

能源消费碳排放零残差因素分解模型研究

宋杰鲲, 窦吉芳

(中国石油大学 经济管理学院, 山东 青岛 266580)

摘要: LMDI模型、Shapley值模型和MRCI模型均是能源消费碳排放的零残差因素分解模型,对三种模型的基本形式进行拓展,提出基于多层次多因素分解的通用表述形式,给出各分解模型中因素的累积效应、逐年效应和效应贡献度的测算方法,并对三种模型特点进行对比。运用Kendall协调系数法对三种模型结果进行相容性检验,输出相容模型集;基于各相容单一分解模型,构建能源消费碳排放的最优加权组合分解模型。应用上述模型对青岛市能源消费碳排放进行分解实证,结果表明,人均GDP和人口是青岛市碳排放增加的驱动因素,能源消费强度下降和能源消费结构优化则对碳排放增长具有抑制作用。

关键词: 能源管理; 能源消费; 碳排放; 零残差; 因素分解; 组合分解模型

中图分类号: X 32

文献标志码: A

Zero-residual factor decomposition models of carbon emissions from energy consumption

SONG Jie-kun, DOU Ji-fang

(School of Economics and Management in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: LMDI model, Shapley value model and MRCI model are all zero-residual factor decomposition models of carbon emissions from energy consumption. The three basic forms of decomposition models were expanded, and their general forms based on multiple levels and multiple factors were proposed. The calculation methods of accumulation effect, year after year effect and effect contribution of different factor were provided respectively. Meanwhile, the characteristics of three models were compared. Kendall coordination coefficient method was employed for compatibility test on different models' results, and the compatible model set can be output. Based on compatible single decomposition models, an optimal weighted combination decomposition model of carbon emissions from energy consumption was constructed. The above models were applied to make an empirical analysis on factor decomposition of carbon emissions from energy consumption of Qingdao city. The results show that per capita GDP and population are the driving factors of carbon emissions, while reducing energy consumption intensity and optimizing energy consumption structure have inhibition role on the growth of carbon emissions.

Key words: energy management; energy consumption; carbon emissions; zero-residual; factor decomposition; combination decomposition model

因素分解是分析能源消费碳排放变化的一种重要方法。通过因素分解,分析碳排放变化的驱动或抑制因素及其作用力强弱^[1]。按照不同的分类标准,因素分解模型可以划分为多种类型^[2],有无残差是判定分解模型是否科学的首要条件。目前,对

数平均权重迪氏指数(LMDI)模型、Shapley值模型和平均变化率指数(MRCI)模型是科学的零残差分解方法,具有计算简便、理论基础成熟、适用广泛等优点。笔者对加法形式的LMDI模型、Shapley值模型和MRCI模型这三种分解方法的基本模型进行拓

收稿日期:2012-06-20

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011GQ004);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(10CX04012B,11CX04034B);教育部人文社会科学研究青年基金项目(10YJC630207);山东省高校人文社会科学研究计划项目(J10WG94);大学生创新创业训练计划创新训练项目(111042555)

作者简介:宋杰鲲(1979-),男,副教授,博士,从事能源经济管理方面的研究。E-mail:songjiekun@163.com。

展,给出其一般形式表述,对各种模型结论进行相容性检验,据此将单一模型相组合,构建能源消费碳排放的组合分解模型;同时给出青岛市能源消费碳排放分解实证。

1 单一分解模型

1.1 LMDI 模型

LMDI 模型采用对数变换函数作为指标权重函数,该函数具有对称性、最大值为 1、能有效处置含零参数等优点^[3],自将其引入能源消费碳排放因素分解提出 LMDI 模型以来^[4],LMDI 已成为目前最常用的碳排放因素分解方法^[5-7]。常见的碳排放分解因素包括 GDP、人口、人均 GDP、产业结构、能源消费结构、能源消费强度、碳排放系数等,按照组合形式包括三因素分解、四因素分解、五因素分解以及六因素分解等多种分解模型。如对碳排放进行六因素分解,碳排放等式如下:

$$C = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n \left(P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{GDP_i}{GDP} \times \frac{E_i}{GDP_i} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \right). \quad (1)$$

式中, P 、 GDP/P 、 GDP_i/GDP 、 E_i/GDP_i 、 E_{ij}/E_i 、 C_{ij}/E_{ij} 分别表示人口、人均 GDP、产业结构、第 i 产业能源消费强度、第 i 产业能源消费结构和碳排放系数。

