

【区域格局与产业发展】

“双碳”背景下制造业数字化转型与绿色发展 耦合协调研究*

薛贺香

摘要:在“双碳”背景下,推进制造业数字化转型和绿色发展是中国制造业转型升级的关键保障。中国制造业数字化转型综合评价指数与绿色发展综合评价指数逐年增加,数字化转型综合评价指数小于绿色发展综合评价指数,但两者的差距随着时间的推移在逐年缩小;制造业数字化转型与绿色发展两个子系统之间的耦合协调度从2016年的0.395增加到2020年的0.475,处于由低度耦合协调向中度耦合协调发展的阶段,两个子系统之间存在协同发展关系,两者形成动态演化的合力推动系统由无序向有序方向升级演化。中国应在推进制造业绿色低碳发展、加快制造业数字化转型、建设绿色数字化生态系统、强化数字基础设施建设等方面采取措施,促进制造业数字化转型与绿色发展。

关键词:碳达峰;碳中和;数字化转型;绿色发展;制造业

中图分类号:F069.9 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5766-(2023)03-0101-10 **收稿日期:**2023-01-10

***基金项目:**2022年中国工程科技发展战略河南研究院项目“‘双碳’背景下河南材料产业绿色数字化转型的路径”;2021年河南省哲学社会科学规划年度项目“‘三链同构’框架下河南省粮食产业高质量发展评价与发展路径研究”(2021BJJ098)。

作者简介:薛贺香,女,郑州航空工业管理学院经济学院副教授(郑州 450046)。

一、引言与文献综述

随着“双碳”目标的提出,建立绿色低碳循环经济体成为中国经济高质量发展的必由之路。作为实体经济的核心和支柱产业,制造业是中国经济体中主要的碳排放源,在“双碳”背景下,制造业如何实现绿色低碳发展是亟待解决的重要问题。近年来,蓬勃发展的数字技术对制造业各环节的渗透为制造业绿色发展提供了新的思路和机遇。国家提出要大力发展智能绿色制造业,利用新一代数字技术驱动制造业绿色发展。中国双碳“1+N”政策体

系也明确提出深度融合数字技术与绿色低碳产业,促进数字技术更好地赋能经济发展,推动制造业领域加快进行数字化转型。因此,推进数字化转型和绿色低碳协调发展是实现中国制造业转型升级的主要路径,那么,中国制造业数字化转型与绿色低碳发展的耦合协调水平怎样?两者之间的耦合协调机制是什么?如何促进两者耦合协调发展?当前,鲜有文献对这一重要命题进行深入研究,现有文献主要集中在数字化的内涵及效应、绿色发展的影响因素及实现机制、数字化与绿色发展的关系等方面。

第一,关于数字化(转型)的内涵及效应。

Marco(2019)认为,制造业数字化转型的动力来源于数字工具和互联网技术。沈恒超(2019)认为,数字化转型表现为将大数据、人工智能等数字技术应用于企业活动的各个环节。陈剑等(2020)指出,数字化可以对企业的各个环节进行“赋能”和“使能”,前者提升效率,后者促进价值创新。周慧慧等(2021)认为,制造业的数字化转型可以提高制造业的绿色创新能力。江小涓等(2021)认为,数字技术在促进各产业之间深度融合的基础上推动全球价值链重构。第二,关于制造业绿色发展的影响因素及实现机制。现有研究认为,技术创新、资源禀赋、环境规制、机制创新、产业协同集聚等均会对制造业绿色发展产生重要影响。贾军等(2018)认为,绿色技术的研发创新能够推进制造业绿色全要素生产率持续改善,从而实现绿色发展。张峰等(2019)认为,环境规制诱发企业进行绿色技术创新,推动制造业绿色发展,而资源禀赋在短期内的调节作用不足。唐勇军等(2019)认为,政府的环境监管促使企业减少污染排放,有利于制造业绿色发展。杨建亮等(2020)认为,企业需要从组织保障、资金保障、人才保障、制度保障等方面促进机制创新,从而推动制造业绿色发展。宋晓玲等(2022)认为,产业协同集聚通过加速制造业技术创新和促进产业结构升级推动制造业绿色发展。第三,关于制造业数字化(转型)与绿色发展的关系。相关文献主要集中于数字化(转型)对制造业绿色发展或绿色创新的影响研究。王锋正等(2022)从技术整合能力的视角研究了地区数字化综合水平对资源型企业绿色技术创新的影响。靳毓等(2022)认为,数字化转型通过缓解融资约束、弱化代理冲突、提升成长能力促进企业绿色创新。韩晶(2022)从动力机制、演化机理、参与主体等方面分析了数字经济赋能绿色发展的机制与路径。戴翔等(2022)认为,数字赋能主要通过规模效应和技术效应两个机制促进制造业企业绿色化转型。

以上文献对数字化内涵及效应、制造业绿色发展进行了深入研究,为本文提供了有益的借鉴和启发。但是,已有文献对两者的研究大多是独立进行的,将两者纳入同一个系统框架进行分析的文献相对较少,即便有文献将两者放入一个框架中分析,也是致力于研究数字化(转型)对制造业绿色发展的单向影响关系,鲜有文献涉及数字化转型与制造

业绿色发展的耦合协调发展研究,两者之间的双向关联以及耦合协调机制缺乏系统探讨,尤其是当“双碳”背景下兼顾碳减排和经济效益两个方面时,数字化转型能否实现制造业发展与生态环境的双重红利,以及环境治理和节能减排的发展趋势能否倒逼制造业进行数字化转型,即制造业数字化转型和绿色发展之间的双向影响关系还需要进一步深入研究。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出,将数字技术作为实现“双碳”目标的关键支柱,深化生产制造过程的数字化应用,赋能绿色制造。因此,深入推进制造业数字化转型与绿色发展的融合协调发展是中国制造业转型升级和高质量发展的保障,也是实现“双碳”目标的重要途径。本文在现有文献的基础上,分析中国制造业数字化转型和绿色发展的耦合协调水平和耦合协调机制,并基于哈肯模型进一步分析耦合协调系统演化的动力因素,对落实中国“双碳”目标和“数字中国”建设具有重要意义。

