

中国碳排放的因素分解模型及实证分析:1995—2004^{*}

徐国泉 刘则渊 姜照华

(大连理工大学 21 世纪发展研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要 能源消费是碳排放的主要来源。随着中国经济的快速发展, 能源消费的急剧增长以及以煤为主的能源结构在短期内很难改变, 因此, 碳排放不可避免地会出现一定幅度的增加。本文基于碳排放量的基本等式, 采用对数平均权重 Divisia 分解法(Logarithmic mean weight Divisia method, LMD), 建立中国人均碳排放的因素分解模型, 定量分析了 1995—2004 年间, 能源结构、能源效率 and 经济发展等因素的变化对中国人均碳排放的影响, 结果显示经济发展对拉动中国人均碳排放的贡献率呈指数增长, 而能源效率和能源结构对抑制中国人均碳排放的贡献率都呈倒“U”。这说明能源效率对抑制中国碳排放的作用在减弱, 以煤为主的能源结构未发生根本性变化, 能源效率和能源结构的抑制作用难以抵销由经济发展拉动的中国碳排放量增长。

关键词 碳排放; 因素分解; 能源效率; 能源结构

中图分类号 N94 **文献标识码** A **文章编号** 1002-2104(2006)06-0158-04

2005 年 2 月 16 日,《京都议定书》的生效, 给中国带来了非常现实的、严峻的挑战。目前, 中国二氧化碳的排放量已位居世界第二, 随着中国经济的快速发展, 碳排放不可避免地会出现一定幅度的增加。因此, 如何控制和减少中国碳排放的问题成为国内外讨论的热点问题之一。1995—2004 年, 中国人均碳排放大致可以分为两个阶段: 第一阶段(1995—2000 年), 中国人均碳排放降低阶段; 第二阶段(2000—2004 年), 中国人均碳排放急剧上升阶段。为了分析中国人均碳排放呈现以上趋势的原因, 本文采用对数平均权重 Divisia 分解法(Logarithmic mean weight Divisia method, LMD), 定量分析能源结构、能源效率 and 经济发展对中国人均碳排放的影响。

1 分解模型

碳排放量的基本公式^[1]为:

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \frac{E_i}{E} \times \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P \tag{1}$$

式中, C 为碳排放量; C_i 为 i 种能源的碳排放量; E 为一次能源的消费量; E_i 为 i 种能源的消费量; Y 为国内生产总值(GDP); P 为人口。

下面分别定义, 能源结构因素 $S_i = \frac{E_i}{E}$, 即 i 种能源在一次能源消费中的份额; 各类能源排放强度 $F_i = \frac{C_i}{E_i}$, 即消费单位 i 种能源的碳排放量; 能源效率因素 $I = \frac{E}{Y}$, 即单位 GDP 的能源消耗; 经济发展因素 $R = \frac{Y}{P}$ 。由此, 人均碳排放量可以写为:

$$A = \frac{C}{P} = \sum_i S_i F_i I R \tag{2}$$

式(2)表示, 人均碳排放量 A 的变化来自于 S_i 的变化(能源结构)、 F_i 的变化(能源排放强度)、 I 的变化(能源效率)以及 R 的变化(经济发展)。

第 t 期相对于基期的人均碳排放量的变化可以表示为:

$$\Delta A = A^t - A^0 = \sum_i S_i^t F_i^t I^t R^t - \sum_i S_i^0 F_i^0 I^0 R^0 = \Delta A_S + \Delta A_F + \Delta A_I + \Delta A_R + \Delta A_{rsd} \tag{3}$$

$$D = \frac{A^t}{A^0} = D_S D_F D_I D_R D_{rsd} \tag{4}$$

其中, ΔA_S 、 D_S 为能源结构因素, ΔA_F 、 D_F 为能源排放强度因素, ΔA_I 、 D_I 为能源效率因素, ΔA_R 、 D_R 为经济发展因素, ΔA_{rsd} 、 D_{rsd} 为分解余量。

