

DOI: 10.5846/stxb201304020585

刘源,李向阳,林剑艺,崔胜辉,赵胜男.基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析.生态学报 2014, 34(9): 2378–2387.

Liu Y, Li X Y, Lin J Y, Cui S H, Zhao S N. Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen City based on LMDI method. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(9): 2378–2387.

基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析

刘源^{1,2}, 李向阳³, 林剑艺^{1,*}, 崔胜辉^{1,2}, 赵胜男⁴

(1. 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021;

2. 厦门市城市代谢重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021;

3. 水利部珠江水利委员会, 广州 510611; 4. 赤峰学院资源与环境科学学院, 赤峰 024000)

摘要: 研究碳排放强度的变化趋势及其影响因素对于指导低碳城市建设具有重要意义。应用对数平均权重分解法(LMDI) 基于厦门市 2005—2010 年各部门终端消费数据对碳排放强度指标进行因素分解, 并将传统分析仅注重产业部门的能源碳排放, 拓展到全面考虑产业部门和家庭消费的能源活动和非能源活动影响。研究结果表明: 2005—2010 年厦门市碳排放强度下降 17.29%, 其中产业部门能源强度对总碳排放强度变化影响最大(贡献 63.07%) 家庭消费能源强度是碳排放强度下降的主要抑制因素(-45.46%)。从影响效应角度看, 经济效率对碳排放强度下降贡献最大, 碳排系数减排贡献最小; 从部门减排贡献角度看, 第二产业贡献最大, 家庭消费贡献最小。总体而言, 厦门市未来碳减排重点部门在第二产业, 优化产业结构和能源结构有较大减排潜力。

关键词: 碳排放强度; LMDI; 因素分解; 厦门市

Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen City based on LMDI method

LIU Yuan^{1,2}, LI Xiangyang³, LIN Jianyi^{1,*}, CUI Shenghui^{1,2}, ZHAO Shengnan⁴

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Xiamen Key Laboratory of Urban Metabolism, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

3 Pearl River Water Resource Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China

4 Faculty of Resources and Environmental Sciences, Chifeng College, Chifeng 024000, China

Abstract: It is of great significance for guiding the low-carbon city development to explore the trends and influencing factors of carbon intensity. Most traditional decomposition studies only focused on the energy carbon emissions from industrial sectors. This paper extended the application of the Logarithmic Mean weight Divisia Index (LMDI) method to a full consideration of the industrial and household sectors, as well as their energy and non-energy activities. Taking Xiamen City as a study case, the carbon emissions was calculated by IPCC's methods based on the end-use consumption data of the industrial and household sectors from 2005 to 2010. Then the aggregated carbon intensity was decomposed by LMDI method into ten driving factors, which covering energy and non-energy related emissions from industrial and household sectors. The ten driving factors were further categorized into four groups: carbon emission efficiency effect (including efficiency factors of energy related industrial carbon emissions, energy related household carbon emission, non-energy related industrial carbon intensity, and non-energy related household carbon intensity), energy intensity effect (including industrial energy intensity factor and that of household), industry structure effect (energy related industrial structure factor and non-energy one) and economic efficiency effect (energy related economic efficiency factor and non-energy one). Results showed that carbon intensity of Xiamen City decreased by 17.29% from 2005 to 2010. From perspective of driving factors, the energy intensity

基金项目: 国家自然科学基金项目(71003090 和 71273252); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01306)

收稿日期: 2013-04-02; 修订日期: 2013-09-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jylin@ iue.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

of industrial sector had the greatest effect on carbon intensity reduction (a contribution rate of 63.07%) , and the energy intensity of household sector was the largest hinder of carbon intensity reduction (-45.46%) . So energy intensity had significant impact on carbon intensity reduction for Xiamen City. Except for reducing the energy intensity of industrial sectors , it is also very important to control the growth of household's energy intensity at the same time. From the effect perspective , the economic efficiency effect became the dominant driver of carbon intensity reduction , followed by energy intensity effect and industry structure effect , and carbon emission efficiency effect contributed the less. The economic efficiency contributed 50.85% of total carbon intensity reduction , which greatly promoted household's carbon intensity reduction. Although industrial structure adjustment had relatively small effects at the study periods , the industry structure in which secondary industry has large proportion is anticipated to have large reduction potentials in the future. The carbon emission efficiency effect was chiefly determined by energy structure , and the current carbon-intensive energy structure also has large reduction potentials. From the sector perspective , the contribution of the secondary industry was the largest (contributing 67.04%) , sequentially followed by the primary industry , the tertiary industry , and the household sector. The carbon intensity reduction by secondary and tertiary industries mainly lied in energy related carbon emissions; whereas the carbon intensity reduction by the primary industry and household sectors mainly relied on non-energy emissions. Thus the non-energy related carbon emissions were an non-negligible part while analyzing carbon intensity reduction. Even though energy efficiency of household sector was the biggest disincentive to reduce carbon intensity , household sector had the less contribution on carbon intensity reduction due to other factors' offset effect. Furthermore , the key sector for future carbon reduction lies on the secondary industry. However , the primary Industry and household sector has limited reduction potential. Overall , optimizing industry structure and energy structure have large reduction potential , and secondary industry has largest reduction potentials.

Key Words: carbon intensity; LMDI; factor decomposition; Xiamen

气候变暖对全球环境和生态系统产生了多方面的不利影响,节能减排已经成为全球应对气候变化的共识。中国向世界郑重承诺到 2020 年单位国内生产总值的碳排放量将在 2005 年基础上下降 40%—45% ,并在“十二五”期间将减排目标分解至各地方政府^[1]。在此背景下,深入研究城市碳排放强度变化趋势及影响因素,对低碳城市工作的开展具有重要指导意义。

