

动态预测视角下 产业系统碳排放强度减排压力分析

——基于低碳发展弹性系数的研究

王万军 路正南 朱东旦

内容提要 本文利用2001-2014年我国产业部门相关数据,基于ARIMA模型,对2020年我国碳排放强度进行了预测,预测结果显示2020年中国实现减排目标的概率较大。在预测结果的基础上,利用低碳发展弹性系数计算了既定目标下,我国具体产业部门的减排压力,结论是:6种低碳发展情形下,完全脱钩发展、基本脱钩发展和弱脱钩发展的17个产业部门,在碳配额后,碳减排压力相对较小,而弱联结发展、联结发展以及超联结发展的22个产业部门,碳减排压力较大。

关键词 产业系统 碳排放强度 目标减排 ARIMA模型 低碳发展弹性系数

王万军,江苏大学管理学院博士研究生 212013

路正南,江苏大学管理学院教授,江苏大学京江学院院长 212013

朱东旦,江苏大学京江学院讲师 212013

一、引言

工业革命改变了人类社会经济活动的基本范式,以化石能源为主的能源资源成为推动经济发展与社会进步的重要引擎。2013年,我国GDP占世界总量的12%,但能源消费却占到全球能源消费总量的22%。作为一个负责任的大国,中国政府已经认识到碳减排的重要性和紧迫性。在2009年哥本哈根气候峰会前,中国宣布,到2020年中国单位GDP二氧化碳排放要比2005年下降40%-45%。2015年3月5日,李克强总理作政府工作报告时指出,当年二氧化碳排放强度要降低3.1%以上。中国政府的多次节能减排承诺向世界表明了减排的坚定决心。要实现既定的碳减排目标,除了要对中国的动态碳排放情况作出较为准确的预测,还需要对碳排放进行因素分解,确定碳减排面临的压力,进而有针对性实施减排措施,实现减排目标。

目前,关于碳强度减排目标实现的研究,主要从碳排放与经济增长的关系、碳排放影响因素及其

本文为国家自然科学基金项目“基于非期望产出率熵变的产业系统减排机理及碳减排差别责任研究”(71173094)阶段性成果。

分解、减排差别责任确定等角度出发。Zhang(2009)^[1]等分析了碳排放、能源消费与经济增长之间的格兰杰因果关系,认为经济增长单向影响能源消费,能源消费单向影响碳排放,而碳排放与能源消费则不是经济增长的原因,制定适当的碳减排政策并不会影响经济增长。Agnolucci(2009)^[2]认为化石类能源的碳排放系数是影响碳排放强度的重要因素。Wang(2010)^[3]认为人口因素、能源消费结构、产业结构等因素对碳排放强度有重要影响。Pani(2011)^[4]等则认为能源强度以及能源消费结构构成了影响碳排放强度最重要的因素。关于碳排放强度的因素分解,主要基于结构分解法(Structural Decomposition Analysis,简称SDA)和指数分解法(Index Decomposition Analysis,简称IDA),Peters(2007)^[5]对中国碳排放和碳排放强度变化进行了SDA的结构化解析研究,袁鹏(2012)^[6]、李恒川(2015)^[7]使用LMDI分解法与多种方法相结合,对碳排放强度进行了多层次分解,明确了碳排放强度的具体影响因素。

“煤炭消费总量控制是我国近年来实施的一项重要政策措施,其目的是减少煤炭生产与消费对生态环境的负面影响。”^[8]本文拟在上述研究基础上,从我国的动态碳排放强度预测出发,通过计算低碳发展弹性系数确定减排压力,从碳减排压力角度分析我国2020年碳排放强度减排目标的实现。本文的研究结论将对我国碳排放强度减排的具体实施提供理论依据,具有一定的实践意义。

二、基于ARIMA模型的我国产业系统碳排放强度测算

我国政府承诺到2020年,碳排放强度相比2005年降低40%~45%。通过对碳排放与低碳发展的分析,为完成我国碳减排目标,我们首先要做的是判断我国减排压力,从而找出我国减排的实现途径。本文拟通过ARIMA模型,模拟并预测我国二氧化碳和国内生产总值在2000~2020年的数据,计算碳排放强度,为进一步研究碳排放强度的因素分解奠定数据基础。

1. ARIMA模型简述

1970年,博克斯和詹金斯提出了一种随机时间序列模型——ARIMA模型。ARIMA模型有三种基本类型:自回归模型(即AR模型)、移动平均模型(即MA模型)、自回归移动平均模型(即ARIMA模型)。

可以表示为:

$$y_t = \varphi_1 \omega_{t-1} + \varphi_2 \omega_{t-2} + \dots + \varphi_p \omega_{t-p} + \mu_t - \theta_1 \mu_{t-1} - \theta_2 \mu_{t-2} - \dots - \theta_q \mu_{t-q}$$

则称 y_t 是自回归移动平均序列,称上式为 (p, q) 阶的自回归移动平均模型,记 $ARMA(p, q)$ 。其中,

[1]Zhang X-P, Cheng X-M. Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics*. 2009, 68(10): 2706-2712.

