

文章编号:1007-6735(2013)05-0484-05

# 上海市碳排放影响因素的灰色关联分析与预测

曹 昶, 樊重俊

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 为给上海市降低碳排放量提供有益参考,同时给中国城市低碳发展作示范,通过灰色关联分析法研究了上海市2000—2011年碳排放量与经济增长水平、人口规模、产业结构、能源结构、能源强度的关联度,并详细分析了各影响因素对上海市碳排放量的影响.同时运用基于正弦函数变换的GM(1,1)模型对上海市碳排放量进行了预测,预测结果表明了上海市加大节能减排力度的紧迫性.最后,针对研究结果,结合上海市实际情况,给出了降低上海市碳排放量的具体对策和路径.

**关键词:** 碳排放量; 灰色关联; 影响因素; GM(1,1)模型

**中图分类号:** F 061.3      **文献标志码:** A

## Grey Correlation Analysis and Forecast of Influencing Factors of Carbon Emissions in Shanghai

CAO Chang, FAN Chong-jun

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The purpose of the analysis is to provide a useful reference for reducing carbon emissions in Shanghai and make a model for the low-carbon development in Chinese cities. The correlation between the carbon emission in Shanghai 2000—2011 and the level of economic development, population size, industrial structure, energy structure and energy intensity was analyzed by using the method of Grey correlation. An exhaustive analysis of the impact of factors was also given. By using the GM(1,1) forecasting model based on sine function to predict carbon emissions, it concludes that it is necessary for Shanghai to strengthen the efforts of energy conservation and emission reduction. By the result, according to the situation of Shanghai, specific countermeasures and corresponding pathes were proposed in order to reduce the carbon emissions in Shanghai.

**Key words:** carbon emissions; grey correlation; influence factors; GM (1,1) model

全球气候变暖是人类迄今面临的最重大环境问题,也是21世纪人类面临的最复杂挑战之一.温室

气体的排放是全球变暖的主要原因,作为世界第二大经济体、全球最大出口贸易国、工业化和城市化进

收稿日期: 2012-12-25

基金项目: 上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1302)

第一作者: 曹 昶(1987-),男,硕士研究生.研究方向: 社会经济系统工程. E-mail: 18817582109@163.com

通讯作者: 樊重俊(1963-),男,教授.研究方向: 信息系统工程、社会经济系统工程、管理系统工程、国际贸易与电子商务. E-mail: cxfan@sh163.net

程最快的国家,降低碳排放不仅来自国际的压力,更主要是出于中国自身发展的需要。“十八”大报告第一次提出“推进绿色发展、循环发展、低碳发展”,这将大大推进中国的节能减排与环境改善。国家高度重视低碳经济,上海作为中国最大的经济中心城市,更应该积极探索和率先走出一条低碳经济的发展道路。因此,准确、全面、完整地研究上海碳排放的影响因素,并进行预测,显得十分重要。通过研究结果,能够有针对性地寻找降低上海市碳排放量的有效途径和对策,为实现上海低碳发展提供建议,给中国其它区域降低碳排放量作示范。

1 指标的选择及数据来源

围绕碳排放量的影响因素,国内外学者对其作了广泛的研究。徐国权等通过建立中国人均碳排放的因素分解模型分析了能源结构、能源效率以及经济发展对中国人均碳排放量的影响,结果显示经济发展对中国人均碳排放的贡献率成指数增长,而能源效率和能源结构对抑制中国人均碳排放的贡献率呈倒“U”型趋势<sup>[1]</sup>。蒋金荷利用碳排放的完全指数分解法分析了中国 1995—2007 年碳排放变化的影响因素和贡献率,影响因素包括经济规模效应、结构效应、能源强度效应和碳强度效应,分析模型结果表明 1995—2007 年对中国碳排放影响最大的是经济发展<sup>[2]</sup>。李齐云等利用偏最小二乘法(partial least squares)建立了 STIRPAT 模型,从整体上对我国碳排放进行了定量分析,研究结果表明:人均实际 GDP 和能源效率对我国的碳排放量影响很大,人口、经济、技术等对我国碳排放量存在不同程度的影响<sup>[3]</sup>。陈飞等利用低碳城市评价指标量化研究上海市碳排放量,提出了相应的低碳城市发展策略<sup>[4]</sup>。