目前主要的因素分解方法有拉斯拜尔指数法 (Laspeyres index)^[2-3]、对数平均权重迪氏指数法^[4] (LMDI , Logarithmic Mean weight Divisia Index method) 和自适应加权法^[5-6] (AWD , Adaptive Weighting Divisia index)。本文选取具有理论基础坚实,适用范围广,不产生余值等优点的 LMDI 法。为制定碳减排政策提供参考依据,学者运用 LMDI 法对碳排放影响因素分析进行了大量研究^[4]。Wang 等^[7]对江苏省能源活动 CO₂排放量进行分解得出经济规模增长是碳排放总量增长的主要拉动因素,Zhang 等^[8]将北京产业部门和家庭生活部门能源碳排放影响分解为 6 个因素,Zhang 等^[9]对中国电力生产二氧化碳排放量进行因素分解,他们也得到相同结论;郭运功等^[10]

利用能源消费数据对上海市碳排放总量分解和 Wang 等^[11]对中国能源活动 CO₂排放量分解以及 Jung 等^[12]从韩国生态工业园、Chen 等^[13]从中国工业和 Hammond 等^[14]从英国制造业角度对碳排放量分解,以上研究均表明能源强度下降对降低碳排放总量起关键作用;Wang 等^[15]在对中国交通部门的碳排放总量分解时指出排放系数因素是最微小的因素;宋德勇等^[16]则采用两阶段 LMDI 法将碳排放总量和能源强度进行综合研究。除了上述对碳排放总量因素分解外,还有一些研究针对碳排放强度进行分解: Tan 等^[17]对中国 1998—2008 年中国电力部门和其他工业部门的碳排放强度的变化驱动因素进行分析,Gonzalez 等^[18]对墨西哥 1965—2010 年工业 CO₂排放强度变化分析,朱玲等^[19]对上海市产业部门碳排放强度分析,其研究均显示能源强度下降是碳排放强度下降的主要拉动因素。综上,目前对碳排放的影响因素分解研究较多集中在碳排放总量上^[20],对碳排放强度的研究相对较少,同时大部分研究仅考虑能源活动碳排放没有考虑非能源活动碳排放,而且大多仅关注产业部门碳排放而没有单独考虑家庭消费碳排放。

本文以厦门市为研究案例,以 2005—2010 年为研究期,综合考虑产业部门和家庭消费中的能源活动和非能源活动碳排放量,建立了城市尺度碳排放强度 LMDI 分解模型,尝试更全面地分析碳排放强度变化的影响因素。本研究结果可为厦门市决策部门制定减排政策提供依据,同时可为其他城市的碳排放强度影响因素分析提供借鉴。

1 研究方法

本文采用的 LMDI 方法是在 Wu 等^[21]和 Ang 等^[22]工作基础上进行扩展,加入家庭消费部门和非能源活动的碳排放影响。文中碳排放强度为产业部门和家庭消费碳排放总量与区域生产总值的比值,其中碳排放量计算包括京都议定书中规定的 6 种温室气体(CO₂, CH₄, N₂O, HFC_s, PFC_s, SF₆)^[23],根据

增温潜势指数用等效二氧化碳(CO₂e)表示。碳排放量(G)按照来源不同分为产业部门和家庭消费,并进一步区分能源活动和非能源活动碳排放,见公式(1),碳排放强度计算公式见公式(2)。

$$G = \sum_{i=1}^3 G_i^e + \sum_{i=1}^3 G_i^{ne} + G_r^e + G_r^{ne} \quad (1)$$

$$I = \frac{G}{Q} = \sum_{i=1}^3 \frac{G_i^e}{E_i} \times \frac{E_i}{Q_i} \times \frac{Q_i}{Q} + \sum_{i=1}^3 \frac{G_i^{ne}}{Q_i} \times \frac{Q_i}{Q} + \frac{G_r^e}{E_r} \times \frac{E_r}{P} \times \frac{P}{Q} + \frac{G_r^{ne}}{P} \times \frac{P}{Q} \quad (2)$$

式中, $i = 1, 2, 3$, 分别表示第一产业、第二产业和第三产业, r 表示家庭消费, e, ne 分别表示能源活动、非能源活动, I 表示总碳排放强度, G 表示碳排放量, E 表示能源消耗量, Q 表示地区生产总值(GDP), P 表示人口规模。

表 1 因素分解各系数的含义

Table 1 Meaning of each coefficients in decomposition

系数 Coefficient	含义 Meaning	效应 Effect
$CFP_i = G_i^e/E_i$	产业部门能源碳排放系数	碳排放效率效应
$CFR = G_r^e/E_r$	家庭消费能源碳排放系数	
$CIP_i = G_i^{ne}/Q_i$	产业部门非能源活动排放强度系数	
$CIR = G_r^{ne}/P$	家庭消费非能源活动排放强度系数	
$EIP_i = E_i/Q_i$	产业部门能源强度系数	能源强度效应
$EIR = E_r/P$	家庭消费能源强度系数	
$NES_i, ES_i = Q_i/Q$	产业结构系数	产业结构效应
$NEF, EF = P/Q$	经济效率系数	经济效率效应

基于上面基本公式,定义相关系数(表 1),将公式(2)转化为公式(3)。

$$I = \sum_i CFP_i \times EIP_i \times ES_i + \sum_i CIP_i \times NES_i + CFR \times EIR \times EF + CIR \times NEF \quad (3)$$

式中,令 $\omega_i = CFP_i \times EIP_i \times ES_i$, $\psi_i = CIP_i \times NES_i$, $\omega_r = CFR \times EIR \times EF$, $\psi_r = CIR \times NEF$ 。

$$\int_0^T \frac{dI}{dt} = \sum_{i=1}^3 \int_0^T \omega_i \left(\frac{d \ln CFP_i}{dt} + \frac{d \ln EIP_i}{dt} + \frac{d \ln ES_i}{dt} \right) dt + \sum_{i=1}^3 \int_0^T \psi_i \left(\frac{d \ln CIP_i}{dt} + \frac{d \ln NES_i}{dt} \right) dt + \int_0^T \omega_r \left(\frac{d \ln CFR}{dt} + \frac{d \ln EIR}{dt} + \frac{d \ln EF}{dt} \right) dt + \int_0^T \psi_r \left(\frac{d \ln CIR}{dt} + \frac{d \ln NEF}{dt} \right) dt \quad (4)$$

