

浙江省能源消费碳排放动态特征及影响因素研究

范玲 汪东

(浙江省发展规划研究院)

【摘要】采用 IPCC 推荐的碳排放计算公式,测算了 2000 年到 2011 年浙江省能源消费碳排放量,分析了人均碳排放量和碳排放强度的动态特征,并利用 LMDI 分析其排放变化的影响因素。研究期间,浙江省人均能源消费碳排放量不断上升,碳排放强度呈现下降的趋势,浙江省碳排放处于碳排放强度倒 U 型曲线高峰到人均碳排放量倒 U 型曲线高峰阶段的过渡期。经济发展对人均碳排放量增长起到拉动作用,产业结构、能耗强度、能源结构、碳排放系数变化起到抑制作用。产业结构、能耗强度和单位能源消耗碳排放强度变化均对碳排放强度下降产生正向驱动作用。

【关键词】浙江省;碳排放;LMDI;影响因素

“十二五”期间浙江省单位地区生产总值碳排放量在“十一五”的基础上继续下降 19%,浙江省碳排放强度已经处于全国领先水平,加上工业化、城镇化快速发展和居民生活水平不断提高带来的碳排放刚性需求,完成碳减排目标任务难度很大。因此,对过去一段时期浙江省碳排放变化动态和影响因素进行分析,提出浙江省碳减排的潜力和空间是非常必要的。

关于中国碳排放驱动因素的研究文献不断涌现,不少研究运用 Ang 等人提出的对数平均权重分解法(LMDI)^[1~3],对碳排放量进行因素分解。郭朝先^[4]对中国 1995~2007 年的碳排放从产业层面和地区层面分解经济总量、经济结构、能源利用效率、能源消费结构、碳排放系数五个影响因素。范体军^[5]基于因素分解方法(LMDI)研究了影响我国化学工业 1996~2007 年间二氧化碳排放量变化的关键因素,包括部门能源消费、化学工业化石能源比例、化石能源结构、能源碳排放强度、经济增长、化学工业产出比例、化学工业的部门结构、能耗强度等 8 个因素。区域碳排放影响因素研究也比较多。马晓微^[6]基于 LMDI 方法定量分析了 1996~2009 年北京市第一、第二、第三产业终端能源消费的变化特征,研究影响北京市二氧化碳排放变化的主要因素及各因素的贡献程度。余建清^[7]对广东省 10 年来化石燃料消费所产生的碳排放进行了估算,分析碳排放量在时间和空间变化上的地域差异,并采用因素分解法对碳排放的影响因素进行了定量分析。赵敏^[8]以对数平均指数法(LMDI)方法为基础,探讨了包括生活能耗在内的上海市终端能源消费 CO₂排放影响因素的分解方法,定量研究了能源强度下降、能源结构优化、产业结构调整、经济发展规模和人口数量等影响因素对 CO₂排放变化量的贡献率。郑义^[9]基于三个层面(3 个产业、8 个主要部门、43 个子部门)使用 LMDI 分解法研究中国 1994~2008 年能源强度变化的原因。

从以往的研究^[10]可发现,一个国家或地区经济发展与碳排放关系的演化存在三个倒 U 型曲线高峰规律,即该演化过程需要先后跨越碳排放强度倒 U 型曲线高峰、人均碳排放量倒 U 型曲线高峰和碳排放总量倒 U 型曲线高峰。本文研究 2000 年到 2011 年浙江省碳排放总量、人均碳排放量和碳排放强度的动态特征,分析人均碳排放量和碳排放强度的影响因素,并为浙江省“十二五”末期甚至更长时期碳减排提出对策。

1 研究方法及数据来源

基金项目:中国清洁发展机制基金赠款项目(111205)

作者简介:范玲,高级工程师,主要研究方向为低碳发展和规划;汪东,博士,主要研究方向为环境管理、低碳经济、循环经济。

1.1 能源消费碳排放测算方法

1.1.1 碳排放量测算方法

本文在测算浙江省碳排放量时，采用《IPCC 国家温室气体清单指南 2006》^[11]中推进的碳排放测算参考方法，具体计算公式如下：

$$C = \sum_j AC_j \cdot NCV_j \cdot CC_j \cdot O_j \times 44/12 \quad (1)$$

式中， C 指能源消费 CO_2 排放量，Mt； j 指燃料品种； AC 指消费的化石燃料实物量，万 t 或亿 m^3 ； NCV 指各燃料低位热值， kJ/kg 或 kJ/m^3 ，低位热值取自《中国能源统计年鉴 2012》^[12]； CC 指燃料含碳量， kg/GJ ，含碳量均采用 IPCC 参考值； O 指氧化率，采用《省级温室气体清单编制指南》的系数；44/12 为 C 转换为 CO_2 的系数。

