

中国碳排放预测与影响因素分析

滕欣, 李健, 刘广为

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 中国经济的高速发展带来了碳排放的快速增加。总结目前国内外所使用的碳排放预测方法, 讨论国内外碳排放的影响因素; 应用离散二阶差分方程预测模型(DDEPM), 预测中国2020年的碳排放量与GDP数值, 结果表明中国未来10年碳排放增长速度依旧很快, 单位GDP的碳排放降低潜力巨大; 通过文献检索、专家咨询、问卷调查与头脑风暴相结合的方法, 建立中国碳排放影响因素体系; 运用应用结构解释模型(ISM)对其进行聚类分析, 经过UCINET模拟, 将影响因素体系划分为5个聚类; 根据聚类中影响因素的相互关系, 分析各个聚类中的关键影响因素, 从而得出中国碳排放影响因素体系中的5个关键因素。

关键词: 碳排放; 离散二阶差分预测模型; 应用结构解释模型; 聚类

中图分类号: F062.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2012)05-0011-08

引言

人类进入21世纪以来, 气候变化问题日益成为全世界关注的焦点。政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第三次评估报告指出, 近50年的气候变暖与人类使用化石燃料所排放的二氧化碳等温室气体密切相关, 世界各国共同认识到减少温室气体排放的必要性与紧迫性。作为全球最大的发展中国家, 中国的温室气体排放量增长速度不断加快^[1]。为此中国政府承受着巨大压力, 承诺到2020年, 单位GDP的二氧化碳排放比2005年降低40%~45%^[2]。中国能否完成这样的减排目标, 造成中国碳排放增多的主要因素是什么? 明确并理顺造成中国碳排放增长的影响因素, 对中国实现可持续发展具有重要意义。

一、理论综述与研究方法

国内外很多学者与机构对碳排放进行了预测研究, Jacob N. Hacker et al^[3]以英国东南部的一所房子为例, 运用生命周期理论分析了两间卧室100年的碳排放数据, 认为实际碳排放与运营碳排放的平衡受到了热质能和气候变化的影响, 并分四个权重对其进行深入研究; 刘朝、赵涛^[4]使用情景分析方法, 设定三种不同情景, 根据情景参数的不同, 对中国2050年的能源需求量与碳排放量等不同指标进行预测, 通过对比研究可知, 中国发展低碳经济可

以实现能源利用和经济增长的协调发展; Peter J. Marcotullio^[5]采用回归分析方法, 分析亚太地区的公路交通人均碳排放与经济发展程度之间的关系, 对亚太地区公路交通碳排放进行预测, 得出经济发展与人均碳排放之间存在某种系数关系; 刘建翠^[6]以交通运输部门运输产品的碳排放和经济发展数据为基础, 通过线性回归方法的使用, 预测交通部门的碳排放与能源消耗, 认为能耗的降低可以通过技术进步来完成; Hsiao-Tien Pao^[7]运用GM(1,1)(灰预测)方法, 基于1980—2007年的实际数据, 对巴西国内的污染物排放、能源消耗和产出进行预测, 结果表明, 巴西应提升基础能源建设, 提高能源效率, 从而减少国内经济增长所带来的负面效应。综上所述, 情景预测方法、线性回归预测方法和GM(1,1)方法为目前国际、国内常用的碳排放预测方法。

同时, 国内外很多学者与机构对某些国家和地区碳排放影响因素进行研究, Qixin Chen et al^[8]认为脱碳发电, 尤其是当前电力向低碳结构转换对缓解碳排放有重要作用。通过研究以中国电力部门为背景的例子, 整合低碳经济的各种影响因素来构建并优化电力扩展计划(PGE)模型, 从而揭示中国降低碳排放的前景与潜力; Frank Collins^[9]从生命周期的角度阐述了建筑制造的碳排放情况, 将钢筋混凝土的回收与再利用定义为二次生命周期研究, 并通过对其分析, 得出建筑材料的二次生命周期的合

收稿日期: 2011-12-21

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(11YJA630046)

作者简介: 滕欣(1986—), 男, 博士研究生; 李健(1963—), 男, 管理学博士, 教授, 博士生导师; 刘广为(1984—), 男, 博士研究生, E-mail: liuguangpang@163.com