不失一般性,将碳排放分解为 $l_1 + l_2 + l_3$ 种因素,有碳排放等式

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(x_1 x_2 \cdots x_{l_1})(y_{1,i} y_{2,i} \cdots y_{l_2,i})(z_{1,ij} z_{2,ij} \cdots z_{l_3,ij})]. \quad (2)$$

应用 LMDI 分解时,首先计算分解最低层的碳排放:

$$C_{ij} = (x_1 x_2 \cdots x_{l_1})(y_{1,i} y_{2,i} \cdots y_{l_2,i})(z_{1,ij} z_{2,ij} \cdots z_{l_3,ij}), \quad (3)$$

则碳排放逐年变动的 LMDI 分解模型为

$$\Delta C = C^t - C^{t-1} = \sum_{k=1}^{l_1} \Delta C_{x_k} + \sum_{k=1}^{l_2} \Delta C_{y_k} + \sum_{k=1}^{l_3} \Delta C_{z_k}. \quad (4)$$

令 u 代表 $x_1, \dots, x_{l_1}, y_{1,i}, \dots, y_{l_2,i}, z_{1,ij}, \dots, z_{l_3,ij}$ 中的任一分解因素,其逐年效应为

$$\Delta C_u = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [L(C_{ij}^{t-1}, C_{ij}^t) \ln(u^t/u^{t-1})], \quad (5)$$

$$L(C_{ij}^{t-1}, C_{ij}^t) = \begin{cases} \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^{t-1}}{\ln(C_{ij}^t/C_{ij}^{t-1})}, & C_{ij}^t \neq C_{ij}^{t-1}, \\ C_{ij}^{t-1} \text{ 或 } C_{ij}^t, & C_{ij}^t = C_{ij}^{t-1}. \end{cases} \quad (6)$$

如果存在某年度 C_{ij} 或 u 等于 0,可依据表 1 中的四种特殊情形结果进行选择^[8]。如果考虑各因素的累积效应,则可将公式(4)~(6)及表 1 中的 $t-1$ 换为基期 0。

表 1 LMDI 分解的特殊情形

Table 1 Special circumstances in LMDI decomposition

情形	C_{ij}^t	C_{ij}^{t-1}	u^t	u^{t-1}	$L(C_{ij}^{t-1}, C_{ij}^t) \ln(u^t/u^{t-1})$	u 代表项
1	0	+	+	+	0	$x_1, \dots, x_{l_1}, y_{1,i}, \dots$ 或 $y_{l_2,i}$
2	+	0	+	+	0	$x_1, \dots, x_{l_1}, y_{1,i}, \dots$ 或 $y_{l_2,i}$
3	0	+	0	+	$-C_{ij}^{t-1}$	$z_{1,ij}, \dots$ 或 $z_{l_3,ij}$
4	+	0	+	0	C_{ij}^t	$z_{1,ij}, \dots$ 或 $z_{l_3,ij}$

为了更加直观地反映各因素效应的贡献(包括对总效应的贡献率和对碳排放增加的作用力方向),定义因素效应贡献度如下:

$$\eta_u = \text{sgn}(\Delta C) \frac{\Delta C_u}{\Delta C}. \quad (7)$$

式中, η_u 为因素效应贡献度; $\text{sgn}(\Delta C)$ 为碳排放量变动方向,如碳排放增加则为正,否则为负。

1.2 Shapley 值模型

Shapley 值分解模型^[9] 将碳排放分解为人口、人均 GDP、能源消费强度(E/GDP) 和能源利用碳排放密度(C/E) 这四项因素,碳排放等式为

$$C = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{C}{E}. \quad (8)$$

写成一般形式:

$$C = \prod_{i=1}^n x_i. \quad (9)$$

将碳排放逐年变动分解为 n 种因素效应,有

$$\Delta C = C^t - C^{t-1} = \prod_{i=1}^n x_i^t - \prod_{i=1}^n x_i^0 = \sum_{i=1}^n \Delta C_{x_i}. \quad (10)$$

记所有分解因素组成局中人集合 $N = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 联盟 $U \subseteq N, U \neq \Phi$ 。令其特征函数

$$v(U) = \prod_{d \in U} d^t * \prod_{\bar{d} \in N \setminus U} \bar{d}^{t-1}. \quad (11)$$