二、理论模型

制造业数字化转型—绿色发展耦合协调系统包括数字化转型和绿色发展两个子系统,本文在评价系统耦合协调度和构建系统演化动力模型之前先通过建立指标体系对两个子系统进行综合评价。

1. 构建评价指标体系

(1)制造业数字化转型指标体系的构建。中国信息通信研究院发布的《中国数字经济发展白皮书(2021年)》提出,数字化发展包括数字产业化和产业数字化,数字技术是其核心驱动力,体现为数字技术的发展和数字应用服务的扩散。本文从数字化技术转型、数字化效益转型和数字化创新能力转型三个方面构建中国制造业数字化转型的评价指标体系(见表1)。

(2)制造业绿色发展指标体系的构建。绿色发展是一种可持续发展模式,以合理消费、低消耗、低排放为主要特征,旨在让经济社会与资源节约、污染物排放减少和环境改善之间形成相互促进关系(许宪春等,2019)。因此,制造业绿色发展的主要内容是提高能效效率、减少环境污染,走绿色制造、智能制造之路。本文从能源投入、环境产出两个方面对制造业绿色发展进行评价,相应的评价指标体系见表2。

表1 中国制造业数字化转型评价指标体系及权重

| 一级指标 | 二级指标 | 计算公式(单位) | 权重 |
|------------------|-------------|-----------------------------|-------|
| 数字化 技术转型 X1 | 基础设施投资 X11 | 固定资产投资额(亿元) | 0.122 |
| | 技术改造投资 X12 | 改建和技术改造额(亿元) | 0.108 |
| | 嵌入型软件投入 X13 | 购买嵌入型系统软件费用/主营业务收入(%) | 0.098 |
| | 工业软件投入 X14 | 购买工业软件费用/主营业务收入(%) | 0.102 |
| 数字化 效益转型 X2 | 产品开发效率 X21 | 新产品销售收入/新产品开发经费支出(%) | 0.093 |
| | 成本费用利润率 X22 | 利润总额/成本费用总额(%) | 0.119 |
| | 主营业务利润率 X23 | (主营业务收入-成本-税金及附加)/主营业务收入(%) | 0.086 |
| 数字化 创新能力转型 X3 | 产品创新 X31 | 新产品销售收入/营业收入(%) | 0.084 |
| | 研发强度 X32 | 行业研发经费/主营业务收入(%) | 0.087 |
| | 研发人员比重 X33 | 计算机和软件人员/从业人员(%) | 0.101 |

资料来源:作者整理。

表2 中国制造业绿色发展评价指标体系及权重

| 一级指标 | 二级指标 | 计算公式(单位) | 权重 |
|------|----------|-----------------------|-------|
| 能源投入 | 能源消耗强度 | 能源消耗量/制造业总产值(吨标准煤/万元) | 0.267 |
| | 能源消费结构 | 煤炭消耗量/能源消耗量(%) | 0.275 |
| 环境产出 | 二氧化碳排放强度 | 二氧化碳排放量/制造业总产值(吨/万元) | 0.217 |
| | “三废”排放强度 | “三废”排放量/制造业总产值(吨/万元) | 0.241 |

注:二氧化碳排放强度的计算公式和折算系数参考陈诗一(2009)的研究。

资料来源:作者整理。

(3)数据来源。本文以2016—2020年中国30个省(区、市)的面板数据为样本,鉴于数据的可得性和可比性,不考虑西藏、香港、澳门和台湾。制造业数字化转型评价指标的数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》和《中国软件和信息技术服务业发展报告》等以及国家统计局、工信部等官方网站。制造业绿色发展评价指标的数据主要来源于《中国工业统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和各地区统计年鉴。个别缺失的数据由插值法补齐。

(4)各指标权重和综合指数的确定方法。本文利用熵权法确定各指标在综合评价中的权重,具体步骤如下:

第一,对评价指标进行规范化处理。

$$y_{ij}=(x_{ij}-\min x_{ij})/(\max x_{ij}-\min x_{ij}) \text{ 正向指标}$$

$$y_{ij}=(\max x_{ij}-x_{ij})/(\max x_{ij}-\min x_{ij}) \text{ 负向指标}$$

其中, x_{ij} 为第*i*个评价对象第*j*项指标的实际评价值, y_{ij} 为标准化后的指标值, $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别为第*i*个评价对象第*j*项指标的最大值和最小值。

第二,确定第*j*项评价指标的熵值 e_j , $e_j=-\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n$

$p_{ij} \ln p_{ij}$, p_{ij} 为第*i*个评价对象第*j*个指标所占的比重。

第三,确定第*j*项指标的权重 w_j , $w_j=\frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^m (1-e_j)}$ 。

第四,计算制造业数字化转型综合评价指数 U_1 和绿色发展综合评价指数 U_2 。 U_1 或 $U_2=\sum_{j=1}^m w_j y_{ij}$ 。综合评价指数越高,说明制造业数字化转型或绿色发展状况越好。

2.耦合协调度模型

耦合度表示两个或两个以上子系统之间的关联程度;协调度反映各子系统的综合发展水平;耦合协调度既反映各子系统是否具有良好的发展水平,又反映系统之间相互影响的程度,耦合作用和协调程度反映系统的演化发展趋势。耦合协调度*D*的测算模型为:

$$D=\sqrt{C \times T}, C=\left[\frac{U_1 \times U_2}{[(U_1+U_2)/2]^2} \right]^{1/2}, T=a \times U_1+b \times U_2$$

其中, C 为耦合度,介于0到1之间,反映制造业数字化转型和绿色发展两个子系统之间的关联程度,越接近于1,说明两者之间的相互作用越强,差距越小,整个系统越趋于有序发展。 T 为协调度,反映两个子系统的综合发展水平,其值越大越好, a 和

b 为两个子系统的系数,分别取值0.5。 D 为耦合协调度,介于0到1之间, D 越大说明两个子系统耦合协调发展越好。 $D=1$ 时,两个子系统之间达到理想状态。本文根据现有文献将耦合协调度分为四个区间(见表3)。

表3 耦合协调度等级划分

| 耦合协调度 | 协调等级 | 耦合协调度 | 协调等级 |
|-----------|--------|-----------|--------|
| [0,0.4] | 低度耦合协调 | (0.5,0.8] | 高度耦合协调 |
| (0.4,0.5] | 中度耦合协调 | (0.8,1] | 极度耦合协调 |