除了上述研究成果提出的影响因素外,城市化和外贸依存度对碳排放量也有一定的影响。但是 2000—2011 年间,上海的城市化水平和外贸依存度长期维持在一定范围内,对上海市碳排放量的影响可以不作考虑。本文在上述研究成果的基础上,对影响碳排放量的因素全面考虑和比较,结合上海实际情况,选取了经济增长水平、人口规模、产业结构、能源结构、能源强度作为上海碳排放量的影响因素。

a. 经济增长水平。经济增长是能源消费的动力,对能源消费的刺激作用十分明显。改革开放以来,上海市经济飞速发展,对能源的消耗越来越多,碳排放量也迅速增加。本文以上海市国民生产总值

(GDP)表示上海市经济增长水平。

b. 人口规模。人口规模的扩大,必然消耗更多的能源,碳排放量也会随之增加。上海市人口面临着总量上升、老龄化、家庭小型化等各类人口变化趋势交错并存的局面,这对上海市碳排放量有着重大而复杂的影响。

c. 产业结构。产业结构对碳排放量的影响主要表现在各产业单位产值能源消耗不同。单位产值能耗越多,碳排放量越多。在三大产业中,第二产业为能源高能耗产业,单位第二产业产值排放的碳是最多的。本文选择第二产业在全市产业产值中所占比重表示上海市产业结构。

d. 能源结构。能源结构对碳排放量的影响主要体现在各种能源的碳排放系数不同和利用率不同。同等产值的情况下,能源投入量的不同,碳排放量也不一样。在各种能源中,煤炭的碳排放系数最高,同时利用率是最低的。本文选取煤炭占能源消耗总量的比重作为上海市能源结构的指标。

e. 能源强度。能源强度指每单位 GDP 所消耗的能量。能源强度是用于对比不同国家和地区能源综合利用效率的最常用指标之一,体现了能源利用的经济效益。能源强度越高,能源利用率越低,碳排放量越高。

本文的碳排放量采用文献[5]计算的 2000—2011 年的上海市碳排放量,通过查阅历年上海市统计年鉴得到 GDP、人口数、第二产业在全市产业产值中所占比重、煤炭占能源消耗总量的比重、每单位 GDP 所消耗的能量,数据如表 1 所示。

表 1 上海市 2000—2011 年的碳排放量及其影响因素  
Tab.1 Carbon emissions and influential factors in Shanghai from 2000 to 2011