依据对称性、有效性和可加性等特征,可得局中人 x_i 的 Shapley 值亦即因素 x_i 的逐年效应为

$$\Delta C_{x_i} = \sum_{r=1}^n \left\{ \frac{(r-1)! (n-r)!}{n!} \sum_{\substack{U: x_i \in U \\ |U|=r}} [v(U) - \right.$$

$$v(U \setminus \{x_i\}) \} \}.$$

其中, $|U|$ 为联盟 U 的基数亦即包含的元素个数。

将上述结论推广到式(2)所示的一般情形,得到式(4)所示的分解模型。令 u 代表任一分解因素,记 $N_{ij} = \{x_1, \dots, x_{l_1}, y_{1,i}, \dots, y_{l_2,i}, z_{1,ij}, \dots, z_{l_3,ij}\}$, 对联盟 $U \subseteq N_{ij}, U \neq \Phi$, 令其特征函数为

$$v(U) = \prod_{d \in U} d^t * \prod_{\bar{d} \in N_{ij} \setminus U} \bar{d}^{t-1}, \quad (12)$$

则有如下的各因素逐年效应测算公式:

$$\Delta C_u = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta C_{u,ij},$$

$$\Delta C_{u,ij} = \sum_{r=1}^{l_1+l_2+l_3} \left\{ \frac{(r-1)! (l_1+l_2+l_3-r)!}{(l_1+l_2+l_3)!} \times \sum_{\substack{U: u \in U \\ |U|=r}} [v(U) - v(U \setminus \{u\})] \right\}.$$

同样地,将式(12)中的 $t-1$ 换为基期0即得到各因素的累积效应,由式(7)得到各因素的效应贡献度。

1.3 MRCI 模型

MRCI 方法^[10] 以各因素平均变化率占全部因素平均变化率之和的比例为权重,是一种零残差分解方法。将式(2)的一般形式分解为模型(4),则各因素 MRCI 逐年效应为

$$\Delta C_u = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_{ij}^t - C_{ij}^{t-1}}{A_{ij}} \times \frac{u^t - u^{t-1}}{(u^t + u^{t-1})/2} \right]. \quad (13)$$

其中

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{l_1} \frac{x_k^t - x_k^{t-1}}{(x_k^t + x_k^{t-1})/2} + \sum_{k=1}^{l_2} \frac{y_{k,i}^t - y_{k,i}^{t-1}}{(y_{k,i}^t + y_{k,i}^{t-1})/2} + \sum_{k=1}^{l_3} \frac{z_{k,ij}^t - z_{k,ij}^{t-1}}{(z_{k,ij}^t + z_{k,ij}^{t-1})/2}.$$

式中, u 代表任一因素; A_{ij} 为全部因素平均变化率之和。

同样地,将式(13)中的 $t-1$ 换为基期0即得到各因素的累积效应,由式(7)得到各因素的效应贡献度。

1.4 模型对比

从模型原理和计算方法来看,三种单一分解模型均为零残差分解,但由于分解原理不同,其分解结果通常并不相同。若以最低层的碳排放变动为效应测算基准,LMDI 模型以各因素对数值变化占全部因素对数值变化之和的比例为权重,MRCI 模型则以各因素平均变化率占全部因素平均变化率之和的比例为权重。比较而言,MRCI 模型更加易于理解,

但其存在两方面不足:一是以各因素相邻年度数值的算术平均值或考察年度与基期数值的算术平均值为基础测算平均变化率,缺乏严密的理论支撑;二是不同因素的平均变化率有正有负,理论上存在全部因素平均变化率之和 A_{ij} 为 0 的可能,导致该方法失效。LMDI 模型尽管缺乏很好的经济含义,但其采用的对数变换函数具有介乎几何平均值和算术平均值之间的良好数学性质^[11]:

$$\sqrt{C_{ij}^t C_{ij}^{t-1}} \leq \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^{t-1}}{\ln(C_{ij}^t / C_{ij}^{t-1})} \leq \frac{C_{ij}^t + C_{ij}^{t-1}}{2}, C_{ij}^t \neq C_{ij}^{t-1},$$

有效提高了平均碳排放的可解释性。Shapley 模型实质上求得的是各局中人对其可以参与的所有联盟的平均边际贡献,在满足个体合理性和群体合理性的合作博弈分配方面具有明确的经济含义^[12],但在碳排放分解方面,由于不同因素对其参与联盟的碳排放变动并无一致的作用方向,导致联盟不具有稳定性,一定程度上削弱了模型的可解释性。