资料来源:作者整理。

3.耦合协调系统演化的动力模型

根据系统演化理论,系统内部的不同变量分为快变量和慢变量,慢变量是序参量,控制着系统演化的过程和方向;快变量服从于慢变量,对系统的演化不起主导作用,当外部环境的改变把系统推过临界失稳点时,系统将演化成新的有序结构,找到失稳点并区分出快、慢两类变量,消去快变量,得到序参量(慢变量)方程,就可以分析系统的演化过程(武春友,2009)。基于哈肯模型系统演化的动力模型具体构建过程如下:

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1 q_1 - a q_1 q_2 + \mu_1 \quad (1)$$

$$\dot{q}_2 = -\lambda_2 q_2 + b q_1^2 + \mu_2 \quad (2)$$

其中, q 为子系统的状态变量; a 、 b 是状态系数, λ 是阻尼系数; μ 为随机涨落项;公式(1)和公式(2)反映两个子系统的相互作用。令 $\mu=0$,则系统的一个定态解是 $q_1=q_2=0$ 。根据绝热近似条件,即 $\lambda_2 > |\lambda_1|$,或者 $\lambda_2 < 0, |\lambda_2| > |\lambda_1|$,可以判断 q_2 为快变量。

$$\text{令 } \dot{q}_2 = 0, \text{ 公式(2)转化为: } q_2 = \frac{b}{\lambda_2} q_1^2 \quad (3)$$

公式(3)表示 q_2 随着 q_1 的变化而变化, q_1 是系统的序参量,它通过支配子系统协同运动促使系统向更高层次演化。将公式(3)代入公式(1)得到序参量方程,即系统的演化方程为:

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1 q_1 - \frac{ab}{\lambda_2} q_1^3 \quad (4)$$

公式(4)说明序参量 q_1 决定系统由一种状态向另一种状态演变的过程,但是系统是否稳定,需要求出公式(4)对应的势函数的极值点。对公式(4)的相反数求积分可以得到势函数:

$$V(q_1) = \frac{\lambda_1 q_1^2}{2} + \frac{ab}{4\lambda_2} q_1^4 \quad (5)$$

通过研究势函数极值的变化情况可以对系统

稳定性进行分析。令 $\dot{q}_1=0$ 求得序参量的定态解,再结合势函数做如下分析:当 $\lambda_1 < 0$ 时,公式(4)有唯一定态解 $q_1=0$,势函数在该处取极小值,此时 $q_2=0$,系统是稳定的;当 $\lambda_1 > 0$ 时,公式(4)将出现 $q_1=0$ 和非零定态解 $q_1 = \pm \sqrt{-\lambda_1 \lambda_2 / ab}$,两个新的非零定态解是稳定的,原来的定态解 $q_1=0$ 成为不稳定点,势函数在 $q_1=0$ 处出现极大值,在 $q_1 = \pm \sqrt{-\lambda_1 \lambda_2 / ab}$ 处出现极小值。这表明,在外部环境的影响下,两个子系统的相互作用产生出对系统的非零影响,从而形成新的有序结构。

实际应用中,一般将公式(1)、公式(2)离散化为:

$$q_1(t+1) = (1-\lambda_1)q_1(t) - a q_1(t)q_2(t) \quad (6)$$

$$q_2(t+1) = (1-\lambda_2)q_2(t) + b q_1^2(t) \quad (7)$$

三、耦合协调度分析和系统演化动力分析

本部分先计算中国制造业数字化转型和绿色发展的综合评价指数,然后以两个子系统的综合评价指数为依据对系统的耦合协调度和演化动力进行分析。

1.综合评价指数分析

根据前面介绍的方法和数据,计算2016—2020年中国30个省(区、市)制造业数字化转型综合评价指数 U_1 和绿色发展综合评价指数 U_2 (见表4和图1)。

根据表4,从全国来看,制造业数字化转型综合评价指数从2016年的0.251逐步增长到2020年的0.364,制造业绿色发展综合评价指数从2016年的0.305逐步增长到2020年的0.391,说明2016—2020年中国制造业数字化转型水平和绿色发展水平得到快速提升。分地区来看,大部分东部地区制造业数字化转型综合评价指数在全国均值之上,尤其是北京、上海、浙江、广东等相对发达地区,而大部分中西部地区在全国均值之下,说明在数字化的浪潮下,东部地区抢先布局了数字经济,制造业数字化转型发展相对较快,而部分中西部地区制造业数字化转型发展则相对滞后,存在一定差距。中国信息通信研究院发布的《中国宽带发展白皮书(2020年)》显示,2020年6月底,在东部地区,千兆及以上宽带网络用户数占全国用户总数的58.1%;5G基站数占全国总数的63.4%,均在半数以上。同样地,大

