

【国民经济】

# 中国工业碳减排成熟度研究

王文举, 李 峰

(首都经济贸易大学经济学院, 北京 100070)

**[摘要]** 本文从 Kaya 恒等式出发,选取产值能耗强度、能耗碳排放强度和产值碳排放强度等三个基础指标,运用灰色关联度分析方法和距离协调度模型,构建了发展度指数、协调度指数和协调发展度指数等三个成熟度测度指数,并基于中国 30 个省份和 38 个工业行业 2003—2012 年数据,从整体和分省份及分行业两个层面对中国工业碳减排成熟度进行了综合评价。结果表明,虽然自 2003 年起中国工业再度出现重型化倾向,但在政府的一系列政策推动下,中国工业碳减排整体发展度指数、协调度指数和协调发展度指数均呈持续增长趋势。其中,东部区域的相对成熟度指数均值明显高于东北部、中部和西部区域;制造业的相对成熟度指数均值明显高于采矿业和公用事业。研究还发现,区域格局和工业结构均对中国工业碳减排整体成熟度产生了显著影响;部分省份和行业的碳减排成熟度还存在所处的发展阶段和协调水平阶段显著不一致的现象。根据评估结果,各地方政府和各工业部门均需制定合理的低碳政策和构建相互间协调机制来持续推进中国工业碳减排成熟度的提升。

**[关键词]** 工业碳减排; 成熟度指数; 灰色关联度分析; 距离协调度模型

**[中图分类号]**F424.1 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2015)08-0020-15

## 一、问题提出

持续推进碳减排已成为一项事关国家发展的长远战略。作为一个负责任的发展中大国履行《联合国气候变化框架公约》的一项重要义务,中国于 2009 年丹麦哥本哈根联合国气候变化会议前夕首次对外公布控制温室气体排放的量化目标:2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%至 45%。在“十二五”规划纲要中,中国再次明确到 2015 年单位国内生产总值二氧化碳排放量比 2010 年降低 17%的约束性目标。为实现这些目标,国务院通过并印发了《“十二五”控制温室气体排放工作方案》、《“十二五”节能减排综合性工作方案》等一系列重要政策文件,将单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放量下降目标分解到各个省份。工业作为中国国民经济的重要组成部分和 GDP 增长的主要推动力,也是中国能源消耗和二氧化碳排放的主要领域。为了全面提升单位碳排放

**[收稿日期]** 2015-03-13

**[基金项目]** 国家社会科学基金重大项目“中国碳市场成熟度、市场机制完善及环境监管政策研究”(批准号 14ZDA072);北京市属高等学校高层次人才引进与培养“长城学者”计划资助项目“碳排放与博弈计量研究”(批准号 CIT&TCD20140321)。

**[作者简介]** 王文举(1965—),男,吉林东丰人,首都经济贸易大学经济学院教授,博士生导师;李峰(1979—),男,安徽马鞍山人,首都经济贸易大学经济学院博士研究生。通讯作者:李峰,电子邮箱:lixuefengbj1979@163.com。

所产生的工业增加值,国务院发布了《“十二五”工业转型升级规划(2011—2015年)》,工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科技部和财政部联合制定了《工业领域应对气候变化行动方案(2012—2020年)》,对工业领域整体和部分重点行业单位工业增加值二氧化碳排放量提出明确的下降目标<sup>①</sup>。那么,当前中国工业碳减排的整体水平如何?各省份工业和各工业行业的碳减排相对发展水平如何?是一致的还是存在明显差异的?各省份工业和各工业行业的碳减排相对协调水平如何?是均衡的还是存在明显的非均衡性?区域格局和工业结构又在多大程度上影响了中国工业碳减排的整体水平?这些问题的研究对把握中国工业碳减排情况和制定应对策略具有重要的理论价值和现实意义。

近年来,对中国工业碳减排问题的实证研究不断涌现<sup>[1-6]</sup>。这些研究对中国工业碳减排实现路径进行了有益的探索,但亦存在两方面局限:一方面,这些研究更多侧重于利用各类分解技术,对中国工业碳排放驱动因素进行分析,少有对中国工业碳减排水平进行测度研究;另一方面,大部分研究都集中于各工业行业间碳排放的比较分析,缺乏对省份间工业碳减排的比较研究,对中国工业碳减排的描述还不够完整。虽然也有部分研究涉及中国工业化进程测度<sup>[7]</sup>、中国低碳经济进程测度<sup>[8]</sup>和中国碳减排国际比较和未来潜力评估<sup>[9,10]</sup>,但也并未对中国工业碳减排水平进行深入分析。基于此,本文以中国30个省份和38个工业行业2003—2012年数据为基础,从整体和分省份及分行业两个层面对中国工业碳减排情况进行综合评价。与上述研究相比,本文的特点主要体现在:一是从Kaya恒等式出发,选取工业碳减排测度的基础指标,保证了与前述研究的可比性和政策目标的一致性;二是提出工业碳减排成熟度概念,并运用灰色关联度分析方法和距离协调度模型,构建了发展度指数、协调度指数和协调发展度指数等三个成熟度测度指数;三是更为全面地估算了中国工业碳排放量,并对中国各省份和各行业工业碳减排成熟度以及中国工业碳减排整体成熟度进行了综合评价。

## 二、指标选取和数据来源

### 1. 指标选取

中国使用单位GDP碳排放作为测度碳减排的量化指标,将碳减排目标与经济增长直接关联,表明碳减排问题既是能源总量和能源结构问题,也是经济增长问题,对这两个问题展开的研究主要基于Kaya恒等式进行因素分解分析<sup>[6]</sup>。Kaya恒等式是通过将碳排放分解为人口、人均GDP、能源消耗强度和能耗碳排放强度等四个要素,以解释人类活动与碳排放关系的数学方程式。因其对碳排放及其驱动因素之间内在逻辑关系进行了清晰的表达,从而得到广泛应用。本文研究中国工业经济增长与碳排放之间的逻辑关系,可将Kaya恒等式转换为:

$$C/V=(E/V)\cdot(C/E) \quad (1)$$

其中, $C$ 为碳排放量, $V$ 为产值, $E$ 为能源消耗量, $C/V$ 为产值碳排放强度, $E/V$ 为产值能耗强度, $C/E$ 为能耗碳排放强度。可见,产值碳排放强度由产值能耗强度和能耗碳排放强度共同决定。以产值碳排放强度作为基础指标可以反映工业碳减排的最终成效情况;以产值能耗强度和能耗碳排放强度作为基础指标可以反映工业碳减排的驱动因素情况。这三个基础指标数值与工业碳减排水平呈反向关系,数值越小表示工业碳减排水平越高,反之,数值越大表示工业碳减排水平越低。

① 根据《工业领域应对气候变化行动方案(2012—2020年)》,到2015年,单位工业增加值二氧化碳排放量比2010年下降21%以上。其中,钢铁、有色金属、石化、化工、建材、机械、轻工、纺织、电子信息等重点行业单位工业增加值二氧化碳排放量分别比2010年下降18%、18%、18%、17%、18%、22%、20%、20%、18%以上。预测到2020年,单位工业增加值二氧化碳排放量比2005年下降50%左右。

## 2. 数据处理

中国工业统计运用的《国民经济行业分类》国家标准,自1984年首次发布以来,分别于1994年、2002年和2011年进行了三次修订。本文研究期间选择2003—2012年,并对2012年工业行业分类按照《国民经济行业分类》(GB/T4754-2002)进行调整,从而保证数据统计口径的一致性。调整后的工业行业为38个,没有考虑其他采矿业和两个新增的行业,并使用回归法对合并的行业进行数据拆分,对被拆分的行业进行了数据合并。由于历年《中国能源统计年鉴》没有提供西藏地区能源平衡表,考虑数据可得性,本文的地区选择为30个省份,未包括西藏。

