

# 碳达峰目标下中国绿色低碳循环发展的协同效应研究

胡剑波<sup>1</sup>,王楷文<sup>2</sup>

(1. 贵州财经大学经济学院,贵州 贵阳 550025; 2. 贵州财经大学大数据应用与经济学院,贵州 贵阳 550025)

**摘要:**探索中国绿色低碳循环发展的协同效应,对于推动环境治理体系新篇章、建设美丽中国具有典型意义。阐述了绿色低碳循环发展的科学要义,构建了复合系统协同发展评价体系,并利用 LSTM-BP 神经网络对不同模式下的发展路径进行预测。研究发现,2001—2020 年,各子系统实现了由低水平有序向中水平有序的转变,其中社会和资源子系统已步入高水平有序阶段;复合系统自 2013 年步入中水平协同阶段,这得益于政策的宏观调控、社会的转型进步、经济的高质量发展、能源的优化调整、资源的高效利用以及环境的持续向好。未来在碳达峰目标导向下,子系统协同增效将推动复合系统高质量发展。

**关键词:**碳达峰;绿色低碳循环发展;中国路径;协同效应;LSTM-BP 神经网络

**中图分类号:**F124.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4970(2022)05-0062-12

在气候问题日益凸显的背景下,如何实现经济发展与减污降碳协同共进,依然面临着较为严峻的挑战。2021 年 2 月,国务院印发《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》,强调建立健全绿色低碳循环发展体系,促进经济社会发展全面绿色转型,是解决我国资源环境生态问题的基础之策。2021 年 10 月,《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》相继出台,共同构建了中国碳达峰、碳中和“1+N”政策体系的顶层设计。2022 年 1 月,习近平总书记在中共中

央政治局第三十六次集体学习时强调“减排不是减生产力,也不是不排放,而是要走生态优先、绿色低碳发展道路。”<sup>[1]</sup>新发展道路需切实满足社会经济与生态环境协同发展的内在要求,避免走经济发展“快而不优”的老路,而推动绿色低碳循环体系协同增效的实质在于发展模式的创新和发展路径的选择。因此,探索符合中国绿色低碳循环发展的现代化道路,对实现经济高质量增长和推动生态文明建设都具有重要的理论意义和现实意义。鉴于此,本文深入研讨了经济、社会、能源、资源、政策和环境等多个领域的协同发展问题,以期为中国建立绿色低

基金项目:贵州省哲学社会科学规划重点课题(21GZZD58)

作者简介:胡剑波(1982—),男,教授,博士,主要从事低碳经济与绿色发展研究。E-mail:hjbb@126.com

碳循环发展体系提供理论基础和实证支撑。

## 一、文献综述

### 1. 绿色低碳循环发展研究

Pearce 于 1989 年首次提出了“绿色经济”一词,他认为社会经济的发展必须在生态环境所能承载的范围内进行<sup>[2]</sup>。联合国环境规划署指出绿色发展不仅可以有效降低环境风险和生物稀缺,同时还将提高人类福祉<sup>[3]</sup>。我国学者崔如波认为绿色发展是兼顾经济效益与生态保护的更高级的可持续发展模式<sup>[4]</sup>。诸大建等指出绿色发展强调将资本投资于资源节约和环境友好的领域,通过增加人力资本和减少资源消耗来推动经济的增长<sup>[5]</sup>。胡鞍钢等认为绿色发展的理论前提是经济、自然和社会系统的共生性<sup>[6]</sup>。在绿色发展体系下,低碳技术、可再生能源被转化为有利于社会发展的先进生产力,通过绿色运行机制,实现经济高质量增长。绿色发展将环境与经济合二为一,整个过程实行绿色先导原则,充分体现了自然环境的价值,是社会可持续发展的必然产物。

英国于 2003 年率先提出“低碳经济”发展理念,即以更少的能源投入、更低的环境污染,换取更多的经济价值。随后,Stem 等通过大量的经验数据,呼吁世界各国向低碳经济转型升级<sup>[7]</sup>。发展低碳经济要重点关注能源效率与能源结构,通过技术和制度的创新,推动人类可持续发展<sup>[8]</sup>。低碳经济的发展方向是低碳发展,其核心在于低碳、目标在于人与自然和谐共处<sup>[9]</sup>。低碳发展并不是一味地强调减少碳排放,而是通过构建新的机制体制,提高减碳效率的同时,推动社会和经济的协同发展<sup>[10]</sup>,而提高减碳效率的关键在于低碳技术的创新以及清洁能源消费比重的增加,二者为低碳发展提供根本动力。在碳达峰目标下,低碳转型将引起社会广泛而深刻的系统性变革,低碳将成为主流的发展模式。

Pearce 等于 1990 年正式提出“循环经济”发展概念,其核心思想可以总结为“内外均衡、一体循环”<sup>[11]</sup>。随后,英、法、德等国家纷纷开展循环经济试点工作,循环经济发展模式逐渐在世界范围内达成共识<sup>[12]</sup>。我国学者对循环发展体系进行了探索<sup>[13-14]</sup>,不断丰富其理论内涵并付诸实践。所谓循环经济,是指通过物质资源的重复循环利用,进而提高经济效益的发展模式<sup>[15]</sup>,作为一种科学的、全新的经济发展模式,循环发展摒弃了以往单程式的发

展模式,主张“资源—产品—再生资源”的新型循环式路径,资源效用的最大化和最优配置是循环经济理论研究必须坚持的准则<sup>[16]</sup>。不难理解,循环经济从源头上解决了资源环境约束困境,是新时期推动经济高质量发展的必然选择,也是建设美丽中国的必由之路。

### 2. 协同效应研究

Harken 于 1977 年系统地阐述了协同理论:在一个复合系统中,子系统之间的相互作用将汇聚成一种新生力量,推动复合系统实现由无序到有序的转变<sup>[17]</sup>。基于协同理论,部分学者针对不同地区,例如京津冀、长三角、粤港澳等区域展开协同研究,探索相邻城市之间进行物质和信息等要素的传递,实现资源的最优配置,进而推动区域共同发展<sup>[18-20]</sup>。部分学者针对不同行业、某些技术领域的协同效应进行分析,探索不同行业之间的协同发展路径<sup>[21-22]</sup>。关于协同效应的测算方法,大体可分为三类:一是采用耦合协调度模型,分析不同系统之间的协同关系,例如李建豹等测算了江苏省人口城镇化和能源消费 CO<sub>2</sub> 排放的耦合协调度<sup>[23]</sup>。仁保平等研究了黄河流域经济增长、产业发展和生态环境之间的耦合协同关系<sup>[24]</sup>。二是基于面板 VAR 模型,通过实证检验探索各个系统之间是否存在协同效应,例如陈亮等研究了金融发展、技术进步与碳排放之间的协同关系<sup>[25]</sup>。杨清可等对区域一体化和城市土地利用效率的协同效应进行探索<sup>[26]</sup>。三是采用复合系统协同度模型,探索多个子系统之间的有序度和协同度,例如陈昭等测度了粤港澳大湾区科技创新的协同水平<sup>[27]</sup>。项国鹏等则是对中国省域创业生态系统的协同效应进行分析<sup>[28]</sup>。

