

数字经济驱动低碳产业发展的 机制与效应研究

邬彩霞¹ 高媛²¹

(1. 山东财经大学, 山东 济南 250014;

2. 对外经济贸易大学, 北京 100029)

【摘要】: 数字经济正在成为经济社会发展新的驱动力。本文基于 2005-2017 年中国省级层面数据, 构建低碳产业发展综合指标及数字经济发展水平评价体系, 实证分析发现: 数字经济对低碳产业的发展具有显著的驱动效应, 该效应通过能源流、资源流两个渠道发挥作用。各地区低碳产业的发展阶段不同, 区域数字经济的发展潜力存在差异, 导致数字经济对低碳产业发展的驱动效应呈现出地区异质性, 但在东、中、西部地区之间的差异较小。

【关键词】: 低碳产业 数字经济 能源流 资源流

【中图分类号】: F49 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1002-6924(2020)11-0155-07

一、引言

在全球低碳化和中国生态文明建设的大背景下, 中国低碳发展成效显著, 通过采取积极的节能减排、应对气候变化的措施, 国民经济正在逐步转向高质量发展阶段。与此同时, 随着互联网、大数据、云计算、物联网及人工智能等数字技术的不断深入应用, 数字经济正在成为经济社会发展新的驱动力。促进数字经济与低碳产业发展的深度融合, 打造新产业新业态, 推动低碳产业发展全面数字化, 是当前我国面临的重要任务。低碳产业发展的驱动因素有很多, 其中数字经济在绿色生产、绿色消费、绿色政务等领域均表现出强大推动力, 逐渐成为实现绿色发展的新路径。^[1]数字经济在环境资源管理中发挥着越来越重要的作用, 通过促进绿色技术的革新, 不断减少全球范围内的碳排放量。^[2]据联合国贸易与发展会议发布的《2019 年数字经济报告》显示, 数字经济规模预期将占世界 GDP 的 4.5%至 15.5%。大数据的迅速发展给中国绿色发展提供了一种重要途径。^[3]数字经济作为新一轮技术革命的产物, 对低碳产业发展的影响显而易见。现有文献的关注点集中于数字技术对一国可持续发展、智慧城市、企业绿色发展的态势和方式中, 少有研究关注数字经济对低碳产业发展的重要作用。虽有少量研究涉及了数字化技术对低碳产业发展的作用, 但也没有对其作用机制进行深层次的挖掘与分析。因此, 本文利用来自《中国统计年鉴》、EPS 全球统计数据及联合国系列报告中的公开数据, 实证检验了数字经济对于低碳产业发展的驱动效应。并尝试从能源流和资源流的角度, 对数字经济的作用机制进行深层次的理论分析, 旨在从一个新的视角为相关机构决策提供依据和参考。鉴于此, 本文有以下几点创新之处: 其一, 本文理论分析了数字经济发展对于低碳产业发展的驱动效应, 并对这一效应进行了实证检验。通过回归分析数字经济对低碳产业发展的驱动效应, 探究其是否显著影响了低碳产业发展。其二, 鉴于数字经济核算指标尚无公认标准, 本文尝试构建了数字经济的指标评估框架, 并测度了以能源产业、资源产业为代表的中国低碳产业的综合发展水平, 能够更为精确地判定数

作者简介: 邬彩霞, 经济学博士, 山东财经大学国际经贸学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 低碳经济、产业政策; 高媛, 对外经济贸易大学中国 WTO 研究院博士研究生, 主要研究方向: 服务业开放、产业政策。