| 年份   | 碳排放量/t                   | GDP/亿元    | 人口<br>规模<br>/万人 | 产业<br>结构<br>/% | 能源<br>结构<br>/% | 能源强度/<br>(t 标准煤·<br>万元 <sup>-1</sup> ) |
|------|--------------------------|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------------------------------|
| 2000 | 4 879.61×10 <sup>4</sup> | 4 771.17  | 1 609           | 46.27          | 45.77          | 1.153                                  |
| 2001 | 5 030.13×10 <sup>4</sup> | 5 210.12  | 1 668           | 46.13          | 45.39          | 1.131                                  |
| 2002 | 5 229.56×10 <sup>4</sup> | 5 741.03  | 1 713           | 45.68          | 44.46          | 1.089                                  |
| 2003 | 5 823.98×10 <sup>4</sup> | 6 694.23  | 1 766           | 47.94          | 42.14          | 1.015                                  |
| 2004 | 6 120.67×10 <sup>4</sup> | 8 072.83  | 1 835           | 48.21          | 40.79          | 0.917                                  |
| 2005 | 6 506.99×10 <sup>4</sup> | 9 247.66  | 1 890           | 47.38          | 39.32          | 0.889                                  |
| 2006 | 6 487.51×10 <sup>4</sup> | 10 572.24 | 1 964           | 47.01          | 38.19          | 0.851                                  |
| 2007 | 6 644.54×10 <sup>4</sup> | 12 494.01 | 2 064           | 44.59          | 37.78          | 0.805                                  |
| 2008 | 7 022.14×10 <sup>4</sup> | 14 069.87 | 2 141           | 43.25          | 37.28          | 0.775                                  |
| 2009 | 6 976.08×10 <sup>4</sup> | 15 046.45 | 2 210           | 39.89          | 36.16          | 0.727                                  |
| 2010 | 7 374.49×10 <sup>4</sup> | 17 165.98 | 2 302           | 42.05          | 38.46          | 0.712                                  |
| 2011 | 7 540.23×10 <sup>4</sup> | 19 195.69 | 2 347           | 41.30          | 39.77          | 0.618                                  |

2 上海市碳排放量影响因素的灰色关联分析

灰色关联分析法衡量因素关联程度,对一个系统发展态势提供了量化的度量. 由于一个地区的碳排放量的影响因素有其特定的区域特点,往往受到当地经济发展水平、科学技术、法律、法规、政策和文化等诸多方面的影响,而这些因素的影响程度不完全清楚,可以作为一个灰色系统.

灰色系统关联分析的步骤:

- a. 将上海市历年碳排放量作为参考序列  $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, 12\}$ , 将 GDP、人口规模、产业结构、能源结构、能源强度作为比较序列  $X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, 12\} (i = 1, 2, \dots, 5)$ .
- b. 对参考序列和比较序列进行无量纲化处理. 采用均值化变化,即用各序列的值除以各序列的平均值:  $X_i(k) = X_i(k) / \bar{X}_i (i = 0, 1, \dots, 5)$ , 无量纲化后得到的序列如表 2 所示.

表 2 无量纲化处理  
Tab.2 Dimensionless treatment

| 年份   | 碳排放量    | GDP     | 人口规模    | 产业结构    | 能源结构    | 能源强度    |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2000 | 0.774 2 | 0.446 3 | 0.821 3 | 1.028 8 | 1.131 3 | 1.295 3 |
| 2001 | 0.798 1 | 0.487 4 | 0.851 4 | 1.025 7 | 1.121 9 | 1.270 5 |
| 2002 | 0.829 7 | 0.537 0 | 0.874 4 | 1.015 7 | 1.098 9 | 1.223 4 |
| 2003 | 0.924 0 | 0.626 2 | 0.901 4 | 1.065 9 | 1.041 5 | 1.140 2 |
| 2004 | 0.971 1 | 0.755 2 | 0.936 7 | 1.071 9 | 1.008 2 | 1.030 1 |
| 2005 | 1.032 4 | 0.865 1 | 0.964 7 | 1.053 5 | 0.971 8 | 0.998 7 |
| 2006 | 1.029 3 | 0.989 0 | 1.002 5 | 1.045 2 | 0.943 9 | 0.956 0 |
| 2007 | 1.054 2 | 1.168 7 | 1.053 6 | 0.991 4 | 0.933 8 | 0.904 3 |
| 2008 | 1.114 1 | 1.316 2 | 1.092 9 | 0.961 6 | 0.921 4 | 0.870 6 |
| 2009 | 1.106 8 | 1.407 5 | 1.128 1 | 0.886 9 | 0.893 7 | 0.816 7 |
| 2010 | 1.169 9 | 1.605 8 | 1.175 0 | 0.935 0 | 0.950 6 | 0.799 9 |
| 2011 | 1.196 3 | 1.795 6 | 1.198 0 | 0.918 3 | 0.983 0 | 0.694 3 |

c. 计算关联系数.