[2]Agnolucci P, Ekins P, Iacopini G, Anderson K, Bows A, Mander S, Shackley S. Different scenarios for achieving radical reduction in carbon emissions: A decomposition analysis. *Ecological Economics*. 2009, 68(6): 1652-1666.

[3]Wang T, Watson J. Scenario analysis of China's emissions pathways in the 21st century for low carbon transition. *Energy Policy*. 2010, 38(7): 3537-3546.

[4]Pani R, Mukhopadhyay U. Variance analysis of global CO₂ emission - A management accounting approach for decomposition study. *Energy*. 2011, 36(1): 486-499.

[5]Peters GP, Hertwich EG. CO₂ Embodied in International Trade with Implications for Global Climate Policy. *Environmental Science & Technology*. 2008, 42(5): 1401-1407.

[6]袁鹏、程施、刘海洋:《国际贸易对我国CO₂排放增长的影响:基于SDA与LMDI结合的分解法》,〔武汉〕《经济评论》2010年第1期。

[7]李恒川、路正南:《中国产业系统非期望产出率熵变层级结构关系研究——基于PLS回归的层级因素分解技术》,〔济南〕《中国人口·资源与环境》2015年第3期。

[8]余熙:《我国煤炭总量控制对关联产业的影响》,《常州大学学报(社会科学版)》2016年第6期。

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为自回归系数, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 为移动平均系数, 它们都是模型的待估参数。运用 ARIMA 模型研究分析时, 自相关系数和偏相关系数是最重要的参数。

实际应用中, 常见的时间序列多呈现某种趋势, 但很多时间序列可以通过差分达到平稳。如果时间序列 y_t 是非平稳的, 经过 d 阶逐期差分后平稳, 则新序列 z_t 称为齐次序列, 记为:

$$z_t = \nabla^d y_t \quad (t > d)$$

平稳时间序列 z_t 可以建立 ARIMA(p, q) 模型, 原时间序列 y_t 可表示为 ARIMA(p, d, q)。

2. 我国碳排放强度序列检验

对我国碳强度指标模拟, 我们参照历年的《中国统计年鉴》中的数据, 数据年份选取 2001-2014 年。由于其中没有现成的 CO₂ 排放量数据, 本文是根据化石能源消耗进行转换来计算的。

对序列 GDP 和 CO₂ 先求自然对数, 分别记为 LnGDP 和 Ln CO₂, 再对序列 LnGDP 和 Ln CO₂ 进行平

表 1 序列 LnGDP 和 LnCO₂ 进行平稳性检验结果

检验序列	LnGDP	ΔLnGDP	Δ ² LnGDP	Δ ³ LnGDP	LnCO ₂	ΔLnCO ₂	Δ ² LnCO ₂
ADF 检验值	0.437913	-1.83305	-1.27182	-7.40514	1.035930	-1.96954	-3.66302
1%显著性水平	-4.12199	-4.42059	-4.58264	-4.58264	-4.12199	-4.20005	-4.42059
5%显著性水平	-3.14492	-3.25980	-3.32096	-3.32096	-3.14492	-3.17535	-3.25980
10%显著性水平	-2.71375	-2.77112	-2.80138	-2.80138	-2.71375	-2.72898	-2.77112
概率 p	0.9752	0.3440	0.5856	0.0005	0.7032	0.2936	0.0283
检验结果	未通过	未通过	未通过	通过	未通过	未通过	通过
平稳性	非平稳	非平稳	非平稳	平稳	非平稳	非平稳	平稳