理利用可以降低CO₂的排放量;潘雄锋^[10]等运用因素分解法将碳排放强度的变化分解为结构份额和效率份额,通过研究表明效率的提高会使碳排放下降,结构的不合理导致碳排放的提升;Aviel Verbruggen et al^[11]认为,可再生的电力供应是降低碳排放的关键因素,通过对欧洲整体可再生能源转化政策的分析,得出可再生的电力供应需要替代不可持续的石化能源和核能技术;孙秀梅^{[12][11-15]}分析了山东省碳排放的演进特征,利用SPSS对山东人均GDP、能源强度、碳强度、第三产业和碳排放量之间的关系进行实证研究,认为建立低碳工业化战略,构建低碳产业体系,优化能源消费结构,加强低碳技术创新,宣传低碳消费观念,促进产业低碳转型是降低碳排放的重要步骤;Levent Aydin^{[13][7031-7040 [14]1722-1731]}指出土耳其能否成为欧盟成员的三个因素为:劳动力流动、资本流动和分担环境负担,通过对土耳其国内的CGE模型分析,得出通过提高含碳能源的价格来达到降低碳排放的目的;GuoHong Wang^[15]通过研究阻碍中国节能的影响因素,认为产业的不平衡发展、能源结构缺陷、能源环境政策不健全是造成高耗能、碳排放量多的主要原因。通过上述研究可以看出,碳排放的影响因素是多方面的,如何全面阐述中国碳排放影响因素,分析各影响因素之间的相互关系,找到降低碳排放的关键影响因素是本文所研究的课题。

本文采用离散二阶差分方程预测模型(Discrete Difference Equation Prediction Model, DDEPM),基于1980—2009年的碳排放与GDP数据,对中国2020年的碳排放与GDP进行预测,得出2020年单位GDP的碳排放预测值,研究现阶段中国单位GDP碳排放降低的潜力。找出影响中国碳排放的14种因素,应用结构解释模型(Interpretive Structural Modeling, ISM)分析各因素之间的关系,利用模型中的小团体分析(Subgroup Analysis, SA)进行聚类,以找到聚类中影响中国碳排放的关键因素。

二、离散二阶差分方程预测模型

离散二阶差分方程预测模型(Discrete Difference Equation Prediction Model, DDEPM)相对于GM(1,1)预测模型的优势在于拐点精准度上^[16],对于不稳定增长的时间序列数据预测有较大的优势,DDEPM的建模过程较为复杂,图1为DDEPM(2,1)建模流程,具体有以下5个步骤。

(一)时间序列累加

令 $x^{(0)}$ 表示初始时间序列数据, $x_m^{(0)}$ 表示经过

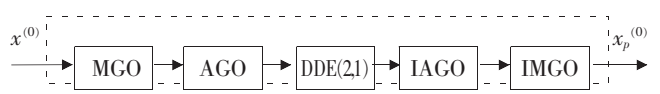


图1 离散差分方程预测模型DDEPM(2,1)建模流程

MGO运算处理过的时间,定义 $x_m^{(0)}$ 为

$$x_m^{(0)} = \{x_m^{(0)}(1), x_m^{(0)}(2), x_m^{(0)}(3), \dots, x_m^{(0)}(n)\} \quad (1)$$

$$x_m^{(0)}(i) = \text{MGO}(x^{(0)}(i)) = s + \gamma \cdot x^{(0)}(i) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

其中, n 为原始时间序列; s 为位移因子; γ 为比例因子; $x^{(0)}(i)$ 表示原始数列的第 i 笔资料。

(二)一次累加生成运算(1-AGO Operation)

令 $x^{(1)}$ 为一次累加生成的时间序列,则 $x^{(1)}$ 可表示如下

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (3)$$

其中
$$x^{(1)}(p) = \sum_{i=1}^p x^{(0)}(i), p=1, 2, \dots, n$$

(三)DEE(2,1)模型构建

DEE(2,1)建模方程式如下

$$x^{(1)}(p+2) + a \cdot x^{(1)}(p+1) + b \cdot x^{(1)}(p) = 0 \quad (4)$$

其中, a 与 b 为未定系数; p 为一整数。

利用线性最小平方误差估计法得到未定系数的估计矩阵 Θ ,可被估计值如下

$$\Theta = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$

若将资料矩阵 X 及 Y 代入式(5)展开,得到

$$a = \frac{-\sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-2)^2 \sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-1)x^{(1)}(p) + \sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-1)x^{(1)}(p-2) \sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-2)x^{(1)}(p)}{\Delta} \quad (6)$$

$$b = \frac{\sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-1)x^{(1)}(p-2) \sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-1)x^{(1)}(p) - \sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-1)^2 \sum_{p=3}^n x^{(1)}(p-2)x^{(1)}(p)}{\Delta} \quad (7)$$

(四)解单变量二阶差分方程

令 $x^{(1)}(p) = r^p$ 代入式(3),可得到

$$r^{p+2} = a \cdot r^{p+1} + b \cdot r^p = 0 \quad (8)$$

$$r^p(r^2 + a \cdot r + b) = 0 \quad (9)$$

由此可以导出

$$r_1 = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4b}}{2}, r_2 = \frac{-a - \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \quad (10)$$

其中, r_1 和 r_2 是式(4)的两个根。

针对不同的 r_1 和 r_2 的情形,可以分为下列3种情况。

Case 1. 假设 $r_1 \neq r_2$, 则二阶差分方程式的解如下

$$x^{(1)}(p) = C_1 \cdot r_1^p + C_2 \cdot r_2^p \quad (11)$$

从初始条件(即令 $p=1, p=2$), 可以得到两个联立方程式如下

$$x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1) = C_1 \cdot r_1 + C_2 \cdot r_2 \quad (12)$$

$$x^{(1)}(2) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) = C_1 \cdot r_1^2 + 2C_2 \cdot r_1^2 \quad (13)$$