式(3)中的 ΔA_S 、 ΔA_F 、 ΔA_I 、 ΔA_R 分别为各因素变化对

收稿日期: 2006—09—01

作者简介: 徐国泉, 博士生, 研究方向为资源效率与区域可持续发展。

^{*} 国家自然科学基金项目: 中德老工业基地“技术进步——资源效率”创新模式比较研究(70440004)和大连理工大学科技伦理与科技管理“985 工程”创新基地资助。

人均碳排放变化的贡献值，它们是有单位的实值。而式(4)中的 D_S 、 D_F 、 D_I 、 D_R 分别为各因素的变化对人均碳排放变化的贡献率。

基于式(3)，本文采用 Ang 等人在 1998 年提出的对数平均权重 Divisia 分解法^[2] (Logarithmic mean weight Divisia method, LMD)进行分解。

按照该方法，各个因素的分解结果如下：

$$\Delta A_S = \sum_i W_i' \ln \frac{S_i^t}{S_i^0}; \Delta A_F = \sum_i W_i' \ln \frac{F_i^t}{F_i^0}$$
$$\Delta A_I = \sum_i W_i' \ln \frac{I_i^t}{I_i^0}; \Delta A_R = \sum_i W_i' \ln \frac{R_i^t}{R_i^0} \tag{5}$$

其中 $W_i' = \frac{A_i^t - A_i^0}{\ln(A_i^t/A_i^0)}$ 。

所以，

$$\Delta A_{rsd} = \Delta A - (\Delta A_S + \Delta A_F + \Delta A_I + \Delta A_R)$$
$$= A^t - A^0 - \sum_i W_i' (\ln \frac{S_i^t}{S_i^0} + \ln \frac{F_i^t}{F_i^0} + \ln \frac{I_i^t}{I_i^0} + \ln \frac{R_i^t}{R_i^0})$$
$$= A^t - A^0 - \sum_i W_i' \ln \frac{A_i^t}{A_i^0} = A^t - A^0 - \sum_i (A_i^t - A_i^0) = 0。$$

对式(4)两边取对数，得到

$$\ln D = \ln D_S + \ln D_F + \ln D_I + \ln D_R + \ln D_{rsd} \tag{6}$$

对照式(3)和(6)，可设各项相应成比例，即

$$\frac{\ln D}{\Delta A} = \frac{\ln D_S}{\Delta A_S} = \frac{\ln D_F}{\Delta A_F} = \frac{\ln D_I}{\Delta A_I} = \frac{\ln D_R}{\Delta A_R} = \frac{\ln D_{rsd}}{\Delta A_{rsd}}$$

这里，假设 $\frac{0}{0}$ 可以为任意常数。

$$\text{设 } \frac{\ln D}{\Delta A} = \frac{\ln A^t - \ln A^0}{A^t - A^0} = W, \text{ 则}$$
$$D_S = \exp(W \Delta A_S), D_F = \exp(W \Delta A_F),$$
$$D_I = \exp(W \Delta A_I), D_R = \exp(W \Delta A_R), D_{rsd} = 1 \tag{7}$$

2 中国碳排放的因素分析

2.1 数据收集、估算与整理

本文对中国总的碳排放量采用以下公式进行估算：

$$C = \sum_i \frac{E_i}{E} \times \frac{C_i}{E_i} \times E = \sum_i S_i \times F_i \times E$$

其中， E 为中国一次能源的消费总量， F_i 为 i 类能源的碳排放强度， S_i 为 i 类能源在总能源所占的比重。这里 F_i 的取值见表 1。

表 1 各类能源的碳排放系数

Tab. 1 Coefficient of carbon emissions of different energy				
项 目	煤炭	石油	天然气	水电、核电
F_i (t 碳/万 t 标准煤)	0.747 6	0.582 5	0.443 5	0.0

资料来源：国家发展和改革委员会能源研究所，中国可持续发展能源暨碳排放情景分析[R]，2003。

通过计算整理得到中国碳排放因素分析的基础数据(见表 2)。

表 2 中国 1990、1995—2004 年的能源、人口、GDP 以及碳排放

Tab. 2 Data for energy consumption, population, GDP and carbon emissions for China