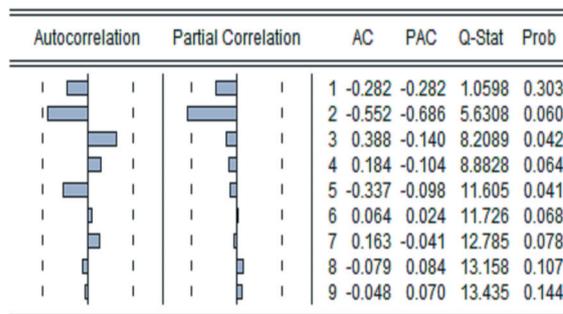


图 1 Δ²LnGDP 的自(偏)相关图

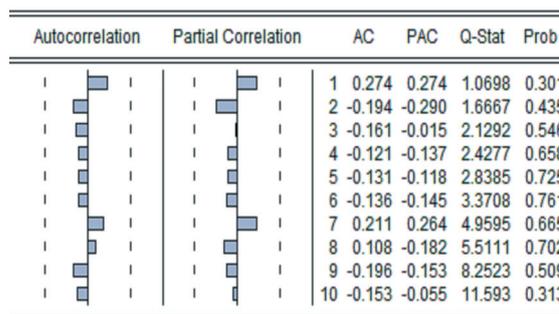


图 2 Δ²LnCO₂ 的自(偏)相关图

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(1)	0.202829	NA	NA	NA
AR(2)	0.204143	NA	NA	NA
AR(3)	0.207583	NA	NA	NA
AR(4)	0.208116	NA	NA	NA
AR(5)	0.211900	NA	NA	NA
MA(1)	4.897241	NA	NA	NA
MA(2)	0.374735	NA	NA	NA
R-squared	0.999171	Mean dependent var	12.67876	
Adjusted R-squared	0.994194	S.D. dependent var	0.364848	
S.E. of regression	0.027801	Akaike info criterion	-4.656950	
Sum squared resid	0.000773	Schwarz criterion	-4.587439	
Log likelihood	25.62780	Hannan-Quinn criter.	-5.125776	
Durbin-Watson stat	1.128298			
Inverted AR Roots	1.01	.14-.69i	.14+.69i	-.54+.36i
				Estimated AR process is nonstationary
Inverted MA Roots	-.08	-4.82		
				Estimated MA process is noninvertible

图 3 序列 Δ³LnGDP 模型 ARIMA(5,1,2) 的参数估计与检验结果

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(1)	1.006103	0.001613	623.6332	0.0000
MA(1)	1.098773	0.352415	3.117843	0.0124
MA(2)	0.237720	0.427075	0.556624	0.5914
R-squared	0.992407	Mean dependent var	13.44069	
Adjusted R-squared	0.990719	S.D. dependent var	0.334201	
S.E. of regression	0.032196	Akaike info criterion	-3.821629	
Sum squared resid	0.009329	Schwarz criterion	-3.700402	
Log likelihood	25.92977	Hannan-Quinn criter.	-3.866511	
Durbin-Watson stat	2.008219			
Inverted AR Roots	1.01			
				Estimated AR process is nonstationary
Inverted MA Roots	-.30	-.80		

图 4 序列 Δ²LnCO₂ 模型 ARIMA(1,1,2) 的参数估计与检验结果

稳性检验,我们采用 ADF 检验,在 EViews 工具中自带 ADF 检验,检验结果见表 1。

根据 ADF 检查结果,我们发现序列 LnGDP 是三阶平稳的,序列 Ln CO₂ 也是二阶平稳的。

$\Delta^3 \text{LnGDP}$ 的自(偏)相关图如图 1, $\Delta^3 \text{LnCO}_2$ 的自(偏)相关图如图 2。

可以求出,序列 $\Delta^3 \text{LnGDP}$ 的均值为 -0.0063446, 均值标准误差为 0.0082002; 同时,序列 $\Delta^3 \text{LnCO}_2$ 的均值为 0.0017753, 均值标准误差为 0.3655230。两个序列的均值都小于均值标准误差,因此不能拒绝均值为 0 的原假设,不必对序列进行编号。

可以对序列 $\Delta^3 \text{LnGDP}$ 可以建立模型 ARIMA(5,1,2), 其参数估计与检验结果如图 3; 序列 $\Delta^2 \text{Ln Ln CO}_2$ 可建立模型 ARIMA(1,1,2), 其参数估计与检验结果如图 4。

通过比较 2001-2014 年的模拟值与实际值,可以看出模拟值与原值是比较吻合的,可以用模拟结果进行经济分析与预测。

3. 我国碳排放强度预测

根据上述对我国 GDP 和 CO₂ 的模拟,可以得到我国到 2020 年的碳排放强度的预测结果,如表 2 所示。

从模型的预测结果可以看出,我国经济仍保持平稳快速的的增长,国内生产总值持续攀升。在经济增长的同时,大量的化石燃料等能源消费所产生的 CO₂ 也在高速上涨,但 CO₂ 排放的增长速度略低于国内生产总值的增长速度。因此,我国的碳排放强度呈现下降趋势。