字经济的低碳驱动效应。其三，本文尝试从能源流及资源流两个角度，对数字经济的驱动效应做出解释。

二、数字经济对低碳产业发展的作用机理

(一)理论模型

以柯布-道格拉斯生产函数为基础，数字经济为低碳产业的发展提供了技术要素，因此数字经济的驱动效应可以通过以下方程体现：

$$Y = A \cdot K^{\alpha} \cdot L^{\beta} \quad (1)$$

其中，Y 为低碳产业发展的产出，K 为资本投入，L 为劳动力投入。而数字经济通过广义的技术进步 A，对低碳产业产出产生影响。A 中包含了数字经济及其他可能影响低碳产业发展的要素。具体来说，数字经济通过采用云计算等数字技术，推动低碳产业结构多元化，使整个产业链条更加“绿色”，促进传统产业转型升级。另外，数字经济推动了低碳产业技术革新，利用现有的生态环保大数据服务平台，实现整个低碳产业链条的技术创新。此外，经济发展水平、产业结构、科技创新能力等也会影响低碳产业发展的程度。首先，一国的经济发展水平会影响能源和资源的使用数量，经济发展水平越高，城市化率越高，则能够更好地平衡经济、社会、环境三者之间的关系，实现协同发展。其次，合理的产业结构，能够引导低碳技术投向转型升级较快的行业，加快低碳产业的发展速度，提升发展成效。最后，科技创新水平也会影响低碳产业发展的程度，有助于低碳技术研发等科技创新能力的提高，从而提升低碳发展的质量。由此，A 可表示为：

$$A = \theta \cdot DIG^{\gamma_1} \cdot URATE^{\gamma_2} \cdot THIRDGDPP^{\gamma_3} \cdot TECH^{\gamma_4} \quad (2)$$

其中，DIG 为数字经济发展水平，为本文核心解释变量；URATE 为城市化率，用以衡量经济发展水平；THIRDDGP 代表第三产业的增加值，用以反映产业结构；TECH 为科研创新能力的体现； θ 为扰动项，包含控制变量中未包含的其他可能影响因素。将(2)式代入(1)式并两边取对数得：

$$\ln Y = \ln A + \alpha \ln K + \beta \ln L \quad (3)$$

本文将以(3)式为基础构建计量模型，检验数字经济对于低碳产业发展的驱动效应。

(二)影响机制

低碳发展的实质就是要提高资源和能源的利用效率，从资源流来看，实现资源最有效利用的途径就是发展循环经济；从能源流来看，核心则是不断推进技术进步，在节能的基础上提高能源利用效率。^[4]数字经济对低碳产业发展的驱动作用，可通过资源流和能源流两个渠道，逐步实现资源领域和能源领域的数字化转型¹。本文也将依据这两个渠道，选择对应的指标，测度低碳产业的发展水平。

1. 在能源流推进数字化低碳经济。

在全球气候变化的大背景下，提高能源利用效率，优化能源结构，是各国减少排放，推动低碳发展的重要路径。在数字经济时代，一方面，数字技术的应用和推广可以更好地了解能源市场的动向和价格变动趋势，做好能源保障供应；通过实时收集、监测、传递、分析、利用能源数据流，引导能源要素实现高效率配置，也可以推动能源流的顺利升级和优化。另一方面，数字经济的出现，有利于加强不同区域和不同主体之间在能源调度与利用上的协同，推动工业、建筑、交通、消费等领域的数字化节能，促进能效提升。在工业领域，通过加入数据生产要素，利用数字化感知和调控设备，可以更好地推广工业电机标准，实现与相关领域的互联互通。数字化工业技术的应用，可以提高单位能源的产值增量，逐步降低能源强度，减少二氧化碳排放。从生产端来看，在生产环节接入大数据，通过大数据优化参数，提升能源使用效率，可以大幅度降低生产成本；从消费端来看，有研究表明，在不增加整体能源消费的前提下，仅推广应用信息技术就可以降低 13%-22% 的碳排放量。^[5]在建筑领域，通过采用数字化节能环保技术，构建数字化能源网络，可以发挥智能电网覆盖广泛、响应灵活的网格化优势。在交通领域，数字技术可以通过提升汽车燃油效率、增加新能源汽车使用量、提高燃油效率标准等方式，推动交通节能，减少碳排放。

2. 在资源流实现数字化循环经济。

资源流方面，推进循环经济，提高资源利用效率，是解决资源问题，推动低碳产业发展的另一条重要路径。自然资源具有不可再生性，如何让有限的资源发挥最大化的作用？最直接的办法就是发展循环经济。数字技术在推动资源流零排放，合理有效地利用资源方面能够发挥重要的作用。首先，在大数据、云计算、物联网等信息技术的推动下，可以多角度、全方位地实现对生态资源的实时监测，也可以预测生态环境与资源发展的趋势，建立较为全面、科学的资源环境监测体系；同时，通过生态环境领域的业务调查、遥感卫星等多类型、大规模、多样化的大数据和现代化信息处理技术，及时把握生态环境的变动情况，可为生态环境保护和有效治理提供依据，促进绿色发展。^[6]其次，通过采用先进的数字化技术，可以实现政府、企业、社会公众之间数据信息资源共享，构建科学、持续的资源生态大系统，发挥数据的集成效用，从而减少生产端的资源消耗，提高资源利用率。最后，通过在资源领域建立信息技术平台，建立以数字技术为中心的资源管理数字化平台，可以对多种资源进行综合管理。