根据文献[6]中公式  $\eta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$  求出 GDP、人口规模、产业结构、能源结构、能源强度 5 个影响因素与碳排放量的关联系数. 其中,  $\rho$  为分辨系数,  $\rho \in [0, 1]$ . 根据文献[7]的分辨系数取值准则计算得到  $0.2568 \leq \rho \leq 0.5$ , 为了方便计算, 本文  $\rho$  取 0.5.

d. 计算关联度. 根据  $r_i = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \eta_i(k) (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  计算参考序列与各比较的关联度, 如表 3 所示.

表 3 各影响因素与碳排放量的关联度  
Tab.3 Correlation between influential factors and carbon emissions

| 影响因素 | GDP       | 人口规模      | 产业结构      | 能源结构      | 能源强度      |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 关联度  | 0.627 853 | 0.615 892 | 0.581 393 | 0.642 183 | 0.611 153 |

比较关联度的大小可知,对上海市碳排放量影响最大的因素是能源结构和经济发展水平,其次是人口规模、能源强度,最后是产业结构.

能源结构和经济增长对上海市碳排放量影响巨大,这与上海市能源结构的调整和经济方式的改变取得较大的成效有关. 在 2000—2011 年间,上海市经济增长方式由粗放型逐渐向集约型转变,能源高能耗、高碳排放的第二产业在国民经济中的比重不断下降,清洁能源比重逐渐增加,能源结构不断升级,对上海市碳排放量的增加起到了延缓的作用. 值得注意的是,2009 年的碳排放量略有降低,原因可能是经济发展受到金融危机的影响,另一方面可能是受上海市政府对能源结构的优化和经济增长方式改变政策的影响. 人口对上海市碳排放量的影响也不容小视,人口的不断增长,对碳排放量起到了推动作用<sup>[8]</sup>. 但是,由于上海市政府的正确引导和市民素质的提高,居民消费观念和低碳意识有了明显提高,在一定程度上抵消了人口增长带来的碳排放量的增加. 能源强度对上海市碳排放量的影响也很大,随着经济体制的不断完善和改革开放的不断深入,各产业部门的能源效率不断提高,能源强度不断降低,有效地抑制了碳排放量的增加. 产业结构的合理调整,对上海市碳排放量的增长也起到了一定的延缓作用. 但是随着经济的发展,产业结构调整缓慢,对上海市碳排放量的影响作用也逐渐减小.

3 基于正弦函数变换的 GM(1,1)模型及检验

综合以上分析,经济发展水平、人口规模、产业结构、能源结构、能源强度都对上海市碳排放量有着重要的影响. 对上海市碳排放量的各影响因素作灰色关联分析,可以使上海市在采取降低碳排放量措施时,能够抓住侧重点. 为了进一步检验上海市降低碳排放量的效果,对上海市碳排放量预测显得十分必要.

3.1 模型建立

利用基于正弦函数变换灰色预测模型对上海市碳排放量  $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, 12\}$  进行预测.

a. 对原始序列  $X_0$  作标准化处理得到序列  $A_0$ ,

使  $A_0(k) \in (\frac{\pi}{2}, \pi)$ , 可得

$$A_0(k) = \frac{\sqrt[4]{X_0(k)}}{4} (k = 1, 2, \dots, 12)$$

b. 对  $A_0$  序列进行正弦函数变换  $Y_0(k) = \sin A_0(k) (k = 1, 2, \dots, 12)$ , 得到序列  $Y_0$ .

c. 对序列  $Y_0 = \{Y_0(k) | k = 1, 2, \dots, 12\}$  作累加得到序列  $Y_1$ .

$$Y_1(k) = \sum_{j=1}^k Y_0(j) (k = 1, 2, \dots, 12)$$

d. 根据序列  $Y_1$  建立 GM(1,1) 模型, 得到白化型灰微分方程

$$\begin{cases} \frac{dY_1(t)}{dt} + aY_1(t) = b \\ Y_1(1) = Y_0(1) \end{cases}$$