表 2 我国碳排放强度预测结果

年份	CO ₂	GDP	碳强度	碳强度预测	年份	碳强度预测
2001	3896.4	110270.4	3.5335	3.5335	2015	1.4502
2002	4190.5	121002	3.4632	3.4632	2016	1.3655
2003	4893.4	136564.6	3.5832	3.5832	2017	1.2807
2004	5754.2	160714.4	3.5804	3.5804	2018	1.1960
2005	6411.3	185895.8	3.4489	3.4489	2019	1.1113
2006	7122.5	217656.6	3.2724	3.2724	2020	1.0265
2007	7675.9	268019.4	2.8639	2.8639		
2008	8185.2	316751.7	2.5841	2.5841		
2009	8617.4	345629.2	2.4932	2.4932		
2010	8879.1	408903	2.1714	2.1714		
2011	9014.7	484123.5	1.8621	1.8621		
2012	9140.4	534123	1.7113	1.7113		
2013	9524.3	588018.8	1.6197	1.6197		
2014	9761.1	635910	1.5350	1.5350		

我国碳排放强度下降的原因主要有:人们对气候变化问题的认识越来越深刻;我国 CO₂ 减排技术在不断发展壮大;我国对气候变化问题高度重视并积极采取措施。近年来,我国在应对气候变化方面做出了巨大努力,将遏制气候恶化、拯救地球家园作为自己的使命,责无旁贷的积极贡献着。

三、基于低碳发展弹性系数的产业部门碳减排压力分析

目前低碳发展特征一般是用碳排放增长与经济成长的脱钩程度来反映,其指标为低碳发展弹性系数。 E_i 为产业当前的低碳发展弹性系数,其计算公式如下:

$$E_i = \frac{\Delta C}{C} / \frac{\Delta GDP}{GDP}$$

本文研究的 2020 年中国实现碳减排目标的基础是 2005 年的碳排放,所以本文可以根据 2005-2020 年各产业部门的 ARIMA 模型模拟数据计算低碳发展弹性系数。低碳发展弹性系数可以计算 2005-2020 年间逐年的系数,也可以计算 16 年间总体系数,本文的目的是得到规划问题的初始值,所以选择了 16 年间的总体低碳发展弹性系数。

参考陈飞(2009)^[1]、郑立群(2013)^[2]等人提出的低碳发展脱钩程度分类方式,本文定义了 6 种低碳发展情景,并根据我国 2005-2020 年各产业部门低碳发展弹性系数的计算结果,对各产业部门低碳发展的特征进行了界定。具体为:当 $E_i \leq 0$ 时,属于完全脱钩发展;当 $0 < E_i \leq 0.25$ 时,属于基本脱钩发展;

[1]陈飞、诸大建:《低碳城市研究的内涵、模型与目标策略确定》,〔上海〕《城市规划学刊》2009年第4期。

[2]郑立群、张宇:《我国省区低碳发展特征与目标研究》,〔武汉〕《科技进步与对策》2013年第2期。

表3 我国产业部门低碳发展特征判定

产业部门编号	低碳发展弹性系数	低碳发展特征判定
烟草制品业(X10)	-0.1028	完全脱钩发展
通信设备、计算机及其他电子设备制造(X33)	0.0814	基本脱钩发展
电气机械及器材制造业(X32)	0.1699	
印刷业和记录媒介的复制(X17)	0.1939	
仪器仪表及文化、办公用机械制造业(X34)	0.2047	
饮料制造业(X9)	0.2370	
燃气生产和供应业(X38)	0.2386	
交通运输设备制造业(X31)	0.2645	弱脱钩发展
非金属矿采选业(X5)	0.2939	
农副食品加工业(X7)	0.3146	
工艺品及其他制造业(X35)	0.3536	
纺织业(X11)	0.3579	
非金属矿物制品业(X25)	0.3818	
专用设备制造业(X30)	0.3927	
医药制造业(X21)	0.3972	
食品制造业(X8)	0.3978	
通用设备制造业(X29)	0.4518	
煤炭开采和洗选业(X1)	0.5100	弱联接发展
橡胶制品业(X23)	0.5314	
化学原料及化学制品制造业(X20)	0.5517	
家具制造业(X15)	0.5537	
文教体育用品制造业(X18)	0.5558	
电力、热力的生产和供应业(X37)	0.5598	
木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业(X14)	0.5654	
有色金属矿采选业(X4)	0.5701	
塑料制品业(X24)	0.5787	
纺织服装、鞋、帽制造业(X12)	0.6159	
石油加工、炼焦及核燃料加工业(X19)	0.6328	
金属制品业(X28)	0.6331	
化学纤维制造业(X22)	0.6449	
造纸及纸制品业(X16)	0.6656	
黑色金属冶炼及压延加工业(X26)	0.6807	
黑色金属矿采选业(X3)	0.6864	
有色金属冶炼及压延加工业(X27)	0.6900	
水的生产和供应业(X39)	0.7210	
皮革、毛皮、羽毛(绒)及其制品业(X13)	0.7429	
废弃资源和废旧材料回收加工业(X36)	0.7847	
石油和天然气开采业(X2)	0.8314	超联接发展
其他采矿业(X6)	1.3924	