解这两个联立方程式可以求得常数 C_1 及 C_2 如下

$$C_1 = \frac{x^{(0)}(1) \times (2r_1 - 1) - x^{(0)}(2)}{r_1^2},$$

$$C_2 = \frac{x^{(0)}(1) \times (1 - r_1) + x^{(0)}(2)}{r_1^2} \quad (14)$$

Case 2. 假设 $r_1 = r_2$, 且均为实根时, 则二阶差分方程式的解如下

$$x^{(1)}(p) = C_1 \cdot \lambda_1^p + C_2 \cdot p \cdot \lambda_1^p \quad (15)$$

其中

$$C_1 = \frac{x^{(0)}(1) \times (2\lambda_1 - 1) - x^{(0)}(2)}{\lambda_1^2},$$

$$C_2 = \frac{x^{(0)}(1) \times (1 - \lambda_1) + x^{(0)}(2)}{\lambda_1^2} \quad (16)$$

Case 3. 假如 r_1 及 r_2 为共轭虚根, 则二阶差分方程的解如下

$$x^{(1)}(p) = C_1 \cdot \rho^p \cdot \sin(\varphi p) + C_2 \cdot \rho^p \cdot \cos(\varphi p) \quad (17)$$

从初始条件(即令 $p=1, p=2$), 可以得到两个联立方程式如下

$$x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1) = C_1 \cdot \rho \cdot \sin\varphi + C_2 \cdot \rho \cdot \cos\varphi \quad (18)$$

$$x^{(1)}(2) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) = C_1 \cdot \rho^2 \cdot \sin(2\varphi) + C_2 \cdot \rho^2 \cdot \cos(2\varphi) \quad (19)$$

解这两个联立方程式求得常数 C_1 及 C_2 如下

$$C_1 = \frac{x^{(0)}(1) \cdot \rho^2 \cdot \cos(2\varphi) - x^{(0)}(1) \cdot \rho \cdot \cos\varphi - x^{(0)}(2) \cdot \rho \cdot \cos\varphi}{\rho^3(\sin\varphi \cdot \cos(2\varphi) - \cos\varphi \cdot \sin(2\varphi))} \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{x^{(0)}(1) \cdot \rho^2 \cdot \sin\varphi + x^{(0)}(2) \cdot \rho \cdot \sin\varphi - x^{(0)}(1) \cdot \rho^2 \cdot \sin(2\varphi)}{\rho^3(\sin\varphi \cdot \cos(2\varphi) - \cos\varphi \cdot \sin(2\varphi))} \quad (21)$$

(五) 逆累加生成运算 (IAGO) 与逆映射生成运算 (IMGO)

利用逆累加生成运算, 将累加时间序列还原成原始数列, 其运算如下

$$x^{(0)} = x^{(1)}(p) - x^{(1)}(p-1) \quad (22)$$

其中, $x^{(0)}$ 表示预测的值; p 为预测的步距。

逆映射生成运算可以表示如下

$$x_p^{(0)} = \text{IMGO}(x^{(0)}(p)) = \frac{1}{\gamma} (x^{(0)}(p) - s) \quad (23)$$

其中, $x_p^{(0)}$ 表示在预测步距 p 下的最后预测值; $x^{(0)}(p)$ 为在逆累加生成后的预测值; s 为位移因数 (shift factor); γ 为比例因数 (scaling factor)。

(六) 离散二阶差分方法的优势

中国的碳排放时间序列数据呈现整体增长而非逐年增长的不规律性。DDEPM 方法可以很好地适应时间序列的不规律性, 从而对中国碳排放进行较为准确的预测。

情景预测方法需要主观设定有差异化的情景模式, 通过具体主要参数的假设, 按照近年的数据进行后续的简单计算来完成预测过程^{[14]1722-1731}; DDEPM 则是以客观数据为基础, 根据一定长度年份的时间序列数据, 估计未来某特定时间的数据值, 其预测结果可观性强, 具有较强的说服力。

线性回归预测方法基于碳排放的历史数据, 假设出可行线性方程, 并且对可行线性方程进行验证。在假设线性方程的过程中, 某些参数或者系数必须被估计出来, 从而带有较强的主观性^{[12]11-15}; DDEPM 方法是非线性的, 一些无法拟合到线性的点可以被 DDEPM 的预测曲线所拟合, 因此其预测值可观性较强。

GM(1, 1) 也是基于实际数据的非线性预测, 但其方程是一阶的, 自身函数的缺陷较大, 主要表现在 GM(1, 1) 方法对时间序列的拐点无法精准的预测^{[13]7031-7040}; DDEPM 的方程是二阶的, 在 GM(1, 1) 的基础上, 利用二阶方程在拐点预测方面的优势, 使预测的精准度得到提高。