2 组合分解模型

2.1 相容性检验

不同的分解方法有着各自的理论基础,通常上述三种模型均适用于能源消费碳排放因素分解,但可能存在分解结论差别较大的情形,引入 Kendall 协调系数法对三种模型进行相容性检验^[13]。记第 k 种模型中第 r 种因素第 t 年的效应为 ΔC_{kr}^t ,效应贡献度为 $\eta_{kr}^t, k=1,2,3; r=1,2, \dots, l_1+l_2+l_3; t=1,2, \dots, T$,对第 k 种模型中的所有 η_{kr}^t 值由小到大进行排序,数值越小表明对碳排放增加的抑制作用越强,给出相应的排序值 $p_{kr}^t, p_{kr}^t \in \{1,2, \dots, T(l_1+l_2+l_3)\}$,不同的分解模型中排序值通常应基本一致。计算统计量

$$\chi^2 = b(h-1)W.$$

其中

$$h = T(l_1+l_2+l_3),$$

$$W = \frac{12 \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^{l_1+l_2+l_3} (p_r^t)^2 - 3b^2h(h+1)^2}{b^2h(h^2-1)}, p_r^t = \sum_{k=1}^b p_{kr}^t.$$

式中, b 为单一分解模型个数, $b=3$; h 为排序值个数; W 为协调系数,用以辨识实际排序结果与最大可能排序结果之间的分歧程度。

统计量 χ^2 近似服从 $\chi_{\alpha}^2(h-1)$, 给定显著性水平 α , 如果 $\chi^2 \geq \chi_{\alpha}^2(h-1)$, 则判定 b 种方法相容, 否则不相容, 需逐一剔除其中的模型, 对其余模型进行相容性检验, 最终输出包含 z 种单一模型的相容模型集。

2.2 组合分解

为了充分利用 z 种相容模型所蕴含的信息,采用最优加权组合模型对所有相容单一模型进行组合^[14],构建组合分解模型。记第 k 种模型的权重为 w_k ,则第 r 种因素第 t 年的效应组合值为

$$\Delta C_r^t = \sum_{k=1}^z w_k \Delta C_{kr}^t, r = 1, \dots, l_1 + l_2 + l_3; t = 1, \dots, T. \tag{14}$$

以最小化所有因素各年度效应组合值与每一种模型相应效应值的误差平方和为目标,构建最优加权组合分解模型:

$$\begin{cases} \min \sum_{k=1}^z \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^{l_1+l_2+l_3} (\Delta C_r^t - \Delta C_{kr}^t)^2, \\ \text{s. t.} \\ \sum_{k=1}^z w_k = 1, w_k \geq 0, k = 1, \dots, z. \end{cases} \tag{15}$$

求解得到各单一分解模型的权重,代入式(14)即得各因素的组合效应值。由式(7)得到各因素的组合效应贡献度。

3 实例分析

对青岛市 2000—2009 年能源消费碳排放进行因素分解,首先按照文献[8]测算的各种能源的折标准煤系数和碳排放系数计算历年碳排放量,其中能源消费量(实物量)数据来自 2001—2010 年《青岛统计年鉴》,得到碳排放结果如表 2 所示。

表 2 2000—2009 年青岛市能源消费碳排放量

Table 2 Carbon emissions from energy consumption of Qingdao in the year of 2000 - 2009

10 ⁴ t			
年份	碳排放量	年份	碳排放量
2000	734.708 0	2005	2 276.010 1
2001	1 015.059 2	2006	1 664.712 4
2002	850.605 1	2007	2 066.546 5
2003	927.307 8	2008	2 410.149 1
2004	1 242.224 8	2009	2 583.427 2

将碳排放分解为人口(P)、人均 GDP(g)、能源消费强度(E/GDP , 记为 e)、能源消费结构(E_j/E , 记为 s_j) 以及碳排放系数(C_j/E_j , 记为 c_j),有碳排放等式

$$C = \sum_{j=1}^n (Pges_j c_j).$$

由于各能源碳排放系数基本保持不变,将碳排放变化 ΔC 分解为人口效应 ΔC_p 、人均 GDP 效应 ΔC_g 、能源消费强度效应 ΔC_e 和能源消费结构效应 ΔC_s ,即

$$\Delta C = \Delta C_p + \Delta C_g + \Delta C_e + \Delta C_s.$$

运用 LMDI 模型、Shapley 值模型和 MRCI 模型计算各因素逐年效应、累积效应及效应贡献度,结果分别见表 3、表 4 和表 5,其中括号内数值为对应的效应贡献度。可见,三种模型的分解结果有所差异,特别是 2005—2009 年在能源消费强度效应和能源消费结构效应方面,LMDI 模型与另外两种模型之间的差异较大。