(1)工业销售产值。虽然2009年前的《中国工业经济统计年鉴》提供规模以上企业工业总产值、工业销售产值和工业增加值数据,但2009—2012年的《中国工业经济统计年鉴》仅提供规模以上企业工业总产值和工业销售产值数据,2013年的《中国工业经济统计年鉴》仅提供规模以上企业工业销售产值数据。为保证数据可比性,本文采用工业销售产值作为工业经济增长测度指标。其中,2004年的数据来源于《中国经济普查年鉴》(2004)。由于历年《中国工业经济统计年鉴》中分省份和分行业的工业销售产值数据均按照当年价格计算,为剔除不同省份和不同行业在不同年份产品价格波动的影响,本文使用分省份工业生产者出厂价格指数对各省份工业销售产值进行缩减处理,使用分行业工业生产者出厂价格指数对各行业工业销售产值进行缩减处理,从而得到分省份和分行业实际工业销售产值数据。上述分省份和分行业工业生产者出厂价格指数均来源于历年《中国统计年鉴》。

(2)工业能源消耗量。能源消耗量包括能源终端消费量、能源加工转换损失量和能源损失量三个部分,考虑数据可得性,本文选择工业终端能源消费量(实物量)作为能源消耗量的代理变量。与通常仅选取煤炭、原油、天然气等主要几种化石能源不同<sup>[2,4]</sup>,精确起见,本文工业能源消耗量估算覆盖历年《中国能源统计年鉴》中工业终端能源消费列示的所有种类能源。由于中国能源消耗实物量单位不统一,在具体计算中还必须将能源消耗实物量换算成统一热量单位(标准煤)。其中,各工业行业统一热量单位的能源消耗量可以通过历年《中国能源统计年鉴》工业分行业终端能源消费量(标准量)直接获得。各省份工业统一热量单位的能源消耗量由工业终端能源消费实物量与能源折标准煤系数乘积获得,各省份工业终端能源消费实物量数据直接来源于历年《中国能源统计年鉴》,各省份能源折标准煤系数则通过历年《中国能源统计年鉴》中的中国能源平衡表最终能源消费标准量和实物量计算所得。

(3)工业碳排放量。工业碳排放主要来自工业生产过程中化石能源的燃烧及热力和电力等能源的使用。由于目前中国官方统计机构尚未直接公布工业碳排放量数据,本文利用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的二氧化碳排放估算参考方法进行工业能源消耗碳排放量估算。其中,各种能源的平均低位发热量、碳排放系数和碳氧化因子分别来自于历年《中国能源统计年鉴》、《IPCC国家温室气体清单指南》(2006)、《中国温室气体清单研究》、《省级温室气体清单编制指南》和《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南(2.1版)》。与化石能源不同,热力和电力作为二次能源,其使用并不直接产生碳排放,但热力和电力在生成的过程中会消耗大量化石能源,从而间接产生碳排放。精确起见,本文借鉴查建平<sup>[4]</sup>的方法对各省份工业和各工业行业使用热力和电力的间接碳排放量进行估算,相关数据来自于历年《中国能源统计年鉴》。

## 三、成熟度指数构建

“成熟度”的本意是指植物果实成长到可以收获的程度,后被引申到对事物完善程度进行描述

和度量。自1987年美国学者Humprey提出“软件能力成熟度模型”之后,“成熟度”概念被广泛应用于各个领域<sup>[1]</sup>。例如,任兆璋和刘云生<sup>[11]</sup>构建了金融成熟度综合指数,朱航<sup>[12]</sup>构建了保险市场成熟度指数。但目前尚未见有将“成熟度”概念引入碳减排领域的研究。与已有文献将“成熟度”内涵局限于“增长”、“成长”和“发展”等几种概念不同,本文认为“成熟度”概念除了强调对事物发展度描述外,还应该包括对事物协调度及协调发展度的综合性描述和度量。所谓“发展度”是指事物从低水平阶段到高水平阶段的实现程度;所谓“协调度”是指事物内部子系统间相互适应、相互配合和相互促进的融合程度;所谓“协调发展度”是指综合事物发展水平和协调水平的和谐发展程度。结合前述研究,中国工业碳减排成熟度可从各省份或各行业和整体两个层面加以阐释。各省份或各行业层面,使用“相对发展度”对各省份或各行业产值碳排放强度的发展水平进行测度,用以比较各省份或各行业碳减排最终成效情况;使用“相对协调度”对各省份或各行业在产值能耗强度和能耗碳排放强度之间的协调水平进行测度,用以比较各省份或各行业碳减排驱动因素间的协调情况;使用“相对协调发展度”对各省份或各行业碳减排相对发展水平和相对协调水平之间的和谐发展程度进行测度,用以比较各省份或各行业碳减排的发展水平和协调水平的综合平衡情况。整体层面,使用“整体发展度”对各省份或各行业工业碳减排的平均发展水平进行测度,用以比较不同年份中国工业碳减排整体成效情况;使用“整体协调度”对各省份或各行业工业碳减排发展水平的协调程度进行测度,用以比较不同年份中国工业碳减排在省份间或行业间的整体协调情况;使用“整体协调发展度”对工业碳减排整体发展水平和协调水平之间的和谐发展程度进行测度,用以比较中国工业碳减排的整体发展水平和协调水平的综合平衡情况。上述概念界定,不仅明确了发展度、协调度和协调发展度的内涵,而且对各省份或各行业和整体两个层面进行了区分,对碳减排最终成效和驱动因素两个层面也进行了区分,从而弥补了常见的产值碳排放强度等单一指标在碳减排分析层面上的局限。

无论是对发展度还是对协调度进行描述和度量,都要求设计一个多层面和多个指标的评价体系。构建评价体系的综合评价方法很多,常见的就有层次分析法、数据包络法和多元统计方法等。正如杜栋和庞庆华<sup>[13]</sup>所指出的,这些方法除了部分存在变量共线性问题、部分存在权重结构依赖人为主观判断问题外,还普遍存在要求数据量大、规律性强及计算复杂等方面的局限,但以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本、贫信息”的不确定性系统为研究对象的灰色系统理论,可以很好地克服这些局限。灰色关联度分析是灰色系统理论的重要组成部分,是对系统各因素之间以及各因素与系统之间相互关联程度进行定量分析的方法<sup>[14]</sup>,在逻辑上,正好可以用来对各省份或各行业工业碳减排相对发展度进行分析。常用的灰色关联度模型多达10余种<sup>[15]</sup>,但无论哪一种,其基本思想都是根据序列曲线几何形状的相似性程度或相近性程度来衡量因素间关联的紧密程度,差异仅在于有的模型侧重于相似性测度,有的模型侧重于相近性测度<sup>[16]</sup>。根据研究目的,本文选择基于相近性测度的邓氏灰色关联度模型,对各省份或各行业工业碳减排相对发展度进行测度。但与其他综合评价方法一样,灰色关联度分析也无法实现对经济系统协调发展程度进行测度。近年来,系统工程领域发展出来的协调度模型,可以很好地对经济系统的协调发展过程展开研究,自然也适用于对工业碳减排协调发展情况进行定量评价。常见的协调度模型包括:离差系数最小化协调度模型、隶属函数协调度模型、基尼系数协调度模型和距离协调度模型等多种<sup>[17]</sup>。其中,汤铃等<sup>[17]</sup>和李海东等<sup>[18]</sup>所提出的距离协调度模型更适用于对工业碳减排整体协调度进行研究。借鉴前述研究,各省份或各行业工业碳减排相对协调度、相对协调发展度和工业碳减排整体协调发展度可采取几何平均法计算,工业碳减排整体发展度可通过简单平均法计算。为研究方便,对上述成熟度进行指数化处理,具体计算方法如下:

### 1. 各省份或各行业工业碳减排相对成熟度指数

(1)各省份或各行业工业碳减排相对发展度指数。邓氏灰色关联度分析的基本思想,是根据序列对应点之间的距离测度系统因素变化趋势的相近性。实际应用中,需要首先确定参考序列和若干个比较序列,然后再通过关联度模型求解出各比较序列与参考序列之间的关联度系数,系数越大表明比较序列与参考序列关联度越大,序列曲线越接近。如果参考序列为最优发展序列,则比较序列与参考序列的关联度系数越大,表示比较序列的发展路径与最优发展路径越接近,其相对发展水平越高。假设评价对象为  $m$  个省份或行业,比较时期为  $n$  个年份, $x$  为产值碳排放强度,第  $i$  省份或行业比较序列  $x_i$  组成的集合为: $x_i=\{x_i(1),x_i(2),\dots,x_i(n)\}$ ,参考序列  $x_0$  组成的集合为: $x_0=\{x_0(1),x_0(2),\dots,x_0(n)\}$ 。由于产值碳排放强度与工业碳减排水平呈负相关关系,参考序列选择产值碳排放强度在各省份或各行业中的最低值, $x_0(k)=\min_{1\leq i\leq m} \{x_i^{x(k)}\},k=1,2,\dots,n$ 。第  $i$  省份或行业在第  $k$  年的灰色关联度系数的计算公式如下:

$$\xi_i(k)=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{\Delta_{ik}+\rho\Delta_{\max}} \quad (2)$$

其中, $\rho$  为分辨系数,按照通常做法,取值为 0.5。 $\Delta_{\min}=\min_i \min_k |x_0(k)-x_i(k)|$  为整个时期所有比较序列与参考序列绝对差的最小值, $\Delta_{\max}=\max_i \max_k |x_0(k)-x_i(k)|$  为整个时期所有比较序列与参考序列绝对差的最大值, $\Delta_{ik}=|x_0(k)-x_i(k)|$  为第  $k$  年第  $i$  省份或行业的比较序列与参考序列的绝对差。可见, $\xi_i(k)$  即为第  $k$  年第  $i$  省份或行业的碳减排相对发展度指数,取值在 0—1 之间,数值越大,表示第  $k$  年第  $i$  省份或行业的碳减排相对发展水平越高。

(2) 各省份或各行业工业碳减排相对协调度指数。假设  $y$  为产值能耗强度, $z$  为能耗碳排放强度。同理可得,基于产值能耗强度的第  $k$  年第  $i$  省份或行业的碳减排相对发展度指数  $\phi_i(k)$ ,以及基于能耗碳排放强度的第  $k$  年第  $i$  省份或行业的碳减排相对发展度指数  $\lambda_i(k)$ 。对  $\phi_i(k)$  和  $\lambda_i(k)$  进行几何平均,可得第  $k$  年第  $i$  省份或行业的碳减排相对协调度指数  $\delta_i(k)$ ,计算公式如下:

$$\delta_i(k)=\sqrt{\phi_i(k)\cdot\lambda_i(k)} \quad (3)$$

(3)各省份或各行业工业碳减排相对协调发展度指数。由于各省份或各行业的工业碳减排相对发展度指数和相对协调度指数会存在不一致的情况,从而可能会出现范柏乃等<sup>[19]</sup>所提到的低水平协调问题,也即经济系统有可能在较低的发展水平上实现较高的协调度,从而导致协调度系数未能有效地反映经济系统协调发展的全貌。因此,需要进一步对  $\xi_i(k)$  和  $\delta_i(k)$  进行几何平均,从而计算得到第  $k$  年第  $i$  省份或行业的碳减排相对协调发展度指数  $\varpi_i(k)$ ,计算公式如下:

$$\varpi_i(k)=\sqrt{\xi_i(k)\cdot\delta_i(k)} \quad (4)$$

可见, $\delta_i(k)$  和  $\varpi_i(k)$  取值也均在 0—1 之间,数值越大,表示第  $k$  年第  $i$  省份或行业的碳减排相对协调水平和相对协调发展水平越高。

### 2. 中国工业碳减排整体成熟度指数

(1)中国工业碳减排整体发展度指数。第  $k$  年中国工业碳减排整体发展度指数  $D_k$ ,可以通过各省份或各行业的相对发展度指数进行算术平均计算获得,计算公式如下:

$$D_k=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m \xi_i(k) \quad (5)$$

区域格局和工业结构的不断调整和优化,是中国工业经济低碳发展的重要内容,但上述简单算术平均方法无法体现区域格局或工业结构的变化对中国工业碳减排整体发展度所造成的影响。为此,本文构造了考虑区域格局或工业结构影响的第  $k$  年中国工业碳减排整体发展度指数  $D_k^\dagger$ , 计算公式如下:

$$D_k^\dagger = \sum_{i=1}^m \omega_i \xi_i(k) \quad (6)$$

其中,  $\omega_i$  为第  $i$  省份或行业的工业销售产值在整体中的占比。区域格局或工业结构对中国工业碳减排整体发展度指数造成的影响,可以通过指标  $\theta$  加以测度,计算公式如下:

$$\theta = D_k^\dagger - D_k \quad (7)$$

$\theta$  值大于 0,表示区域格局或工业结构对中国工业碳减排整体发展度起到积极的提升作用,且  $\theta$  值越大,起到的提升作用越大; $\theta$  值小于 0,表示区域格局或工业结构对中国工业碳减排整体发展度提升起到不利的阻碍作用,且  $\theta$  绝对值越大,起到的阻碍作用越大。

(2)中国工业碳减排整体协调度指数。与中国工业碳减排整体发展度指数测度方法不同,中国工业碳减排整体协调度指数所要测度的是各省份间或各行业间碳减排的协同水平,因此,无法通过各省份或各行业的相对协调度指数进行简单算术平均计算获得,但可以通过距离协调度模型进行测度。距离协调度模型的本质,是通过测度经济系统现实状态与理想状态的欧式距离与切比雪夫距离之间的比率关系来衡量经济系统的协调水平。基于前述假设,第  $k$  年各省份或各行业的产值碳排放强度实际值与最优值的欧式距离测度公式为:

$$o_k = \sqrt{\sum_{i=1}^m [x_0(k) - x_i(k)]^2} \quad (8)$$

第  $i$  省份或行业在整个期间的产值碳排放强度实际值与最优值的切比雪夫距离测度公式为:

$$q_i = \max_{1 \leq k \leq n} \{|x_0(k) - x_i(k)|\} \quad (9)$$

基于(8)式和(9)式构建的第  $k$  年中国工业碳减排整体协调度指数测度公式为:

$$C_k = 1 - \sqrt{(o_k)^2 / \sum_{i=1}^m (q_i)^2} \quad (10)$$

很明显,  $0 \leq C_k \leq 1$ ,  $C_k$  值越大表示各省份或各行业之间的碳减排趋同水平越高,中国工业碳减排整体协调水平越高;反之,  $C_k$  值越小表示各省份或各行业之间的碳减排趋同水平越低,中国工业碳减排整体协调水平越低。同理,可以计算考虑区域格局或工业结构的第  $k$  年中国工业碳减排整体协调度指数  $C_k^\dagger$ 。进一步参照(7)式,通过将  $C_k$  和  $C_k^\dagger$  进行比较,可计算出区域格局或工业结构对中国工业碳减排整体协调度指数造成的影响。