表 1 碳排放预测表

百万吨

年份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
碳排放量	1 448.5	1 439.9	1 506.9	1 593.4	1 724.5	1 857.8	1 970.8	2 102.8	2 240.4	2 275.3	2 269.7	2 369.3	2 449.2	2 626.6
预测值					1 703.5	1 911.1	1 987.7	2 050.5	2 256.8	2 381.9	2 196.3	2 212.6	2 564.8	2 509.8
年份	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
碳排放量	2 831.5	2 861.7	2 893.4	3 081.7	2 967.3	2 885.7	2 849.7	2 969.6	3 464.8	4 069.2	5 089.8	5 512.7	5 817.1	6 260.0
预测值	2 906.4	3 067.9	2 711.5	2 926.6	3 159.1	2 907.8	2 750.1	2 854.7	3 246.1	3 945.4	4 806.3	5 848.7	5 784.8	6 191.9
年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
碳排放量	6 803.9	7 710.5												
预测值	6 705.1	7 378.2	8 654.7	9 382.2	9 782	10 096	9 936.7	10 500	11 203	11 501	11 715	12 001	13 339	

数据来源: 根据历年《中国能源统计年鉴》整理测算。

三、碳排放与 GDP 数值预测

(一)碳排放数值预测

经上述推导过程,用于 Matlab 进行编程,以 1980—2008 年的碳排放数据为基准数据,对 2020 年碳排放进行预测,得到数值如表 1 所示。

表 1 的第 3 行为碳排放的预测数据,离散二阶差分方法可以基于四年的数据进行有效推导预测,碳排放的预测值与实际值对比,如图 2 所示。

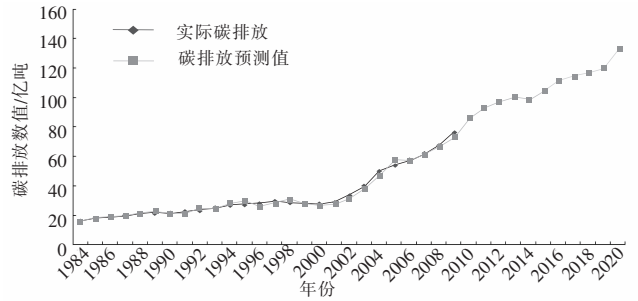


图2 碳排放曲线

由图 2 可知,采用 DDEPM 预测得到的碳排放

表 2 GDP 预测表

表 2 GDP 预测表														亿元
年份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
GDP	4 545.6	4 891.6	5 323.4	5 962.7	7 208.1	9 016.0	10 275.2	12 058.6	15 042.8	16 992.3	18 667.8	21 781.5	26 923.5	35 333.9
预测值					6 603.6	8 730.0	11 200.0	12 241.0	14 170.0	17 781.0	18 771.0	19 939.0	24 766.0	31 303.0
年份	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
GDP	48 197.9	60 793.7	71 176.6	78 973.0	84 402.3	89 677.1	99 214.6	109 655.2	120 332.7	135 822.8	159 878.3	184 937.4	216 314.4	265 810.3
预测值	44 631.2	59 792.5	70 308.0	77 775.6	80 511.6	82 908.0	90 384.5	105 214.2	117 176.6	131 572.6	153 340.3	182 525.9	213 488.1	252 277.2
年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
GDP	314 045.4	340 506.9												
预测值	302 022.0	355 300.3	383 597.6	426 236.0	493 213.8	536 997.1	603 303.8	675 641.0	731 465.7	811 215.3	897 380.4	990 257.1	1 080 910.0	

数据来源:根据历年《中国统计年鉴》整理测算。

预测值曲线与实际值曲线相比,基本处于拟合状态,预测值符合中国碳排放的发展趋势。

(二)GDP 数值预测

中国政府承诺在 2020 年,单位 GDP 的碳排放降低 40%~45%。本文利用 DDEPM,经过 Matlab 程序分析,基于近 1980—2009 年的值,对 2020 年 GDP 进行预测,如表 2 所示。

表 2 的第 3 行为国内 GDP 的预测数据,其预测值与实际值的曲线如图 3 所示。

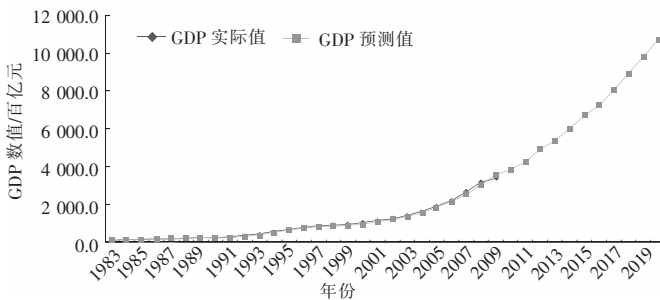


图3 GDP 曲线

(三)预测数据分析

事物的发展有其独特的规律性,由表 1 可以看出,中国碳排放在未来 10 年中仍然处于整体上升趋势,但并不是逐年递增,而是在有的年份略有降

低。表 1 中 2010—2020 年碳排放的预测值中,2014 年(9 936.7)相比 2013 年(10 096)的碳排放量略有下降。在 1980—2009 年的碳排放数据中,也有当年碳排放相比上一年降低的例子,如 1997—2000 年。DDEPM 准确地预测出了中国碳排放独特的规律性。