表 3 LMDI 模型的各因素效应

Table 3 Effect of different factor by LMDI model

年份	人口效应		人均 GDP 效应		能源消费强度效应		能源消费结构效应	
	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积
	2001	4.464 3 (0.015 9)	4.464 3 (0.015 9)	101.317 1 (0.361 4)	101.317 1 (0.361 4)	296.659 9 (1.058 2)	296.659 9 (1.058 2)	-122.090 0 (-0.435 5)
2002	6.308 8 (0.038 4)	10.773 (0.093 0)	111.597 6 (0.678 6)	212.914 7 (1.837 1)	-426.700 4 (-2.594 6)	-130.040 4 (-1.122 0)	144.339 8 (0.877 7)	22.249 8 (0.192 0)
2003	6.194 0 (0.080 8)	16.967 (0.088 1)	127.428 0 (1.661 3)	340.342 8 (1.767 1)	-54.768 1 (-0.714 0)	-184.808 5 (-0.959 5)	-2.151 2 (-0.028 0)	20.098 5 (0.104 4)
2004	15.398 6 (0.048 9)	32.365 6 (0.063 8)	149.915 3 (0.476 0)	490.258 1 (0.966 0)	190.759 5 (0.605 7)	5.951 (0.011 7)	-41.156 4 (-0.130 7)	-21.057 8 (-0.041 5)
2005	20.547 6 (0.019 9)	52.913 3 (0.034 3)	216.878 4 (0.209 8)	707.136 5 (0.458 8)	1 085.637 9 (1.050 2)	1 091.588 9 (0.708 2)	-289.278 7 (-0.279 8)	-310.336 6 (-0.201 3)
2006	21.776 3 (0.035 6)	74.689 6 (0.080 3)	250.769 1 (0.410 2)	957.905 6 (1.030 0)	-1 073.079 6 (-1.755 4)	18.509 3 (0.019 9)	189.236 5 (0.309 6)	-121.100 1 (-0.130 2)
2007	21.124 1 (0.052 6)	95.813 7 (0.071 9)	245.338 5 (0.610 5)	1 203.244 1 (0.903 4)	246.180 8 (0.612 6)	264.690 2 (0.198 7)	-110.809 4 (-0.275 8)	-231.909 4 (-0.174 1)
2008	10.334 8 (0.030 1)	106.148 5 (0.063 4)	262.086 7 (0.762 8)	1 465.330 8 (0.874 6)	-73.332 7 (-0.213 4)	191.357 5 (0.114 2)	144.513 8 (0.420 6)	-87.395 6 (-0.052 2)
2009	4.405 6 (0.025 4)	110.554 1 (0.059 8)	281.641 6 (1.625 4)	1 746.972 4 (0.945 0)	-172.649 5 (-0.996 4)	18.708 (0.010 1)	59.880 4 (0.345 6)	-27.515 2 (-0.014 9)