热力碳排放系数测算是根据浙江省热力生产过程中产生的碳排放量和热力终端消费计算；电力碳排放系数测算是根据浙江省本地生产、电网净调入电力碳排放量与电力终端消费计算，电网调入电力碳排放系数采用华东电网碳排放系数。具体计算公式如下：

$$CE_1 = \frac{C_1}{E_1} \quad (2)$$

$$CE_2 = \frac{C_2 + C_3}{E_2} \quad (3)$$

式中， CE 指热力消费 CO_2 排放系数； C_1 为热力生产 CO_2 排放量； E_1 为浙江省热力终端消费量； CE_2 为热力消费 CO_2 排放系数； C_2 为火力发电 CO_2 排放量； C_3 为净调入电力 CO_2 排放量； E_2 为电力终端消费量。

1.1.2 数据来源

本文采用的能源数据主要来自 2001~2012 年《中国能源统计年鉴》的地区能源平衡表中，各种燃料折标准煤参考系数来自《中国能源统计年鉴 2012》。人口数据、GDP、产业产值数据主要来自《浙江统计年鉴 2012》^[13]。华东电网碳排放系数采用《省级温室气体清单编制指南》。

1.2 能源消费碳排放变化影响因素研究

自 20 世纪 70 年代末以来，指数分解分析法 (IDA) 被广泛运用到能源消费、碳排放等问题的影响因素研究中。因素分解是目前国际上碳排放变化影响因素研究广泛采用的方法，主要是将影响分解为相关因素的乘积，并确定不同权重，以明确各个因素的影响程度。其主要方法包括 Laspeyres 指数分解法和 Divisia 指数分解法。LMDI 法能解决分解残差以及数据 0 值和负值问题，是一种很好的研究能源消费碳排放的影响因素及其特征的方法。本文在扩展 Kaya 恒等式^[14]的基础上，采用 LMDI 分解法对浙江省碳排放量驱动因素的贡献度进行测算。

碳排放量的基本公式为：

$$C = \sum_i P \times \frac{Y}{P} \times \frac{Y_i}{Y} \times \frac{E_i}{Y_i} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \quad (4)$$

式中, C 为碳排放量, 万 t; P 为人口, 万人; Y 为国内生产总值 (GDP), 以 2000 年价格计, 亿元; E 为能源消费量, 万 tce; i 为产业类型; j 为能源种类。因此, 人均碳排放量和碳排放强度可以写为:

$$\frac{C}{P} = \sum_i \frac{Y}{P} \times \frac{Y_i}{Y} \times \frac{E_i}{Y_i} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \quad (5)$$

$$\frac{C}{GDP} = \sum_i \frac{Y_i}{Y} \times \frac{E_i}{Y_i} \times \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \quad (6)$$

分别定义, 人均产值因素 $F = \frac{Y}{P}$; 产业结构因素 $H_i = \frac{Y_i}{Y}$, 即 i 种产业在经济生产总值中的比重; 能耗强度因素 $I_i = \frac{E_i}{Y_i}$, 即单位 GDP 的能源消耗; 能源结构因素 $J_{ij} = \frac{E_{ij}}{E_i}$, 即 i 种产业 j 种能源在 i 种产业能源消费中的比重; 碳排放系数 $K_{ij} = \frac{C_{ij}}{E_{ij}}$, 即 i 种产业 j 种能源的碳排放系数; 能源碳排放强度 $L_i = \frac{C_{ij}}{E_{ij}}$, 即 i 种产业单位能源消耗碳排放量。

人均能源消费碳排放的影响因素有人均产值、产业结构、能耗强度、能源消费结构以及碳排放系数等, 可以分解为:

$$A = \frac{C}{P} = \sum_i F H_i I_i J_{ij} K_{ij} \quad (7)$$

因此, 两个具体年份人均能源消费碳排放量变化的影响因素可以分解成人均产值 (ΔA_1)、产业结构 (ΔA_2)、能耗强度 (ΔA_3)、能源消费结构 (ΔA_4)、碳排放系数 (ΔA_5)。用 A_t 和 A_0 代表 2 个按时间序列的前后年份人均能源消费碳排放量, 根据 LMDI 方法, 两者人均能源消费碳排放量的变化 (ΔA) 为:

$$\Delta A = A_t - A_0 = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 + \Delta A_4 + \Delta A_5 \quad (8)$$