年份		1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
消费总量	10 ⁸ t	9.87	13.12	13.89	13.78	13.22	13.01	13.03	13.49	14.82	17.09	19.70
煤炭	10 ⁸ t	7.521	9.879	10.376	9.853	9.201	8.847	8.609	8.806	9.720	11.560	13.337
	(%)	76.20	75.30	74.70	71.50	69.60	68.00	66.07	65.28	65.59	67.64	67.70
石油	10 ⁸ t	1.638	2.178	2.500	2.811	2.842	3.018	3.216	3.274	3.552	3.886	4.472
	(%)	16.60	16.60	18.00	20.40	21.50	23.20	24.68	24.27	23.97	22.74	22.70
天然气	10 ⁸ t	0.207	0.249	0.250	0.234	0.291	0.286	0.326	0.364	0.388	0.451	0.512
	(%)	2.10	1.90	1.80	1.70	2.20	2.20	2.50	2.70	2.62	2.64	2.60
水电	10 ⁸ t	0.503	0.768	0.707	0.794	0.826	0.791	0.818	0.981	1.067	1.037	1.202
	(%)	5.10	5.85	5.09	5.76	6.25	6.08	6.28	7.27	7.20	6.07	6.10
核电	10 ⁸ t	0	0.051	0.057	0.061	0.059	0.068	0.061	0.065	0.092	0.157	0.177
	(%)	0	0.39	0.41	0.44	0.45	0.52	0.47	0.48	0.62	0.92	0.90
人口	10 ⁸ 人	11.43	12.11	12.24	12.36	12.48	12.58	12.67	12.76	12.84	12.92	13.00
1990 年不变 GDP	10 ⁸ RMB	18 598	31 367	33 678	35 837	38 027	40 370	44 039	47 437	51 942	57 582	64 884
碳排放	10 ⁸ t	6.669	8.765	9.324	9.107	8.663	8.499	8.454	8.652	9.508	11.106	12.803
人均碳排放	t/人	0.583	0.724	0.762	0.737	0.694	0.676	0.667	0.678	0.740	0.860	0.985

资料来源：能源数据来自国家统计局工业交通统计司，中国能源统计年鉴(1991—1996、1997—1999、2000—2002、2003、2004)[M]，北京：中国统计出版社；人口与 GDP 数据来自中国国家统计局，<http://www.stats.gov.cn>。

2.2 因素分析

本文中， F_i 是固定的，即影响中国人均碳排放的因素主要为能源结构变化、能源效率变化以及经济发展变化。

因此， $\Delta A_F = 0$ ， $D_F = 1$ ，其它三个因素的影响效果按照公式(5)和(7)计算，结果见表 3 和图 1。

表 3 1995—2004 年三因素对中国人均碳排放的影响效果
Tab.3 Three decompositions of carbon emissions per capita for China, 1995—2004

		1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
人均 排放	ΔA	0.141	0.179	0.154	0.111	0.093	0.084	0.095	0.157	0.277	0.402
	D	1.242	1.307	1.264	1.190	1.160	1.144	1.163	1.269	1.475	1.690
能源 结构	ΔA_s	-0.007	-0.004	-0.014	-0.019	-0.021	-0.025	-0.032	-0.034	-0.027	-0.029
	D_s	0.989	0.994	0.978	0.970	0.967	0.961	0.950	0.950	0.963	0.963
能源 效率	ΔA_l	-0.155	-0.169	-0.212	-0.270	-0.313	-0.364	-0.392	-0.408	-0.414	-0.428
	D_l	0.788	0.777	0.724	0.655	0.608	0.558	0.537	0.538	0.560	0.572
经济 发展	ΔA_R	0.303	0.351	0.379	0.399	0.426	0.472	0.519	0.598	0.717	0.858
	D_R	1.592	1.691	1.782	1.872	1.970	2.132	2.279	2.481	2.734	3.061