综上所述,学者对不同的经济模式、多系统协同发展等方面开展了大量有益的研究,但既有文献的研究视角多基于某一种经济模式,鲜有学者将多种经济发展模式放置于同一框架进行深入评测,且各指标之间的逻辑关系缺乏缜密性。同时,绿色低碳循环发展是一个较为新颖的概念,亟须建立一个相对完善、全面的评测指标体系,对其发展水平进行科学的考量,为其优化路径提供决策依据。相较于已有文献,本文的边际贡献主要体现在:第一,理论与实证相结合。本文基于理论视角,丰富了绿色低碳循环发展的本质内涵,总结了绿色低碳循环发展的中国路径;同时,基于实证方法,研究了复合系统的

协同效应,为中国绿色低碳循环发展提供实证数据支撑。第二,指标体系与实证模型优化。将影响绿色低碳循环发展经济体系的30个重要指标放置于协同效应模型的框架下,构建包含社会、经济、能源、资源、政策和环境等领域的多个系统,组成全新的绿色低碳循环发展系统,梳理了各个指标之间的内部关系网络,实证分析了复合系统的协同效应。第三,预测模型构建。利用LSTM-BP神经网络对中国在不同发展情境下的复合系统协同度进行前景预测,以期找寻符合中国绿色低碳循环发展经济体系协同发展的路径。本文的研究框架见图1。

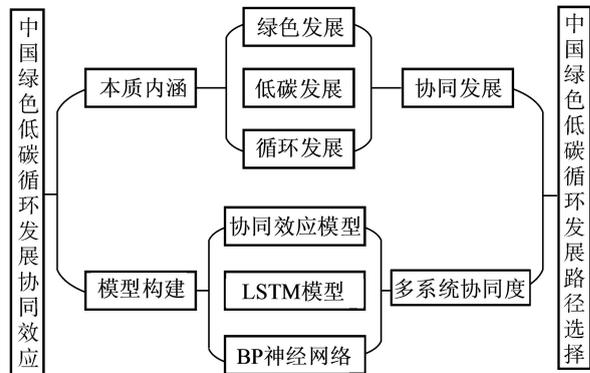


图1 中国绿色低碳循环发展研究框架

## 二、绿色低碳循环发展的内涵及中国路径

### 1. 绿色低碳循环发展的本质内涵

绿色低碳循环发展是将绿色发展、低碳发展、循环发展的理念、原则、规律以及特征进行有机融合,有效突破资源环境的约束、进而实现多领域协同增效的经济发展体系。具体来看,绿色发展与可持续发展观一脉相承,以人与自然命运共同体为核心,以永续发展为目的,以实现社会与生态和谐共生为最终结果,推动人类向绿色文明的进步;低碳发展是贯彻新发展理念、构建新发展格局的基本方法,也是节能减排、减污降碳等政策措施的深入与拓展,以经济高质量增长为前提,降低CO<sub>2</sub>等温室气体的排放为核心理念,为充分解决当今世界日益严峻的气候问题提供了理论基础与现实路径;循环发展是落实科学发展观的重要途径,它是整个社会以及生态系统良性循环的经济模式,强调通过实施“3R”原则,将经济系统和谐融入生态系统的物质和能量循环之中,最终形成“资源-产品-再生资源”的科学发

展体系。不难理解,绿色发展是低碳发展的组织框架,低碳发展是绿色发展的根本抓手;循环发展是实现低碳发展的基本路径,低碳发展是循环发展的必然结果。三者相互融合、相互促进,同时又存在一定的区别:绿色发展是以建设生态文明、人与自然和谐共生为出发与归宿点,强调整个经济活动对生态环境的影响;低碳发展是以降低碳排放为主旨,是应对全球气候变化为宗旨而催生出的经济发展模式;循环发展侧重于资源的循环再利用,以提高资源有效利用率与资源产出率为目标。只有准确地把握好绿色、低碳、循环发展之间的联系与区别,才能更好地实现三者的协同增效。

### 2. 绿色发展的中国路径

2001—2020年,中国经济实现了奇迹般的增长,同时在建设生态文明背景下,绿色发展模式应运而生;2010年中央经济工作会议中首次提出中国要全面发展绿色经济,以此推动节能减排政策的深入实施。党的十八大报告中明确提出绿色发展是建设生态文明的重要手段,也是推动国民经济健康发展的必然选择,更是持续改善民生、增进人民福祉的重要实现路径。党的十九大以来,我国持之以恒地推进绿色发展与美丽中国建设,不断完善生态文明建设体系,例如建立用能权、排污权、生态补偿、碳排放权交易等制度。在一系列绿色政策推动下,社会、经济和政治等方面蓬勃发展,取得了傲人的成绩。《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》(简称“十四五”规划,下同)进一步提出要大力推动经济社会全方位绿色转型。从国家层面看,我国将绿色发展纳入了国民经济和社会、民生发展的框架之中,通过绿色化的政策手段,加强了绿色市场体系与绿色发展路径的顶层设计与统筹规划;从企业层面看,绿色科技优化了产业结构,建立了环境友好型的绿色企业;从人民层面看,绿色生活理念为绿色经济发展奠定了坚实的思想基础,绿色行为方式为社会的绿色发展赋能增效。在“双碳”目标下,绿色已成为现代化社会体系中,经济高质量发展的鲜明底色。

### 3. 低碳发展的中国路径

2006年,我国发布了《气候变化国家评估报告》,明确提出走“低碳经济”发展之路;2009年,在哥本哈根气候大会上,中国承诺到2020年单位GDP二氧化碳排放将比2005年降低40%~45%,为我

国发展中国特色低碳道路敲定了方向;2020年,进一步指出到2030年,单位GDP二氧化碳排放将比2005年下降65%以上。“十三五”时期,我国碳排放强度降低18.8%;2020年,我国碳排放强度相比于2005年降低48.8%,超额完成了碳减排任务,基本扭转了碳排放增速过快的局面。然而值得深思的是,我国在全球价值链分工体系中仍处于较低水平、产业结构不合理、单位GDP能耗较高、清洁能源消费占比较低等一系列问题,使得低碳发展任重道远。因此,我国在“十四五”规划中明确提出,到2025年非化石能源消费比重将提高到20%,单位GDP碳排放将降低18%,单位GDP能耗将下降13.5%。这些约束性指标无一不体现中国在降低碳排放、应对气候变化方面的决心与担当。习近平总书记不止一次强调“绿水青山就是金山银山”的发展理念,这是对低碳发展最为形象的概括,也是最为明确的指示。结合中国实际以及可持续发展观等生态文明理念,中国化的低碳发展不仅是一种发展理念,更是一种发展模式;不仅是经济问题,更是涉及多个领域协同发展的综合问题。

#### 4. 循环发展的中国路径

中国是发展中国家,也是人口大国,经济的高速发展伴随着资源的大量消耗,发展循环经济无疑是保持经济发展与资源利用之间平衡关系的最优路径之一。2008年,我国通过了《循环经济促进法》,标志着循环经济的法制建设迈出了坚实的一步,为之后的循环发展奠定了强有力的法律基础。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》指出发展循环经济是推进生态文明建设、实现可持续发展的重要途径和基本方式;资源产出率作为一个重要的指导性指标被纳入循环经济体系之中;《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》明确提出全国要积极推进循环经济评价体系的建立。据中国循环经济协会的测算,“十三五”时期,主要资源产出率提高了约26%,单位GDP能耗大幅下降,资源循环利用产业产值达3万亿元,循环经济对我国的综合贡献率超过了25%,资源的循环利用已成为保障我国资源安全的重要途径。《“十四五”循环经济发展规划》中提出,到2025年,主要资源产出率相较于2020年提高20%,单位GDP能耗降低13.5%,资源循环利用产业产值达5万亿元等一系列硬性指标。新常态下,