3. 为低碳产业发展提供新动能。

数字经济通过能源流、资源流发挥作用，从而促进低碳产业的优化升级，进而为中国低碳产业发展提供新动能。市场机制通过逐步实现数字化碳定价机制，如收费、收税、碳排放交易，降低节能降碳成本，促进技术进步与创新，优化低碳产业结构，形成全新的经济发展方式和能源消费方式，推动数字低碳的融合发展。

通过采用云计算等数字技术，可以推动低碳产业结构多元化，使整个产业链条更加“绿色”，推动传统产业实现转型升级。通过构建数字化低碳产业标准体系，确保产品的出口竞争力和生态设计的前沿性；利用现有的能源效率技术、减少非碳能源成本技术以及减少碳捕捉与封存成本技术等，降低能源消费需求 and 强度，提高资源使用效率，从而抑制、缓解碳排放的增长速度。

三、模型构建与数据来源

(一) 基准回归模型

本文以 (3) 式为基础，构建基准回归模型如下：

$$LCD_{it} = \beta_0 + \beta_1 DIG_{it} + \beta_2 URATE_{it} + \beta_3 TECH_{it} + \beta_4 THIRD GDP_{it} + \delta_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, LCD_{it} 为低碳产业发展综合指标, 通过测度得到; DIG_{it} 为数字经济发展水平, 为本文的核心解释变量。其余控制变量包括城市化率 ($URATE_{it}$)、科技创新能力 ($TECH_{it}$) 及第三产业增加值 ($THIRDGP_{it}$)。 β_0 为截距项, δ_i 为省份固定效应, ν_t 为时间固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

(二) 指标构建与数据来源

1. 低碳产业发展。

本文参考邬彩霞^[4]对于低碳产业发展的定义与测度, 从能源流及资源流两个方面测度低碳产业发展综合指标 (见表 1)。能源流方面, 选取能源强度、能源消费结构及碳强度作为二级指标。能源强度采用单位 GDP 能源强度作为具体测量指标, 降低生产过程中的能源强度是气候治理的核心环节, 通过改进技术创新、优化调整产业结构, 可以逐步地降低单位 GDP 能源强度。能源消费结构采用一次电力及其他能源消费占比作为衡量指标。碳强度采用单位能耗碳强度进行衡量。资源流方面, 以资源产出率、森林覆盖率及生物多样性作为二级指标。资源产出率衡量自然资源的使用效率。一国资源禀赋一定的情况下, 自然资源利用效率越高, 自然生态的运行就越良好。而低碳产业发展中森林覆盖率及生物多样性等自然生态情况的考量, 更是体现了“基于自然的解决方案”的全球可持续发展共识。

表 1 低碳产业发展综合指标测度体系

	一级指标	二级指标
低碳产业发展	能源流	一次电力及其他能源消费占比 (%)
		单位 GDP 能源强度 (吨标准煤/万元)
		单位能耗碳强度 (万吨/标准煤)
	资源流	资源产出率 (元/吨)
		森林覆盖率
		生物多样性

根据以上指标, 构建低碳产业发展综合指标如下:

$$LCD_{it} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m I_{ij} H_{ij} \right) H_i \tag{5}$$

LCD_{it} 表示低碳产业发展水平, 通过能源流及资源流两个方面进行测度, 该指标数值越大, 代表低碳产业发展水平越高。其中 n 为一级指标的指标个数, 即 $n=2$, m 为二级指标的要素个数。 I_{ij} 为第 i 个构成项的第 j 项指标的标准化值, H_{ij} 表示第 i 个构成项的第 j 个指标的权重。一级指标能源流包含三个二级指标: 一次电力及其他能源消费占比、单位 GDP 能源强度及单位能耗碳强度。其中, 一次电力及其他能源消费占比以一次电力及其他能源占能源消费总量的比重表示, 单位 GDP 能源强度以能源消费量/GDP 计算得到, 单位能耗碳强度以二氧化碳排放量/能源消费总量计算得到。一级指标资源流包含三个二级指标: 资源产出率、森林覆盖率及生物多样性。其中, 资源产出率以地区生产总值 (不变价)/主要物质资源消费量计算得到, 森林覆盖率采用森林面积占土地面积的比率进行衡量, 生物多样性以生物种类数量进行衡量。以上数据来自《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《国民经济和社会发展统计公报》、世界银行等权威性报告和机构。基于公式 (5) 的计算及统计, 得到我国总体的低碳产业发展水平。由于部分省份数据的缺失, 因此以各省 GDP 占当年全国 GDP 的比重作为权重, 计算得到 29 个省 (除港澳台、新疆及西藏) 的低碳产业发展水平。各省 2005 年及 2017 年低碳产业发展水平如图 1 所示。