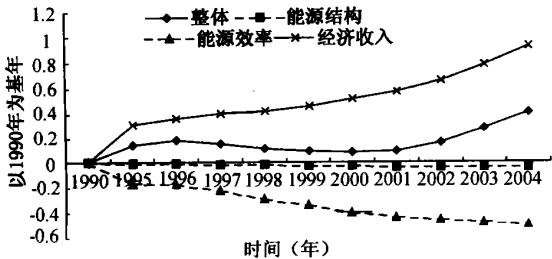


图 1 1995—2004 年三因素对中国人均碳排放的贡献值趋势图
Fig.1 Decomposition of carbon emissions per capita difference for China, 1995—2004

从图 1 可以看出，中国人均碳排放量总体在不断增加，虽然，1996—1999 年期间，中国人均碳排放量有所降低，但其后又快速增长。特别是 2000 年以来，其数值猛增，2002 年年增长率接近 10%，而 2003 年和 2004 年的年增长率更是超过了 15%。

造成中国人均碳排放量快速增长的主要因素是中国经济的快速发展。我们从图 1 可以看出，经济发展对中国人均碳排放的贡献值是不增大的，特别是从 1999 年以来，基本呈现出指数增长的趋势。

中国在能源结构中仍以煤炭为主，煤炭在中国一次能源中占 65% 以上，因此，中国人均碳排放量的能源结构对减少人均碳排放量的贡献值虽然在不断增加，但其贡献力不大。因而，中国人均碳排放的抑制作用主要来自能源效率的提高。从图 1 可以看出，能源效率对降低中国人均碳排放的贡献值是不增大的。但近年来，能源效率对降低中国人均碳排放的贡献值与经济发展对增加中国人均碳排放的贡献值相比，其增长趋势明显趋缓。这也导致近年来中国人均碳排放的急剧增长。

为进一步分析各因素对中国人均碳排放的贡献率，我们将各因素分成拉动因素(经济发展)和抑制因素(能源结

构、能源效率)。
为了强化各因素的可比性，将抑制因素对中国人均碳排放增加的贡献率(小于 1)取倒数，成为对中国人均碳排放降低的贡献率，然后比较拉动因素对拉动中国人均碳排放的贡献率与抑制因素对抑制中国人均碳排放的贡献率的变化趋势(见图 2)。

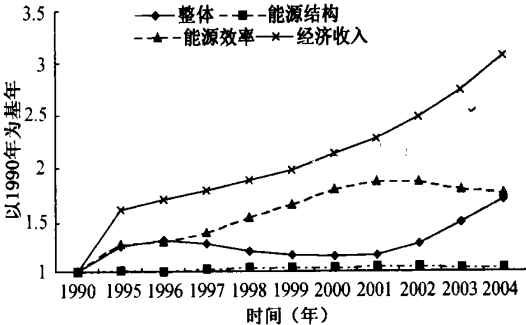


图 2 1995—2004 年三因素对中国人均碳排放变化的贡献率趋势图
Fig.2 Decomposition of carbon emissions per capita radi for China, 1995—2004

从图 2 可以看出，拉动因素(经济发展)对拉动中国人均碳排放的贡献率呈指数增长，并且其各个阶段的贡献率都要大于抑制因素对抑制中国人均碳排放的贡献率，从而导致中国人均碳排放的增大。而两个抑制因素(能源效率和能源结构)对抑制中国人均碳排放的贡献率都呈倒“U”。1996—2000 年能源效率的抑制贡献率与经济发展的拉动贡献率之间的差距逐渐缩小，使得中国人均碳排放量在 1996—2000 年间不断减小，并在 2000 年达到最小的 0.667，但随后，由于能源效率的抑制贡献率的减小和经济发展的拉动贡献率的增大，使 2000 年以后，抑制贡献率与拉动贡献率之间的差距又不断扩大，导致了中国人均碳排放呈指数增长。