表4 2016—2020年中国制造业数字化转型综合评价指数 U_1 和绿色发展综合评价指数 U_2

| 地区 | 2016年 | | 2017年 | | 2018年 | | 2019年 | | 2020年 | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | U_1 | U_2 | U_1 | U_2 | U_1 | U_2 | U_1 | U_2 | U_1 | U_2 |
| 北京 | 0.337 | 0.403 | 0.372 | 0.427 | 0.419 | 0.447 | 0.434 | 0.467 | 0.469 | 0.482 |
| 天津 | 0.217 | 0.282 | 0.234 | 0.301 | 0.261 | 0.328 | 0.292 | 0.348 | 0.335 | 0.368 |
| 河北 | 0.233 | 0.291 | 0.245 | 0.311 | 0.273 | 0.331 | 0.302 | 0.352 | 0.331 | 0.371 |
| 山西 | 0.201 | 0.273 | 0.283 | 0.293 | 0.314 | 0.314 | 0.332 | 0.332 | 0.364 | 0.369 |
| 内蒙古 | 0.112 | 0.182 | 0.192 | 0.203 | 0.227 | 0.224 | 0.253 | 0.259 | 0.281 | 0.289 |
| 辽宁 | 0.230 | 0.293 | 0.242 | 0.314 | 0.273 | 0.337 | 0.302 | 0.362 | 0.338 | 0.381 |
| 吉林 | 0.262 | 0.284 | 0.281 | 0.302 | 0.312 | 0.322 | 0.331 | 0.342 | 0.363 | 0.368 |
| 黑龙江 | 0.198 | 0.238 | 0.218 | 0.256 | 0.247 | 0.278 | 0.273 | 0.296 | 0.308 | 0.316 |
| 上海 | 0.352 | 0.398 | 0.371 | 0.412 | 0.401 | 0.432 | 0.432 | 0.453 | 0.461 | 0.473 |
| 江苏 | 0.302 | 0.374 | 0.327 | 0.392 | 0.358 | 0.412 | 0.382 | 0.431 | 0.414 | 0.461 |
| 浙江 | 0.387 | 0.428 | 0.402 | 0.444 | 0.439 | 0.462 | 0.469 | 0.483 | 0.499 | 0.502 |
| 安徽 | 0.283 | 0.318 | 0.301 | 0.338 | 0.337 | 0.357 | 0.368 | 0.377 | 0.392 | 0.397 |
| 福建 | 0.294 | 0.329 | 0.319 | 0.349 | 0.348 | 0.368 | 0.372 | 0.389 | 0.405 | 0.409 |
| 江西 | 0.287 | 0.324 | 0.302 | 0.344 | 0.332 | 0.365 | 0.371 | 0.386 | 0.401 | 0.407 |
| 山东 | 0.263 | 0.328 | 0.286 | 0.349 | 0.311 | 0.362 | 0.342 | 0.387 | 0.379 | 0.410 |
| 河南 | 0.259 | 0.313 | 0.271 | 0.332 | 0.304 | 0.361 | 0.332 | 0.389 | 0.361 | 0.413 |
| 湖北 | 0.276 | 0.329 | 0.293 | 0.348 | 0.324 | 0.363 | 0.358 | 0.382 | 0.382 | 0.402 |
| 湖南 | 0.285 | 0.334 | 0.319 | 0.354 | 0.348 | 0.379 | 0.372 | 0.398 | 0.401 | 0.417 |
| 广东 | 0.396 | 0.448 | 0.437 | 0.472 | 0.439 | 0.503 | 0.462 | 0.523 | 0.492 | 0.542 |
| 广西 | 0.218 | 0.293 | 0.231 | 0.324 | 0.261 | 0.352 | 0.295 | 0.372 | 0.329 | 0.392 |
| 海南 | 0.302 | 0.362 | 0.324 | 0.382 | 0.357 | 0.401 | 0.387 | 0.423 | 0.412 | 0.443 |
| 重庆 | 0.293 | 0.347 | 0.312 | 0.362 | 0.349 | 0.382 | 0.372 | 0.402 | 0.403 | 0.432 |
| 四川 | 0.239 | 0.283 | 0.253 | 0.303 | 0.283 | 0.323 | 0.318 | 0.352 | 0.349 | 0.372 |
| 贵州 | 0.193 | 0.243 | 0.217 | 0.263 | 0.248 | 0.283 | 0.273 | 0.303 | 0.305 | 0.323 |
| 云南 | 0.129 | 0.223 | 0.147 | 0.243 | 0.173 | 0.263 | 0.204 | 0.284 | 0.239 | 0.306 |
| 陕西 | 0.281 | 0.303 | 0.312 | 0.323 | 0.348 | 0.345 | 0.372 | 0.365 | 0.405 | 0.386 |
| 甘肃 | 0.208 | 0.263 | 0.224 | 0.283 | 0.258 | 0.304 | 0.284 | 0.325 | 0.315 | 0.345 |
| 青海 | 0.193 | 0.228 | 0.213 | 0.258 | 0.241 | 0.273 | 0.273 | 0.293 | 0.308 | 0.313 |
| 宁夏 | 0.147 | 0.223 | 0.168 | 0.254 | 0.193 | 0.275 | 0.217 | 0.296 | 0.248 | 0.317 |
| 新疆 | 0.125 | 0.217 | 0.148 | 0.237 | 0.173 | 0.254 | 0.204 | 0.273 | 0.239 | 0.293 |
| 全国 | 0.251 | 0.305 | 0.271 | 0.326 | 0.305 | 0.347 | 0.331 | 0.368 | 0.364 | 0.391 |

数据来源:作者整理。

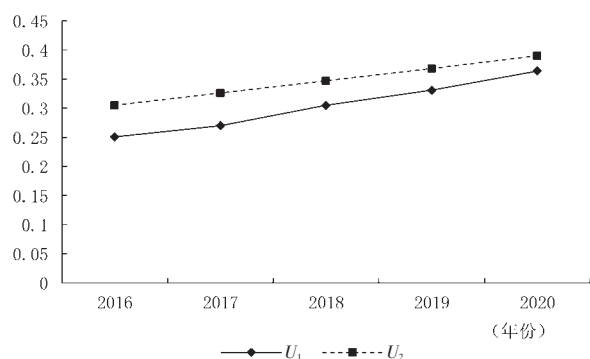


图1 2016—2020年中国制造业数字化转型综合评价指数 U_1 和绿色发展综合评价指数 U_2 变化趋势

数据来源:作者整理。

部分东部地区制造业绿色发展综合评价指数明显高于中西部地区,说明东部地区制造业绿色发展水平高于中西部地区,进一步说明制造业数字化转型

水平与绿色发展水平是一致的,有着密切的关系,从产业发展的角度看,两者是相辅相成的。

尽管中国制造业数字化转型综合评价指数和绿色发展综合评价指数发展趋势是增加的,但是整体而言两者普遍较低,比如2020年数字化转型综合评价指数和绿色发展综合评价指数的全国均值分别为0.364和0.391,说明中国制造业数字化转型和绿色发展相对缓慢。由图1可以看出,制造业数字化转型综合评价指数普遍小于绿色发展综合评价指数,但是,两者的差距随着时间的推移在逐步缩小,说明数字化转型演化趋势与绿色发展演化趋势同步不同速,制造业的数字化转型快于绿色发展,这种发展趋势有利于耦合协调系统向高阶演化。随着人们可持续发展理念的深入和数字经济的迅猛发展,制造业的数字化转型和绿色发展都在加快