$$I^T - I^0 \cong \sum_{i=1}^3 \omega_i(t^*) \ln \left(\frac{CFP_i^T}{CFP_i^0} \right) + \sum_{i=1}^3 \omega_i(t^*) \ln \left(\frac{EIP_i^T}{EIP_i^0} \right) + \sum_{i=1}^3 \omega_i(t^*) \ln \left(\frac{ES_i^T}{ES_i^0} \right) + \sum_{i=1}^3 \psi_i(t^*) \ln \left(\frac{CIP_i^T}{CIP_i^0} \right) + \sum_{i=1}^3 \psi_i(t^*) \ln \left(\frac{NES_i^T}{NES_i^0} \right) + \omega_r(t^*) \ln \left(\frac{CFR^T}{CFR^0} \right) + \omega_r(t^*) \ln \left(\frac{EIR^T}{EIR^0} \right) + \omega_r(t^*) \ln \left(\frac{EF^T}{EF^0} \right) + \psi_r(t^*) \ln \left(\frac{CIR^T}{CIR^0} \right) + \psi_r(t^*) \ln \left(\frac{NEF^T}{NEF^0} \right) \quad (5)$$

式中, $\omega_i(t^*)$, $\psi_i(t^*)$, $\omega_r(t^*)$, $\psi_r(t^*)$ 表示 $\omega_i(t) = CFP_i \times EIP_i \times ES_i$, $\psi_i(t) = CIP_i \times NES_i$,

$\omega_r(t) = CFR \times EIR \times EF$, $\psi_r(t) = CIR \times NEF$ 中当 $t = t^* \in [0, T]$ 。 $\psi_r(t^*)$ 的权重函数值^[17], 分别用 $\bar{\omega}_i(t^*)$ 、 $\varphi_i(t^*)$ 、 $\bar{\omega}_r(t^*)$ 、 $\varphi_r(t^*)$ 表示。

采用 LMDI 法确定 $\omega_i(t^*)$, $\psi_i(t^*)$, $\omega_r(t^*)$, 于是方程可以表示为:

$$I^T - I^0 = \sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i(t^*) \ln\left(\frac{CFP_i^T}{CFP_i^0}\right) + \sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i(t^*) \ln\left(\frac{EIP_i^T}{EIP_i^0}\right) + \sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i(t^*) \ln\left(\frac{ES_i^T}{ES_i^0}\right) + \sum_{i=1}^3 \varphi_i(t^*) \ln\left(\frac{CIP_i^T}{CIP_i^0}\right) + \sum_{i=1}^3 \varphi_i(t^*) \ln\left(\frac{NES_i^T}{NES_i^0}\right) + \bar{\omega}_r(t^*) \ln\left(\frac{CFR^T}{CFR^0}\right) + \bar{\omega}_r(t^*) \ln\left(\frac{EIR^T}{EIR^0}\right) + \bar{\omega}_r(t^*) \ln\left(\frac{EF^T}{EF^0}\right) + \varphi_r(t^*) \ln\left(\frac{CIR^T}{CIR^0}\right) + \varphi_r(t^*) \ln\left(\frac{NEF^T}{NEF^0}\right) \quad (6)$$

由此可以表示为:

$$\Delta I = \Delta I_{CFP} + \Delta I_{EIP} + \Delta I_{ES} + \Delta I_{CIP} + \Delta I_{NES} + \Delta I_{CFR} + \Delta I_{EIR} + \Delta I_{EF} + \Delta I_{CIR} + \Delta I_{NEF} \quad (7)$$

将上述 10 个因素根据相同的作用效应进一步分为 4 组:

碳排效率效应: ΔI_{CFP} 、 ΔI_{CFR} 、 ΔI_{CIP} 、 ΔI_{CIR} ;

能源强度效应: ΔI_{EIP} 、 ΔI_{EIR} ;

产业结构效应: ΔI_{ES} 、 ΔI_{NES} ;

经济效率效应: ΔI_{EF} 、 ΔI_{NEF} 。

分解模型框架见图 1, 碳排效率效应包括能源活动碳排放系数因素 (ΔI_{CFP} 、 ΔI_{CFR}) 和非能源活动排放

强度因素 (ΔI_{CIP} 、 ΔI_{CIR}), 反映单位能源消耗的碳排放量和在非能源活动中单位 GDP (人口) 的碳排放量对碳排放强度的影响; 能源强度效应包括产业能源强度因素 (ΔI_{EIP}) 和家庭消费能源强度因素 (ΔI_{EIR}), 反映单位 GDP 能耗和家庭消费人均能耗对碳排放强度变化的影响; 产业结构效应反映产业结构调整对碳排放强度变化的影响, 通过三产结构比重表征; 经济效率效应反映经济效率变化对碳排放强度变化的影响, 通过能源活动和非能源活动单位 GDP 需人数表征。