(3)中国工业碳减排整体协调发展度指数。同一年份中国工业碳减排整体发展度指数所处阶段和整体协调度指数所处阶段也可能存在不一致的情况,从而导致单独使用中国工业碳减排整体发展度指数或中国工业碳减排整体协调度指数对中国工业碳减排整体成熟度进行综合评价可能存在片面性。基于此,可以通过对  $D_k$  和  $C_k$  进行几何平均,构建中国工业碳减排整体协调发展度指数  $H_k$ ,计算公式如下:

$$H_k = \sqrt{D_k \cdot C_k} \quad (11)$$

同理,可计算考虑区域格局或工业结构的第  $k$  年中国工业碳减排整体协调发展度指数  $H_k^\dagger$ 。  $H_k$

和  $H_k^\dagger$  取值也均在 0—1 之间,数值越大,表示第  $k$  年中国工业碳减排整体协调发展水平越高。对两者进行比较,可计算出区域格局或工业结构对中国碳减排整体协调发展度指数造成的影响。

为研究方便,本文分别对  $\xi_i(k)$ 、 $\delta_i(k)$ 、 $\omega_i(k)$ 、 $D_k$ 、 $D_k^\dagger$ 、 $C_k$ 、 $C_k^\dagger$ 、 $H_k$  和  $H_k^\dagger$  9 个测度指数进行百分制处理。借鉴陈佳贵等<sup>[7]</sup>的研究,本文将上述 9 个测度指数所表示的成熟度水平划分为四个阶段:用 I 表示非常低水平阶段(指数值大于等于 0,小于等于 35);用 II 表示较低水平阶段(指数值大于 35,小于等于 70);用 III 表示较高水平阶段(指数值大于 70,小于等于 85);用 IV 表示非常高水平阶段(指数值大于 85,小于等于 100)。从而对中国各省份或各行业以及整体工业碳减排成熟度水平及其所处阶段进行更好地描述和度量。

## 四、实证分析

### 1. 中国各省份工业碳减排相对成熟度分析

经济发展水平、区位条件和管理体制等诸多因素的不同,会导致各省份工业碳减排发展水平和协调水平存在显著差异。表 1 为根据(2)—(4)式计算所得的 2003 年和 2012 年中国各省份工业碳减排相对成熟度指数及其所处阶段情况。可以看出,除了东部区域的河北、中部区域的山西和西部区域的内蒙古、贵州及宁夏等个别省份外,东部区域的三个相对成熟度指数均值都高于东北部区域、中部区域和西部区域,且各省份相对发展度指数普遍高于相对协调度指数。这一方面表明较高的经济发展水平更有利于通过推动节能减排技术发展来促进产值能耗强度降低,从而更快地推动碳减排发展度指数提升;另一方面也表明较快的经济发展水平提升也可能会加深对以煤炭为主的能源消费结构的依赖,从而阻碍能耗碳排放强度降低,不利于碳减排协调度指数提升。

从表 1 还可以看出,相对于 2003 年,2012 年各省份三个相对成熟度指数普遍得到不同幅度的提升。其中,各省份平均相对发展度指数的提升幅度明显高于平均相对协调度指数的提升幅度。以相对发展度指数测度,2003 年有 8 个省份处于非常高水平阶段,12 个省份处于较高水平阶段,9 个省份处于较低水平阶段和 1 个省份处于非常低水平阶段;2012 年则有 21 个省份处于非常高水平阶段,9 个省份处于较高水平阶段,没有省份处于其他两个更低水平阶段。以相对协调度指数测度,2003 年有 11 个省份处于较高水平阶段,19 个省份处于较低水平阶段,没有省份处于其他两个水平阶段;2012 年则有 2 个省份处于非常高水平阶段,15 个省份处于较高水平阶段,13 个省份处于较低水平阶段,没有省份处于非常低水平阶段。这表明各省份平均相对发展度指数所处的阶段也要显著高于各省份平均相对协调度指数所处的阶段。在相对发展度指数和相对协调度指数的共同作用下,以相对协调发展度指数测度,2003 年有 2 个省份处于非常高水平阶段,13 个省份处于较高水平阶段,15 个省份处于较低水平阶段,没有省份处于非常低水平阶段;2012 年则有 6 个省份处于非常高水平阶段,22 个省份处于较高水平阶段,2 个省份处于较低水平阶段,没有省份处于非常低水平阶段。

除了各省份间工业碳减排相对发展水平和相对协调水平会存在显著不同外,各省份内工业碳减排发展水平和协调水平往往也会存在显著差异。表 2 为根据表 1 整理所得的 2003 年和 2012 年中国各省份工业碳减排发展水平和协调水平所处阶段的匹配情况,为研究方便,将 I 阶段和 II 阶段合并为低水平阶段,将 III 阶段和 IV 阶段合并为高水平阶段。可以看出,2003 年有 11 个省份处于高发展水平—高协调水平阶段,有 10 个省份处于低发展水平—低协调水平阶段,有 9 个省份处于高发展水平—低协调水平阶段。这表明确有部分省份存在发展水平所处阶段和协调水平所处阶

表1 2003年和2012年中国各省份工业碳减排相对成熟度指数及其所处阶段情况

区域	省份	发展度指数				协调度指数				协调发展度指数			
		2003		2012		2003		2012		2003		2012	
		指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段
东部	北京	90.97	IV	100.00	IV	74.47	III	79.60	III	82.31	III	89.22	IV
	天津	94.13	IV	95.56	IV	78.37	III	68.97	II	85.89	IV	81.18	III
	河北	62.71	II	84.29	III	60.93	II	65.30	II	61.81	II	74.19	III
	上海	97.25	IV	97.96	IV	73.07	III	73.52	III	84.30	III	84.87	III
	江苏	94.99	IV	97.15	IV	66.92	II	68.63	II	79.73	III	81.65	III
	浙江	96.60	IV	96.43	IV	73.13	III	70.25	III	84.05	III	82.30	III
	福建	94.64	IV	95.73	IV	74.40	III	75.04	III	83.91	III	84.75	III
	山东	85.63	IV	94.73	IV	63.63	II	69.28	II	73.81	III	81.01	III
	广东	100.00	IV	97.80	IV	78.64	III	74.16	III	88.68	IV	85.16	IV
海南	77.88	III	92.48	IV	84.20	III	73.32	III	80.98	III	82.34	III	
东北部	辽宁	74.23	III	92.26	IV	65.46	II	71.66	III	69.70	II	81.31	III
	吉林	73.97	III	90.75	IV	64.58	II	66.84	II	69.11	II	77.88	III
	黑龙江	74.90	III	88.56	IV	60.94	II	69.29	II	67.56	II	78.33	III
中部	山西	48.13	II	82.03	III	53.64	II	65.36	II	50.81	II	73.22	III
	安徽	62.41	II	94.00	IV	59.98	II	70.38	III	61.18	II	81.34	III
	江西	73.33	III	95.50	IV	65.62	II	74.81	III	69.37	II	84.53	III
	河南	77.09	III	92.20	IV	57.95	II	67.17	II	66.84	II	78.70	III
	湖北	75.08	III	92.14	IV	72.25	III	78.43	III	73.65	III	85.01	IV
	湖南	77.96	III	93.06	IV	70.98	III	76.23	III	74.39	III	84.22	III
西部	内蒙古	59.44	II	80.48	III	50.98	II	54.45	II	55.05	II	66.20	II
	广西	72.06	III	90.44	IV	74.90	III	76.37	III	73.47	III	83.11	III
	重庆	73.63	III	90.95	IV	71.39	III	83.25	III	72.50	III	87.02	IV
	四川	75.28	III	92.99	IV	69.59	II	90.01	IV	72.38	III	91.49	IV
	贵州	53.63	II	80.28	III	57.18	II	69.02	II	55.37	II	74.44	III
	云南	69.53	II	84.13	III	66.78	II	73.84	III	68.14	II	78.82	III
	陕西	80.22	III	91.26	IV	62.23	II	73.23	III	70.65	III	81.75	III
	甘肃	68.23	II	83.02	III	61.53	II	66.69	II	64.79	II	74.41	III
	青海	60.43	II	84.59	III	62.93	II	89.66	IV	61.67	II	87.09	IV
	宁夏	33.33	I	71.05	III	47.61	II	54.37	II	39.84	II	62.16	II
新疆	66.54	II	75.63	III	64.79	II	66.63	II	65.66	II	70.99	III	