我国大力建设物质资源循环利用的新型产业体系,有效提高了资源产出率,推动循环发展迈上新台阶。

### 三、模型构建、变量选取与数据来源

在绿色低碳循环发展理论的基础上,考虑到经济系统是绿色低碳循环发展的物质基础,社会系统是绿色低碳循环发展的重要引擎,能源系统是绿色低碳循环发展的关键动力,资源系统是绿色低碳循环发展的支撑力量,政策系统是绿色低碳循环发展的制度保障,环境系统是绿色低碳循环发展的自然前提,构建了不同于现有多数文献的复合系统协同效应模型,通过中国的实践经验数据,较为全面地测度了自21世纪以来中国绿色低碳循环发展的协同效应;同时采用LSTM-BP神经网络模型,对复合系统的协同度进行科学准确地预测评估,以期为中国在碳达峰目标下,绿色低碳循环发展协同增效提供必要的实证数据支撑。

#### 1. 协同效应模型构建

序参量决定了复合系统由无序到有序的演变速率,有正负之分,即对系统产生正向作用和负向作用的序参量。设子系统序参量为 $w_{ij}$ ,其中, $i$ 为子系统序号, $j$ 为指标序号。为消除分母为零导致结果无意义的影响,通常在上下限的基础上乘以一个系数 $1+e$ 或 $1-e$ ,其取值根据具体研究内容而定,既反映真实的协同水平,同时也保证原始数据的基本特征<sup>①</sup>。

#### (1) 指标有序度模型

指标有序度模型计算公式为

$$q_{ij} = \begin{cases} \frac{w_{ij} - \alpha_{ij}}{\beta_{ij} - \alpha_{ij}} & j \in (1, m) \\ \frac{\beta_{ij} - w_{ij}}{\beta_{ij} - \alpha_{ij}} & j \in (m + 1, n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $q_{ij}$ 为第 $i$ 个子系统、第 $j$ 个指标、第 $t$ 年的有序度; $\alpha_{ij}$ 、 $\beta_{ij}$ 分别为序参量 $w_{ij}$ 的下限和上限, $\alpha_{ij} \leq w_{ij} \leq \beta_{ij}$ ;  $m$ 为正负指标个数的分界点,当 $j \in (1, m)$ , $w_{ij}$ 为正向指标,当 $j \in (m+1, n)$ , $w_{ij}$ 为负向指标; $n$ 为影响该系统运行的指标个数。

#### (2) 子系统有序度模型

基于式(1)测算指标有序度,进而利用几何平

<sup>①</sup>通常而言,时间序列越长,序参量的极差值越大,越能较好地反映出协同水平。本文充分考虑了样本期间内指标体系的变动速度,最终确定 $e$ 取值为0.1。

均法对指标有序度进行集成,得到子系统的有序度:

$$w_{it} = \sqrt{\prod_{j=1}^n q_{ijt}} \quad (2)$$

式中: $w_{it}$ 为第*i*个子系统第*t*年的有序度。

### (3) 复合系统协同度模型

几何平均法是测算复合系统协同度较为有效的方法之一,将时间维度放置于系统协同度的框架中,对复合系统在一段时间内的动态平衡度进行测算。由于复合系统的协同程度不仅由各子系统所影响,还受到子系统内部序参量的相互作用,因此,复合系统协同度的公式如下:

$$L_t = \phi \sqrt{\prod_{i=1}^v (w_{it}^1 - w_{it}^0)}$$

其中

$$\phi = \frac{\min(w_{it}^1 - w_{it}^0)}{|\min(w_{it}^1 - w_{it}^0)|} \quad (3)$$

式中: $\phi$ 为子系统对复合系统协同度的作用方向; $w_{it}^0$ 为子系统在初始时刻 $t_0$ 的有序度; $w_{it}^1$ 为子系统在 $t_1$ 时刻的有序度。 $L \in [-1, 1]$ ,其值越大,表示协同度越高,反之越低。本文将复合系统协同度划分为6级,依次为高度不协同( $L \in [-1, -0.66)$ )、中度不协同( $L \in [-0.66, -0.33)$ )、轻度不协同( $L \in [-0.33, 0)$ )、低水平协同( $L \in [0, 0.33)$ )、中水平协同( $L \in [0.33, 0.66)$ )和高水平协同( $L \in [0.66, 1)$ )。

## 2. LSTM 模型构建

LSTM 模型在传统 RNN 神经网络的基础上,通过上下两路非对称的设计,将长短期信息同时考虑在内,长期记忆路径( $C_{t-1} \sim C_t$ )通过线性层进行计算,而短期记忆路径( $h_{t-1} \sim h_t$ )的计算将经过额外的网络以及非线性层,有效地更新了神经网络参数,解决了长期依赖问题导致的性能瓶颈。由于 LSTM 模型拥有强大的门控系统,分别为遗忘门、记忆门以及输出门,因此可以控制性地储存或丢弃信息,LSTM 神经网络结构如图 2 所示,第一步解决从细胞状态中所要丢弃的信息,由遗忘门的 Sigmoid 层实现;第二步解决从细胞状态中所要储存的信息,由输入门的 Sigmoid 层决定数值的更新;第三步解决从细胞状态中所要输出的内容,tanh 是指单元状态更新值的激活函数,即通过 tanh 将细胞状态进行规范化处理,并将其乘以 Sigmoid 层的输出,最终由输出门将有效信息进行输出。

## 3. BP 神经网络构建

BP 神经网络采用梯度下降策略,逐层调节权重

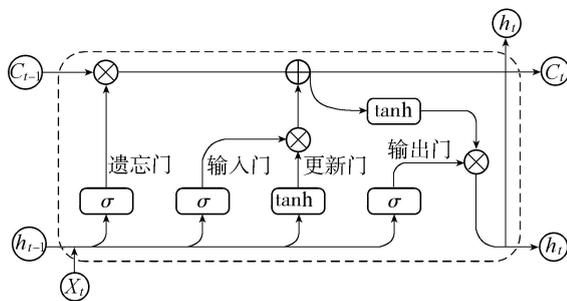


图 2 LSTM 神经网络结构

和阈值,最终得到与期望向量在误差允许范围内的输出向量。BP 神经网络结构如图 3 所示, $X$  表示输入值, $Y$  表示输出值,数据由输入层进入神经网络,经过加权运算传递到隐含层,隐含层通过激活函数将数据处理后输送到输出层,输出层通过损失函数计算将误差反向传递,经过层层迭代,不断修正各层神经元之间的权重和阈值,使得误差最小<sup>①</sup>。