5 个因素对人均能源消费碳排放量的影响利用 LMDI 法进行计算:

$$\Delta A_1 = \sum_i \frac{A_t^i - A_0^i}{\ln A_t^i - \ln A_0^i} \ln \left(\frac{F_t^i}{F_0^i} \right) \quad (9)$$

$$\Delta A_2 = \sum_i \frac{A_t^i - A_0^i}{\ln A_t^i - \ln A_0^i} \ln \left(\frac{H_t^i}{H_0^i} \right) \quad (10)$$

$$\Delta A_3 = \sum_i \frac{A_t^i - A_0^i}{\ln A_t^i - \ln A_0^i} \ln \left(\frac{I_t^i}{I_0^i} \right) \quad (11)$$

$$\Delta A_4 = \sum_i \frac{A_t^i - A_0^i}{\ln A_t^i - \ln A_0^i} \ln \left(\frac{J_t^i}{J_0^i} \right) \quad (12)$$

$$\Delta A_s = \sum_i \frac{A_i^s - A_i^0}{\ln A_i^s - \ln A_i^0} \ln\left(\frac{K_i^s}{K_i^0}\right) \quad (13)$$

能源消费碳排放强度的影响因素有产业结构、能耗强度、单位能源消耗碳排放强度等，可以分解为：

$$B = \frac{C}{GDP} = \sum_i H_i I_i L_i \quad (14)$$

因此，2 个具体年份能源消费碳排放强度变化的影响因素可以分解成产业结构 (ΔB_1)、能耗强度 (ΔB_2)、单位能源消耗碳排放强度 (ΔB_3)。用 B_0 和 B_s 代表 2 个按时间序列的前后年份能源消费碳排放强度，根据 LMDI 方法，两者能源消费碳排放强度的变化 (ΔB) 为：

$$\Delta B = B_s - B_0 = \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3 \quad (15)$$

对 3 个因素对能源消费碳排放强度的影响利用 LMDI 法进行计算^[10]：

$$\Delta B_1 = \sum_i \frac{B_i^s - B_i^0}{\ln B_i^s - \ln B_i^0} \ln\left(\frac{H_i^s}{H_i^0}\right) \quad (16)$$

$$\Delta B_2 = \sum_i \frac{B_i^s - B_i^0}{\ln B_i^s - \ln B_i^0} \ln\left(\frac{I_i^s}{I_i^0}\right) \quad (17)$$

$$\Delta B_3 = \sum_i \frac{B_i^s - B_i^0}{\ln B_i^s - \ln B_i^0} \ln\left(\frac{L_i^s}{L_i^0}\right) \quad (18)$$

2 浙江省能源消费碳排放动态特征分析

2.1 能源消费碳排放

2000~2011 年期间，能源消费碳排放量持续上升，2011 年浙江省能源消费碳排放量为 3.65 亿吨，是 2000 年能源消费碳排放量的 2.86 倍，年均增长 10%。其中第一产业、工业、建筑业和第三产业分别增长了 25.0%、182.1%、575.3% 和 219.5%。“十一五”期间浙江省经济和工业发展较为迅速，能源消费碳排放提高了 76.8%，2004 年工业能源消费碳排放量占能源消费总量的比重高达 75.1%；“十二五”期间浙江省加大产业转型升级和节能减排力度，能源消费碳排放仅增长了 23.3%，工业能源消费碳排放比重下降了 3.6 个百分点。研究期间，第一产业能源消费碳排放占能源消费碳排放总量的比重从 5.0% 下降到 2.2%，建筑业能源消费碳排放比重增加了 1.1%，工业能源消费碳排放比重先上升再下降，而第三产业能源消费碳排放比重先下降再上升。

2.2 人均能源消费碳排放

研究期间，浙江省人均能源消费碳排放持续增加，仅 2008 年出现波动，小幅下降 0.7%。2011 年人均能源消费碳排放达到 6.68 吨，比 2000 年增长了 140.4%，比能源消费碳排放总量增长速度略低。2000~2005 年期间，人均能源消费碳排放增加了 77.7%，