资料来源:作者计算整理。

段不同步的现象,存在这种不同步现象的省份在2012年变得更多,2012年共有13个省份处于高发展水平—低协调水平阶段。

## 2. 中国各工业行业碳减排相对成熟度分析

能源消耗水平、能源消费结构和高新技术发展水平等诸多因素的不同,会导致中国各工业行业碳减排相对发展水平和相对协调水平存在显著的差异。表3为根据(2)—(4)式计算所得的2003年和2012年中国各工业行业碳减排相对成熟度指数及其所处阶段情况。可以看出,无论是发展度指数、协调度指数,还是协调发展度指数,制造业的三个相对成熟度指数均值都高于采矿业和公用事



表 2 2003 年和 2012 年中国各省份工业碳减排发展水平和协调水平所处阶段的匹配情况

	2003	2012
高发展水平—高协调水平阶段	北京、天津、上海、浙江、福建、广东、湖北、湖南、广西、海南、重庆	北京、辽宁、上海、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、陕西、四川、云南、青海
低发展水平—低协调水平阶段	河北、山西、内蒙古、安徽、贵州、云南、甘肃、青海、新疆、宁夏	—
高发展水平—低协调水平阶段	辽宁、吉林、黑龙江、江西、河南、四川、陕西、江苏、山东	天津、吉林、黑龙江、江苏、山东、河南、河北、山西、内蒙古、贵州、甘肃、宁夏、新疆

资料来源:根据表 1 内容整理。

业,且各个行业相对发展度指数普遍高于相对协调度指数。这一方面表明节能减排技术提升对各行业产值能耗强度下降存在普遍的“推动”效应,从而促进碳减排发展度指数提升;另一方面也表明各行业的快速增长也加深了对以煤炭为主的能源消费结构的依赖,从而阻碍了整体能耗碳排放强度的下降,不利于碳减排协调度指数提升。

从表 3 还可以看出,相对于 2003 年,2012 年各行业三个相对成熟度指数也普遍得到不同幅度的提升。其中,各行业平均相对发展度指数增幅也明显高于平均相对协调度指数增幅。以相对发展度指数测度,2003 年有 13 个行业处于非常高水平阶段,8 个行业处于较高水平阶段,16 个行业处于较低水平阶段和 1 个行业处于非常低水平阶段;2012 年则有 28 个行业处于非常高水平阶段,6 个行业处于较高水平阶段,4 个行业处于较低水平阶段,没有行业处于非常低水平阶段。以相对协调度指数测度,2003 年有 2 个行业处于非常高水平阶段,16 个行业处于较高水平阶段,20 个行业处于较低水平阶段,没有行业处于非常低水平阶段;2012 年虽然多数行业所处的协调度水平阶段均发生了变化,但其结果与 2003 年相同,也有 2 个行业处于非常高水平阶段,16 个行业处于较高水平阶段,20 个行业处于较低水平阶段,没有行业处于非常低水平阶段。这表明各行业相对发展度指数所处的阶段要显著高于各行业相对协调度指数所处的阶段。在相对发展度指数和相对协调度指数的共同作用下,以相对协调发展度指数测度,2003 年有 6 个行业处于非常高水平阶段,15 个行业处于较高水平阶段,17 个行业处于较低水平阶段,没有行业处于非常低水平阶段;2012 年则有 5 个行业处于非常高水平阶段,30 个行业处于较高水平阶段,3 个行业处于较低水平阶段,没有行业处于非常低水平阶段。

与各省份内工业碳减排发展水平和协调水平之间存在显著差异类似,各工业行业内碳减排发展水平和协调水平也存在显著不同。表 4 为根据表 3 整理所得的 2003 年和 2012 年中国各工业行业碳减排发展水平和协调水平所处阶段的匹配情况,同样为研究方便,将 I 阶段和 II 阶段合并为低水平阶段,将 III 阶段和 IV 阶段合并为高水平阶段。可以看出,2003 年有 17 个行业处于高发展水平—高协调水平阶段,有 16 个行业处于低发展水平—低协调水平阶段,有 4 个行业处于高发展水平—低协调水平阶段和 1 个行业处于低发展水平—高协调水平阶段。这也表明确实有部分行业存在发展水平所处阶段和协调水平所处阶段不同步的现象,存在这种不同步现象的行业在 2012 年出现了大幅度增加,2012 年共有 17 个省份处于高发展水平—低协调水平阶段。与各省份情况相比,各行业内碳减排发展水平和协调水平所处阶段的差异性更大。

### 3. 中国工业碳减排整体成熟度分析

表 5 为根据前述公式计算所得的 2003—2012 年中国工业碳减排整体成熟度指数变化情况。可以看出,虽然中国正处于工业化加速发展关键时期,但重工业发展速度也在同步加快,期间伴随着