表 4 Shapley 值模型的各因素效应
Table 4 Effect of different factor by Shapley value model

年份	人口效应		人均 GDP 效应		能源消费强度效应		能源消费结构效应	
	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积
2001	4.7666 (0.0170)	4.7666 (0.0170)	107.8406 (0.3847)	107.8406 (0.3847)	313.7614 (1.1192)	313.7614 (1.1192)	-146.0173 (-0.5208)	-146.0173 (-0.5208)
2002	6.9048 (0.0420)	10.0856 (0.0870)	122.3510 (0.7440)	199.4291 (1.7207)	-463.6340 (-2.8192)	-103.6755 (-0.8945)	169.9240 (1.0333)	10.058 (0.0868)
2003	6.2310 (0.0812)	16.524 (0.0858)	128.0631 (1.6696)	329.6576 (1.7116)	-55.1225 (-0.7187)	-161.8656 (-0.8404)	-2.4689 (-0.0322)	8.2838 (0.0430)
2004	15.5578 (0.0494)	33.6424 (0.0663)	151.0033 (0.4795)	517.5102 (1.0197)	191.9659 (0.6096)	-13.5012 (-0.0266)	-43.6099 (-0.1385)	-30.1345 (-0.0594)
2005	23.7692 (0.0230)	69.6759 (0.0452)	249.3378 (0.2412)	939.8124 (0.6098)	1213.9932 (1.1743)	956.9481 (0.6209)	-453.3148 (-0.4385)	-425.1342 (-0.2758)
2006	22.8769 (0.0374)	70.367 (0.0757)	264.2354 (0.4323)	920.1396 (0.9894)	-1110.8786 (-1.8172)	152.7993 (0.1643)	212.4686 (0.3476)	-213.3015 (-0.2294)
2007	21.2947 (0.0530)	97.3253 (0.0731)	246.7811 (0.6141)	1213.6351 (0.9112)	247.6264 (0.6162)	356.8916 (0.2680)	-113.8681 (-0.2834)	-336.0135 (-0.2523)
2008	10.5239 (0.0306)	115.1912 (0.0688)	266.4928 (0.7756)	1486.9426 (0.8875)	-74.7114 (-0.2174)	345.7883 (0.2064)	141.2973 (0.4112)	-272.4809 (-0.1626)
2009	4.4315 (0.0256)	124.8138 (0.0675)	283.1166 (1.6339)	1716.422 (0.9284)	-173.7372 (-1.0026)	255.9744 (0.1385)	59.4671 (0.3432)	-248.491 (-0.1344)

表 5 MRCI 模型的各因素效应
Table 5 Effect of different factor by MRCI model

年份	人口效应		人均 GDP 效应		能源消费强度效应		能源消费结构效应	
	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积
2001	4.2643 (0.0152)	4.2643 (0.0152)	96.6563 (0.3448)	96.6563 (0.3448)	280.3470 (1.0000)	280.347 (1.0000)	-100.9162 (-0.3600)	-100.9162 (-0.3600)
2002	6.2521 (0.0380)	10.1443 (0.0875)	110.4440 (0.6716)	200.1267 (1.7268)	-414.6039 (-2.5211)	-103.9550 (-0.8970)	133.4536 (0.8115)	9.5811 (0.0827)
2003	6.2043 (0.0809)	16.8335 (0.0874)	127.4209 (1.6612)	333.9513 (1.7339)	-54.8421 (-0.7150)	-163.7396 (-0.8502)	-2.0804 (-0.0271)	5.5546 (0.0288)
2004	15.4601 (0.0491)	33.6616 (0.0663)	150.2713 (0.4772)	516.8777 (1.0184)	191.0196 (0.6066)	-13.4825 (-0.0266)	-41.8339 (-0.1328)	-29.5400 (-0.0582)
2005	23.7510 (0.0230)	55.0031 (0.0357)	250.2825 (0.2421)	756.4218 (0.4908)	1205.7557 (1.1664)	770.0372 (0.4996)	-446.0040 (-0.4314)	-40.1599 (-0.0261)
2006	21.8852 (0.0358)	68.6079 (0.0738)	251.6655 (0.4117)	894.6495 (0.9620)	-1051.0773 (-1.7194)	149.4910 (0.1607)	166.2289 (0.2719)	-182.7440 (-0.1965)
2007	20.6937 (0.0515)	91.3529 (0.0686)	239.9902 (0.5972)	1141.0423 (0.8567)	240.8118 (0.5993)	338.4271 (0.2541)	-99.6616 (-0.2480)	-238.9838 (-0.1794)
2008	10.5125 (0.0306)	114.0280 (0.0681)	266.2783 (0.7750)	1477.887 (0.8821)	-74.5869 (-0.2171)	345.7835 (0.2064)	141.3987 (0.4115)	-262.2574 (-0.1565)
2009	4.4224 (0.0255)	121.0615 (0.0655)	282.4141 (1.6298)	1666.0378 (0.9012)	-173.2387 (-0.9998)	249.8147 (0.1351)	59.6802 (0.3444)	-188.1948 (-0.1018)

应用 Kendall 协调系数法对三种模型的效应贡献度进行相容性检验,得到逐年效应的协调系数 $W=0.9992$,统计量 $\chi^2=104.9159$;累积效应的协调系数 $W=0.9751$,统计量 $\chi^2=102.3814$ 。给定显著性水平 $\alpha=0.01$, $\chi_{\alpha}^2(35)=57.3421$,可见,三种模型的逐年效应和累积效应均通过相容性检验。