将 1984—2009 年的碳排放预测数据与实际值相比较,能够从数据差的角度,计算 DDEPM 所预测的碳排放数值的误差率(误差率=(预测值-实际值)÷实际值×100%),验证预测值的精准度,如表 3 所示。

由表 3 中的数据可知,在 1984—2009 年的预测数据中,数据值误差率最大为 7.21%(1995 年),最小值为 0.56%(2006 年),大于 6%的误差值仅有 6 次,可以看到 DDEPM 方法预测数据的准确性。中国的碳排放量在 2020 年将达到 13 339 万吨,相比于 2009 年增长 73.0%,涨幅巨大。中国的自然环境将承受越来越大的压力,气候条件也可能受到深度影响。

中国政府提出到 2020 年,单位 GDP 的碳排放量比 2005 年减少 40%~45%,根据 2005 年的实际值

表 3 碳排放预测值误差率

	表 3 碳排放预测值误差率													%
年份	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	
误差率	1.22	2.87	0.86	2.49	0.73	4.69	3.23	6.61	4.72	4.45	2.65	7.21	6.29	
年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
误差率	5.03	6.46	0.77	3.50	3.87	6.31	3.14	5.57	6.01	0.56	1.09%	1.45	4.03	

表4 单位GDP碳排放预测值

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
碳排放预测值/百万吨	8 654.7	938 2.2	8 782.0	10 096.0	9 936.7	10 500.0	11 203.0	11 501.0	11 715.0	12 001.0	13 339.0
GDP预测值/亿元	383 597.6	426 236.0	493 213.8	536 997.1	603 303.8	675 641.0	731 465.7	811 215.3	897 380.4	990 257.1	1 080 910.0
单位GDP碳排放/(百万吨/亿元)	0.022 6	0.022 0	0.017 8	0.018 8	0.016 5	0.015 5	0.015 3	0.014 2	0.013 1	0.012 1	0.012 3

计算单位GDP的碳排放为： $5\ 512.7 \div 184\ 937.4 = 0.029\ 8$ (单位:百万吨/亿元);根据DDEPM所预测的2020年碳排放的数值(表1)与GDP的数值(表2),2010—2020年的单位GDP的排放量如表4所示。

表4中显示,2020年的单位GDP的碳排放相比2005年的单位GDP的碳排放有大幅度降低,约为2005年的41.4%,降低幅度为58.6%,超过中国政府所提出的40%~45%的指标,说明中国降低单位GDP碳排放的潜力巨大。

四、碳排放影响因素分析

按照目前中国经济的发展状况,根据上述分析,中国降低单位GDP碳排放的潜力很大,然而,结合表

1和表2的预测数据可以看到,中国的GDP增长依然部分依靠能源消耗的增长,碳排放量的增长依旧呈现迅猛趋势,中国的环境压力仍然无法得到有效缓解。因此,在保持经济稳定增长的情况下,如何有效降低碳排放,是中国亟待解决的问题。

系统解释结构模型(ISM)是Warfield教授^[7]研发的一种方法模型,其目的是为了将社会经济系统中的复杂问题简单化与明晰化。该模型主要通过有向图模型和布尔矩阵作为主要分析手段,通过系统内部各要素相互关系的分析,确定各要素在系统中的地位。