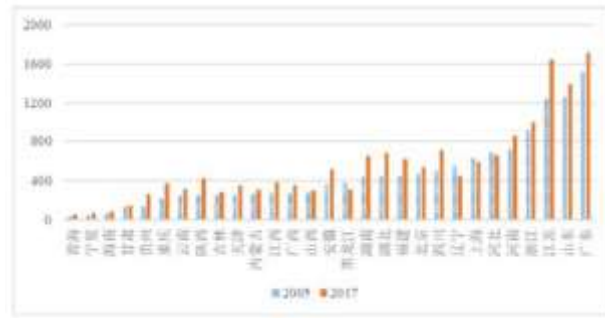


图 1 各省 2005 年及 2017 年低碳产业发展指数对比

2. 数字经济的评价模型。

国内外数字经济的评价指标及方法各有不同。^[6]本文结合数字经济理论的基本特点,以及低碳产业发展最为相关的数字经济要素,从数字基础设施建设与数字应用服务两个角度,挑选有代表性的指标及数字融合的产业领域,提出数字经济发展水平的测度指标(见表 2)。

表 2 数字经济发展水平指标测度体系

	一级指标	二级指标
数字 经济 发展 水平	数字基 础设施 指数	计算机、通信和其他电子设备制造业规模
		互联网基础设施
		数字化生活应用普及程度
		互联网发展规模
	数字应 用服务 指数	电子商务规模
		数字电子政务
		公共服务应用
		工业人工智能化程度

根据以上指标,本文提出数字经济发展水平测度模型:

$$DIG_{it} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m I_{ij} W_{ij} \right) W_i \quad (6)$$

DIG_{it} 表示数字经济发展水平,由数字基础设施指数及数字应用服务指数两个一级指标构成,该指数越高则代表数字经济发展水平越高。其中 n 为一级指标的指标个数,即 $n=2$, m 为二级指数的要素个数。 I_{ij} 为第 i 个构成项的第 j 项指标的标准化值, W_{ij} 表示第 i 个构成项的第 j 个指标的权重。其中一级指标数字基础设施包含四个二级指标:计算机、通信和其他电子设备制造业规模、互联网基础设施、数字化生活应用普及程度及互联网发展规模。一级指标数字应用服务包括四个二级指标,即电子商务规模、数字电子政务、公共服务应用及工业人工智能化程度。

数字经济发展水平测度体系中,一级指标数字基础设施指数中的二级指标包括:计算机、通信和其他电子设备制造业规模以

该行业主营业务收入衡量，互联网基础设施以光缆线路长度衡量，数字化生活应用普及程度以互联网普及率衡量，互联网发展规模以互联网宽带接入端口数量规模衡量。一级指标数字应用服务指数中的二级指标包括：电子商务规模以商务部公开的电子商务交易额衡量，数字电子政务以联合国发布的电子政务完备度指数衡量，公共服务应用以中国政府网公开的国务院文件及部门文件中，涉及数字经济、数字化、互联网+、大数据、信息技术、软件产业、科技与科技创新内容的文件数进行统计，工业人工智能化程度以使用机器人的数量进行衡量。以上数据均来自《中国统计年鉴》、EPS 全球统计数据、联合国公开报告及国际机器人联盟。经测算得到除港澳台、新疆和西藏外，我国 29 个省份 2005-2017 年的数字经济发展水平指数，其密度分布如图 2 所示。可见，各地区不同年份的数字经济发展水平差异较大。据统计显示，2005-2017 年，各省数字经济发展水平的中位数为 4.651，平均值为 8.612。

