”对“人均生态足迹”的回归系数,在“数字经济”小于门槛值时为 -0.008(不显著),大于门槛值时为 -0.138*(在 10% 的水平上显著),表明当数字经济发展水平较高时,数字经济发展能够降低生态足迹。进一步结合基准模型的分析结果,可以认为,尽管在总体上,数字经济对生态足迹没有显著影响,但在数字经济发展水平较高的情形下,数字经济的生态足迹降低效应已经开始显现。

表 6 门槛检验结果

门槛变量	门槛个数	F 统计值	P 值	10%临界值	5%临界值	1%临界值	是否存在
数字经济	单门槛	81.38	0.000	24.985	30.947	41.617	是
	双门槛	32.65	0.000	15.197	17.223	22.003	是
	三门槛	9.14	0.430	18.309	22.643	33.174	否
生产效率	单门槛	90.21	0.000	25.762	28.064	33.644	是
	双门槛	19.13	0.110	20.858	22.642	30.196	否
产业结构升级	单门槛	32.18	0.150	42.221	54.337	63.348	否

表 7 门槛模型回归结果

被解释变量	生态效率				人均 GDP		人均生态足迹		
	门槛变量	门槛值	数字经济	门槛值	生产效率	门槛值	数字经济	门槛值	数字经济
$Dig \times I(m \leq \gamma_1)$			0.397*** (15.48)	$\gamma_1 = 0.307$	0.331*** (13.33)	$\gamma_1 = -2.01$	0.471*** (25.88)	$\gamma_1 = -0.470$	-0.008 (-0.10)
$Dig \times I(\gamma_1 < m \leq \gamma_2)$		$\gamma_1 = -2.153$	0.474*** (17.01)		0.423*** (15.57)		0.512*** (25.18)		-0.138* (-1.67)
$Dig \times I(m > \gamma_2)$			0.538*** (16.70)						
控制变量和固定效应			控制		控制		控制	控制	控制
N			270		270		270		270
R ²			0.885		0.874		0.947		0.207

2. 异质性分析

(1)资源禀赋异质性。自然资源禀赋是影响地区经济发展模式的重要因素。根据比较优势理论,自然资源丰富的地区往往会大力发展资源开采及加工产业,以获取最大化的经济收益,然而,这会对生态环境造成较大破坏。基于此,本文参考赵康杰和景普秋(2014)^[47]的方法,采用采掘业就业人数占工业就业人数比重来衡量样本省份的资源依赖度,将资源依赖度前30%的省份归为“资源型地区”,其余省份归为“非资源型地区”,并进行分组检验,回归结果见表8。两组样本中,“数字经济”的回归系数均在1%的水平上显著为正,但“非资源型地区”的系数显著大于“资源型地区”,表明数字经济发展对生态效率的提升作用在不具备资源优势的地区更强。

(2)时间异质性。2015年,习近平总书记在第二届世界互联网大会上提出要推进“数字中国”建设(陆峰,2019)^[48],我国数字经济随之进入加快发展阶段。基于此,本文将样本分为“2011—2015年”和“2016—2019年”两组,分组检验的结果见表8。两组样本中,“数字经济”的回归系数均在1%的水平上显著为正,但“2016—2019年”的系数显著大于“2011—2015年”,表明数字经济发展对生态效率的提升作用会随着“数字中国”建设的推进而增强,这也印证了数字经济对生态效率的影响具有非线性特征。

表8 异质性分析结果

变 量	资源禀赋异质性		时间异质性	
	(1)资源型地区	(2)非资源型地区	(3)2011—2015年	(4)2016—2019年
数字经济发展水平	0.214*** (5.32)	0.338*** (10.71)	0.292*** (9.02)	0.514*** (11.73)
控制变量和固定效应	控制	控制	控制	控制
N	90	180	150	120
R ²	0.741	0.905	0.808	0.874
Chow Test [P值]	30.57 [0.000]		3.05 [0.007]	