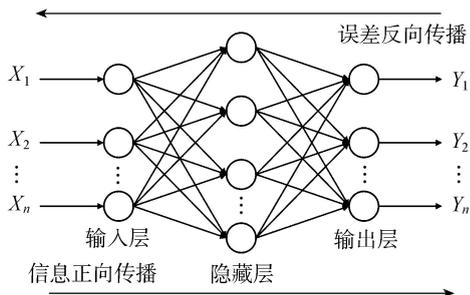


图 3 BP 神经网络结构

## 4. 指标选取、数据来源及处理

为保证数据的真实性与准确性,文中数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国科技统计年鉴》等年鉴以及《国民经济和社会发展统计公报》等权威性报告,样本区间为 2000—2020 年<sup>②</sup>。由于指标单位的不同可能会对实证结果产生影响,本文利用 SPSS 26.0 对数据进行标准化处理;同时,为保证绿色低碳循环发展体系的可行性与精确性,通过相关性分析剔除相关性较弱的指标,最终选取 30 个指标(表 1),各指标之间的动态关系如图 4 所示。

① 本文构建共有 3 层网络结构的 BP 神经网络,输入层节点 30 个,隐藏层节点 11 个,输出层节点 1 个,以 sigmoid 作为激活函数,以 tansig 作为隐含层的传递函数,以 purelin 作为输出层的传递函数,训练函数采用梯度下降法和高斯—牛顿法相结合的 trainlm 函数。

② 针对个别指标在个别年份的数据缺失情况,本文采用指数平滑法,创建拟合误差最小的模型对数据进行补充。

表 1 绿色低碳循环发展系统指标体系结构

系统	子系统	序参数	具体指标	单位	类型	属性
经济社会	经济子系统	经济发展水平	GDP 增长速度	%	+	关键
		结构升级	第三产业增加值占 GDP 比重	%	+	引领
		技术创新	R&D 经费支出占 GDP 比重	%	+	关键
		外汇市场	人民币兑 100 美元汇率	元	-	核心
		碳均 GDP	碳生产率	万元/t	+	引领
	社会子系统	产业人员配置	第三产业就业人员占比	%	+	引领
		城市发展水平	城镇化率	%	+	核心
		教育水平	每 10 万人口高等学校平均在校生数	人	+	引领
		生活品质	国内旅游人均花费	元	+	引领
		医疗水平	每万人拥有医疗卫生机构数	张	+	引领
能源资源	能源子系统	能源强度	单位 GDP 能耗	万 t 标煤/亿元	-	关键
		能源结构	煤炭消费占比	%	-	引领
		能源效率	一次电力及其他能源占能源消费比重	%	+	核心
		能源系数	能源加工转换效率	%	+	引领
		能源弹性	能源消费弹性系数	%	-	引领
	资源子系统	水资源	人均水资源量	t	+	引领
		矿产资源	资源产出率	万元/t	+	关键
		土地资源	人均城市建设用地面积	km <sup>2</sup> /万人	+	引领
		森林资源	森林蓄积量	亿 m <sup>3</sup>	+	核心
		生物资源	现有物种数量	万种	+	引领
政策环境	政策子系统	环境政策强度	人均环境污染治理投资	万元	+	关键
		社会政策	科教文卫支出	亿元	+	引领
		工业治理政策	工业污染治理与工业增加值的比值	%	+	关键
		财政政策	国家财政总支出	亿元	+	关键
		公共政策	城市每万人拥有公交车量	标台	+	引领
	环境子系统	居住环境	建成区绿化覆盖率	%	+	关键
		公共环境	人均公共绿地面积	m <sup>2</sup>	+	引领
		城市环境	生活垃圾无害化处理率	%	+	引领
		水质环境	单位 GDP 化学需氧量排放	万 t/亿元	-	引领
		环境治理	环境灾害防治率	%	+	关键

注:核心指标为控制性指标,是我国发展的约束性指标<sup>①</sup>;关键指标是指我国虽未明确规定其数值,但对我国发展起到关键作用的指标;引领指标是引领绿色低碳循环发展潮流,符合我国发展战略的指标,具有前瞻性和示范引领作用<sup>②</sup>。核心>关键>引领。表中的“+”、“-”分别表示正向指标、负向指标,即指标数值大小分别与系统的有序程度呈正向关系、负相关关系。

## 四、实证结果分析

### 1. 有序度、协同度分析

表 2 为 2001—2020 年中国绿色低碳循环发展系统协同度计算结果,总体来看,各子系统的有序度呈稳定上升趋势,表明我国十分重视社会的全方位发展,在党中央的带领下,各子系统之间相辅相成、有序演化,得到了长足的发展。从动态演化来看,复

合系统协同度与子系统有序度的变化大体趋于一致,整体上呈现不断攀升的良好势头。其发展历程可以分为 3 个阶段:①2001—2004 年,轻度不协同阶段,主要由于能源子系统未达到有序状态所导致;②2005—2012 年,低水平协同阶段,主要由于各子系统有序度较低所导致;③2013—2020 年,中水平协同阶段,子系统之间协同增效,推动复合系统达到有序的动态平衡状态。

① 核心指标是指政府通过政策引导、合理配置资源等方式,对指标进行管控,使其按照既定目标发展,主要参考《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》;选取人民币兑换美元汇率、城镇化率、一次电力及其他能源消费比重和森林蓄积量作为本文的核心指标,并根据国家已给出的 2030 年核心指标的目标值,采用平均递减法估算出 2021—2030 年的逐年数值。

② 关键指标和引领指标则更多受到过去市场和数据的影响,将按照一定的惯性向前发展。根据本文指标数据的特征以及针对不同预测模型的优缺点对比,最终采用 LSTM 模型对关键指标和引领指标进行预测。