3. 控制变量的测度。

控制变量均参照现有研究，数据来源于各省统计年鉴。采用城市化率反映该省经济发展水平；采用专利申请数代表该省的科技创新能力；采用该省第三产业增加值，衡量该省第三产业的规模，反映该省产业结构。主要变量的描述性统计见表 3。

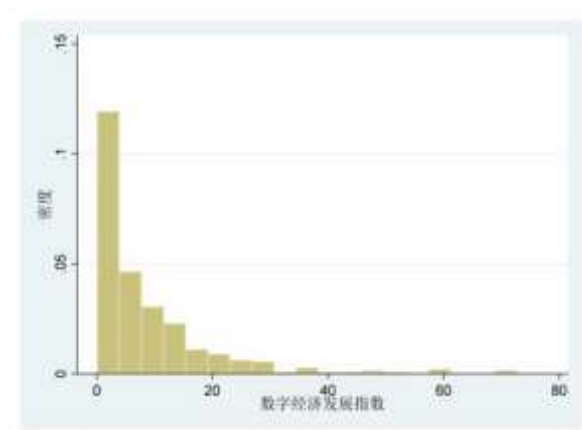


图 2 2005-2017 年各省数字经济发展指数密度分布

表 3 主要解释变量描述

解释变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
数字经济	377	8.612	10.934	0.063	72.676
城市化率	377	0.533	0.141	0.269	0.896
科技创新能力	377	55909.670	91725.640	216	627834
第三产业增加值	377	8.478	1.035	5.363	10.781

四、实证结果与分析

(一)基准回归结果分析

本文依据 (4) 式对 2005-2017 年我国 29 个省份(除港澳台、新疆及西藏)的 377 个样本进行了回归分析。

数字经济发展水平对低碳产业发展的回归结果，结果发现，数字经济发展水平项前系数符号为正，且结果显著，证明数字经济发展水平能够显著提升低碳产业的发展水平。第(2)列为加入固定效应后，核心解释变量数字经济发展水平对低碳产业发展的回归结果，结果显示这一驱动效应依旧显著。第(3)(4)(5)列分别为依次加入控制变量并且使用固定效应模型回归的结果，显示数字经济发展水平对低碳产业发展仍具有显著的正向驱动效应。

(二)分样本回归结果分析

在本文的回归分析中，虽然尽可能地控制了影响低碳产业发展的因素，但是依旧可能有其他地区异质性的影响因素会影响估计结果。同时，不同地区间数字经济发展水平对低碳产业发展的影响力可能存在差异。因此，本文对 29 个省份进行了地区的分类，分为东、中、西部三个子样本。

东部两列分别为只有核心解释变量数字经济发展水平对低碳产业发展的回归结果，以及加入全部控制变量后数字经济水平对低碳产业发展的回归结果。结果显示，在控制固定效应后，数字经济发展水平对低碳产业发展仍旧产生了显著的驱动效应，与全样本分析结论一致。同理，中部及西部地区的分析结果，也得出了相同的结论。通过比较东、中、西部地区加入所有控制变量后的固定效应模型回归结果发现，各地区数字经济发展水平对低碳产业发展的影响力存在差异，但差异较小。尤其是中、西部地区，其数字经济发展水平对低碳产业发展的影响力甚至高于东部地区。可能的原因主要有两个：第一，中、西部地区低碳产业起步较晚，相较东部地区，其低碳产业发展水平仍处于较快的上升期，低碳产业发展相关指标年均增长率较高，产业低碳化发展潜力较大。因此数字经济发展水平的提高，较易对低碳产业发展产生促进作用。第二，得益于贵州省在数字经济中的龙头作用，西部地区数字经济发展水平提升潜力巨大。据国家工业信息安全发展研究中心发布的《2019 中国大数据产业发展报告》显示，贵州省大数据产业发展指数为 76，仅次于北京和广东，位列全国第三位。同时，以贵安综保电子信息产业园、贵阳大数据安全产业园及贵安数字经济产业园为载体，贵州省乃至西部地区数字产业表现了良好的市场发展潜力，有助于西部地区数字经济发展水平的进一步提高。

(三)稳健性检验

1. 替换指标。

本文的被解释变量低碳产业发展是一个综合指标，且根据各省权重计算得到，现有文献多关注单位 GDP 能源强度等单一指标的变化。因此，为了验证本文结论的稳健性，本文将被解释变量替换为各省单位 GDP 能源强度，通过计算各省能源消费量与 GDP 的比率得出，数据均来自于各省统计年鉴。该指标数值越小，表示低碳产业发展水平越高。