通过以上分析，我们发现，1996—2000 年中国人均碳

排放量的下降主要是由能源效率的提高引起的，但随着中国经济的飞速发展，中国人均碳排放量在 2000 年后急剧增长，说明仅依赖能源效率的提高已难以抑制经济发展引起的中国人均碳排放。因此，需要进一步发挥能源结构的改变对中国人均碳排放的抑制作用。

3 结论及对策

通过分析，我们可以得到以下结论：

- (1)近 10 年来，中国碳排放由逐年下降趋势转为急剧上升趋势，其拐点出现在 2000 年。
- (2)过去的 10 年中，中国人均碳排放的抑制作用主要来自能源效率的提高，而能源结构的调整对中国人均碳排放的影响作用不大。
- (3)近年来，能源效率对抑制中国碳排放的作用在减弱，仍然以煤为主的能源结构未发生根本性变化，因此，能源效率和能源结构的抑制作用难以抵消由经济的快速增长拉动的中国碳排放量增长。

因此，中国要实现碳减排，这里提出以下针对性措施：

- (1)增加石油、天然气、水电、核电所占比重，改善能源生产和消费结构。前面的分析可以发现，中国的能源结构调整对抑制人均碳排放的贡献不大，这主要原因是，能源结构的变化不大。若能通过能源替代，增加石油、天然气、水电、核电所占比重，改变以煤炭为主的能源结构，中国的碳排放将得到极大的缓解。为此，中国的能源工业要以电力为中心，煤炭为基础，大力发展水电，积极开发利用石油

和天然气，积极发展核能、太阳能等新能源，在增加能源总量的同时，更注重能源的品质。

- (2)提高能源效率、节约能源。当前国际社会提出的主要减排措施之一是提高能源利用效率。从上面的分析也可以知道，能源效率对抑制中国碳排放作用显著。因此，在能源结构调整困难的情况下，提高能源效率、节约能源应作为中国国民经济发展的一项长远战略方针，这不仅符合中国经济增长方式从粗放型向集约型根本转变的需要，而且有利于降低经济增长对能源的依赖，使之成为最有效的碳减排途径。

- (3)加强碳减排等能源技术领域的研发力度与国际合作。由于技术上和经济上的原因，中国目前煤炭为主的能源结构调整的幅度和速度都难以有突破。燃煤排放的 CO₂ 是中国碳排放的主要来源之一。为此，中国必须通过加大燃煤排放的 CO₂ 捕获与埋存等能源减排技术的研发力度与国际合作，以此来减少煤炭对环境的影响，这样就能够确保煤炭继续成为中国能源的重要部分之一。

(编辑：王兴杰)

参考文献 (References)

[1] Johan A, Delphine F, Koen S. A Shapley Decomposition of Carbon Emissions without Residuals[J]. Energy Policy, 2002, 30: 727~736.
[2] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing Changes in Energy and Environmental Indicators through Decomposition [J]. Energy, 1998, 23 (6): 489~495.

Decomposition Model and Empirical Study of Carbon Emissions for China, 1995—2004

XU Guo-quan LIU Ze-yuan JIANG Zhao-hua

(Development Research Center for the 21st Century of DUT, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract Energy consumption is the main source of carbon emissions. With the economy expanding, the sharply rising consumption of energy and the coal-focused energy structure are very difficult to change in short-term. Therefore the carbon emissions increase inevitably. A decomposition model of carbon emissions per capita for China is set up by adopting Logarithmic Mean Weight Divisia(LMD) method based on the identity of carbon emissions. The model is adopted to analyze the influence of energy structure, energy efficiency and economic development to carbon emissions per capita in China from 1995 to 2004. The results show that the contribution rate of economic development to carbon emissions per capita is exponential growth, however, the contribution rate of energy structure and energy efficiency restraining to carbon emissions per capita is as the down “U”. Some conclusions from above are that the restrain effect of energy efficiency is weakening; the coal-focused energy structure has not changed at all; and the restrain effect of energy structure and energy efficiency cannot offset the driving force of economic development to carbon emissions.

Key words carbon emissions; decomposition analysis; energy efficiency; energy structure