基于三种单一分解模型结果,构建式(15)的最

优加权组合分解模型,求解得到 LMDI 模型、Shapley 值模型和 MRCI 模型的逐年效应最优权重均为 1/3,累积效应最优权重分别为 0.333334、0.333334 和 0.333332,代入式(14)得到各因素逐年效应和累积效应结果见表 6。2009 年各因素累积效应贡献度、2001—2009 年各因素逐年效应贡献度见图 1 和图 2。

表6 组合分解模型的各因素效应

Table 6 Effect of different factor by combination decomposition model

10⁴ t

年份	人口效应		人均 GDP 效应		能源消费强度效应		能源消费结构效应	
	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积	逐年	累积
2001	4.4984	4.4984	101.9381	101.9380	296.9231	296.9227	-123.0080	-123.0078
2002	6.4886	10.3343	114.7977	204.1568	-434.9799	-112.5570	149.2393	13.9630
2003	6.2098	16.7749	127.6375	334.6505	-54.9109	-170.1379	-2.2335	11.3123
2004	15.4722	33.2232	150.3968	508.2153	191.2485	-7.0109	-42.2001	-26.9108
2005	22.6893	59.1974	238.8331	801.1233	1168.4635	939.5246	-396.1996	-258.5431
2006	22.1795	71.2215	255.5569	924.2315	-1078.3462	106.9332	189.3115	-172.3818
2007	21.0375	94.8306	244.0369	1185.9737	244.8732	320.0029	-108.1131	-268.9688
2008	10.4571	111.7892	264.9529	1476.7201	-74.2104	294.3097	142.4034	-207.3779
2009	4.4199	118.8098	282.3911	1709.8107	-173.2086	174.8323	59.6760	-154.7335

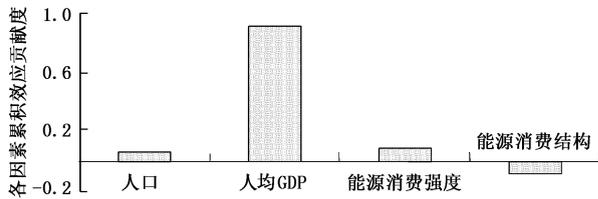


图1 2009年各因素累积效应贡献度

Fig.1 Accumulated effect contribution of different factor in the year of 2009

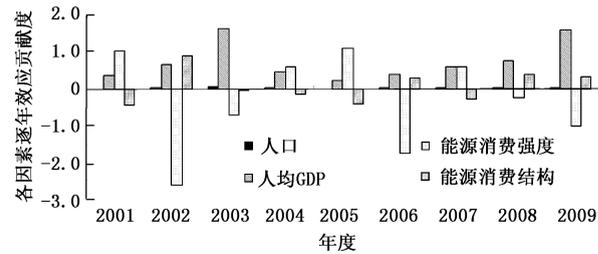


图2 2001—2009年各因素逐年效应贡献度

Fig.2 Year after year effect contribution of different factor in the year of 2001—2009

可见,以2000年为基期,2009年青岛市人均GDP和人口的累积效应、2001—2009年的逐年效应均为正值,这表明近年来青岛市人均GDP和人口对碳排放增加具有拉动作用。其中人均GDP累积效应贡献度高达0.9248,是碳排放增加的最主要拉动因素;人口效应累积贡献度为0.0643,对碳排放量增加具有较弱的拉动作用。2009年能源消费强度的累积效应贡献度为0.0946,但2001—2009年的逐年效应有所波动,2001年、2004—2005年和2007年为正值,2002—2003年、2006年、2008—2009年为负值,这与青岛市2008年以来不断提高能源利用效率,能源消费强度明显下降有关。青岛市2007年能源消费强度为0.1315 kg(标准煤)/元,2008年、2009年分别降至0.1272 kg(标准煤)/元和0.1187 kg(标准煤)/元,今后青岛市应继续强化节能减排,严