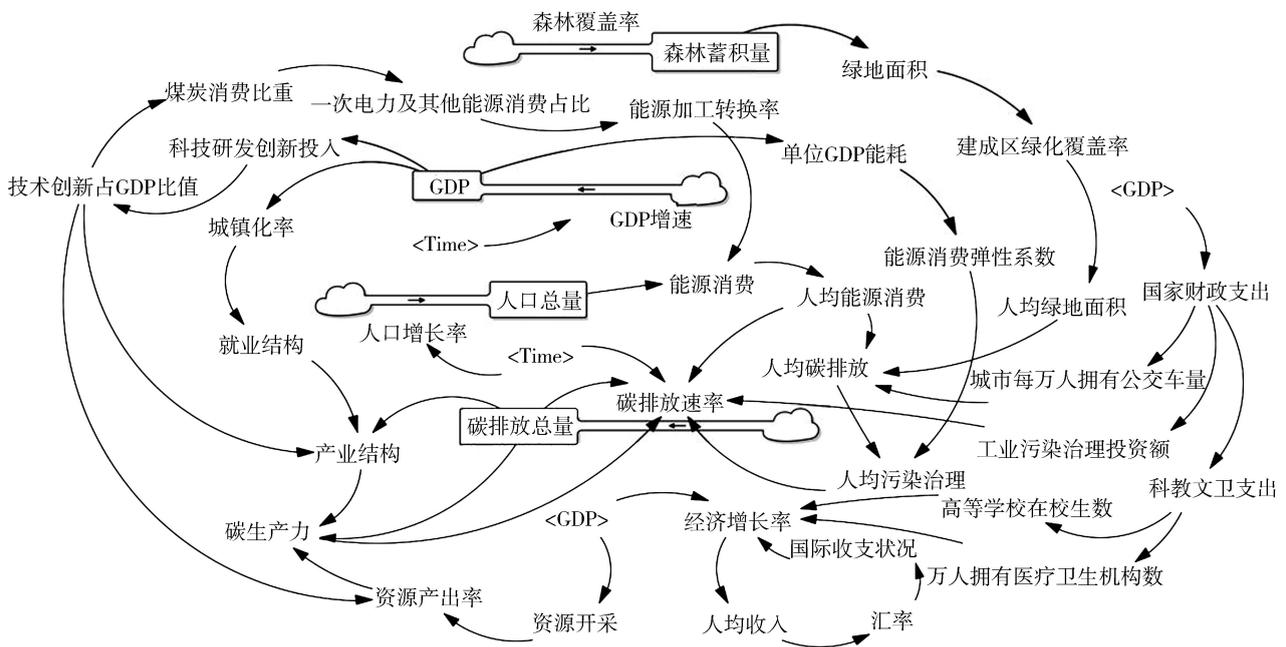


图4 绿色低碳循环指标动态流示意图

表2 2001—2020年中国绿色低碳循环发展系统协同度

年份	经济	社会	能源	资源	政策	环境	复合
2001	0.058	0.074	-0.032	0.016	0.033	0.042	-0.038
2002	0.073	0.118	-0.010	0.057	0.059	0.054	-0.050
2003	0.053	0.131	-0.005	0.082	0.076	0.051	-0.047
2004	0.070	0.200	-0.002	0.125	0.098	0.083	-0.052
2005	0.112	0.250	0.004	0.187	0.136	0.092	0.078
2006	0.158	0.301	0.037	0.212	0.152	0.109	0.135
2007	0.206	0.321	0.068	0.217	0.210	0.150	0.177
2008	0.209	0.328	0.138	0.237	0.253	0.243	0.227
2009	0.225	0.371	0.160	0.252	0.245	0.314	0.253
2010	0.213	0.416	0.188	0.320	0.237	0.330	0.273
2011	0.260	0.478	0.154	0.346	0.266	0.317	0.287
2012	0.268	0.492	0.238	0.403	0.315	0.322	0.330
2013	0.300	0.548	0.270	0.451	0.437	0.373	0.385
2014	0.320	0.582	0.320	0.482	0.482	0.414	0.423
2015	0.348	0.607	0.375	0.510	0.434	0.442	0.445
2016	0.350	0.622	0.404	0.523	0.486	0.434	0.462
2017	0.358	0.646	0.391	0.571	0.514	0.535	0.492
2018	0.371	0.676	0.388	0.601	0.492	0.552	0.501
2019	0.358	0.717	0.441	0.639	0.502	0.594	0.527
2020	0.319	0.713	0.482	0.700	0.506	0.631	0.539

注:在复合系统协同度模型中,协同度是由各年份数值与基期年份数值相减所得,由于2000年是基准年,因此不纳入最终结果。

a. 经济子系统的有序度相对较低,2001—2013年均处于低水平有序阶段,自2014年步入中水平有序阶段,但总体上升水平有限,近两年又出现小幅下降趋势(表2)。结合中国的发展历程不难发现,在改革开放浪潮的推动下,我国GDP增速逐年递增,其中2000—2008年,GDP增速均超过了8%,2007

年高达14.2%,经济高速增长的同时,也带来了较为严重的经济结构失衡问题。2012年后,我国经济开始进入新常态时期,GDP增速总体上呈递减态势,转而进入增速换挡期,同时面临结构调整阵痛期、前期刺激政策消化期这样一个“三期叠加”的经济转型时期,经济子系统有序度从低水平有序向中水平有序缓慢过渡。2014年,继上一年第三产业占GDP比重首次超过第二产业后,服务业占比进一步提高到了48.2%,高于第二产业5.6%,中国经济正加快由第二产业主导向第三产业主导的转变,产业结构愈发趋于合理化;同时,我国强调“以支撑创新驱动发展战略实施为目标,以满足科技创新需求和提升产业创新能力为导向,深化科技体制改革”,在国家政策的推动下,技术创新水平稳步提升;而金融危机爆发以来,我国持续推动汇率市场化改革,货币储备呈现多元化,资本账户管制逐步放松,人民币国际化水平显著提升,汇率保持均衡水平上的基本稳定,并呈稳步上升趋势。2020年,受全球疫情影响,我国GDP增速明显放缓,同时第三产业受到了较大的冲击,导致经济子系统的有序度不升反降。但由于我国体制机制的优越性,及时打破经济政策常规,以纾困为方向,从供给侧入手,推动企业的复工复产,并利用财政政策加快了社会保险结构的优化与重构,从短期需求和供给两方面为经济转型创造适应的条件。此外,我国还形成了较为完善和成

熟的全产业链,在疫情期间为世界交出了一份较为满意的答卷。

**b. 社会子系统的有序度相对较高,且提升迅速。**2001—2008年处于低水平有序阶段;2009—2017年处于中水平有序阶段;2018年开始,社会子系统步入了高水平有序阶段,全面建成小康社会取得了重大进展(表2)。首先,就业是民生之本,是社会发展的主要支撑。党的十八大以来,第三产业规模不断扩大,以信息技术为引领的新兴生产性服务业增势强劲,成为吸纳第二产业就业人员流出的主要端口,而第二产业就业人员占比不断下降,表明我国由人口红利大国向资本强国转变;同时,现代化农业的快速发展,使得第三产业吸纳了第一产业的剩余劳动力,进而推动了社会整体的发展与进步。其次,高等教育为社会可持续发展赋予强大动力,在“211工程”“985计划”以及“双一流建设”等一系列政策下,高等教育各项工作取得了突破性进展。截至2020年底,各类高等教育在学总规模4183万人,毛入学率达54.4%,高等教育为社会的延续与发展赋能增效。再次,城镇化是社会现代化程度的重要衡量标准,城镇化可以促进要素资源优化配置,提高社会生产效率。2011年,我国城镇化率首次突破50%。纵观过去20余年,我国城镇化率由2000年的36.2%增长到2020年的63.9%,城乡结构发生了历史性转变,尤以近三年为甚,城镇化率实现质的飞跃是社会子系统迈向高水平有序阶段的关键抓手。最后,国民健康不仅是民生问题,更是重大的社会问题。2009年我国推出了新医改,万人医疗机构卫生数呈稳步上升趋势;2017年提出了“健康中国”发展战略,医疗服务能力和医疗质量水平显著提升,为社会子系统的有序发展提供了强有力的基础保障。综上,各方面的稳步发展,使得社会子系统的有序度持续提升,相对于其他子系统而言,社会子系统较早进入了高水平有序阶段。

**c. 能源子系统的有序度相对较低,2001—2004年处于轻度无序阶段;2005—2014年处于低水平有序阶段,且发展水平较为缓慢;2015—2020年处于中水平有序阶段(表2)。**能源是国家前进的动力源泉,攸关人类的生存和发展。传统化石能源的消费释放大量CO<sub>2</sub>气体,使得中国碳排放总量急剧增加,所面临的国际减排压力也与日俱增,新能源革命势在必行。2004年,我国提出了“分布式能源”发展策