当 $0.25 < E_i \leq 0.5$ 时,属于弱脱钩发展;当 $0.5 < E_i \leq 0.75$ 时,属于弱联接发展;当 $0.75 < E_i \leq 1$ 时,属于联接发展;当 $E_i > 1$ 时,属于超联接发展。由此判定我国产业系统低碳发展状态。

将2005-2020年,我国产业系统的低碳发展弹性系数,按升序排列,得到如表3所示的情况。

从表3中可见,我国的烟草制品业已经实现了完全脱钩发展。这是由烟草制品业本身的行业特征决定,烟草业属于高利润行业,而烟草制品业的生产过程耗费能源比例本身比较低,加之技术进步的影响,2005-2020年实现了碳排放的负增长,所以表现为完全脱钩发展。

此外,有通信设备、电气机械及器材制造业(X32)、计算机及其他电子设备制造(X33)、印刷业和记录媒介的复制(X17)、仪器仪表及文化、办公用机械制造业(X34)、饮料制造业(X9)、燃气生产和供应业(X38)等6个产业部门属于基本脱钩发展。这些产业部门中,前面四个为高端设备制造业,技术进步对其能源消费的替代率较高,使得产业产值的增长与碳排放的增长初步脱离,实现了基本脱钩发展。对于以上6个产业部门而言,实现碳配额后,其减排压力是比较小的。

交通运输设备制造业(X31)、非金属矿采选业(X5)、农副食品加工业(X7)、工艺品及其他制造业(X35)、纺织业(X11)、非金属矿物制品业(X25)、专用设备制造业(X30)、医药制造业(X21)、食品制造业(X8)、通用设备制造业(X29)等10个产业部门属于弱脱钩发展,碳配额后,这些产业部门的减排压力相对较小。

弱联结发展、联结发展和超联结发展的22个产业部门,则是“十三五”建立全面碳市场和实现碳配额后,减排的“主力军”。这些产业部门,本身的能源消费就比较高,而且对能源消费的依赖也比较大,所以减排压力相对较大。

四、研究结论

本文从我国政府作出的承诺“到2020年中国单位GDP二氧化碳排放要比2005年下降40%—45%”出发,使用ARIMA模型,对我国2001—2014年的碳排放相关数据进行了实证研究,并预测了要实现到2020年40%—45%的碳强度减排,“十三”五期间每年应该达到的碳排放强度值,进而使用同样的方法预测我国39个产业部门2020年的碳排放值,计算低碳发展弹性系数,从而进行碳强度减排压力分析。

由实证分析结果可以得到以下结论:①通过实践序列检验可知,ARIMA模型能够预测我国碳排放强度情况;②通过对2020年我国碳排放强度值的预测,发现由于近年来我国对碳减排的重视,虽然每年的碳排放总量还在增加,但是碳排放强度在逐年降低,而且到2020年实现40%—45%的碳减排压力已经不像2009年作出承诺时那么大,已经在可以实现的范围内。③通过分析我国产业系统的低碳发展弹性系数,得出6种低碳发展情形下,完全脱钩发展、基本脱钩发展和弱脱钩发展的17个产业部门,在碳配额后,碳减排压力相对较小,而弱联结发展、联结发展以及超联结发展的22个产业部门,碳减排压力较大。

[责任编辑:洪峰]

The Pressure Analysis of Carbon Emission Reduction in the Industrial System from a Dynamic Forecasting Perspective — Based on the Elastic Coefficient of Low Carbon Development

Wang Wanjun Lu Zhengnan Zhu Dongdan

Abstract: Based on the ARIMA model and data from China's industrial sectors during 2001–2014, this paper predicts China's carbon emissions intensity in 2020. The predicted result is: China is very likely to achieve the target of emission reduction by 2020. What's more, the pressure to reduce emissions for specific industry sector is calculated with the elastic coefficient, and the findings are: with the requirement of carbon quota, there are six types of low carbon development. For 17 industrial sectors which adopt complete decoupling development, basic decoupling development or weak decoupling development, the pressure of carbon emission reduction is relatively low, while for other 22 sectors which adopt joint development, weak joint development or hyper-joint development, the pressure is high.

Keywords: industrial system; carbon emission intensity; emission reduction target; ARIMA model; elastic coefficient of low carbon development