2006 年到 2011 年期间增长速度比前一段时期降低了 55.6%。

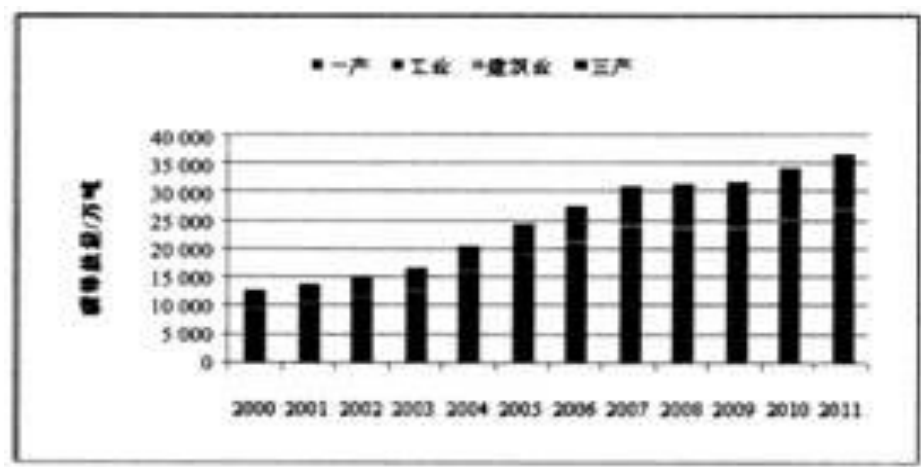


图 1 浙江省碳排放总量变化趋势

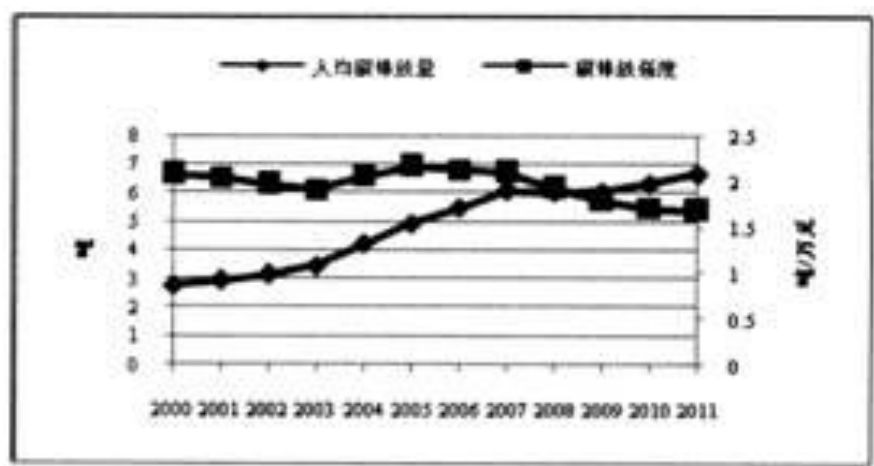


图 2 浙江省人均碳排放量和碳排放强度变化趋势

2.3 能源消费碳排放强度

研究期间，浙江省能源消费碳排放强度基本上呈现下降的趋势，仅 2004 年和 2005 年能源消费碳排放强度出现小幅上升，我国政府提出了 2020 年比 2005 年碳排放强度下降 40%~45% 的目标，浙江省 2011 年比 2005 年碳排放强度下降了 22.1%，很好地完成这个阶段的减排任务，然后一个阶段的压力依然较大。

根据以上的分析和判断，浙江省碳排放强度正处于跨过倒 U 型曲线高峰，不断下降的阶段；人均碳排放正处于倒 U 型曲线的上升阶段，增长速度下降；碳排放总量正处于倒 U 型曲线的上升阶段，但是滞后于人均碳排放发展的阶段，增长速度也在下降。浙江省已跨越碳排放强度倒 U 型曲线的高峰阶段，但仍处于碳排放强度倒 U 型曲线的高峰到人均碳排放量倒 U 型曲线的高峰阶段，正处于碳排放总量下降和碳减排的关键阶段，搞清楚过去一段时间的人均碳排放和碳排放强度的影响因素，有利于缩短碳排放达到峰值的时间。