(一)中国碳排放影响因素体系构建

本文采用文献检索与专家咨询相结合的方法,找寻中国碳排放的影响因素,其具体清单如表5所示。

表5 影响碳排放的因素清单

代码	影响因素	特征描述
CLRE	1. 能源禀赋存在先天缺陷 (Congenital Lack of Resource Endowment)	在我国已探明的能源储量中,煤炭占到90%以上,石油与天然气的比重较小,这种煤炭占主导地位的能源资源条件,使我国不得不将煤炭作为经济发展的主能源,而煤的高碳密集度使我国降低碳排放的难度大大增加 ^[8] 。
LLAP	2. 缺乏先进的土地使用模式,农业生产科技含量过低 (Low Levels of Agricultural Production)	大量的碳汇土地转化为了碳源土地,土地向大气中排放了大量的二氧化碳 ^[9] ,约占总量的1/3;植被和土壤中的有机碳大量流失。
BIPM	3. 工业生产模式落后,缺乏有效的低碳激励手段。 (Backward Industrial Production Mode)	中国的工业生产模式长期片面追求经济利益,以高耗能、高污染和高排放为特征。
TECE	4. 城市化进程加快,交通能耗激增 (Transport Energy Consumption Explosion)	城区面积的迅速增加导致大量耕地被占用,公交密度的整体下降,私人交通工具的增多不可避免地使碳排放大大增加。
LQCM	5. 建筑材料质量偏低,生命周期长度偏短,建筑设计中降低碳排放因素考虑不足。 (Low Quality of Construction Material)	建筑商在牟取利益的前提下,建材质量得不到保证,使用寿命缩短,建筑材料更新频率过快,导致大量可避免的碳排放产生;建筑设计的不合理导致碳排放无法有效回收利用。
BCTM	6. 餐饮业模式落后,所造成的环境负荷日益严重 (Backward Catering Trade Mode)	设备更新换代滞后、员工工作习惯差、监管措施不利等因素导致操作间能源浪费严重,一次性餐饮用品造成大量的木材浪费,形成潜在碳排放。
PLLA	7. 人口众多,且消费方式高碳化 (Population and Lack of Low-carbon Awareness)	中国人口众多,居民价值取向和生活模式对我国温室气体的排放影响重大,其低碳意识的提高能够大大促进中国降低碳排放进度的加快 ^[10] 。
LPTM	8. 降低碳排放领域缺乏专业人才 (Lack of Personnel or Trained Manpower)	人才匮乏会导致有效技术支持的不足,专业训练的不同步与实验能力的不足,降低政策措施的潜在效率 ^[11] 。我国科研机构与高校中,专门研究节能减排的专业较少,人才培养几近空白。
LCMD	9. 缺乏完善的碳排放约束机制 (Lack of a Complete carbon-emission Policy Framework)	中国降低碳排放没有落实到基层,仅仅依靠政府的强制手段为主导,其带来的节能减排效率低下,环境保护情况不能从根本上得到改善,需要更有效的约束机制来限制碳排放的产生。

续表 5

代码	影响因素	特征描述
LSMT	10. 碳排放交易体系不完整 (Lack of a Sound Mechanism for carbon emissions Trading)	中国碳排放权交易发展较晚,目前仍在起步阶段,碳排放权交易各种相关法规与政策制定滞后,约束与限制力度不足。
ITCW	11. 含碳废物处理不当 (Inappropriate Treatment of Carbon -con-tained Waste)	含碳废物处理模式单一,难以做到细化分类,在含碳垃圾的回收与处理中容易形成二次碳排放。
LIRD	12. 能源公司商业模式落后 (Lack of Incentive to Reduce consumer Demand)	中国大部分能源公司没有承担起应有的社会与环境责任,一味地以追求利润最大化为主要目的,能源消费者缺乏有效的抑制手段,仅仅采用强制手段来限制消费者使用,如拉闸限电等。
LEUE	13. 能源利用效率低下 (Low Energy Utilization Efficiency)	能源利用技术落后,大部分能源仅仅使用一次,能源利用率大大低于全球平均水平,导致更多的能源被投入使用,大大增加了碳排放量。
LTIP	14. 研发成本高,且融资困难,知识产权保 护机制不健全 (Lack of Technological Innovation and Protection)	降低碳排放技术的开发、设备引进,一次性投入较高,导致产品价格过高,投资者短期激励不足,投资者缺乏积极性;且中国知识产权保护环境不理想,容易造成研发成果的流失,先进技术引进同样困难。

表 5 列表中的影响因素为了满足 ISM 分析方法的系统性,首先举出中国能源先天劣势 CLRE (1);随后以《中国能源统计年鉴》中所划分的能源消耗行业为分类依据,找出各行业中的特殊影响因素条件:农业 LLAP(2)、工业 BIPM(3)、交通 TECE (4)、建筑 LQCM(5)和餐饮 BCTM(6);最后将能够影响两个或者 2 个以上行业碳排放的因素列举出来,和上述 6 个因素共同组成中国碳排放影响因素

体系。影响中国碳排放的 14 种因素可以通过 ISM 模型的构建,达到清晰地表述各个因素之间的相互作用和联系。

(二)影响因素关系探究

ISM 模型需要分析各影响因素之间的逻辑关系。各影响因素之间逻辑关系的确定主要由相关领域专家组判断,根据其判定结果转化为布尔矩阵,形成可达矩阵如表 6 所示。

表 6 可达矩阵

影响因素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
8	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
9	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
10	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0

可达矩阵能够反映出碳排放影响因素的直接关系,表中的数字“1”表示 2 种因素之间有影响,“0”表示 2 种因素之间没有影响。

(三)影响因素聚类分析

ISM 模型中的小团体分析可以对碳排放影响因素有效聚类。顾名思义,小团体 (subgroup 或称 cliques)就是团体中的一部分节点(本文指中国碳排放影响因素)关系特别紧密,以至于结合成一个次级团体。将中国碳排放影响因素进行小团体分析,每一个小团体就是要划分成的聚类。