六、结论与启示

可持续发展强调在发展过程中,既要满足人们的经济和社会需求,又要保护和改善生态环境,以确保资源的可持续利用和生态系统的平衡稳定,这就要求以最小的生态环境代价实现最大的经济社会效益,即要不断提高生态效率。相比农业经济、工业经济等传统经济形态,基于数字技术和数据要素兴起的数字经济具有更高的经济效率和更强的绿色属性,因而可以在促进经济产出增长的同时抑制资源占用的增加,从而提高生态效率。本文采用2011—2019年我国30个省份的面板数据,以人均GDP与人均生态足迹之比测度生态效率,实证检验数字经济对生态效率的影响,分析结果表明:(1)数字经济发展显著提升了生态效率,但主要是促进了经济产出(人均GDP)的增长,对资源占用(人均生态足迹)增加的抑制作用不明显,该结论在经过替换被解释变量和核心解释变量、变量滞后和数据缩尾处理、工具变量法等一系列稳健性检验后依然成立。(2)数字经济发展具有显著的生产效率提升和产业结构升级效应,能够通过提高生产效率和促进产业结构升级来提升生态效率。(3)数字经济对生态效率的影响具有非线性特征,表现为数字经济发展水平和生产效率的门槛效应,即随着数字经济发展水平和生产效率的提高,数字经济的生态效率提升效应增强;此外,随着数字经济发展水平的提高,数字经济发展对经济产出增长的促进作用增强,且对生态足迹增加的抑制作用也开始显现。(4)数字经济对生态效率的影响存在

地区和时间异质性,表现为对具有资源优势地区的影响较小,在推进“数字中国”建设后(2015年之后)影响较大。

基于本文研究结论,提出以下几点启示:第一,进一步推动数字经济发展,并充分发挥其提高生态效率的积极作用。数字经济的发展水平越高,对生态效率的提升作用越强,因而要加强数字基础设施建设,营造良好的数字经济发展环境,并因地制宜促进数字经济发展,以进一步提高生态效率,实现可持续发展。第二,重视和增强数字经济发展在减少资源占用和环境污染方面的功效。分析表明,数字经济发展对经济产出增长的促进作用明显,但在抑制资源占用方面的潜力还有待挖掘。因此,在利用数字技术提高经济产出的同时,也要增强数字技术应用在节约资源、节能减排等方面的作用。第三,不断提高生产效率,优化产业结构,增强数字经济发展对生态效率的提升作用。生产效率和产业结构是数字经济影响生态效率的中介变量,努力提高生产效率、积极调整产业结构都有助于生态效率的提高。尤其应加大对绿色技术创新和应用的激励支持力度,持续推进产业结构数字化和绿色化升级。第四,加快资源型地区的数字经济发展和产业结构调整。提高资源型地区的生态效率意义重大,然而数字经济发展对资源型地区生态效率的提升作用相对较小,一方面是由于其数字经济发展水平较低,另一方面是由于其产业结构偏重资源型产业。因此,资源型地区应积极发展数字经济,主动调整产业结构,以更有效地提高生态效率。

参考文献:

- [1] PANAYOTOU T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development[J]. Pacific and Asian Journal of Energy,1993,4(1).
- [2] KWAKWA P A,ADUSAH-POKU F,ADJEI-MANTEY K. Towards the attainment of sustainable development goal 7: what determines clean energy accessibility in sub-Saharan Africa? [J]. Green Finance,2021,3(3):268-286.
- [3] 梁琦,肖素萍,李梦欣. 数字经济发展提升了城市生态效率吗?——基于产业结构升级视角[J]. 经济问题探索,2021(6):82-92.
- [4] 何维达,温家隆,张满银. 数字经济发展对中国绿色生态效率的影响研究——基于双向固定效应模型[J]. 经济问题,2022(1):1-8+30.
- [5] 盛皓炜,王如忠. 数字经济对工业生态效率的影响——基于长三角城市群的实证分析[J]. 财经论丛,2023(9):3-13.
- [6] 初丽霞,岳远媛. 数字经济对黄河流域生态效率的影响[J]. 人民黄河,2023,45(8):47-53.
- [7] 孔令章,李金叶. 数字经济发展对区域生态效率的影响研究[J]. 统计与决策,2023,39(20):23-28.
- [8] 孙欣,陈乃惠. 数字经济对生态效率的非线性影响——基于门槛效应的检验[J]. 调研世界,2024(3):39-49.
- [9] 黄恒君,王子源. 数字普惠金融对农业生态效率的影响——理论框架、机制分析与空间溢出效应[J]. 现代财经(天津财经大学学报),2024,44(1):3-17.
- [10] 于志慧,何昌磊. 数字金融与城市生态效率——基于长江经济带108个地级市的实证分析[J]. 华东经济管理,2024,38(4):14-26.
- [11] 钞小静,沈路. 新型数字基础设施对黄河流域城市生态效率的空间溢出效应——基于2013—2020年沿线97个城市数据的分析[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2023,52(6):46-60.
- [12] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization,1992,4(2):121-130.
- [13] 付丽娜,陈晓红,冷智花. 基于超效率DEA模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(4):169-175.
- [14] 马晓君,李煜东,王常欣,等. 约束条件下中国循环经济发展中的生态效率——基于优化的超效率SBM-Malmquist-