推进,数字经济是赋能绿色发展的重要引擎(许宪春等,2019),数字经济具有的高技术、高增长、高清洁特性为推动中国制造业实现绿色发展提供了新思路(韩晶等,2022),因此,相对于绿色发展,制造业的数字化转型更加迫切,尤其是随着中国“双碳”目标的提出,在世界经济下行压力加大和环境保护与资源有限的现实约束下,数字化转型和绿色发展是两大新的赛道,同时也是驱动产业结构升级的新

动能,但归根结底,数字化作为一种新发展模式,为实体经济赋能作用明显,数字化转型是实现绿色高质量发展的重要抓手。

2.耦合度和耦合协调度分析

根据前面的公式及数字化转型综合评价指数和绿色发展综合评价指数,计算2016—2020年中国制造业数字化转型与绿色发展之间的耦合度 C 和耦合协调度 D (见表5)。

表5 2016—2020年中国制造业数字化转型与绿色发展耦合度 C 和耦合协调度 D

| 地区 | 2016年 | | 2017年 | | 2018年 | | 2019年 | | 2020年 | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C | D | C | D | C | D | C | D | C | D |
| 北京 | 0.842 | 0.452 | 0.848 | 0.473 | 0.845 | 0.495 | 0.858 | 0.515 | 0.849 | 0.535 |
| 天津 | 0.811 | 0.382 | 0.820 | 0.403 | 0.817 | 0.423 | 0.821 | 0.443 | 0.819 | 0.463 |
| 河北 | 0.802 | 0.378 | 0.798 | 0.398 | 0.808 | 0.419 | 0.811 | 0.439 | 0.816 | 0.459 |
| 山西 | 0.808 | 0.368 | 0.812 | 0.389 | 0.815 | 0.421 | 0.817 | 0.431 | 0.818 | 0.451 |
| 内蒙古 | 0.815 | 0.363 | 0.823 | 0.382 | 0.826 | 0.402 | 0.827 | 0.422 | 0.824 | 0.442 |
| 辽宁 | 0.793 | 0.349 | 0.804 | 0.369 | 0.811 | 0.389 | 0.816 | 0.409 | 0.812 | 0.429 |
| 吉林 | 0.823 | 0.391 | 0.828 | 0.402 | 0.819 | 0.422 | 0.817 | 0.442 | 0.824 | 0.463 |
| 黑龙江 | 0.808 | 0.288 | 0.813 | 0.309 | 0.821 | 0.329 | 0.819 | 0.359 | 0.822 | 0.379 |
| 上海 | 0.831 | 0.445 | 0.828 | 0.467 | 0.829 | 0.487 | 0.826 | 0.507 | 0.827 | 0.527 |
| 江苏 | 0.823 | 0.423 | 0.818 | 0.443 | 0.823 | 0.463 | 0.822 | 0.477 | 0.819 | 0.497 |
| 浙江 | 0.862 | 0.489 | 0.853 | 0.502 | 0.867 | 0.522 | 0.858 | 0.544 | 0.861 | 0.563 |
| 安徽 | 0.823 | 0.397 | 0.829 | 0.407 | 0.824 | 0.427 | 0.827 | 0.447 | 0.831 | 0.463 |
| 福建 | 0.798 | 0.401 | 0.808 | 0.421 | 0.812 | 0.441 | 0.816 | 0.461 | 0.813 | 0.482 |
| 江西 | 0.804 | 0.392 | 0.812 | 0.412 | 0.813 | 0.432 | 0.821 | 0.452 | 0.819 | 0.479 |
| 山东 | 0.829 | 0.382 | 0.821 | 0.402 | 0.819 | 0.423 | 0.823 | 0.443 | 0.822 | 0.462 |
| 河南 | 0.809 | 0.389 | 0.812 | 0.409 | 0.816 | 0.429 | 0.813 | 0.449 | 0.815 | 0.467 |
| 湖北 | 0.826 | 0.401 | 0.819 | 0.421 | 0.825 | 0.441 | 0.827 | 0.462 | 0.831 | 0.489 |
| 湖南 | 0.821 | 0.412 | 0.831 | 0.432 | 0.829 | 0.452 | 0.832 | 0.473 | 0.835 | 0.492 |
| 广东 | 0.873 | 0.482 | 0.869 | 0.502 | 0.872 | 0.522 | 0.875 | 0.541 | 0.868 | 0.568 |
| 广西 | 0.792 | 0.394 | 0.802 | 0.412 | 0.812 | 0.432 | 0.815 | 0.452 | 0.813 | 0.479 |
| 海南 | 0.793 | 0.413 | 0.810 | 0.423 | 0.811 | 0.442 | 0.817 | 0.467 | 0.813 | 0.482 |
| 重庆 | 0.807 | 0.402 | 0.809 | 0.422 | 0.811 | 0.442 | 0.813 | 0.463 | 0.817 | 0.481 |
| 四川 | 0.821 | 0.411 | 0.813 | 0.433 | 0.816 | 0.453 | 0.815 | 0.474 | 0.819 | 0.493 |
| 贵州 | 0.782 | 0.382 | 0.808 | 0.401 | 0.811 | 0.422 | 0.816 | 0.443 | 0.816 | 0.469 |
| 云南 | 0.793 | 0.379 | 0.803 | 0.399 | 0.812 | 0.409 | 0.808 | 0.429 | 0.811 | 0.447 |
| 陕西 | 0.809 | 0.397 | 0.818 | 0.414 | 0.813 | 0.434 | 0.814 | 0.454 | 0.817 | 0.478 |
| 甘肃 | 0.812 | 0.382 | 0.817 | 0.402 | 0.814 | 0.423 | 0.818 | 0.443 | 0.813 | 0.468 |
| 青海 | 0.787 | 0.379 | 0.803 | 0.399 | 0.802 | 0.419 | 0.809 | 0.439 | 0.811 | 0.452 |
| 宁夏 | 0.803 | 0.369 | 0.806 | 0.389 | 0.808 | 0.408 | 0.811 | 0.429 | 0.809 | 0.442 |
| 新疆 | 0.801 | 0.372 | 0.808 | 0.394 | 0.811 | 0.414 | 0.813 | 0.434 | 0.818 | 0.457 |
| 全国 | 0.813 | 0.395 | 0.818 | 0.414 | 0.821 | 0.435 | 0.823 | 0.455 | 0.824 | 0.475 |