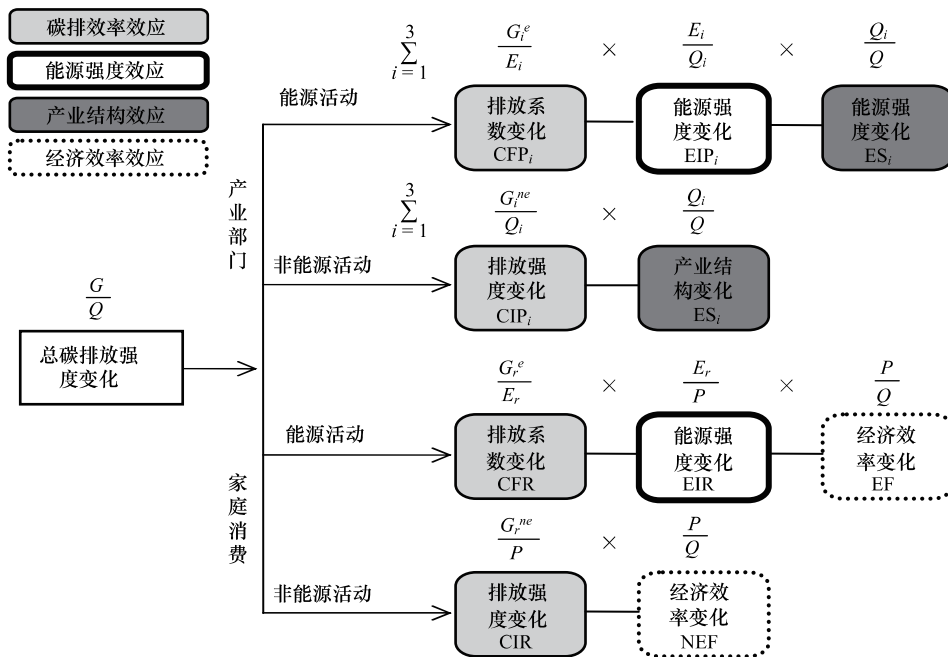


图 1 分解模型框架

Fig.1 Framework of the decomposition model

为进一步探寻三产业部门和家庭消费对总碳排放强度的影响, 将 ΔI 拆分为 4 个部门的影响加和 (公式 8)。

$$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 + \Delta I_r \quad (8)$$

其中, ΔI_1 、 ΔI_2 、 ΔI_3 分别表示第一产业、第二产业和第三产业对总碳减排的贡献值 (t/万元), ΔI_r 表示家

庭消费对总碳排放强度的贡献值($t/\text{万元}$)。

2 研究实例

2.1 研究区概况与数据来源

厦门市是首批实行对外开放政策的4个经济特区之一,定位为现代化国际性港口风景旅游城市和海峡西岸重要中心城市,是国家发改委“五省八市”的首批低碳试点城市之一^[24]。2005年厦门市常住人口为225万人,2010年增加至353万人,平均年增长率为9.43%。2005年厦门地区生产总值达到1007亿元,按可比价计算,2010年在此基础上增加了93.47%。产业结构稳步优化,2010年3次产业比重为1:50:49,第三产业比重相对2005年提升6个百分点。厦门市能源消费以煤炭和油类产品为主,2010年的单位GDP能耗为0.523 t标煤/万元。

2005—2010年能源数据主要来自历年厦门市地区能源平衡表与厦门市统计年鉴中规模以上工业分行业综合能源消费量表,并通过政府部门调研校验核实。涉及外调电力部分参照《中国能源统计年鉴》^[25]和福建省能源平衡表。社会经济数据来自历年《厦门经济特区年鉴》^[26],GDP以2005年不变价计。

2.2 碳排放清单核算

厦门市碳排放量主要依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[27]计算。采取可评估碳排放责任的终端分配法^[28],将能源工业碳排放分配至各终端部门。交通运输部分不计国际航空和国际水运,非运营性交通和除工业废弃物的其他废弃物处理产生的碳排放归并到家庭消费部门。厦门市电力分为本市火力发电和外调电力两部分,本市火力发电投入的一次能源主要是原煤、天然气;外调电力发电投入参照福建省能源平衡表,主要投入能源为原煤、炼厂干气和天然气。按照外调电力和本地发电的比例得到本地电网排放因子($t\text{CO}_2e\text{ kW}^{-1}\text{ h}^{-1}$)。热力绝大部分由第二产业使用,因此将生产热力产生的碳排放并入到第二产业中。

2005—2010年间厦门市碳排放总量增加了819万t,平均年增长率为9.86%,其中2009年相对2008年碳排放量略有下降(降幅0.36%)(图2)。碳排放量主要来自第二产业、第三产业和家庭消费的能源活动,家庭消费非能源活动产生的碳排放量超过第一

产业能源活动和第二产业非能源活动碳排放量之和。厦门市总碳排放强度总体呈现下降趋势(2006年相对2005年略有上升),2010年万元产值碳排放量在2005年的基础上下降了17.29%。

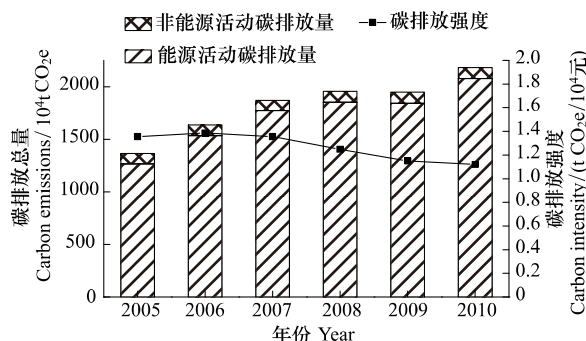


图2 2005—2010年厦门市碳排放总量和强度

Fig.2 Carbon emissions and carbon intensity in Xiamen from 2005 to 2010

3 分解结果

运用LMDI方法分析各因素对厦门市总碳排放强度变化的影响(表2)。2010年万元产值碳排放比2005年减少了0.234 t,其中产业部门能源强度因素和家庭消费能源活动经济效率因素贡献最大,分别为63.07%和42.41%。家庭消费能源强度是碳排放强度下降的主要抑制因素,贡献-45.46%。其他因素对碳排放强度下降的影响相对较小。

4 分析与讨论

4.1 效应影响分析

研究期内,经济效率效应均表现为促进减排,其他效应对减排的贡献呈现波动变化,能源强度效应对碳排放强度的影响最大。总体表现经济效率效应对减排贡献最大,其次是能源强度效应,而碳排放效率效应贡献最小(图3)。

4.1.1 碳排放效率效应

碳排放效率效应包括产业部门能源碳排放系数因素(ΔI_{CFP})、家庭消费能源碳排放系数因素(ΔI_{CFR})、产业部门非能源活动排放强度因素(ΔI_{CIP})和家庭消费非能源活动排放强度因素(ΔI_{CIR})。碳排放效率在2009—2010年期间对碳排放强度下降贡献最大,2007—2008年期间次之,其余时期抑制碳排放强度下降(图4)。

表 2 LMDI 法碳排放强度因素分解结果(2005—2010 年)

Table 2 Carbon intensity decomposition results by LMDI (2005—2010)