略,有效地提高了能源利用效率;2005年,我国一次能源生产总量22.5亿t标准煤,是世界第二能源生产和消费大国,煤炭产量突破22亿t,对经济增长、社会进步起到了重要的支撑作用,但能源结构严重偏煤、清洁能源发展缓慢等问题致使能源效率偏低、碳排放总量偏高,进而导致能源子系统处于低水平有序状态;2006年,我国首次提出节能减排措施,各地区、各部门积极响应政策,降低能耗、减少污染物的排放。“十一五”期间,我国节能6.3亿t标准煤,单位GDP能耗降低19.1%,扭转了污染物排放增长过快、能源消费强度过高的局势,能源发展进入了新阶段,节能减排取得巨大成效,能源子系统逐渐由低水平有序向中水平有序过度。2011年开始,我国大力推动能源多元化、清洁化进程,“十二五”期间,能源消费过快增长的势头得到有效控制,煤炭消费占比降低6.4%,清洁低碳化趋势加快,单位GDP能耗显著下降,在“四个革命、一个合作”能源发展战略的带动下,能源子系统进入了中水平有序阶段。“十三五”以来,我国重点解决可再生能源发展瓶颈制约、能源配置扭曲等突出问题,创新能源体制机制,持续推进能源供给侧结构性改革,能源体系得到了长足的发展,开辟了富有成效的能源道路,能源子系统有序度稳步提升。

**d. 资源子系统有序度的发展具有明显的阶段性,2001—2010年处于低水平有序阶段,发展较为缓慢;2011—2019年处于中水平有序阶段,发展相对迅速;2020年开始步入高水平有序阶段(表2)。**首先,我国人均水资源量仅为世界平均水平的1/4,随着社会化进程加快,水资源供需矛盾愈加严重。虽然近年来人均水资源量在逐渐增多,但由于环境变化、用水效率偏低等原因,导致水资源的大量浪费,如若不加以重视,水将成为制约社会进步的重要因素之一。其次,生物资源与社会、经济、环境发展息息相关,2017年以来,我国不断加大对生物多样性的保护力度,有效保护了85%的重点保护野生动物种群,生物多样性保护成效显著,推动了资源子系统的有序发展。再次,森林蓄积量是反映一国或地区生产力的一项重要指标,森林资源对减缓气候变化具有特殊意义,我国森林蓄积量以及森林面积连续30多年保持“双增长”。最后,资源产出率是衡量主要物质资源利用效率的指导性指标,保障资源的可持续利用已成为国家战略资源保障体系的重要

内容,也是国家制定资源战略的基础<sup>[29]</sup>。2001—2010年,经济高速增长,但资源产出率年均增速缓慢,物质资源的大量开采导致的环境压力与日俱增,同时资源压力并未呈现向环境库兹涅茨曲线方向发展的迹象,原因在于较为粗放的经济增长路径使得资源环境付出了一定的代价;2011—2020年,随着循环经济发展模式不断深入,资源产出率逐年升高,例如:“十三五”时期,我国主要资源产出率提高了约26%,经济增长与物质资源利用逐渐呈现脱钩趋势,体现出不同发展阶段下,经济增长的资源利用效应发生了显著的变化。基于中国实情不难发现,循环经济发展模式是解决资源利用问题最为有效的方式之一,对资源子系统有序度水平的提升也起到了关键的促进作用。

e. 政策子系统的有序度相对偏低,2001—2012年处于低水平有序阶段,2013—2020年处于中水平有序阶段(表2)。一方面,财政支出是政府优化资源配置、促进共同富裕、实现国家长治久安的制度保障。科教文卫支出作为支撑国家繁荣昌盛的基础性、战略性投资,在改善民生、提高人民文化水平等方面发挥着重要作用。2013年开始,政策子系统步入中水平有序阶段,这首先得益于党的十八大以来,财税体制改革向纵深推进,财政宏观调控机制不断完善,财政实力不断增强,国家财政支出以及科教文卫支出年均增长率超过10%,常年实现“双增长”的局面。另一方面,由于自然环境具有公共产品属性,导致环境污染具有典型的负外部性,通常这种负外部性很难通过市场调节得到有效控制,而政府的相关政策可以从根源上解决此类问题,例如人均环境污染治理投资很大程度上反映了我国对于环境保护的政策强度,以及对生态文明建设的迫切意愿。进入21世纪,虽然我国对环境问题逐渐重视,但由于社会发展阶段等原因,无法快速实现经济增长与环境污染的脱钩效应。2001—2012年,我国工业发展起步较晚、所覆盖行业众多,其碳排放约占总量的80%,相应的环境规制政策也较为贫瘠,导致政策子系统处于较低的有序水平。2012年以来,生态文明建设制度出台频度之密前所未有,对工业污染防治的要求日益严格,其中工业污染治理占工业增加值的比重可以很好地衡量政策制度在产业层面的执行力度,从实践经验以及数据层面来看,工业污染治理投资能够有效推动产业结构转型升级,进而大幅提

高产业的生产效率以及经济效益。换言之,当生产效率及经济效益持续向好,国家及产业也会把更多的精力放在污染治理上,从而推动生态文明建设迈入高质量发展阶段。综上,正是国家在上述各方面颁布的相应政策,使得政策子系统实现了由低水平有序向中水平有序的转变。

f. 环境子系统的有序度变化与政策子系统一致,2001—2012年处于低水平有序阶段,2013—2020年处于中水平有序阶段(表2)。首先,城市绿化已成为城市建设事业的重要组成部分,起到了优化生态系统的服务功能,是评价城市环境质量的重要考核指标。发展初期,人民更多地将重心放在提高生活水平上,对于绿化的诉求偏低,再加之城市早期规划不周等缘故,城市绿化水平基本维持在一个较低水准;随着人民对生活质量和居住环境的需求增加,各级政府在新老城区建设中明显加强了对于绿地的规划。“十三五”时期,我国深入推进大规模的国土绿化行动,并与区域发展、乡村振兴等国家发展战略紧密结合;同时,实现了扩面增绿与提质增效相结合,总计完成国土绿化面积0.46亿 $\text{hm}^2$ (6.89亿亩),城市绿化事业取得新进展、新成效。其次,生活垃圾无害化处理率是衡量环境卫生水平的一项重要指标,2000年的无害化处理率仅有50.3%,这意味着近50%的垃圾处理会对环境产生不同程度的损害,这也导致环境子系统有序水平偏低。近年来,在多项法律法规的约束下,环境污染防治成效显著,生活垃圾无害化处理率超过99%,环境子系统有序度较之前显著提高。此外,随着全球气候变暖,我国自然灾害频发,对生态环境以及人类生存都造成了严重影响。2000—2012年,自然灾害防治存在体制性障碍,加之防治力量薄弱,自然灾害防治率由67.0%变为66.5%,期间呈现起伏波动态势,并未有效助推环境子系统的有序水平。党的十八大以来,我国将自然灾害防治摆在更加突出的位置,不断深化防治体制改革、优化防治资源要素配置、推动防治共建共治共享,充分发展现代化的防治体系,探索具有中国特色的自然灾害防治道路,防治率由2012年的66.5%提升至2020年的86.0%,防治效果十分显著,这对环境子系统有序度的提高起到关键作用。

以上结果表明,2001—2020年,中国的社会经济得到了长足的发展,同时推动了能源低碳转型、强化了资源循环利用、健全了政策支撑体系、推进了生

态文明建设,逐渐走上绿色低碳循环发展协同增效的新道路。此外,我国的实践经验还表明,各个子系统之间是相互联动、相互促进的发展关系,复合系统的协同发展可以成为经济增长、社会稳定的新动力。新时期,积极应对气候变化,构建绿色低碳循环发展体系,可以实现多系统之间的协同共赢。