- Tobit 模型[J]. 中国环境科学,2018,38(9):3584-3593.
- [15] XUE D, YUE L, AHMAD F, et al. Urban eco-efficiency and its influencing factors in Western China: fresh evidence from Chinese cities based on the US-SBM[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127(1): 107784.
- [16] XIAO H, WANG D, QI Y, et al. The governance-production nexus of eco-efficiency in Chinese resource-based cities: a two-stage network DEA approach[J]. *Energy Economics*, 2021, 101: 105408.
- [17] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. *中国工业经济*, 2016(5): 5-21.
- [18] 吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 等. 企业数字化转型与资本市场表现——来自股票流动性的经验证据[J]. *管理世界*, 2021, 37(7): 130-144+10.
- [19] 许宪春, 任雪, 常子豪. 大数据与绿色发展[J]. *中国工业经济*, 2019(4): 5-22.
- [20] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. *管理世界*, 2020, 36(10): 65-76.
- [21] 王开科, 吴国兵, 章贵军. 数字经济发展改善了生产效率吗[J]. *经济学家*, 2020(10): 24-34.
- [22] 周磊, 龚志民. 数字经济水平对城市绿色高质量发展的提升效应[J]. *经济地理*, 2022, 42(11): 133-141.
- [23] YI M, LIU Y, SHENG M S, et al. Effects of digital economy on carbon emission reduction: new evidence from China[J]. *Energy Policy*, 2022, 171: 113271.
- [24] LUO K, LIU Y, CHEN P F, et al. Assessing the impact of digital economy on green development efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Energy Economics*, 2022, 112: 106127.
- [25] BERTANI F, PONTA L, RABERTO M, et al. The complexity of the intangible digital economy: an agent-based model[J]. *Journal of Business Research*, 2021, 129: 527-540.
- [26] ABENDIN S, PINGFANG D. Capital mobility and business cycle synchronization in Sub-Saharan Africa: the role of the digital economy[J]. *The Journal of International Trade & Economic Development*, 2022, 31(7): 1108-1126.
- [27] SONG M, FISHER R, KWONG Y. Technological challenges of green innovation and sustainable resource management with large scale data[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 144: 361-368.
- [28] 邓荣荣, 张翔祥. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J]. *南方经济*, 2022(2): 18-37.
- [29] WANG J, DONG K, DONG X, et al. Assessing the digital economy and its carbon-mitigation effects: the case of China[J]. *Energy Economics*, 2022, 113: 106198.
- [30] 陈晓东, 杨晓霞. 数字经济发展对产业结构升级的影响——基于灰关联熵与耗散结构理论的研究[J]. *改革*, 2021(3): 26-39.
- [31] FENG S, CHONG Y, YU H, et al. Digital financial development and ecological footprint: evidence from green-biased technology innovation and environmental inclusion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 135069.
- [32] CHEN P. Is the digital economy driving clean energy development? New evidence from 276 cities in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 372: 133783.
- [33] 池毛毛, 叶丁菱, 王俊晶, 等. 我国中小制造企业如何提升新产品开发绩效——基于数字化赋能的视角[J]. *南开管理评论*, 2020, 23(3): 63-75.
- [34] 张浩, 汪俊亮, 吕佑龙, 等. 大数据驱动的智能制造[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(2): 127-133+158.
- [35] 赵西三. 数字经济驱动中国制造转型升级研究[J]. *中州学刊*, 2017(12): 36-41.
- [36] 刘云强, 权泉, 朱佳玲, 等. 绿色技术创新、产业集聚与生态效率——以长江经济带城市群为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2395-2406.
- [37] 李晓华. 数字经济新特征与数字经济新动能的形成机制[J]. *改革*, 2019(11): 40-51.
- [38] 韩永辉, 黄亮雄, 王贤彬. 产业结构优化升级改进生态效率了吗? [J]. *数量经济技术经济研究*, 2016, 33(4): 40-59.
- [39] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用[J]. *心理学报*, 2004(5): 614-620.