数据来源:作者整理。

根据表5,从耦合度来看,整体而言,2016—2020年,除个别地区的耦合度接近0.8外,绝大多数地区的耦合度稳定在0.8以上,处于高水平耦合阶段,说明中国制造业数字化转型与绿色发展两个子系统之间具备一定的耦合基础,两者之间存在较强的相关性,具有相互依赖、相互作用关系。但是,具

有高水平的耦合度并不说明能够实现高水平的协调发展,根据耦合协调度的计算公式,子系统之间的耦合协调度不仅与耦合度有关,还与子系统的协调度有关,即与子系统各自的综合发展水平密切相关,如果子系统综合发展水平较低,那么子系统之间依然不能实现高水平的协调发展。

从耦合协调度来看,由表3和表5可知,各地区耦合协调度普遍偏低,绝大多数地区都处于低度耦合协调和适度耦合协调区间,只有北京、上海、浙江、广东四个地区的耦合协调度勉强介于高度耦合协调区间。从全国均值来看,中国制造业数字化转型和绿色发展系统耦合协调度从2016年的0.395增加到2020年的0.475,说明两者之间耦合协调状态由低度耦合协调向适度耦合协调转变,耦合协调水平在不断提升,呈现健康发展的态势,同时也说明当前中国制造业数字化转型与绿色发展的相互融合和互促互济的作用比较弱,部分原因在于两者的综合发展水平较低,由表4可以看出,两者的发展指数都比较小,而且中国制造业的数字化转型综合评价指数低于绿色发展综合评价指数,虽然绿色发展的对数字化转型起到一定的倒推和助力作用,但是由于当前中国制造业数字化转型水平相对较低,整体上来说,两者之间互动较少,协同作用也就较弱。

综上,尽管现阶段中国制造业数字化转型与绿色发展两个子系统之间耦合度较高,存在较强的相

关关系,具备一定的耦合基础,但是由于两个子系统在样本考察期的综合发展水平普遍较低,而且出现同向不同速的发展现象,从动态来看,两个子系统之间的耦合协调度处于由低度耦合协调向适度耦合协调发展的状态,无论是制造业的数字化转型还是绿色发展,均具有较大的提升空间,两者之间的协调发展水平及相互促进状态会随着各自的发展持续提升,进而实现长久健康的协调发展状态。

3. 耦合协调系统演化动力分析

数字化转型和绿色发展都是影响制造业数字化转型—绿色发展耦合协调系统演化的重要因素,两者的协同作用推动系统演化发展,根据前面系统演化的动力模型,先设数字化转型综合评价指数 U_1 为序参量 q_1 ,绿色发展综合评价指数 U_2 为快变量 q_2 ;再设绿色发展综合评价指数 U_2 为序参量 q_1 ,数字化转型综合评价指数 U_1 为快变量 q_2 ,利用公式(6)和公式(7),根据2019年和2020年中国30个省(区、市)数字化转型综合评价指数和绿色发展综合评价指数进行估计,将估计结果整理成表6。

表6 中国制造业数字化转型—绿色发展耦合协调系统演化的估计结果

| | λ_1 | a | 可决系数 | λ_2 | b | 可决系数 |
|---|------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| 数字化转型 U_1 为 q_1 绿色发展 U_2 为 q_2 | 0.013 (0.001) | -0.116 (0.001) | $R^2=0.892$ adj $R^2=0.821$ | -0.049 (0.000) | -0.012 (0.019) | $R^2=0.827$ adj $R^2=0.802$ |
| 绿色发展 U_2 为 q_1 数字化转型 U_1 为 q_2 | 0.019 (0.013) | -0.031 (0.024) | $R^2=0.829$ adj $R^2=0.798$ | -0.061 (0.000) | -0.042 (0.014) | $R^2=0.816$ adj $R^2=0.783$ |

数据来源:作者整理。

注:括号内的数字为相应系数对应的概率值。

由表6可知,根据前面的绝热近似条件可以得出,模型的估计结果与模型的假设是一致的,即数字化转型综合评价指数 U_1 和绿色发展综合评价指数 U_2 均为系统的序参量;参数 a 、 b 、 λ_1 、 λ_2 均通过显著性水平为5%的显著性检验,说明在中国制造业数字化转型—绿色发展耦合协调系统由低级向高级演化的过程中,数字化转型和绿色发展均为系统演化的动力因素。

先来看数字化转型为序参量时耦合协调系统演化的情况。根据表6和公式(3)可以得到: $U_2=0.245U_1^2$,表明中国制造业绿色发展受数字化转型的影响,绿色发展随着数字化转型的变化而变化,而且呈同向变化的趋势。根据表6、公式(4)和公式(5),分别得到系统演化方程和相应的势函数: $\dot{U}_1 = -0.013U_1 + 0.028U_1^3$, $V(U_1) = 0.0065U_1^2 -$

$0.0071U_1^4$,令 $\dot{U}_1=0$,可以求得序参量 U_1 的三个定态解: $U_1=0$ 和 $U_1=\pm 0.677$ 。据此判断,当定态解 $U_1=0$ 时,此时势函数的二阶导数大于0,说明在定态解处势函数有极小值;当 $U_1=\pm 0.677$ 时,此时势函数的二阶导数小于0,说明在定态解处势函数有极大值(见图2(a))。当系统的状态参数和状态变量发生变化时,系统的势函数会发生相应的变化,从初始的稳定状态($U_1=0$)到新的稳定状态($U_1=\pm 0.677$),或者从一种稳定状态($U_1=-0.677$)到另一种稳定状态($U_1=+0.677$)。