14 种影响因素划分聚类应遵守如下原则:

(1)经小团体划分后所得到的聚类应包括所有 14 个因素;(2)聚类中的因素应当在 3~5 个;(3)聚类的个数不能超过 14 个。

其中,条件(1)由聚类因素的影响关系密度确定,即某一因素在所属聚类中与其他因素的联系(影响和被影响)程度。

经过多次 ISM 分析软件 UCINET 的多次模拟划分,将中国碳排放影响因素划分为 4 种因素为一个团体单位数量,其 4 种因素组成的小团体中,每个因素与其他 3 种因素都有联系(影响或被影响)。根据此条件,对碳排放的 14 种影响因素按照小团

体分析聚类,其结果如图4所示。

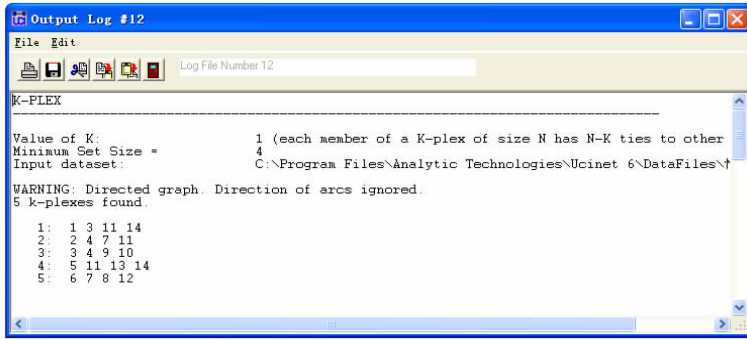


图4 聚类结果示意图

图4中所得聚类结果可知,应用小团体分析,得到5个聚类,5个聚类中包含了所有14个影响因素。

(四)聚类关键因素分析

中国碳排放影响因素体系所划分的5个聚类中,每个聚类中的4种影响因素相互作用,其核心因素的解决对整个聚类的影响因素起到至关重要的作用。5个聚类的核心影响因素分析如表7所示。

表7 核心影响因素分析

代码	聚类因素列表	核心因素分析	核心因素
A	CLRE(1) BIPM(3) ITCW(11) LTIP(14)	落后的工业模式使得中国能源禀赋不足的缺点更为突出,高耗能的产业加上煤炭为主的能源,造成碳排放量居高不下;片面最求利益最大化导致生产过程中的含碳废物处理不当;激励手段的不足也使新技术的开发举步维艰。	BIPM(3)
B	LLAP(2) TECE(4) PLLA(7) ITCW(11)	中国居民低碳意识的不足造成土地中有机碳流失严重;个人缺乏环保意识的生活方式导致交通能耗激增;缺乏科学的行为模式使得含碳废物很容易造成二次碳排放。	PLLA(7)
C	BIPM(3) TECE(4) LCMD(9) LSMT(10)	碳排放交易体系不完整,使得工业碳排放无法确认责任;交通行业造成的碳排放得不到有效抑制;交易体系的不完整客观上导致碳排放约束体系无法得以完整构建。	LSMT(10)
D	LQCM(5) ITCW(11) LEUE(13) LTIP(14)	低碳技术的研发困难使得建筑业中的高质量材料成本太高,无法得到广泛应用;技术的研发不足也使得能源利用效率低下;含碳废弃物得不到科学、合理的处理。	LTIP(14)
E	BCTM(6) PLLA(7) LPTM(8) LIRD(12)	中国低碳人才的培养会大幅度带动居民的低碳意识的提升;能够加快中国餐饮业实现产业模式升级;并且能够改变中国根深蒂固的商业模式,引导能源公司承担应有的社会责任。	LPTM(8)

由表7中可知,通过5个聚类中影响因素的相互作用分析,中国碳排放影响因素体系中的关键影响因素为BIPM、PLLA、LSMT、LTIP、LPTM。这5种因素的正确处理目前对中国降低碳排放具有重要作用,会对未来中国发展低碳经济产生深远影响。

五、结论与讨论

中国碳排放的降低面临着诸多困难,其过程复杂多变,需要决策者通过有效的计划、组织、指挥、协调、控制、评价等众多工作来完成,进而做出正确的决策。本文通过离散二阶差分方程预测方法对2020年的碳排放以及GDP进行预测,随后利用ISM模型分析中国碳排放14种影响因素,得到结论如下:

1. 中国单位GDP的碳排放降低潜力巨大,根据单位GDP的碳排放预测数据表明,按照目前中国碳排放的发展规律与GDP的增长确实,中国2020

年单位GDP的碳排放比2005年降低58.6%。在中国现有生产条件下,能够实现单位GDP碳排放降低40%~45%的目标。

2. 中国的GDP增长仍然需要部分依靠资源的消耗和碳排放的增加。中国的碳排放预计在2020年将达到13339百万吨,比2009年增长73.0%,未来10年中国的资源与环境都将承受巨大压力。