3 浙江省能源消费碳排放影响因素研究

在不同的演化阶段，驱动因素的影响和贡献存在明显差异^[10]。在碳排放强度高峰之前阶段，碳排放增长主要由能源、碳密集型技术进步驱动；在碳排放强度高峰到人均碳排放量高峰阶段，则主要由经济增长驱动；在人均碳排放量高峰到碳排放总量高峰阶段，则主要由碳减排技术进步驱动；进入碳排放总量稳定下降阶段，碳减排技术进步占据了绝对的主导地位。

3.1 人均能源消费碳排放影响因素分析

2000~2001 年期间，浙江省人均能源消费碳排放增加了 3.9 t，在推动碳排放增长的影响因素中，全部归因于经济的快速发展，推动碳排放增长 4.8 t。在抑制碳排放增长的影响因素中，57.3%归因于能耗强度的下降，22.3%归因于电力和热力碳排放系数的减少，而能源结构和产业结构的调整的贡献率分别为 12.8%和 7.6%。

研究期间，人均产值对人均能源消费碳排放的年均拉动作用为 0.5 t，其中 2001~2007 年拉动作用逐年增加，而 2007~2011 年，拉动作用也是出现波动下降趋势。能源消耗强度对人均能源消费碳排放增长起到抑制作用，尤其在 2005~2011 年，能耗强度起到的抑制作用比较显著。电力和热力的碳排放系数变化对人均碳排放增长的抑制作用波动性较大，主要是热力碳排放系数变化波动导致的。研究期间，能源结构调整基本上对人均能源消费碳排放增长起到抑制作用，而产业结构的调整在 2008 年之后效果更加明显。

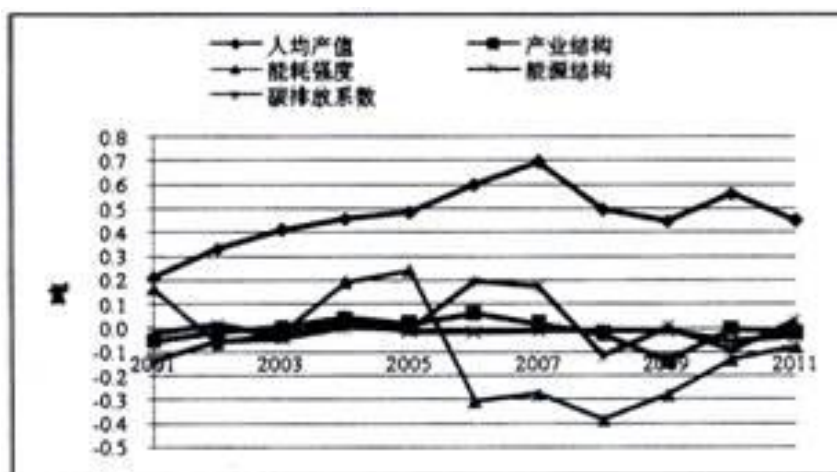


图3 2000~2011 年浙江省人均能源消费碳排放影响因素

3.2 能源消费碳排放强度影响因素分析

2000~2011 年期间，浙江省能源消费碳排放强度呈现下降的趋势，仅 2003~2004 年和 2004~2005 年出现了小幅上升，在促进碳排放强度下降的因素中，56.4%来自于能耗强度的下降，尤其是 2005~2011 年能耗强度的抑制作用更为显著。35%来自于单位能源消耗碳排放强度的下降，而产业结构调整起到 8.6%的抑制作用。

研究期间，能耗强度下降对碳排放下降起到重要的作用，但 2003 年和 2005 年起到负向驱动作用，主要是这期间浙江省耗能较大的重工业得到大力发展。单位能源消耗碳排放强度下降对碳排放强度下降起到促进作用，除了 2004 年、2006 年和 2007 年外，主要是因为这些年浙江省热力和电力碳排放系数有小幅的上升，热力和电力使用煤炭增多导致的。产业结构对碳排放强度下降起到正向驱动作用，但是 2002~2007 年起到负向驱动作用，主要归因于这些年能耗强度较大的工业增加值比例逐年攀升。