基于同样的方法和过程,可以求得绿色发展作为序参量时系统的三个定态解: $U_2=0$ 和 $U_2=\pm 0.943$ (见图2(b))。

以上分析过程说明,数字化转型和绿色发展即是决定耦合协调系统演变过程的序参量,两者形成

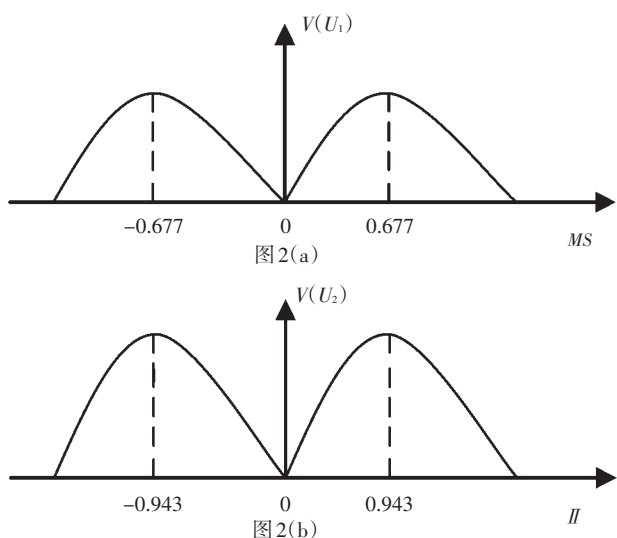


图2 中国制造业数字化转型—绿色发展耦合协调系统演化状态

数据来源:作者整理。

动态演化的合力推动耦合协调系统由无序向有序的方向演化。系统中各子系统之间的协同机制是系统进行演化的前提条件和重要基础,是系统由无序向有序演化的关键。在中国制造业数字化转型—绿色发展耦合协调系统运行的过程中,两个子系统之间的非线性协同作用通过促进系统的完善或突变,使耦合协调系统不断向最优方向演化。根据前面参数的含义,无论是以数字化转型为序参量,还是以绿色发展为序参量,反映两者关系的公式(3)的系数均大于0,说明两个子系统既具有相互促进的关系,又具有相同的变化趋势,这与前面对于两者的发展指数的分析是一致的,正是两个子系统之间的协同发展关系推动耦合协调系统演化升级有序进行,两者缺一不可。

一方面,中国的工业化促进经济高速增长,但工业化排放的污染物也导致环境破坏和空气污染,为应对气候变化和保护环境,绿色低碳发展成为全世界的共识,倒逼传统产业节能降碳改造、工业领域低碳工艺革新和数字化转型。中国《“十四五”工业绿色发展规划》提出,实施绿色制造工程,建立健全工业绿色发展长效机制,走高效、清洁、低碳、循环的绿色发展道路。企业要实现全产业链的节能减排,就必须进行数字化转型,数字技术的发展和应用在形成增长新动能的同时,也为节能减排提供了新视角,缓解对环境与能源造成的压力,在促进产出增加的同时实现绿色发展。据相关国际组织研究,数字技术有助于在全球范围减少约15%的二

氧化碳排放(王于鹤等,2021)。另一方面,绿色低碳发展是数字化发展的重要推力,中国要加速推进制造业尤其是高碳行业进行数字化转型。当前,大多数企业已经充分认识到数字化的趋势与价值,中国制造业的数字化转型也在加快推进,尤其是在“双碳”背景下,“双碳”目标对中国制造业转型提出了新的更高要求,制造业要以绿色低碳发展为导向,全产业链各个环节推进减污降碳,助力碳达峰和碳中和目标的实现,随着企业在硬件方面投入的增加,软件能力提升的重要性也更加显现,加速了数字技术在制造业领域的应用。

因此,数字化转型和绿色发展既是中国制造业面临的机遇,同时也是挑战,在两者融合协调发展的过程中,需要政府介入进行方向牵引和政策刺激,以确保耦合协调系统向着更高质量和更高效的方向不断演化,这是政府在数字化转型赋能绿色发展过程中所要展现的主要功能,可以预见,随着政府对制造业数字化转型和绿色发展的大力推进,两个子系统将迎来深度耦合协调发展阶段。

四、结论与对策建议

1. 结论

本文分别构建制造业数字化转型和绿色发展的评价指标体系,运用熵权法和综合指数法得到2016—2020年中国30个省(区、市)制造业数字化转型综合评价指数和绿色发展综合评价指数,在此基础上计算中国制造业数字化转型—绿色发展耦合协调系统的耦合度和耦合协调度,分析中国制造业数字化转型和绿色发展两个子系统的耦合协调水平,并进一步利用哈肯模型分析该系统演化发展的动力因素,得到以下结论:

第一,2016—2020年中国制造业数字化转型综合评价指数与绿色发展综合评价指数逐年增加,呈现出稳步上升的特征,制造业数字化转型综合评价指数小于绿色发展综合评价指数,但是,两者的差距随着时间的推移在逐年缩小,而且东部地区制造业的数字化转型水平与绿色发展水平均高于中西部地区,从产业发展的角度看,两者是相辅相成的。

第二,中国制造业数字化转型与绿色发展两个子系统之间的耦合度在0.8以上,处于高水平耦合

阶段,具备一定的耦合协调基础。但是由于两个子系统在样本考察期的综合发展水平普遍较低,而且出现同向不同速的发展现象,从动态来看,两个子系统之间的耦合协调度从2016年的0.395增加到2020年的0.475,处于由低度耦合协调向中度耦合协调发展的状态。

第三,数字化转型和绿色发展是决定耦合协调系统演化过程的序参量,即动力因素,两个子系统之间存在协同发展的关系,两者形成动态演化的合力推动耦合协调系统由无序向有序的方向演化。

2. 对策建议

基于前文的分析过程,结合中国制造业数字化转型与绿色发展的实践,提出以下对策建议:

第一,推进制造业低碳绿色发展,以绿色发展带动数字化转型。一是加强顶层设计,制定实现绿色发展的路线,并配以相应的政策支持和技术支持。同时,将绿色低碳理念贯穿制造业发展全过程,使绿色低碳发展成为制造业产业体系的发展底蕴。二是转变高排放、低效率的传统发展模式,提升绿色生产率。摒弃牺牲环境的粗放增长模式,根据发展战略及区域减排政策动态制定与调整碳排放门槛,减少对生产要素的盲目浪费,提高投入要素的合理配置与综合利用。三是深入实施绿色低碳转型战略,推动节能降碳、超低排放和清洁生产,积极落实《2030年前碳达峰行动方案》和《“十四五”工业绿色发展规划》,实施绿色制造工程,走绿色发展道路。