表 3 2003 年和 2012 年中国各工业行业碳减排相对成熟度指数及其所处阶段情况

大类	中类	发展度指数				协调度指数				协调发展度指数			
		2003		2012		2003		2012		2003		2012	
		指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段	指数	阶段
采 矿 业	H1	44.66	II	84.94	III	58.63	II	80.32	III	51.17	II	82.59	III
	H2	57.39	II	86.27	IV	70.92	III	89.54	IV	63.80	II	87.89	IV
	H3	45.57	II	89.77	IV	54.31	II	69.18	II	49.75	II	78.80	III
	H4	58.91	II	89.04	IV	57.58	II	63.44	II	58.24	II	75.15	III
	H5	45.64	II	82.92	III	57.72	II	69.12	II	51.33	II	75.71	III
制 造 业	H6	86.98	IV	97.66	IV	85.05	IV	72.93	III	86.01	IV	84.40	III
	H7	78.96	III	94.10	IV	76.75	III	75.53	III	77.85	III	84.30	III
	H8	81.55	III	94.80	IV	80.18	III	76.11	III	80.86	III	84.94	III
	H9	95.25	IV	99.63	IV	85.25	IV	73.86	III	90.11	IV	85.78	IV
	H10	76.26	III	88.30	IV	70.31	III	64.43	II	73.23	III	75.42	III
	H11	95.64	IV	98.31	IV	77.67	III	70.59	III	86.19	IV	83.31	III
	H12	96.46	IV	98.23	IV	77.00	III	66.72	II	86.18	IV	80.96	III
	H13	76.63	III	94.13	IV	74.54	III	69.64	II	75.58	III	80.97	III
	H14	93.01	IV	99.46	IV	80.22	III	72.47	III	86.38	IV	84.90	III
	H15	58.95	II	81.59	III	65.24	II	69.05	II	62.01	II	75.06	III
	H16	83.17	III	95.95	IV	66.31	II	66.12	II	74.26	III	79.65	III
	H17	93.99	IV	100.00	IV	72.76	III	74.16	III	82.69	III	86.11	IV
	H18	51.22	II	82.15	III	68.68	II	89.30	IV	59.31	II	85.65	IV
	H19	42.43	II	73.68	III	58.73	II	75.39	III	49.92	II	74.53	III
	H20	79.86	III	94.68	IV	74.00	III	73.04	III	76.87	III	83.16	III
	H21	57.24	II	87.39	IV	62.07	II	65.27	II	59.60	II	75.52	III
	H22	72.17	III	88.91	IV	68.09	II	64.80	II	70.10	III	75.90	III
	H23	87.35	IV	92.89	IV	68.80	II	64.94	II	77.52	III	77.67	III
	H24	35.90	II	69.47	II	55.48	II	75.29	III	44.63	II	72.32	III
	H25	33.33	I	61.41	II	52.02	II	68.41	II	41.64	II	64.82	II
H26	47.44	II	80.72	III	54.43	II	62.85	II	50.81	II	71.23	III	
H27	78.89	III	93.33	IV	65.57	II	65.50	II	71.93	III	78.19	III	
H28	86.48	IV	95.60	IV	73.31	III	73.76	III	79.63	III	83.97	III	
H29	87.63	IV	97.60	IV	78.40	III	72.85	III	82.89	III	84.32	III	
H30	93.95	IV	97.83	IV	74.64	III	73.34	III	83.74	III	84.70	III	
H31	96.45	IV	99.03	IV	73.54	III	66.77	II	84.22	III	81.32	III	
H32	100.00	IV	99.31	IV	72.00	III	63.95	II	84.85	III	79.69	III	
H33	95.96	IV	98.61	IV	75.37	III	66.73	II	85.05	IV	81.12	III	
H34	60.53	II	66.82	II	61.39	II	56.40	II	60.96	II	61.39	II	
H35	65.38	II	99.56	IV	54.58	II	78.57	III	59.74	II	88.45	IV	
公 用 事 业	H36	53.84	II	85.29	IV	58.03	II	62.00	II	55.89	II	72.72	III
	H37	49.12	II	92.15	IV	66.66	II	72.73	III	57.22	II	81.86	III
	H38	53.72	II	62.97	II	50.76	II	53.58	II	52.22	II	58.08	II

注：H1：煤炭开采和洗选业；H2：石油和天然气开采业；H3：黑色金属矿采选业；H4：有色金属矿采选业；H5：非金属矿采选业；H6：农副食品加工业；H7：食品制造业；H8：饮料制造业；H9：烟草制品业；H10：纺织业；H11：纺织服装、鞋、帽制造业；H12：皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业；H13：木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业；H14：家具制造业；H15：造纸及纸制品业；H16：印刷业和记录媒介的复制；H17：文教体育用品制造业；H18：石油加工、炼焦及核燃料加工业；H19：化学原料及化学制品制造业；H20：医药制造业；H21：化学纤维制造业；H22：橡胶制品业；H23：塑料制品业；H24：非金属矿物制品业；H25：黑色金属冶炼及压延加工业；H26：有色金属冶炼及压延加工业；H27：金属制品业；H28：通用设备制造业；H29：专用设备制造业；H30：交通运输设备制造业；H31：电气机械及器材制造业；H32：通信设备、计算机及其他电子设备制造业；H33：仪器仪表及文化、办公用机械制造业；H34：工艺品及其他制造业；H35：废弃资源和废旧材料回收加工业；H36：电力、热力的生产和供应业；H37：燃气生产和供应业；H38：水的生产和供应业。下表同。

资料来源：作者计算整理。

表 4 2003 年和 2012 年中国各工业行业碳减排发展水平和协调水平所处阶段的匹配情况

	2003	2012
高发展水平—高协调水平阶段	H6、H9、H11、H12、H14、H17、H28、 H29、H30、H31、H32、H33、H7、H8、 H10、H13、H20	H2、H6、H7、H8、H9、H11、H14、H17、 H20、H28、H29、H30、H35、H37、H18、 H1、H19
低发展水平—低协调水平阶段	H1、H3、H4、H5、H15、H18、H19、H21、 H24、H26、H34、H35、H36、H37、H38、 H25	H25、H38、H34
高发展水平—低协调水平阶段	H23、H16、H22、H27	H3、H4、H10、H12、H13、H16、H21、 H22、H23、H27、H31、H32、H33、H36、 H5、H15、H26
低发展水平—高协调水平阶段	H2	H24

资料来源:根据表 3 内容整理。

表 5 2003—2012 年中国工业碳减排整体成熟度指数变化情况

年份	基于省份的整体成熟度指数变化			基于行业的整体成熟度指数变化		
	发展度指数	协调度指数	协调发展度指数	发展度指数	协调度指数	协调发展度指数
2003	74.81	0.92	8.31	71.00	0.59	6.49
2004	78.40	24.49	43.82	74.40	14.89	33.29
2005	80.38	39.73	56.51	77.25	28.88	47.23
2006	82.21	46.76	62.00	80.18	42.18	58.16
2007	84.09	52.58	66.49	82.73	50.60	64.70
2008	86.08	59.49	71.56	85.16	58.69	70.70
2009	87.88	65.70	75.98	86.97	65.87	75.69
2010	88.07	65.84	76.15	87.18	65.56	75.60
2011	88.47	67.67	77.37	88.67	68.69	78.05
2012	89.92	73.23	81.14	89.33	72.02	80.21

资料来源:作者计算整理。

大量的能源消耗和碳排放。在国家 2004 年颁布《节能中长期专项规划》、2005 年制定《可再生能源法》、2007 年出台《中国应对气候变化国家方案》、2011 年出台《“十二五”控制温室气体排放工作方案》、《“十二五”节能减排综合性工作方案》、《“十二五”工业转型升级规划(2011—2015)》和《工业领域应对气候变化行动方案(2012—2020 年)》等一系列节能减排规划、法规和方案措施的推动下,无论是基于省份还是基于行业,中国工业碳减排三个整体成熟度指数均呈持续上升趋势。

其中,无论是基于省份还是基于行业,相对于中国工业碳减排整体发展度指数,2003—2012 年中国工业碳减排整体协调度指数在最初几年存在数值过小而增速过快的现象。这主要由于两个指数的计算方法差异所致。前者是通过每个年份各省份或各行业的相对发展度指数进行算术平均计算获得,起始年份与后续年份的指数值通常不会出现较大幅度差异;而后者是根据每年各省份或各行业的产值碳排放强度实际值与最优值的差距和整个时期的产值碳排放强度实际值与最优值的差距进行综合比较获得,由于起始年份各省份或各行业的产值碳排放强度实际值与最优值的差距往往贴近整个时期的产值碳排放强度实际值与最优值的差距,通过(8)—(10)式计算所得的起始年份指数值与后续年份指数值自然就存在较大幅度差异。这种计算方法差异所引起的计算结果差异,并