- [40] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. 经济研究,2004(10):35-44.
- [41] 邱斌,杨帅,辛培江. FDI技术溢出渠道与中国制造业生产率增长研究:基于面板数据的分析[J]. 世界经济,2008(8):20-31.
- [42] 刘翠花. 数字经济对产业结构升级和创业增长的影响[J]. 中国人口科学,2022(2):112-125+128.
- [43] 刘强,马彦瑞,徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率? [J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(3):72-85.
- [44] 黄群慧,余泳泽,张松林. 互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济,2019(8):5-23.
- [45] 潘宏亮. 角色冲突对平台依附型新创企业绩效的影响[J]. 科学学研究,2022,40(11):2045-2054.
- [46] 曾刚,胡森林. 技术创新对黄河流域城市绿色发展的影响研究[J]. 地理科学,2021,41(8):1314-1323.
- [47] 赵康杰,景普秋. 资源依赖、有效需求不足与企业科技创新挤出——基于全国省域层面的实证[J]. 科研管理,2014,35(12):85-93.
- [48] 陆峰. 加快数字中国建设的八大要点[EB/OL]. (2019-02-22). 中国共产党新闻网, <http://theory.people.com.cn/n1/2019/0222/c40531-30896211.html>.

Has the Digital Economy Improved Ecological Efficiency? Empirical Test Based on Ecological Footprint

TANG Ping, YANG De-lin

(School of Finance, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Human social development has made ecological carrying capacity more fragile and sensitive, exacerbating the “butterfly effect” of expanding ecological footprints. However, the development of the digital economy has improved ecological efficiency, providing new opportunities to balance human social development and environmental protection. Nevertheless, existing literature lacks in-depth research on measuring ecological efficiency from the perspective of the balance between economic output and ecological footprint. In particular, it lacks thorough analysis of how the development of the digital economy affects ecological efficiency by embedding production efficiency and upgrading industrial structure at a deeper level of inherent logic.

This paper believes that the rapid development of the digital economy plays an important role in achieving harmonious coexistence between humans and nature and enhancing ecological efficiency. Based on the provincial panel data from 2011 to 2019 in China, using the ecological footprint model and entropy-weighted TOPSIS method to respectively calculate the changes in the ecological footprint and the level of digital economic development in each province of China, and using per capita economic output and ecological footprint to measure ecological efficiency, this paper empirically tests the impact of the digital economy on ecological efficiency. The research found that the development of China’s digital economy has significantly improved the ecological efficiency of various regions. Mechanism tests show that the promotion effect of China’s digital economy development on ecological efficiency can be achieved through the mediation of production efficiency and industrial structure upgrades; threshold tests show that the higher the level of development of China’s digital economy, the stronger the enhancing effect on ecological efficiency, but under different production efficiency and industrial structure conditions, the impact of the digital economy on ecological efficiency is either

a single threshold effect or no threshold effect; heterogeneity analysis shows that the impact of China's digital economic development on ecological efficiency is heterogeneous. From the perspective of regional resource dependency, the promotion effect of the digital economy on ecological efficiency is stronger in non-resource-based areas than in resource-based areas. From the analysis of the policy nodes of the "Digital China" initiative, the post-node effect is stronger.

Compared with existing literature, this paper mainly expands and deepens as follows: first, this paper measures ecological efficiency from the perspective of the ecological footprint and economic output, reflecting the impact of economic development on the ecological environment with an ecological footprint, revealing the changing laws and inherent logical relationships between the ecological footprint and ecological efficiency. Second, this paper puts the digital economy, ecological footprint, and ecological efficiency in the same analytical framework and conducts an in-depth analysis of the impact of the digital economy on ecological efficiency based on the changes in ecological footprints in various regions of China. Thirdly, unlike existing literature that focuses solely on the role of industrial structure upgrades or green ecological efficiency on ecological efficiency, this paper comprehensively analyzes the mechanism of the digital economy on ecological efficiency from the aspects of production efficiency and industrial structure upgrades, and empirically tests the mechanism and non-linear characteristics of the digital economy in enhancing ecological efficiency.

This study deepens the connotation and measurement methods of ecological efficiency, to a certain extent, reveals the inherent logical relationship between the digital economy and ecological efficiency, and helps governments at all levels formulate policy measures for the development of the digital economy from the aspects of improving resource utilization efficiency, promoting green technology innovation and research and development, optimizing industrial structure, and strengthening the construction of digital infrastructure.

Key words: digital economy; ecological efficiency; ecological footprint; economic output; resource occupancy; production efficiency; industrial structure

CLC number: F205; F062.2

Document code: A

Article ID: 1674-8131(2024)04-0050-16

(编辑:刘仁芳)