## 2. 前景预测分析

由图5可知,训练集、验证集、测试集以及全体集合的仿真输出与期望输出的相关系数 $R$ 值均大于0.970,表明本文预测模型设定的精准度较高。将指标的预测数值代入建好的神经网络模型,可以得出2021—2030年复合系统的协同度如图6所示,整体上复合系统协同度呈稳步上升趋势,预计到2027年步入高水平协同阶段。其中2021—2026年协同度增速相对迅速,2027—2030年协同度增速相对平缓。

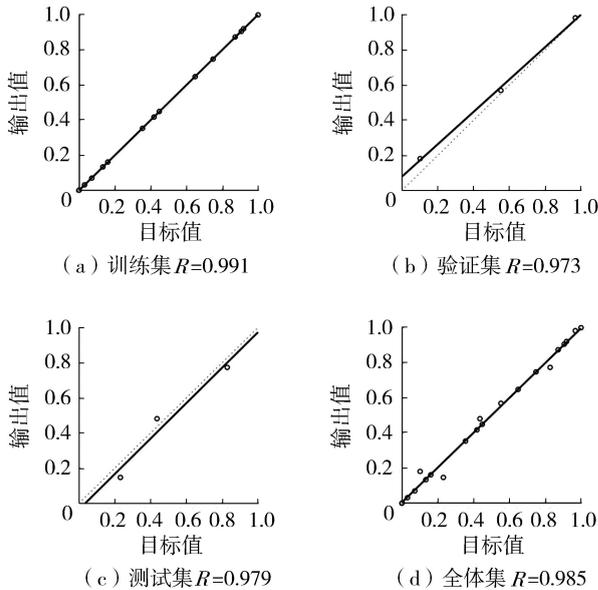


图5 训练、验证、测试以及全样本回归曲线

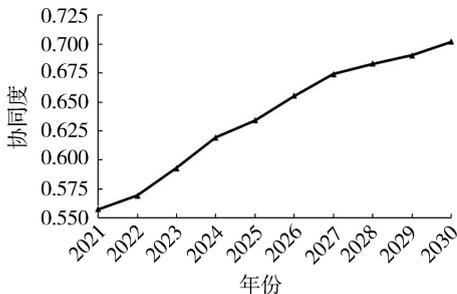


图6 2021—2030年复合系统协同度预测值

为探索绿色低碳循环发展在不同路径下的协同效果,考虑到国家对指标发展的宏观作用,本文选取汇率、城镇化率、非化石能源占比、森林蓄积量、GDP增速以及技术创新作为单个控制变量<sup>①</sup>,使上述单个指标数值保持不变,其余指标仍按前述预测值代入神经网络模型,所得结果与图6的预测值进行比较。由图7可知,汇率、非化石能源占比、GDP增长速度和技术创新指标对复合系统协同度的影响较大,而森林蓄积量和城镇化率的影响较小。具体来看,汇率对复合系统协同度产生0.5%~0.8%的影响,即人民币汇率的提升,会推动复合系统协同度的提高;非化石能源占比对复合系统协同度产生0.4%~0.8%的影响,即非化石能源占比越大,复合系统的协同度越高;GDP增速对复合系统协同度产生0.7%~1.2%的影响,即GDP增速的提高有利于多系统的协同发展;技术创新对复合系统协同度产生0.2%~0.6%的影响,即技术的进步促进多系统协同发展。究其原因,主要包含以下几个方面:首先,基于要素禀赋理论,我们不难理解,人民币汇率升值引发资本、劳动力等生产要素的流入,提高我国的贸易优势,可以促进产业出口贸易结构的优化,进而推动产业结构的转型升级;同时,由内嵌技术扩散效应可知,我国汇率提高会增加高技术产品的进口,进而推动技术的创新与进步,对提高能源利用效率等方面起到促进作用;此外,人民币汇率升值,有利于以美元为计价单位的碳生产力、GDP增长速度、单位GDP能耗等指标有序度的提高,对经济、社会以及能源等多个子系统均产生积极的影响。其次,CO<sub>2</sub>排放主要由消费化石能源所引起,其中燃烧煤炭产生的CO<sub>2</sub>占碳排放总量的70%以上,非化石能源占比增加,将有效提高终端能源电气化率,大幅减少碳排放;同时,可以尽早实现由能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”的转变,快速破解碳排放“双控”与经济高质量转型之间的矛盾。因此,能源结构低碳转型无疑为多系统协同发展以及尽早实现碳达峰目标提供动力源泉。再次,中国作为最大的

<sup>①</sup>汇率、城镇化率、非化石能源占比以及森林蓄积量是本文的核心指标,也是我国发展的约束性指标;GDP增长速度和技术创新是本文的关键指标,对我国绿色低碳循环发展起到重要作用;作者测算了其余指标对复合系统的影响结果,发现其相对作用偏小,同时受限于篇幅,并未一一将其列出。

发展中国家,发展仍是解决一切问题的基础和关键,而 GDP 作为衡量发展水平最具综合性的指标之一,在“十四五”规划中,并未设定具体的量化目标,这并不意味着任由经济增速下滑,而是可以理解为“弹性指标”,更加凸显了我国对经济发展质量和效益的重视程度;此外,若要实现 2035 年人均 GDP 达到中等发达国家水平,意味着年均 GDP 增速需达到 4.73% 以上,如若像上述模型设定那样,保持 2020 年仅 2.3% 的 GDP 增速,将对复合系统协同发展产生不小的负面影响,因此,在外部环境不确定、不稳定的因素下,保持经济高质量平稳运行是推动复合系统协同发展的根本之策。最后,技术创新是破解经济高质量发展深层次矛盾的根本驱动力,技术创新可以有效改变生产方式和要素结构,提升资源配置效率,进而加快经济增长模式的转变,提高经济效益。同时,技术创新可以推动产业结构由劳动密集型向知识密集型转变,提高产业在全球价值链中的地位。此外,技术创新有利于清洁低碳生产工艺的进步,有效减少了碳排放对环境造成的污染,对社会、经济、能源以及环境等子系统的发展起到了促进作用,进而提升复合系统的协同水平。

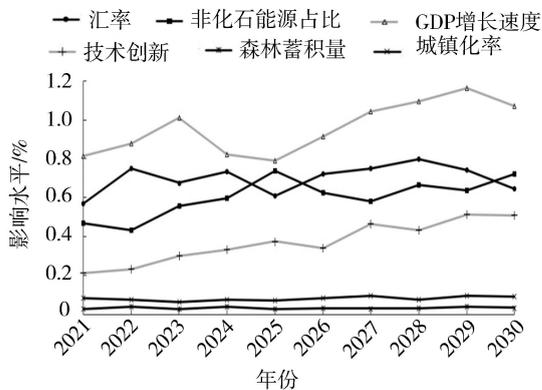


图 7 2021—2030 年指标变动对复合系统协同度的影响

## 五、结论与对策

中国绿色低碳循环发展体系因生态文明建设而催生,因经济高质量发展而深化,因共建美丽中国而强化。本文全面构建了绿色低碳循环发展的指标体系,基于理论和实证两个视角研究了中国绿色低碳循环发展的路径,并构建 LSTM-BP 神经网络,预测了 2021—2030 年中国复合系统的协同度,结果表明:①2001—2020 年,各子系统有序度实现了由低水平有序向中水平有序的转变,其中社会和资源子