年份 Year	ΔI	ΔI_{CFP}	ΔI_{EIP}	ΔI_{ES}	ΔI_{CIP}	ΔI_{NES}	ΔI_{CFR}	ΔI_{EIR}	ΔI_{EF}	ΔI_{CIR}	ΔI_{NEF}
2005—2006	0.031	0.015	0.039	-0.019	0.003	-0.012	0.002	0.030	-0.024	0.002	-0.005
2006—2007	-0.030	0.017	-0.022	-0.017	-0.008	-0.004	0.004	0.028	-0.023	0.000	-0.004
2007—2008	-0.107	-0.012	-0.065	-0.019	-0.002	-0.001	-0.002	0.015	-0.021	0.003	-0.004
2008—2009	-0.098	0.010	-0.111	-0.004	-0.002	-0.001	0.002	0.021	-0.013	0.003	-0.002
2009—2010	-0.030	-0.038	0.019	0.014	-0.005	-0.001	-0.010	0.018	-0.024	-0.001	-0.004
2005—2010	-0.234	-0.014	-0.148	-0.031	-0.017	-0.015	-0.005	0.106	-0.099	0.007	-0.019

(1) 负值表示碳排放强度的下降;

(2) 为便于比较,2010 年人口数与其他年份采用统一统计口径,数据来源 2011 年厦门经济特区年鉴;

(3) ΔI 表示总碳排放强度变化; ΔI_{CFP} 表示产业部门能源碳排放系数因素; ΔI_{EIP} 表示产业部门能源强度因素; ΔI_{ES} 表示能源活动产业结构因素; ΔI_{CIP} 表示产业部门非能源活动排放强度因素; ΔI_{NES} 表示非能源活动产业结构因素; ΔI_{CFR} 表示家庭消费能源碳排放系数因素; ΔI_{EIR} 表示家庭消费能源强度因素; ΔI_{EF} 表示能源活动经济效率因素; ΔI_{CIR} 表示家庭消费非能源活动排放强度因素; ΔI_{NEF} 表示非能源活动经济效率因素。

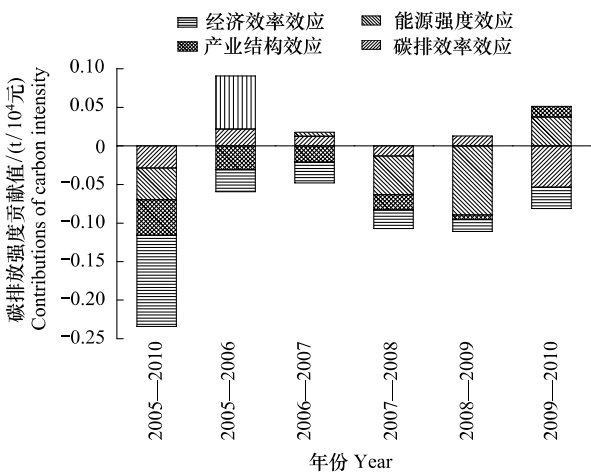


图 3 2005—2010 年厦门市碳排放强度 LMDI 分解结果

Fig.3 Results of effect decomposition analysis for Xiamen carbon intensity from 2005 to 2010

ΔI_{CFP} 和 ΔI_{CFR} 在 2005—2006 年、2006—2007 年、2008—2009 年 3 个时期阻碍碳排放强度下降,在 2007—2008 年和 2009—2010 年时期则相反,这主要与能源结构变化有关。2005—2006 年、2006—2007 年、2008—2009 年 3 个时期煤炭的比例上升,能源结构高碳化,而 2007—2008 年和 2009—2010 年时期煤炭比例下降,能源结构优化。厦门市从 2008 年开始推广使用天然气,到 2010 年天然气的比重大幅增加,占总能源消耗的 7.57%。2009—2010 年能源结构有较大优化,同时碳排放系数因素对碳排放强度下降的贡献也最大,这一时期的能源结构优化主导了研究期内 ΔI_{CFP} 和 ΔI_{CFR} 的减排贡献。综合可知,能源结构优化增加碳排放效率效应的减排贡献。

除 2005—2006 年外, ΔI_{CIP} 促进碳排放强度下降,同时期内厦门市工业过程碳排在减少。除 2009—2010 年外,生活垃圾增加引发 ΔI_{CIR} 抑制碳排放强度下降,而厦门市 2010 年垃圾产生量相比 2009 年略有下降。因此,削减工业生产过程的碳排放和减少生活垃圾产量将增加碳排放效率效应的减排贡献。

4.1.2 能源强度效应

能源强度效应包括产业部门能源强度(ΔI_{EIP}) 和家庭消费能源强度(ΔI_{EIR}),两者对碳排放强度变化影响显著,其中 ΔI_{EIP} 促进碳排放强度下降, ΔI_{EIR} 则相反。

ΔI_{EIP} 在最初 10 个因素里对碳排放强度下降贡献最大(图 5)。研究期内厦门市第一产业能源强度降幅尽管较大,但其比重很小,因而对产业部门能源强度影响十分微小。第二产业和第三产业都有较大比重,对应能源强度变化也大,两者共同影响产业部门能源强度,比重分别为 51.5% 和 46.1%。 ΔI_{EIP} 在

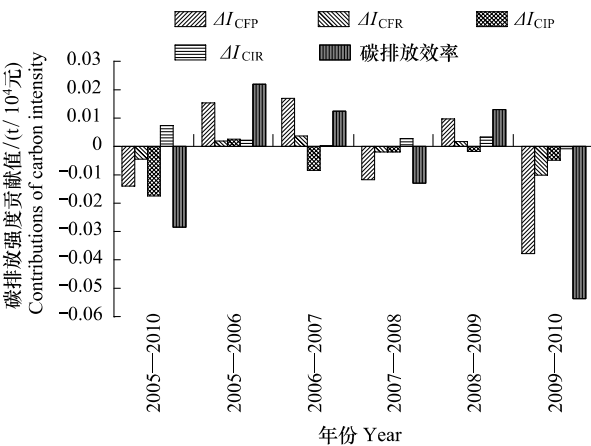


图 4 2005—2010 年厦门市碳排放效率效应影响因素分析

Fig.4 Relative contributions of carbon emission coefficient effect in Xiamen from 2005 to 2010

ΔI_{CFP} 表示产业部门能源碳排放系数因素; ΔI_{CFR} 表示家庭消费能源碳排放系数因素; ΔI_{CIP} 表示产业部门非能源活动排放强度因素; ΔI_{CIR} 表示家庭消费非能源活动排放强度因素