2. 工具变量。

虽然本文已尽可能地控制影响数字经济发展水平及低碳产业发展的因素，但不免还存在其他未观测到的因素，由此产生一定的内生性。因此，本文采用核心解释变量数字经济发展水平的滞后一期作为工具变量进行回归。

第(1)–(3)列显示了替换指标后的回归结果。结果显示，数字经济发展水平的提高，能够显著地降低单位 GDP 能源强度，且这一结果在固定省份及时间效应、加入所有控制变量后依旧显著。降低生产过程中的能源强度是气候治理的核心环节，数字经济通过改进技术创新及优化产业结构，逐步降低单位 GDP 能源强度。第(4)–(6)列显示了使用工具变量后的回归结果。结果显示，数字经济发展水平的提升，对低碳产业发展有显著的正向影响，且这一结果在固定省份及时间效应、加入所有控制变量后依旧显著。这与本文的全样本回归结果相一致，证明了本文基准回归结果的稳健性。同时，可以很明显的观测到，在控制了可能存在的内生性之后，数字经济发展对低碳产业发展的驱动效应较基准回归更为明显。

五、结论及建议

本文通过总结现有研究,得到结论如下。第一,数字经济发展水平的提升,对低碳产业发展具有正向的驱动效应,且这一效应具有稳健性。第二,数字经济通过能源流、资源流两个渠道影响低碳产业发展。能源流方面,数字经济能够提升能源使用效率,优化能源结构;资源流方面,数字经济有利于提升资源利用率,优化产业结构,促进低碳产业发展。第三,数字经济发展水平对低碳产业发展的驱动效应具有地区异质性,但差异较小。该结果可能是地区低碳产业发展阶段及数字经济发展潜力所致。

根据上述结论,本文提出以下政策建议:第一,制定数字经济驱动低碳产业发展的配套政策。结合低碳产业发展的特点,完善相关的配套政策,健全低碳产业体系和数字化标准规范体系。加强财政对数字化低碳产业发展的投资力度,加大对低碳产业链数字化发展的奖励力度,优化低碳产业发展环境,积极发挥数字技术的正面能动作用。第二,培育能源流、资源流领域低碳产业发展的新业态和新模式。积极推广智慧基础设施建设,运用数字化技术改造提升传统能源产业,优化产业布局,完善配套政策,推动信息化和工业化的深度融合;依托市场主体对低碳产业的深层次需求,引导清洁能源消费,避免资源浪费,提高低碳产业的资源产出率,实现资源的最大化利用,确保中国低碳产业的绿色竞争力。第三,加强数字化低碳技术的开发,推动区域合作。针对国内东、中、西部地区的差异化特点,推动技术交流与创新,提升低碳产业的生产能力。积极发挥先进地区的产业引领作用,对能源和资源部门的实时数据和历史数据进行深层挖掘分析,提高其经济性、安全性和可靠性,为低碳数据赋能,以此推进我国工业转型升级,实现产业经济发展的低碳化、智能化。

参考文献:

[1]夏勇.数字经济引领绿色发展新路径.[N].浙江日报,2019-04-10.

[2]Nizam,H. A.,Zaman,K.,Khan,K. B. et al.Achieving environmental sustainability through information technology:Digital Pakistan” initiative for green development[Z].Environ SciPollut Res 27,10011-10026,2020.

[3]许宪春,等.大数据与绿色发展[J].经济研究参考,2019(10):97-110.

[4]郭彩霞.“一带一路”背景下中国低碳经济的发展模式研究[M].北京:中国金融出版社,2019.

[5]陈庆修.以信息化引领和带动绿色化[N].学习时报,2018-09-12.

[6]徐清源,单志广,马潮江.国内外数字经济测度指标体系研究综述[J].调研世界,2018(11):54-60.

注释:

1 本文对于能源流和资源流的划分,基于对能源和资源的理解作如下界定:能源流包含一次能源和二次能源,一次能源指存在于自然界并可直接使用的能源,包括太阳能、煤、石油等;二次能源指人工能源,主要是指经过一次能源转化形成的能源,包括电能、煤气、蒸汽等,也包含可再生能源等新能源。资源流主要是指天然存在的、能够为生物活动提供不同物质财富的自然因素总和,包括大气、水、土地、森林、草地、生物等。