不会影响指数值的趋势特征。

从表5还可以看出,按照前述成熟度水平四个阶段的划分,无论是基于省份还是基于行业,截至2008年,中国工业碳减排整体发展度水平都已进入非常高水平阶段;而截至2012年,中国工业碳减排整体协调度水平则都刚刚进入较高水平阶段。两方面综合的结果是,截至2012年,中国工业碳减排整体协调发展度水平依然处在较高水平阶段。这表明当前中国工业碳减排整体协调发展度水平提升主要受制于中国工业碳减排整体协调水平的提升,进一步提升省份间和行业间工业碳减排整体协调水平将会对中国工业碳减排整体协调发展水平提升起到更大的推动作用。此外,虽然基于省份计算所得的三个整体成熟度指数值普遍高于基于行业计算所得的指数值,但两者的差距正在缩小。这表明区域格局和工业结构对中国工业碳减排成熟度影响越来越具有同等重要的作用,未来中国工业碳减排区域政策的制定需要同时考虑区域内的工业结构特征,而行业政策的制定则需要同时考虑行业的区域分布格局。

#### 4. 区域格局和工业结构变化造成的影响分析

伴随着中国经济改革战略的不断推进,中国经济发展的区域格局和产业结构发生着巨大变化。但学术界对区域格局或产业结构变化对中国碳排放造成的整体影响观点不一。王群伟等<sup>[20]</sup>研究认为中国四大区域的碳排放绩效存在明显差异,但差异程度呈下降趋势;但刘华军和赵浩<sup>[21]</sup>研究则认为中国碳排放强度在省份分布上呈明显的非均衡特征,且各省份差异程度呈增大趋势;周五七和聂鸣<sup>[22]</sup>研究也认为中国四大区域工业碳排放效率存在明显差异,但东部区域与中部、西部及东北区域的差距程度呈上升趋势,而东部和西部区域内各省份的工业碳排放效率则存在明显的差异程度下降趋势。可见,区域格局变化对中国碳排放整体测度结果产生的影响并没有定论。张友国<sup>[23]</sup>研究认为1987—2007年三次产业间结构、三次产业内结构和制造业内结构变化带来了中国整体碳排放强度的显著上升;林伯强和孙传旺<sup>[24]</sup>研究则认为产业结构调整对中国碳减排的作用相对较小,且产业结构因素对碳排放增量具有负向影响;陈诗一<sup>[25]</sup>研究也认为产业结构调整虽然不是中国碳减排的主要决定因素,但产业结构调整的确有利于中国碳排放强度的降低。同样,产业结构调整对中国碳排放整体测度结果产生的影响也没有定论。伴随着中国工业发展战略的不断推进,中国工业经济发展的区域格局和工业结构也发生着巨大变化。受篇幅所限,本文没有列示考虑区域格局和工业结构后的中国工业碳减排整体成熟度指数情况。表6仅为根据(5)—(7)式计算所得的2003—2012年区域格局和工业结构对中国工业碳减排整体成熟度指数测度结果造成的影响情况。可以看出,区域格局对整体发展度指数产生了显著的正向影响,而对整体协调度指数产生了显著的负向影响,两者综合使得区域格局在绝大多数年份对整体协调发展度指数产生了显著的负向影响。这主要受东部区域部分省份相对发展度水平较高而相对协调度水平呈下降趋势的影响所致。工业结构对三个整体成熟度指数均产生了显著的负向影响,这主要受部分工业产值占比较高的行业相对发展度指数和相对协调度指数均较低的影响所致。综合来看,本文的结论支持区域格局和工业结构变化都对工业碳减排整体成熟度指数测度结果产生了显著的影响,且更多的年份为负向影响。

从表6还可以看出,自2003年以来,区域格局对整体发展度指数所产生的显著正向影响呈明显下降趋势;而自2007年以来,工业结构对整体协调度指数所产生的显著负向影响也呈明显下降趋势。这一方面表明工业碳减排相对发展度水平较高的东部区域对整体发展度水平的影响越来越弱,未来政策需要不断提升中西部区域的工业碳减排相对发展度水平;另一方面表明各行业产值碳排放强度之间的差异越来越小,未来政策需要不断强化工业产值占比较高的行业工业碳减排相对发展度指数提升。

表 6 2003—2012 年区域格局和工业结构对整体成熟度指数测度结果造成的影响

年份	考虑区域格局变化的基于省份的整体成熟度			考虑工业结构变化的基于行业的整体成熟度		
	指数变化			指数变化		
	发展度指数	协调度指数	协调发展度指数	发展度指数	协调度指数	协调发展度指数
2003	11.44	0.39	2.32	2.65	-0.51	-4.02
2004	9.97	-3.06	-0.30	0.85	-1.58	-1.63
2005	8.65	-8.23	-3.56	-0.30	-5.23	-4.57
2006	7.81	-6.68	-1.93	-1.32	-7.04	-5.52
2007	6.88	-5.67	-1.17	-1.71	-7.27	-5.45
2008	6.02	-4.56	-0.44	-1.80	-6.68	-4.85
2009	4.96	-3.25	0.16	-2.52	-6.31	-4.76
2010	4.66	-4.42	-0.68	-1.68	-5.19	-3.76
2011	4.02	-4.24	-0.78	-2.05	-4.93	-3.73
2012	3.42	-4.74	-1.19	-1.69	-2.03	-1.89

资料来源:作者计算整理。

## 五、结论与建议

### 1. 结论

本文利用灰色关联度分析方法和距离协调度模型,构建了三个中国工业碳减排成熟度测度指数,并从整体和分省份及分行业两个层面对 2003—2012 年中国工业碳减排成熟度进行了综合评价。

(1)虽然 2003 年起中国工业再度出现重型化倾向,但在政府一系列政策推动下,基于发展度指数、协调度指数和协调发展度指数测度的中国工业碳减排整体成熟度呈持续上升趋势。其中,整体发展度指数明显高于整体协调度指数。

(2)无论是 2003 年还是 2012 年,东部区域的三个相对成熟度指数均值都高于东北部区域、中部区域和西部区域;制造业的三个相对成熟度指数均值都高于采矿业和公用事业。2003—2012 年,无论是各省份还是各行业,三个相对成熟度指数均得到不同幅度的提升。其中,相对发展度指数的平均提升幅度明显高于相对协调度指数的平均提升幅度。

(3)各省份和各行业均存在碳减排成熟度所处的发展水平阶段和协调水平阶段不同步的现象,即存在部分省份和行业处于高发展水平—低协调水平阶段的情况。其中,各行业所存在的这种不同步现象比各省份更为明显,部分行业甚至存在处于低发展水平—高协调水平阶段的情况。此外,相对于 2003 年,2012 年各省份和各行业这种不同步现象也更为明显。

(4)区域格局和工业结构对中国工业碳减排整体成熟度具有显著影响。其中,区域格局调整对整体发展度指数具有显著的正向影响,而对整体协调度指数具有显著的负向影响;工业结构变化对整体发展度指数和整体协调度指数均具有显著的负向影响。

### 2. 政策建议

2014 年 11 月 12 日 APEC 会议期间,中美双方发布《中美气候变化联合声明》,美国首次提出到 2025 年温室气体排放在 2005 年基础上整体下降 26%—28%;中国首次提出 2030 年左右碳排放达到峰值,并计划到 2030 年将非化石能源在一次能源中的比重提升至 20%左右。中国这一承诺将会给其工业经济发展带来巨大的转型压力。结合前述分析,本文对新形势下持续推进中国工业碳减排进程提出以下政策建议:

(1)将降低能耗碳排放强度与降低产值能耗强度并重,促进各省份、各行业及整体工业碳减排协调度水平和发展度水平同步提升。长期以来,受以煤炭为主的能源消费结构的约束,中国工业碳