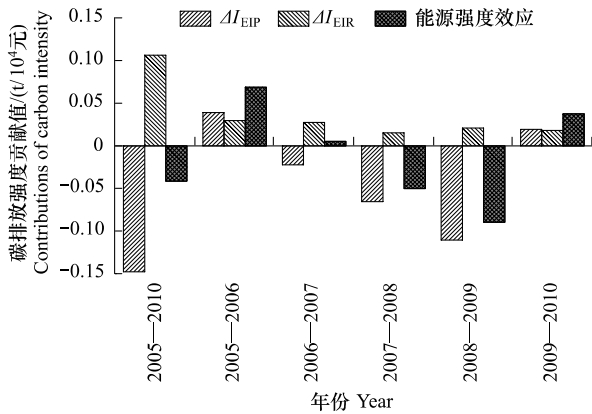


图5 2005—2010年厦门市能源强度效应影响因素分析
 Fig.5 Relative contributions of energy intensity effect in Xiamen from 2005 to 2010
 ΔI_{EIP} 表示产业部门能源强度因素; ΔI_{EIR} 表示家庭消费能源强度因素

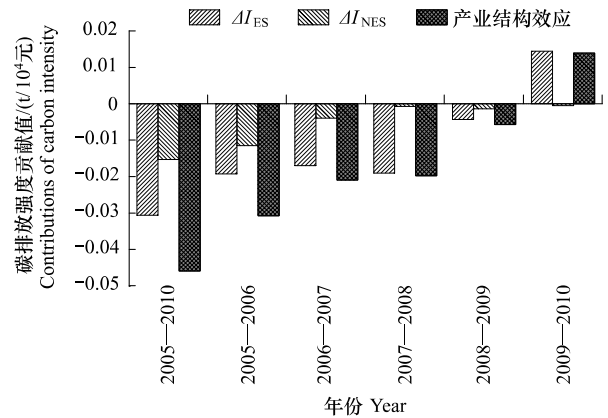


图6 2005—2010年厦门市产业结构效应影响因素分析
 Fig.6 Relative contributions of industrial structure effect in Xiamen from 2005 to 2010
 ΔI_{ES} 表示能源活动产业结构因素; ΔI_{NES} 表示非能源活动产业结构因素

2005—2006年、2009—2010年期间对碳排放强度下降起反作用,其中2005—2006年期间是由于第二产业能源强度大幅提升,从而带动整个产业能源强度上升,2009—2010年期间是由于第三产业能源强度的上升,带动整个产业能源强度的上升。总体而言,能源效率的提高和工业部门内部的结构调整大幅降低产业能源强度,促使产业部门能源强度表现出强劲的减排拉动作用。

ΔI_{EIR} 在各个时期均抑制碳排放强度下降,研究期内对厦门市碳排放强度下降贡献率为-19.78%,因此 ΔI_{EIR} 是碳排放强度下降的主要抑制因素。家庭能源消费主要来源于电力、油类和天然气。厦门市居民消费结构进一步升级带来家用电器销售增加,加之百人私家车拥有量由2005年的14辆增至2010年的19辆(包括摩托车)^[29]。快速增长的家电需求量与私家车拥有量一定程度上增加了家庭消费的能源强度,未来通过节能家电和新能源汽车的替代可以减缓家庭消费能源强度的减排抑制作用。

4.1.3 产业结构效应

产业结构效应包括能源活动产业结构因素(ΔI_{ES})和非能源活动产业结构因素(ΔI_{NES}),两者在2005—2010年间促进碳排放强度下降,前者作用大于后者(图6)。

ΔI_{NES} 在研究期内不同时期对碳排放强度下降的贡献逐年减小,主要由于农业生产碳排放量逐年下降,同时下降空间逐渐变小。 ΔI_{ES} 对减排的贡献变化

与产业结构调整方向一致,产业结构优化调整是第三产业对第二产业和第一产业的替代过程。因此2009—2010年第二产业比重增加,相应 ΔI_{ES} 抑制碳排放强度下降。2009年厦门市的第三产业达到研究期内最大值仅为52%,同期北京市第三产业的比重超过了75%,纽约、伦敦第三产业的比重均超过了80%。因此,未来厦门市通过优化产业结构降低碳排放强度的潜力很大。

4.1.4 经济效率效应

经济效率由能源活动经济效率因素(ΔI_{EF})和非能源活动经济效率因素(ΔI_{NEF})构成,在4类效应对碳排放强度变化影响最大(图7)。研究期内各个

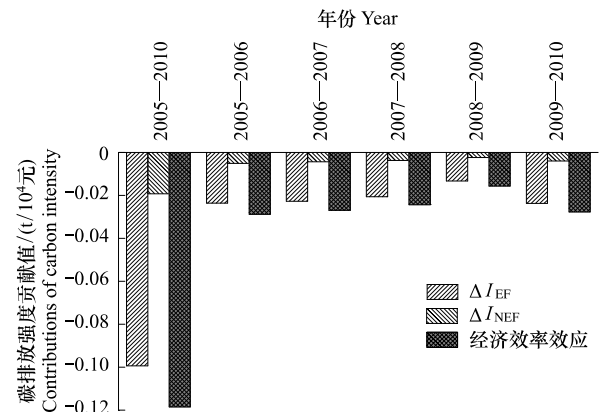


图7 2005—2010年厦门市经济效率效应影响因素分析
 Fig.7 Relative contributions of economic efficiency effect in Xiamen from 2005 to 2010
 ΔI_{EF} 表示能源活动经济效率因素; ΔI_{NEF} 表示非能源活动经济效率因素

时期 ΔI_{EF} 和 ΔI_{NEF} 对碳排放强度的下降均起到促进作用,且能源活动的影响大于非能源活动的影响。表 2 中的经济效率系数是反映区域经济发展与人口强度之间的关系,即每创造一个单位的社会财富所需要的人口数。单位 GDP 需人数越多,说明经济发展对人口的依赖程度越大,经济效率也越低。厦门市单位 GDP 需人数从 2005 年 0.224 人/万元降到 2010 年 0.132 人/万元。随着经济发展水平的提升,劳动效率提高,单位产出的投入要素下降,经济效率将持续促进碳排放强度的下降。