积分后得到上述方程的离散解为

$$\hat{Y}_1(k) = (Y_0(1) - b/a)e^{-ak} + b/a (k = 1, 2, \dots, 12)$$

参数列  $\beta = (a, b)^T$  由最小二乘法确定

$$\beta = (a, b)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} -(Y_0(1) + Y_0(2))/2 & 1 \\ -(Y_0(1) + Y_0(2))/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -(Y_0(11) + Y_0(12))/2 & 1 \end{bmatrix}$$

表4 碳排放量的实际值与预测值相对误差

Tab.4 Relative error between the actual value and predicted value of carbon emissions

| 年份         | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\xi_0/\%$ | 0.0  | 3.2  | 4.3  | 2.0  | 2.6  | 4.6  | 0.5  | 0.7  | 1.3  | 2.7  | 0.2  | 1.0  |

a. 平均相对误差

$$\bar{\xi}_0 = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \xi_0(k) = 0.019$$

所以预测精度为二级.

b. 后验差检验<sup>[9]</sup>

$$s_1 = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{k=2}^{12} [X_0(k) - \bar{X}_0]^2}$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{k=2}^{12} [\Delta_0(k) - \bar{\Delta}_0]^2}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_0(2) \\ Y_0(3) \\ \vdots \\ Y_0(12) \end{bmatrix}$$

e. 将  $k = 1, 2, \dots, 12$  代入上式, 得到模拟序列

$$\hat{Y}_1 = \{\hat{Y}_1(k) | k = 1, 2, \dots, 12\}$$

f. 根据公式  $\hat{Y}_0(k) = \hat{Y}_1(k) - \hat{Y}_1(k-1)$  还原求出  $\hat{Y}_0$ .

g. 由逆函数变换得到序列  $\hat{A}_0$

$$\hat{A}_0(k) = \pi - \arcsin \hat{Y}_0(k)$$

h. 序列  $\hat{A}_0$  经过相应的变换得到  $\hat{X}_0$

$$\hat{X}_0(k) = [4(\pi - \arcsin \hat{Y}_0(k))]^4$$

3.2 模型结果及检验

根据计算, 2000—2011 年上海碳排放量的预测值、相对误差  $\xi_0$  分别如图 1 和表 4 所示.

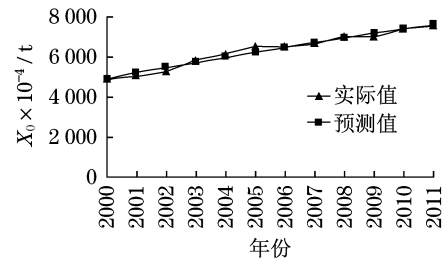


图1 上海市碳排放量的实际值与预测值对比

Fig.1 Comparison between the actual value and predicted value of carbon emissions in Shanghai

均方差比  $C = \frac{s_2}{s_1} = 0.11 < 0.35$  为一级.

c. 小误差概率

$$P = p\{|\Delta_0(k) - \bar{\Delta}_0| < 0.6745s_1\} = 1 > 0.95$$

所以小误差概率为一级.

运用基于正弦函数变换的 GM(1,1) 模型, 预测精度为二级, 均方差比、小误差概率都为一级, 预测值比较准确, 精度较高, 适合上海市碳排放量的预测. 表 5 (见下页) 给出了 2012—2015 年上海市碳排放量的预测值.



上海市节能减排工作已经取得了很大成绩,但“十二五”期间也面临许多新的挑战 and 矛盾.从表5可以看出,如果继续保持当前的产业结构、经济增长水平、能源强度、人口规模、能源结构,到2015年上海市的碳排放量将突破  $8\,500 \times 10^4 \text{ t}$ ,污染会更加严重,因此上海市加大节能减排力度势在必行.