3. 中国碳排放影响因素体系中,BIPM、PLLA、LSMT、LTIP、LPTM是5个关键因素。正确的处理5个关键影响因素,将会有效地降低中国碳排放,并且对碳排放影响因素体系中的其他因素产生正面影响,推进中国由资源依赖性经济向低碳经济的快速转型。

针对5种关键影响因素,如何制定相应的有效对策,5种影响因素的处理会对体系中其他因素产生何种影响,有待进一步的研究与探讨。

参考文献:

[1] 姚伟龙,邢涛. 中国能源状况与发展对策分析[J]. 能源研究与信息,2006(4):7-8.
 [2] 吴献金,邓杰. 贸易自由化、经济增长对碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(1):43-48.
 [3] Jacob N Hacker. Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing:a case study on the effects of thermal mass

- and climate change [J]. *Energy and Buildings*, 2008 (40): 375–384.
- [4] 刘朝, 赵涛. 中国低碳经济影响因素分析与情景预测[J]. *资源科学*, 2011, 33(5): 844–850.
- [5] Peter J Marcotullio. Potential futures for road transportation CO₂ emissions in the Asia Pacific[J]. *Asia Pacific Viewpoint*, 2007, 48(3): 355–377.
- [6] 刘建翠. 中国交通运输部节能潜力和碳排放预测[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 640–646.
- [7] Hsiao-Tien Pao, Chung-Ming Tsai. Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil [J]. *Energy*, 2011 (36): 2450–2458.
- [8] Qixin Chen, Chongqing Kang. Power generation expansion planning model towards low-carbon economy and its application in China [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 1117–1124.
- [9] Frank Collins. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010 (15): 549–556.
- [10] 潘雄锋, 舒涛, 徐大伟. 中国制造业碳排放强度变动及其因素分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(5): 101–105.
- [11] Ashbjorn Torvanger. The political economy of technology support: making decisions about carbon capture and storage and low carbon energy technologies[J]. *Global Environmental Change*, 2011(21): 303–312.
- [12] 孙秀梅, 周敏, 蔡振法. 山东省碳排放演进特征及影响因素的实证研究[J]. *华东经济管理*, 2011, 25(7): 11–15.
- [13] Levent Aydin, Mustafa Acar. Economic and environmental implications of Turkish accession to the European Union: a CGE analysis[J]. *Energy Policy*, 2010 (38): 7031–7040.
- [14] Levent Aydin, Mustafa Acar. Economic impact of oil price shocks on the Turkish economy in the coming decades: a dynamic CGE analysis[J]. *Energy Policy*, 2011 (39): 1722–1731.
- [15] Wang Guohong, Wang Yunxia, Zhao Tao. Analysis of interactions among the barriers to energy saving in China [J]. *Energy Policy*, 2008 (36): 1879–1889.
- [16] Chen Chih-ming, Lee Hang-ming. An efficient gradient forecasting search method utilizing the discrete difference equation prediction model[J]. *Applied Intelligence*, 2002(16): 43–58.
- [17] Warfield J W. Developing interconnected matrices in structural modeling[J]. *IEEE Transcript on Systems, Men and Cybernetics*, 1974, 4 (1): 51–81.
- [18] Fukasaku. Energy and environment policy integration: the case of energy conservation policies and technologies in Japan[J]. *Fuel and Energy Abstract*, 1996 (37): 138–139.
- [19] 金明红, 李爱仙, 成建宏, 汤万金. 建立我国能效信息标识制度的有关问题[J]. *中国能源*, 2004, 3(26): 42–44.
- [20] 张坤民. 低碳世界中的中国: 地位、挑战与战略[J]. *中国人口资源环境*, 2008 (3): 1–7.
- [21] Andrews-Speed P. *Energy policy and regulation in the People's Republic of China*[M]. Aspen Publishers Inc, 2004: 24–112.

Carbon Emission Forecast and Influential Factors Analysis of China

TENG Xin, LI Jian, LIU Guangwei

(School of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The rapid economy development of China brings about fast increasing carbon emission. The paper first summarized the present situation of carbon emission forecast, and elaborated the factors of carbon emission home and abroad. Then, based on the Discrete Difference Equation Prediction Model (DDEPM), using the Matlab programming, and in accordance with the annual data of carbon emission and GDP from 1980 to 2009, it put forward the forecast of the carbon emission and GDP data of 2020. The results show that growth rate of carbon emission will be fast. Combining with document retrieval, expert consultation and brain storm method, the study enumerates 14 kinds of factors that influence the carbon emission in China, forming the carbon emission influential factor system of China. The paper straightens out the relationship of these factors by the Interpretative Structural Modeling Method (ISM). The 14 kinds of influential factors are divided into 5 clusters. According to the factors' relationship of each cluster, 5 key factors are determined in the carbon emission influential factor system.

Key words: carbon emission; discrete difference equation prediction model; interpretative structural modeling method; cluster

[责任编辑: 孟青]