格落实能源消费强度目标制度,扩大能源消费强度下降导致的负向效应,抑制碳排放增长。2009年青岛市能源消费结构的累积效应贡献度为-0.0837,但其逐年效应也有一定波动。2001年、2003—2005年和2007年为负值,2002年、2008—2009年为正值,这与青岛市近年来油品消费比例大幅上升而原煤和焦炭消费比例下降很小有着一定关系。2007年青岛市油品消费比例、原煤和焦炭消费比例分别为12.62%、25.36%,2008年、2009年油品消费比例分别升至27.10%和37.19%,而原煤和焦炭消费比例仅分别降至28.86%和26.14%。这表明青岛市今后应注重能源消费结构优化,进一步降低原煤和焦炭消费比例,使能源消费结构逐年效应调整为负值,不断提高能源消费结构优化对碳排放增加的抑制作用。

4 结论

(1)对LMDI模型、Shapley值模型和MRCI模型这三种零残差因素分解模型的加法形式进行扩展,提出基于多层次多因素分解的三种模型的通用表述形式,分别给出其因素累积效应和逐年效应计算公式,并定义了同时反映因素效应贡献率大小和作用力方向的因素效应贡献度。同时,从模型原理和可解释性角度对三种模型进行对比分析。

(2)鉴于三种单一分解模型结论可能存在较大的差异,提出运用Kendall协调系数法进行模型相容性检验,形成相容模型集。对于相容的单一模型,构建最优加权组合分解模型,实现各单一模型的信息融合,提高分解结论的客观性。

(3)给出青岛市能源消费碳排放分解实证,验证基于单一分解模型的组合分解的可行性与有效性。同时,研究结果表明,人均GDP是青岛市碳排放增加的最主要拉动因素,人口具有较弱的拉动作

用,能源消费强度下降和能源消费结构优化对碳排放增加具有较为明显的抑制作用。

参考文献:

- [1] 宋杰鲲. 基于支持向量回归机的中国碳排放预测模型[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(1): 127-135.
SONG Jie-kun. China's carbon emissions prediction model based on support vector regression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1):182-187.
- [2] ANG B W, LIU F L, CHEW E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis[J]. Energy Policy, 2003, 31:1561-1566.
- [3] SATO K. The ideal log-change index number[J]. The Review of Economics and Statistics, 1976, 58(2):223-228.
- [4] ANG B W, CHOI K. Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: a refined division index method[J]. The Energy Journal, 1997, 18(3):59-73.
- [5] WU L, KANEKO S, MATSUOKA S. Driving forces behind the stagnancy of China's energy-related CO₂ emissions from 1996 to 1999: the relative importance of structural change, intensity change and scale change [J]. Energy Policy, 2005, 33:319-335.
- [6] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放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.
XU Guo-quan, LIU Ze-yuan, JIANG Zhao-hua. Decomposition model and empirical study of carbon emissions for China, 1995-2004[J]. China Population, Resources and Environment, 2006, 16(6):158-161.
- [7] 朱勤, 彭希哲, 陆志明, 等. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 资源科学, 2009, 31(12): 2072-2079.
ZHU Qin, PENG Xi-zhe, LU Zhi-ming, et al. Factors decomposition and empirical analysis of variations in energy carbon emission in China[J]. Resources Science, 2009, 31(12):2072-2079.
- [8] 宋杰鲲. 基于LMDI的山东省能源消费碳排放因素分解[J]. 资源科学, 2012, 34(1):35-41.
SONG Jie-kun. Factor decomposition of carbon emissions from energy consumption of Shandong province based on LMDI[J]. Resources Science, 2012, 34(1):35-41.
- [9] ALBRECHT J, FRANCOIS D, SCHOORS K. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals[J]. Energy Policy, 2002, 30:727-736.
- [10] CHUNG H S, RHEE H C. A residual-free decomposition of the sources of carbon dioxide emissions: a case of the Korean industries[J]. Energy, 2001, 26:15-30.
- [11] TORNQVIST L, VARTIA P, VARTIA Y. How should relative changes be measured? [J]. The American Statistician, 1985, 39(1):43-46.
- [12] 汪贤裕, 肖玉明. 博弈论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008:172-215.
- [13] 陈国宏, 李美娟, 陈衍泰. 组合评价及其计算机集成系统研究[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [14] 梁伟, 张来斌, 胡瑾秋, 等. 动态环境下燃压机组的自适应安全评估方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(1):127-135.
LIANG Wei, ZHANG Lai-bin, HU Jin-qiu, et al. Self-adaptive safety assessment method for gas-turbine/compressor unit in dynamic environment[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1):127-135.

(编辑 修荣荣)