4.2 部门贡献分析

根据公式(8)将 10 个因素按照部门分类,得到

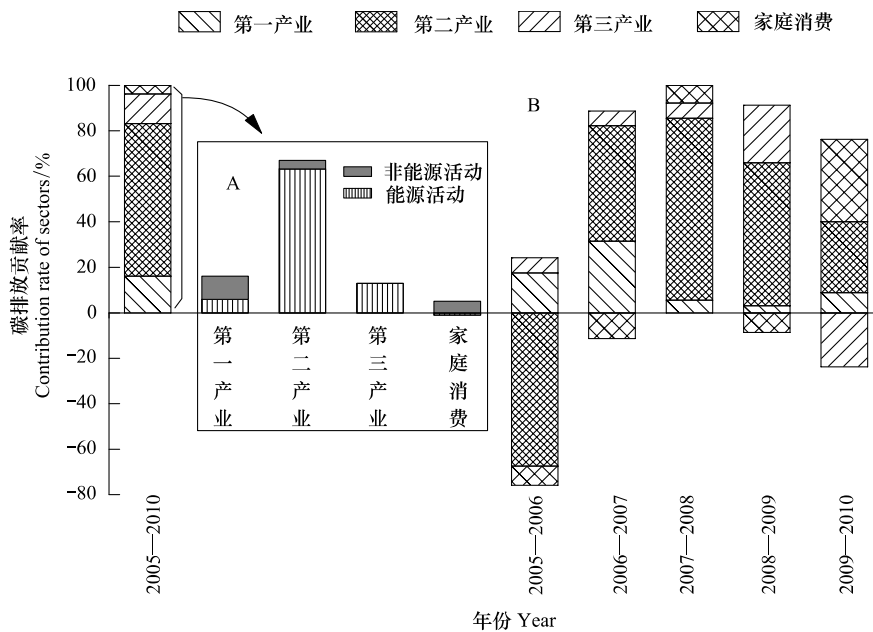


图 8 2005—2010 年厦门市各部门减排贡献率

Fig.8 Contribution rate of carbon intensity reduction of each sector from 2005 to 2010

A 与 B 共用 y 轴

下降和产业比重(贡献 42.87%)降低对第二产业减排起到主要作用。工业活动碳排放量占碳排放总量的比重很小,对厦门市碳排放强度下降贡献小(仅 3.76%),因而第二产业非能源活动未来减排潜力也小。综上分析,能源强度下降和产业结构比重下降是第二产业减排贡献的主要原因。

第一产业在研究期内各个时期均促进碳排放强度下降,减排贡献仅次于第二产业,其中非能源活动和能源活动的减排贡献比为 64:36。研究期内第一产业比重下降所起的作用在非能源活动贡献中占 57.8%。排放强度因素(ΔI_{CFP})减排贡献占非能源活

各部门对总碳排放强度下降贡献(图 8)。研究期内减排贡献最大的是第二产业,其次是第一产业,家庭消费贡献最小。

第二产业减排贡献最大,2010 年厦门市碳排放强度相对 2005 年下降了 0.234 t/万元,其中第二产业贡献 67.04%,第二产业中的能源活动贡献 63.28%。2005—2006 年期间第二产业活动阻碍碳排放强度下降;其余时期促进碳排放强度的下降。分解结果表明第二产业的能源强度(贡献 51.33%)

动的 42.2%;能源活动产业结构因素(ΔI_{ES})贡献为 70.6% 远大于排放系数因素(ΔI_{CFP})和能源强度因素(ΔI_{EIP})的贡献。因此,第一产业减排主要依靠产业比重下降,考虑第一产业比重原本很小(占 1%),因此第一产业未来的减排潜力有限。

第三产业中无非能源活动碳排放,除 2009—2010 年期间外对碳排放强度下降起均起促进作用(图 8)。第三产业中能源活动中能源强度因素(ΔI_{EIP})促进碳排放强度下降,产业结构因素(ΔI_{ES})抑制碳排放强度下降。因此,第三产业的产业结构比重增加削弱能源强度的减排效果。

家庭消费在四个产业部门中减排贡献最小,家庭能源活动中生活排放系数因素(ΔI_{CFR})和经济效率因素(ΔI_{EF})起促进作用,能源强度因素(ΔI_{EIR})起抑制作用;家庭非能源活动中非能源活动排放强度因素(ΔI_{CIR})阻碍减排,非能源活动经济效率因素(ΔI_{NEF})促进减排。 ΔI_{CIR} 和 ΔI_{NEF} 是影响家庭消费碳排放两个最主要因素,前者促进减排,后者抑制减排。综上,降低家庭能源强度和非能源活动排放强度是减排关键所在。推行低碳生活方式,减少生活垃圾产生量,采用相对低碳的焚烧无害化处理垃圾是家庭消费减排潜力所在。

5 结论

基于LMDI的分解结果,通过效应影响分析和部门贡献分析,得到以下结论:

从效应影响角度看,能源强度效应中产业部门和家庭消费能源强度对碳排放强度变化影响最显著,分解表明家庭消费能源强度的抑制作用削弱了能源强度效应的影响,因此在降低产业部门能源强度的同时,如何有效控制家庭消费的能源强度增加对碳减排意义重大。经济效率效应对降低碳排放强度的贡献最大(50.85%),经济效率提高极大促进了家庭部门碳排放强度下降。产业结构优化对碳排放强度下降起到重要作用,能源结构调整相对减排贡献更小,两者未来减排潜力巨大^[30]。

各部门对碳排放强度下降的影响中第二产业贡献最大,其次是第一产业,家庭消费贡献最小。从能源与非能源角度看,第二产业和第三产业减排贡献主要来自能源部分,而第一产业和家庭消费部门主要依靠非能源部分减排,因此城市非能源部分是分析碳减排不可忽略的重要因素。家庭消费部门仍需关注,其能源强度是最大的减排抑制因素,因与其他因素作用抵消后显现出家庭消费减排贡献最小。从部门来看未来减排潜力主要来自第二产业^[30],相对而言第一产业和家庭消费的减排空间比较有限。

References:

[1] State Council of the People's Republic of China. "12th Five-Year Plan" program of work to control greenhouse gas emissions. (2012-01-13) [2013-03-19]. http://www.gov.cn/zwqk/2012-01/13/content_2043645.htm.