减排一直将降低工业产值能耗强度作为其核心动力,而将降低能耗碳排放强度放在了从属地位。这不仅导致各省份、各行业和整体工业碳减排协调度指数明显低于其发展度指数,也使得各省份、各行业和整体工业碳减排发展度指数提升对其协调发展度指数的提升作用逐步降低。未来政策需要加大新能源开发和使用政策扶持力度,同时积极引入市场机制促进新能源的开发和使用,从而促进中国能源消费结构朝着以清洁能源为主导的方向转变,充分发挥能耗碳排放强度降低对工业产值碳排放强度下降的促进作用,并最终实现各省份、各行业和整体工业碳减排协调度水平与发展度水平的同步提升。

(2)加强省份间碳减排技术交流与合作,将促进省份间碳减排协调发展作为中国工业碳减排成熟度提升的重要途径。当前区域格局调整对中国工业碳减排整体发展度指数的促进作用逐年下降,主要由于中西部省份工业产值在全国占比逐渐提升而其工业产值碳排放强度相对发展度指数较低两方面共同作用所致。随着中国区域协调发展战略的推进,中西部省份工业碳减排将会对中国工业碳减排整体成熟度水平起到越来越重要的作用。未来政策不仅需要建立先进碳减排技术由发达省份向欠发达省份转移的引导机制,还要建立发达省份间碳减排技术交流和平台;同时,对河北、江苏、山东等经济规模大、经济发展水平高的“重点省份”要实施更加严格的碳减排措施,并防止欠发达省份工业再度重型化过程中数量型、粗放式扩张所导致的碳排放急剧上升,从而促进省份间碳减排协调发展,提升中国工业碳减排整体成熟度水平。

(3)推动工业结构调整和优化,将促进高新技术产业发展作为中国工业碳减排成熟度提升的重要内容。21世纪以来,工业结构重型化趋势所导致的能源消耗增长加剧,是导致中国碳排放总量增加的重要原因。但工业重型化是由中国当前工业化和城市化的快速发展阶段所决定的。直接对现有工业结构进行调整,势必会限制中国的工业化和城市化进程。因此,要对存量调整和增量调整进行区别对待。对现有的重工业行业要明确其节能减排标准和落后产能淘汰要求,并设置更为严格的再投资条件,从而提升其碳减排成熟度和约束其过度的规模扩张;对新增的能源节约型高新技术产业要降低其准入条件,并对其技术创新和研发投入给予积极的政策支持,从而不断提升其在工业整体中的规模占比。与此同时,为进一步提升工业结构调整的整体影响效果,还需要对产值占比较大的工业行业实施更加严格的碳减排措施,从而不断弱化当前工业结构对中国工业碳减排整体成熟度水平提升所造成的负面影响。

#### [参考文献]

- [1]查建平,唐方方,傅浩. 产业视角下的中国工业能源碳排放 Divisia 指数分解及实证分析[J]. 当代经济科学, 2010,(9):88-94.
- [2]陈诗一. 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]. 世界经济, 2011,(4):124-143.
- [3]徐盈之,徐康宁,胡永舜. 中国制造业碳排放的驱动因素及脱钩效应[J]. 统计研究, 2011,(7):55-61.
- [4]何小钢,张耀辉. 中国工业碳排放影响因素与 CKC 重组效应——基于 STIRPAT 模型的分行业动态面板数据实证研究[J]. 中国工业经济, 2012,(1):26-35.
- [5]孙作人,周德群,周鹏. 工业碳排放驱动因素研究:一种生产分解分析新方法[J]. 数量经济技术经济研究, 2012,(5):63-74.
- [6]涂正革,王玮. 碳排放的驱动因素及我国低碳政策选择——基于 1994—2010 年工业 39 个行业的证据[J]. 广东社会科学, 2013,(1):76-80.
- [7]陈佳贵,黄群慧,钟宏武. 中国地区工业化进程的综合评价和特征分析[J]. 经济研究, 2006,(6):4-15.
- [8]陈诗一. 中国各地区低碳经济转型进程评估[J]. 经济研究, 2012,(8):32-44.
- [9]王文举,李峰. 国际碳排放核算标准选择的公平性研究[J]. 中国工业经济, 2013,(3):59-71.

- [10]王文举,向其凤. 中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J]. 中国工业经济, 2014,(1):44-56.
- [11]任兆璋,刘云生. 广东金融成熟度综合指数研究[J]. 金融研究, 2010,(3):183-193.
- [12]朱航. 中国保险市场成熟度指数研究[J]. 保险研究, 2013,(6):35-42.
- [13]杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [14]齐志强,张干,齐建国. 进入 WTO 前后中国制造业部门结构演变研究——基于制造业部门与工业整体经济增长的灰色关联度分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2011,(2):52-63.
- [15]谢乃明,刘思峰. 几类关联度模型的平行性和一致性[J]. 系统工程, 2007,(8):98-103.
- [16]刘思峰,蔡华,杨英杰,曹颖. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013,(8):2041-2046.
- [17]汤铃,李建平,余乐安,覃东海. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010,(4):594-602.
- [18]李海东,王帅,刘阳. 基于灰色关联理论和距离协同模型的区域协同发展评价方法及实证[J]. 系统工程理论与实践, 2014,(7):1749-1955.
- [19]范柏乃,张维维,贺建军. 我国经济社会协调发展的内涵及其测度研究[J]. 统计研究, 2013,(7):3-8.
- [20]王群伟,周鹏,周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. 中国工业经济, 2010,(1):45-54.
- [21]刘华军,赵浩. 中国二氧化碳排放强度的地区差异分析[J]. 统计研究, 2012,(6):46-50.
- [22]周五七,聂鸣. 中国工业碳排放效率的区域差异研究——基于非参数前沿的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2012,(9):58-70.
- [23]张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响[J]. 经济研究, 2010,(4):120-132.
- [24]林伯强,孙传旺. 如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标[J]. 中国社会科学, 2011,(1):64-76.

## Research on Maturity of China's Industrial Carbon Emissions Reduction

WANG Wen-Ju, LI Feng

(Economics School, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

**Abstract:** Beginning with Kaya equation, this article selects three basic indicators, the energy consumption intensity of output, the carbon emission intensity of energy consumption, and the carbon emission intensity of output, uses grey co-relational analysis method and distance coordination degree model, constructs three maturity measurement indexes, the development index, the coordination index, and the coordination development index, and based on the data of 30 provinces and 38 industrial sectors, evaluates comprehensively the industrial carbon reduction emission in China since 2003 to 2012. The study shows that, though heavy trends reappeared in Chinese industry in 2003, driven by the series of policies, there is a continuing growth trend in the three maturity measurement indexes. In which, the eastern region has the relative maturity indexes level higher than the northeast regions, the central regions and the western regions, manufacturing industry has the relative maturity index level higher than the mining industry and utilities. It also shows that, regional pattern and industrial structure have a significant effect on the overall maturity of China's industrial carbon emissions reduction, some provinces and industrial sectors carbon emission reduction maturity also exists significant asynchronous phenomena in the level of development and coordination. According to the evaluation result, the local governments and various industrial sectors both need to set up reasonable low carbon policies and build mutual coordination mechanisms to continue promoting the maturity of China's industrial carbon emissions.

**Key Words:** industrial carbon emission reduction; maturity index; grey co-relational analysis; distance coordination degree model

**JEL Classification:** O13 O14 Q53

[责任编辑:王燕梅]