表5 上海市碳排放量预测

Tab.5 Prediction of carbon emissions in Shanghai

| 年份             | 2012                    | 2013                    | 2014                    | 2015                    |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $X_0/\text{t}$ | $7\,843.82 \times 10^4$ | $8\,065.65 \times 10^4$ | $8\,284.85 \times 10^4$ | $8\,501.50 \times 10^4$ |

4 结论及对策

综合以上分析,上海市的碳排放量持续增长,节能减排形势紧迫,依据关联分析的结果,各影响因素的影响程度不同,提出建议如下:

- a. 能源结构存在较大的优化空间.随着海外液化天然气的引进、川气东送、西气东输等工程的实施,上海市拥有充足的气源,未来可以通过提高天然气比重来调整能源结构<sup>[10]</sup>.同时可以使用水电和核电代替本地火力发电,使上海市能源结构得到进一步优化.
- b. 发展低碳经济.经济发展水平对上海市碳排放量影响很大.上海必须加快金融、保险、旅游、文化等现代服务业的发展.尤其是高端服务业的发展.经济水平增长的同时,必须减少化石能耗和碳排放,保护和改善城市生态环境,防止污染和其它公害.上海在培育发展低碳经济时,不仅要节约资源使用,减少二氧化碳的温室气体排放,而且也要更加关注其它资源的合理利用,更加关注环境生态保护,发展低碳经济,促进经济全面良性、健康、均衡、可持续发展.
- c. 积极倡导节能减排.在人口很难得到控制的情况下,上海市应积极提高教育水平、人口素质和居民节能意识.深入开展节能减排宣传教育,积极倡导节约型的生产方式、消费模式和生活习惯.充分利用世博会对市民低碳意识的提升作用,大力倡导低碳

消费、绿色消费理念,如倡导绿色出行,使上海更清洁、更绿色、更环保.

d. 强化重点单位节能减排管理.开展钢铁、化工、石化、电力等高耗能、高排放行业企业节能减排自愿协议.理顺在沪央企等重点用能单位的管理体制.对中小企业提供节能减排专项指导和服务.健全能效标识制度和推广利用机制,完善节能减排监察执法机制.

总之,上海必须通过调整能源结构、发展低碳经济、降低能源强度、加大低碳技术研发和使用支持力度来落实提高节能减排任务,适应“十八”大关于“推进绿色发展、循环发展、低碳发展”总体要求.

参考文献:

[1] 徐国泉,刘则渊,姜照华.中国碳排放量的因素分解模型及实证分析:1995—2004[J].中国人口·资源与环境,2006,16(6):158-161.

[2] 蒋金荷.中国碳排放及影响因素分析[J].资源科学,2011,33(4):581-604.

[3] 李齐云,商凯.二氧化碳排放的影响因素分析与碳税减排政策设计[J].财政研究,2009(10):41-44.

[4] 陈飞,诸大建.低碳城市研究的理论与上海实证分析[J].城市可持续发展,2009,10(16):71-79.

[5] 华坚,任俊.长江三角地区碳排放的测度、比较及影响因素分析:1990—2009年[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2012,14(3):58-61.

[6] 孙继佳,蒋健,严广乐,等.基于灰色系统理论的中医五脏系统分析[J].上海理工大学学报,2009,31(6):573-580.

[7] 吕锋.灰色系统关联度之分辨系数的研究[J].系统工程理论与实践,1997,17(6):49-54.

[8] 张传平,周倩倩.我国碳排放影响因素研究[J].河南科学,2012,30(10):1449-1553.

[9] 马晓婷.用灰色模型预测碳钢表面合金化处理后的耐腐蚀性能[J].上海理工大学学报,1999,21(4):420-422.

[10] 朱聆,张真.上海市碳排放强度因素解析[J].环境科学研究,2011,24(1):20-26.

(编辑:丁红艺)