[2] Sun J W, Zhao R Q, Huang X J, Chen Z G. Research on carbon

emission estimation and factor decomposition of china from 1995 to 2005. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1284-1295.

[3] Zhang M, Mu H L, Ning Y, Song Y C. Decomposition of energy-related CO₂ emission over 1991-2006 in China. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 2122-2128.

[4] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.

[5] Greening L A. Effects of human behavior on aggregate carbon intensity of personal transportation: comparison of 10 OECD countries for the period 1970-1993. *Energy Economics*, 2004, 26(1): 1-30.

[6] Fan Y, Liu L C, Wu G, Tsai H T, Wei Y M. Changes in carbon intensity in China: Empirical findings from 1980-2003. *Ecological Economics*, 2007, 62(3/4): 683-691.

[7] Wang W W, Liu R, Zhang M, Li H N. Decomposing the decoupling of energy-related CO₂ emissions and economic growth in Jiangsu Province. *Energy for Sustainable Development*, 2013, 17(1): 62-71.

[8] Zhang J Y, Zhang Y, Yang Z, Fath B D, Li S S. Estimation of energy-related carbon emissions in Beijing and factor decomposition analysis. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 258-265.

[9] Zhang M, Liu X, Wang W, Zhou M. Decomposition analysis of CO₂ emissions from electricity generation in China. *Energy Policy*, 2013, 52: 159-165.

[10] Guo Y G, Lin F C, Bai Y Q, Wu J J. The decomposition research on energy-related carbon emissions of Shanghai. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(9): 68-72, 81-81.

[11] Wang C, Chen J N, Zou J. Decomposition of energy-related CO₂ emission in China: 1957-2000. *Energy*, 2005, 30(1): 73-83.

[12] Jung S, An K J, Dodbiba G, Fujita T. Regional energy-related carbon emission characteristics and potential mitigation in eco-industrial parks in South Korea: Logarithmic mean Divisia index analysis based on the Kaya identity. *Energy*, 2012, 46(1): 231-241.

[13] Chen L, Yang Z F, Chen B. Decomposition analysis of energy-related industrial CO₂ emissions in China. *Energies*, 2013, 6(5): 2319-2337.

[14] Hammond G P, Norman J B. Decomposition analysis of energy-related carbon emissions from UK manufacturing. *Energy*, 2012, 41(1): 220-227.

[15] Wang W W, Zhang M, Zhou M. Using LMDI method to analyze transport sector CO₂ emissions in China. *Energy*, 2011, 36(10): 5909-5915.

[16] Song D Y, Lu Z B. The factor decomposition and periodic fluctuations of carbon emission in China. *China Pollution, Resources and Environment*, 2009, 19(3): 18-24.

[17] Tan Z F, Li L, Wang J J, Wang J H. Examining the driving forces for improving China's CO₂ emission intensity using the

- decomposing method. *Applied Energy*, 2011, 88 (12): 4496-4504.
- [18] González D, Martínez M. Changes in CO₂ emission intensities in the Mexican industry. *Energy Policy*, 2012, 51: 149-163.
- [19] Zhu L, Zhang Z. Decomposition analysis of carbon emission intensity in Shanghai city. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(1): 20-26.
- [20] Peters G P, Weber C L, Guan D, Hubacek K. China's growing CO₂ emissions: A race between increasing consumption and efficiency gains. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (17): 5939-5944.
- [21] Wu L B, 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. *Energy Policy*, 2005, 33(3): 319-335.
- [22] Ang B W, Liu F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation. *Energy*, 2001, 26 (6): 537-548.
- [23] United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. [2013-3-19]. http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/items/1678.php.
- [24] Lin J Y, Meng F X, Cui S H, Yu Y, Zhao S N. Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China. *Acta Ecologica Sinica* 2012, 32(12): 3782-3794.
- [25] Energy Statistics Bureau of State Statistics Bureau. *China Energy Statistical Yearbook 2009*. Beijing: China Statistics Press 2010.
- [26] Xiamen Statistics Bureau. *Yearbook of Xiamen Special Economic Zone*. Beijing: China Statistics Press 2006-2011.
- [27] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan, IGES press 2006.
- [28] Yang X A, Cui S H, Lin J Y, Xu L L. The comparison of CO₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (22): 7135-7145.
- [29] Transportation Bureau of Xiamen. *Xiamen annual report of transportation development 2010*. Xiamen. 2011.
- [30] Lin J Y, Cao B, Cui S H, Wang W, Bai X M. Evaluating the effectiveness of urban energy conservation and GHG mitigation measures: The case of Xiamen city, China. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 5123-5132.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府门户网站. “十二五”控制温室气体排放工作方案, 国务院. (2012-01-13) [2013-03-19]. http://www.gov.cn/jwqk/2012-01/13/content_2043645.htm.
- [2] 孙建卫, 赵荣钦, 黄贤金, 陈志刚. 1995—2005 年中国碳排放核算及其因素分解研究. *自然资源学报*, 2010, 25(8): 1284-1295.
- [10] 郭运功, 林逢春, 白义琴, 吴玖玖. 上海市能源利用碳排放的分解研究. *环境污染与防治*, 2009, 31(9): 68-72, 81-81.
- [16] 宋德勇, 卢忠宝. 中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(3): 18-24.
- [19] 朱聆, 张真. 上海市碳排放强度的影响因素解析. *环境科学研究*, 2011, 24(1): 20-26.
- [24] 林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 于洋, 赵胜男. 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例. *生态学报*, 2012, 32(12): 3782-3794.
- [25] 国家统计局能源统计司. 2009 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [26] 厦门市统计局. 厦门市经济特区年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2006-2011.
- [28] 杨喜爱, 崔胜辉, 林剑艺, 徐礼来. 能源活动 CO₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择. *生态学报*, 2012, 32(22): 7135-7145.
- [29] 厦门市交通运输局. 2010 厦门交通发展年度报告. 厦门. 2011.