系统已步入高水平有序阶段,而其余子系统未来仍有较大的发展空间;②复合系统自 2013 年转变为中水平协同阶段,这得益于政策的宏观调控、社会的转型进步、经济的高质量发展、能源的优化调整、资源的高效利用以及环境的持续向好;③绿色低碳循环发展体系将于 2027 年步入高水平协同阶段,呈平稳发展趋势,为我国尽早实现碳达峰目标提供多方面支撑;④汇率、非化石能源占比、GDP 增长速度以及技术创新对绿色低碳循环发展体系具有显著影响,而城镇化率和森林蓄积量的影响效果整体偏小。

基于本文理论分析和实证研究结果,提出以下对策:

**a. 强化顶层设计,建立健全绿色低碳循环发展法律体系。**完善的法律体系是绿色低碳循环发展的基本保障,目前我国尚未建立由上至下统一的法律法规,为此,应加强绿色低碳循环发展法律体系的统筹规划,全面开展绿色低碳循环发展的制度建设与政策设计,尽快将绿色低碳循环发展提升至战略高度。优选部分城市进行试点工作,总结优秀经验,最后推广至全国范围,为碳达峰目标下复合系统协同发展保驾护航。

**b. 实施多系统配套的政策组合,加强绿色低碳循环发展之间的协同运作。**绿色、低碳、循环发展既相互融合,又有所区别,理清各自的本质内涵才能推动三者的高效协同,发挥出“1+1+1>3”的作用。同时,在建设绿色低碳循环发展体系的过程中,既要统揽全局,也要充分把握各子系统之间的内在联系,充分发挥“社会机制融碳、经济发展脱碳、能源优化降碳、资源循环减碳、政策体系去碳、生态系统固碳”的多系统协同作用。

**c. 提高清洁能源消费占比,加快能源体系的低碳转型。**目前我国非化石能源消费比重偏低,能源体系惯性较大,须积极完善能耗“双控”制度,促进能源向清洁化、电气化和数字化转型,积极开展清洁能源替代改造,构建以清洁能源为主体的新型能源供应体系。政府要加强能源低碳转型的系统谋划,在遵循能源体系演化规律的基础上,以市场减排作为经济导向,紧抓能源市场改革所带来的减碳机遇,全面推行清洁低碳的能源体系。

**d. 加大技术研发投资力度,构建绿色低碳循环技术创新体系。**技术进步是推动绿色低碳循环发展的根本动力,在碳达峰目标导向下,应充分发挥市场

在创新资源配置中的决定性作用,推动创新要素在地区、产业间的互联互通,调动各部门技术创新的积极性,全面开展技术创新攻关行动,围绕资源循环利用、能源低碳利用等领域部署具有战略性的技术攻关项目,形成以技术创新驱动绿色低碳循环发展的动力格局。

e. 推动汇率平稳提升,构建绿色低碳循环发展的对外开放新格局。通过相关的汇率政策,推动产业结构的转型升级,吸收先进的生产技术,进而提高产业部门的经济效益。同时,人民币汇率在合理均衡水平上的稳定升值,有利于提高我国在全球价值链中的地位,在此基础上,积极优化贸易结构,强化绿色低碳循环标准的国际合作,优化生产、流通、消费等环节,形成绿色低碳循环的对外开放新格局,助力我国复合系统协同发展迈上新台阶。

### 参考文献:

[1] 习近平在中共中央政治局第三十六次集体学习时强调深入分析推进碳达峰碳中和工作面临的形势任务 扎扎实实把党中央决策部署落到实处[J]. 旗帜,2022(2):9-10.

[2] PEARCE D. Green economics [J]. Environmental Values, 1992,1(1):3-13.

[3] UNEP U. Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication [EB/OL]. (2011-12-17) [2022-03-28]. www.unep.org/greeneconomy.

[4] 崔如波. 绿色经济:21世纪持续经济的主导形态[J]. 社会科学研究,2002(4):47-50.

[5] 诸大建,朱远. 生态文明背景下循环经济理论的深化研究[J]. 中国科学院院刊,2013,28(2):207-218.

[6] 胡鞍钢,周绍杰. 绿色发展:功能界定、机制分析与发展战略[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(1):14-20.

[7] STERN N, STERN N H. The economics of climate change: the stern review [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007:5-11.

[8] 庄贵阳. 中国经济低碳发展的途径与潜力分析[J]. 太平洋学报,2005(11):79-87.

[9] 付允,马永欢,刘怡君,等. 低碳经济的发展模式研究[J]. 中国人口·资源与环境,2008(3):14-19.

[10] 厉以宁,朱善利,罗来军,等. 低碳发展作为宏观经济目标的理论探讨——基于中国情形[J]. 管理世界,2017(6):1-8.

[11] PEARCE D W, TURNER R K. Economics of natural

resources and the environment [M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press,1990:17-23.

[12] GENG Y, SARKIS J, BLEISCHWITZ R. How to globalize the circular economy [J]. Nature, 2019, 565: 153-155.

[13] 诸大建. 绿色经济新理念及中国开展绿色经济研究的思考[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(5):40-47.

[14] 吴绍中. 循环经济是经济发展的新增长点[J]. 社会科学,1998(10):18-19.

[15] 曲格平. 发展循环经济是21世纪的大趋势[J]. 当代生态农业,2002(增刊1):18-20.

[16] 陆学,陈兴鹏. 循环经济理论研究综述[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(增刊2):204-208.

[17] HAKEN H. Synergetics [J]. Physics Bulletin, 1977, 28(9):412.

[18] 赵琳琳,张贵祥. 京津冀生态协同发展评测与福利效应[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(10):36-44.

[19] 唐珏岚. 长三角城市群协同发展的实践探索与政策建议[J]. 上海行政学院学报,2020,21(2):86-94.

[20] 武文霞. 粤港澳大湾区城市群协同发展路径探讨[J]. 江淮论坛,2019(4):29-34.

[21] 唐晓华,张欣钰,李阳. 制造业与生产性服务业协同发展对制造效率影响的差异性研究[J]. 数量经济技术经济研究,2018,35(3):59-77.

[22] 杨艳军. 武汉市科技创新与金融耦合协调发展研究[J]. 武汉金融,2021(10):62-68.

[23] 李建豹,黄贤金,揣小伟,等. 江苏省人口城镇化与能源消费CO<sub>2</sub>排放耦合协调度时空格局及影响因素[J]. 经济地理,2021,41(5):57-64.

[24] 任保平,杜宇翔. 黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(2):119-129.

[25] 陈亮,胡文涛. 金融发展、技术进步与碳排放的协同效应研究——基于2005—2017年中国30个省域碳排放的VAR分析[J]. 学习与探索,2020(6):117-124.

[26] 杨清可,段学军,王磊,等. 长三角区域一体化与城市土地利用效率的协同测度及交互响应[J]. 资源科学,2021,43(10):2093-2104.

[27] 陈昭,梁淑贞. 粤港澳大湾区科技创新协同机制研究[J]. 科技管理研究,2021,41(19):86-96.

[28] 项国鹏,高挺. 中国省域创业生态系统动态协同效应研究[J]. 地理科学,2021,41(7):1178-1186.

[29] 曾现来,闫晓宇,张宇平,等. 中国资源的进出口与产出率:演化、挑战及对策[J]. 自然资源学报,2018,33(4):552-562.

(收稿日期:2022-05-30 编辑:张志琴)