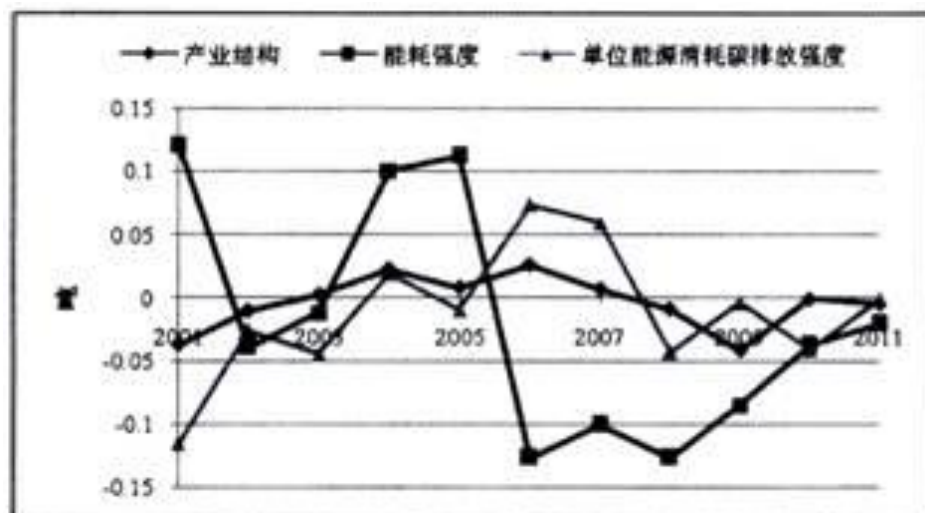


图 4 2000~2011 年浙江省能源消费碳排放强度的影响因素

4 结论

本文利用 IPCC 推荐公式测算和判断浙江省能源消费碳排放动态特征，对碳排放的影响因素进行了实证分析。通过使用扩展 Kaya 模型，得到影响碳排放的因素为人口规模效应、人均产值效应、产业结构效应、能耗强度效应、能源结构效应、碳排放系数效应。并利用 LMDI 分解法，分析各类影响因素对人均碳排放和碳排放强度的影响因素和变化趋势。通过测算和分析，得出以下结论。

(1) 研究期间，浙江省能源消费碳排放量不断上升，而能源消费碳排放强度呈现下降的趋势，工业能源消费碳排放一直是碳排放的主要来源。浙江省能源消费碳排放处于碳排放强度倒 U 型曲线的高峰到人均碳排放量倒 U 型曲线的高峰阶段，人均碳排放和碳排放量增长速度呈现下降的趋势。

(2) 经济发展对人均碳排放量增长产生正向驱动作用，产业结构、能耗强度、能源结构、碳排放系数变化产生负向驱动作用，从分析结果来看，正向驱动作用远大于负向驱动作用，促使 2000~2011 年浙江省人均碳排放量呈现不断上升的趋势。

(3) 能耗强度、单位能源消耗碳排放强度和产业结构变化对碳排放强度下降起到促进作用，能耗强度、单位能源消耗碳排放强度和产业结构的作用不断显现，可以看出，近年来浙江省加快产业结构调整、节能减排和能源结构调整有效降低了碳排放强度和碳排放量。

(4) 工业是推动节能减排重中之重，一是因为工业对碳排放的贡献度最大，二是因为工业能耗强度下降和能源结构调整，使得能源消耗成为最大的人均碳排放和碳排放强度负向驱动作用。

参考文献:

- [1]Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis—a practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33: 867-871.
- [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]Ang B W, Liu F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation[J]. Energy, 2001, 26: 537-548.
- [4]郭朝先. 中国碳排放因素分解: 基于 LMDI 分解技术[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 4~9.
- [5]范体军, 骆瑞玲, 范耀东, 等. 我国化学工业二氧化碳排放影响因素研究[J]. 中国软科学, 2013(3): 166~174.
- [6]马晓微, 崔晓凌. 北京市终端能源消费及碳排放变化影响因素[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2012, 14(5): 1~5.
- [7]余建清, 吕拉昌. 广东省化石燃料碳排放的地域差异[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 100~106.
- [8]赵敏. 上海市终端能源消费的 CO₂ 排放影响因素定量分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1583~1590.
- [9]郑义, 徐康宁. 中国能源强度不断下降的驱动因素——基于对数均值迪氏分解法(LMDI)的研究[J]. 经济管理, 2012, 34(2): 11~21.
- [10]中国科学院可持续发展战略研究组. 中国可持续发展战略报告——探索中国特色的低碳道路[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11]IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. IGES, Japan: The National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006.
- [12]国家统计局. 中国能源统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [13]浙江省统计局. 浙江统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [14]Kaya Yoichi. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: interpretation of proposed scenarios[Z]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC, 1989.