第二,加快制造业数字化转型,以数字化转型赋能绿色发展。一是制定数字化战略,提升数字化水平。通过应用人工智能、云计算、区块链等新一代信息技术,重构制造业企业的关键环节,实现数字技术与企业生产、管理等业务的融合,将数字技术的应用落到实处,提升制造业的数字化水平,助力绿色发展。二是加快传统制造业的数字化转型,培育绿色发展新动能。积极引导新一代信息技术与传统制造业融合发展,构建数字技术共享平台,依托平台加强企业合作,加快前沿数字技术对传统制造企业的改造,提升传统制造业的数字化水平,从而带动制造业的数字化转型。三是加大制造业数字化人才的培养力度和引进力度。鼓励企业与高校、科研院所合作,联合培养既懂技术又懂业务兼具绿色发展意识的数字化人才。同时,加大对数

字化人才引进的投入力度,通过股权激励、项目分红等多种途径和制定优惠政策引进国内外数字化人才和创新团队。

第三,建设绿色数字化生态系统,促进数字化转型与绿色发展协同发展。一是以生态为根本,将生态环境保护融入制造业产业链发展全过程,建立健全绿色低碳循环发展的生产制造体系,同时将绿色发展的具体措施嵌入数字化生态系统中的各个方面,加快形成制造业的绿色生产制造方式,提高制造业绿色发展水平。二是以数字技术为基础,利用数字技术积极开展在制造业产业链各个环节中的应用,提升企业的数字化运营和管理水平,形成基于数字技术的低碳环保解决方案,以建立绿色低碳的数字化生态系统,促进低碳环保与数字技术的深度融合,以数字化引领绿色化,以绿色化带动数字化。

第四,发挥政府引领作用,强化数字基础设施建设。一是加快“新基建”的建设步伐,建立完善的数字基础设施体系。针对中国制造业数字化转型存在的区域异质性,实施差异化战略。具体表现为,强化东部地区制造业数字化转型的发展优势,形成制造业数字化转型的有效模式;提高中西部地区网络基础设施的应用水平,加大对新一代信息技术产业的投资力度,加快促进新一代信息技术在制造业各领域中的应用,提高数字技术产业的研发创新和融通水平。二是有效发挥财税政策的支持作用,加大对数字产品及数字服务需求侧的政策支持力度。政府通过相应的政策工具鼓励企业深入推进技术创新,研发创新型数字技术,生产能耗低的绿色数字产品;为数字产品和数字服务创造更大的市场需求,倒逼部分传统产业进行数字化转型。

参考文献

- [1] Marco S, Carlo A, Francesco B, et al.. Contextual Impacts on Industrial Processes Brought by the Digital Transformation of Manufacturing: A Systematic Review [J]. Sustainability, 2019(3).
- [2] 沈恒超. 中国制造业数字化转型的特点、问题与对策 [J]. 中国经济报告, 2019(5).
- [3] 陈剑, 黄朔, 刘运辉. 从赋能到使能: 数字化环境下的企业运营管理 [J]. 管理世界, 2020, 36(2).
- [4] 周慧慧, 李海霞, 赵琳瑞. 制造业数字化转型对绿色创新绩效的影响研究: 数字化水平的调节作用 [J]. 科技与管

- 理,2021,23(1).
- [5]江小涓,孟丽君.内循环为主、外循环赋能与更高水平双循环:国际经验与中国实践[J].管理世界,2021(1).
- [6]贾军.中国制造业绿色发展的锁定形成机理及解锁模式[J].软科学,2018,30(11).
- [7]张峰,宋晓娜,董会忠.资源禀赋对制造业绿色转型升级的驱动机制:基于空间 Durbin 模型的解释[J].华东经济管理,2019,33(7).
- [8]唐勇军,李鹏.董事会特征、环境规制与制造业企业绿色发展:基于2012—2016年制造业企业面板数据的实证分析[J].经济经纬,2019,36(3).
- [9]杨建亮,唐方成,顾世玲,等.创新驱动制造业绿色发展保障机制研究[J].管理现代化,2020,40(2).
- [10]宋晓玲,李金叶.产业协同集聚、地方政府竞争与制造业绿色发展[J].经济经纬,2022,39(4).
- [11]王锋正,刘向龙,张蕾,等.数字化促进了资源型企业绿色技术创新吗?[J].科学学研究,2022(2).
- [12]靳毓,文雯,何茵.数字化转型对企业绿色创新的影响:基于中国制造业上市公司的经验证据[J].财贸研究,2022(7).
- [13]韩晶,陈曦,冯晓虎.数字经济赋能绿色发展的现实挑战与路径选择[J].改革,2022(9).
- [14]戴翔,杨双至.数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型[J].中国工业经济,2022(9).
- [15]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).
- [16]陈诗一.能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J].经济研究,2009,44(4).
- [17]王于鹤,王娟,邓良辰.“双碳”目标下能源行业数字化转型的思考与建议[J].中国能源,2021(10).
- [18]武春友,刘岩,王恩旭.基于哈肯模型的城市再生资源系统演化机制研究[J].中国软科学,2009(11).
- [19]韩晶,陈曦.数字经济赋能绿色发展:内在机制与经验证据[J].经济社会体制比较,2022(2).

The Coupling Coordination between Digital Transformation and Green Development of Manufacturing Industry under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality

Xue Hexiang

Abstract: Under the background of Carbon Peak and Carbon Neutrality, promoting the digital transformation and green development of the manufacturing industry is a key guarantee for the transformation and upgrading of China's manufacturing industry. The digital transformation comprehensive evaluation index and green development comprehensive evaluation index of China's manufacturing industry increase year by year, while the digital transformation comprehensive evaluation index is smaller than the green development comprehensive evaluation index, but the gap between the two is narrowing year by year with the passage of time. The coupling coordination degree between the two subsystems of manufacturing digital transformation and green development increased from 0.395 in 2016 to 0.475 in 2020, which is in the development stage from low coupling coordination to moderate coupling coordination. There is a cooperative development relationship between the two subsystems, and they form a dynamic evolution force to promote the system upgrading from disorder to order. China should take measures to promote the low-carbon and green development of the manufacturing industry, accelerate the digital transformation of the manufacturing industry, build a green digital ecosystem and strengthen the construction of digital infrastructure, so as to promote the digital transformation and green development of the manufacturing industry.

Key Words: Carbon Peak; Carbon Neutrality; Digital Transformation; Green Development; Manufacturing Industry

(责任编辑:张子)