

庄颖, 夏斌. 广东省交通碳排放核算及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2017, 30(7): 1154-1162.

ZHUANG Ying, XIA Bin. Estimation of CO<sub>2</sub> emissions from the transport sector in Guangdong Province, China and analysis of factors affecting emissions[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(7): 1154-1162.

## 广东省交通碳排放核算及影响因素分析

庄颖<sup>1,2</sup>, 夏斌<sup>1,3,4,5\*</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 中山大学海洋石油勘探开发研究中心, 广东 广州 510006
4. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广东 广州 510006
5. 海洋石油勘探与开发广东高校重点实验室, 广东 广州 510006

**摘要:** 交通领域是二氧化碳排放的重要领域, 为研究广东省的交通碳排放及影响因素, 利用 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会) 在温室气体清单指南中提供的方法估算了广东交通碳排放量, 并应用 LMDI 分解法(对数平均指数法) 对广东交通碳排放进行因素分解分析. 结果表明: ①2001—2010 年广东交通碳排放量从  $1\ 950.98 \times 10^4$  t 增至  $6\ 068.41 \times 10^4$  t, 其中交通运输业碳排放是广东交通碳排放的主体, 私人交通碳排放已成为广东交通碳排放不可忽视的组成部分. ②交通运输业中的公路碳排放量占比最大, 占 56%~64%; 铁路的碳排放量占比最小, 占 0.6%~1.6%; 水运具有较大的节能优势; 民航单位周转量碳排放量最高. ③交通运输业发展水平、运输结构、私人汽车数量规模对广东交通碳排放增加的贡献率分别为 68.79%、36.14%、18.66%, 是拉动广东交通碳排放增长的主要因素; 运输强度与能源强度的贡献率分别为 -18.1%、-6.46%, 是抑制交通碳排放增长的因素. 广东可以通过采取优化交通运输结构、使用替代清洁能源等措施减少交通碳排放.

**关键词:** 交通碳排放; 影响因素; LMDI 模型; 广东

中图分类号: X32 文章编号: 1001-6929(2017)07-1154-09

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.02.43

## Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions from the Transport Sector in Guangdong Province, China and Analysis of Factors Affecting Emissions

ZHUANG Ying<sup>1,2</sup>, XIA Bin<sup>1,3,4,5\*</sup>

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Offshore Oil Exploration and Development Center of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Guangzhou 510006, China
5. Key Laboratory of Offshore Oil Exploration and Development of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** The transport sector is a major contributor of CO<sub>2</sub> emissions. The emissions from the transport sector in Guangdong province were estimated in accordance with the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The logarithmic mean Divisia index was used to measure the influence of commercial transport sector development, transport modal shift, private vehicle number, energy consumption per private vehicle, carbon emission coefficient, transport intensity and energy intensity on the CO<sub>2</sub> emissions of the Guangdong transport sector. The results showed that: (1) CO<sub>2</sub> emissions of the transport sector in Guangdong province increased from 19.51 million tons in 2001 to 60.68 million tons in 2010. The commercial transport sector was the major contributor of emissions, and private vehicle CO<sub>2</sub> emissions were indispensable. (2) CO<sub>2</sub> emissions from highways presented the largest share at 56%–64%, whereas

the smallest share was from railways, which accounted for only 0.6%–1.6% of commercial transport sector CO<sub>2</sub> emissions. Aviation presented the highest CO<sub>2</sub> emissions per unit turnover, while waterways showed the lowest. (3) Commercial transport sector development, transport modal shift and private vehicle number positively affected the growth of emissions, with

收稿日期: 2017-07-15 修订日期: 2017-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372208, 40534019)

作者简介: 庄颖(1979-) 女, 江苏南通人, zhuangyingjs@163.com.

\* 责任作者: 夏斌(1959-) 男, 江西泰和人, 教授, 博士, 博导, 主要从事资源环境与区域可持续发展研究, xiabin01@gmail.com

contributions of 68.79%, 36.13% and 18.66% respectively. By contrast, transport and energy intensities contributed negatively, with -18.1% and -6.46%, respectively. Therefore, the development of commercial transport industry, deterioration of transport modes and growing demand for private vehicles were responsible for the increasing CO<sub>2</sub> emissions of the transport sector, whereas transport and energy efficiencies limited the increase in emissions. Transport sector CO<sub>2</sub> emissions can be reduced through transport mode improvement and clean energy utilization.

**Keywords:** transport sector carbon emissions; affecting factors; LMDI model; Guangdong

气候变化已成为影响人类社会发展的重大议题,二氧化碳排放早已引起全球各界的高度重视.由于对石油能源过多的依赖,交通业是二氧化碳排放的重要领域.根据国际能源署(International Energy Agency)的数据<sup>[1]</sup>,2014年交通部门所排放的二氧化碳约占全球燃料燃烧产生二氧化碳的23.3%,北美、欧洲这一比重分别为33.2%和29.8%,中国作为发展中国家,这一比重为8.6%.事实上,中国交通业的能源消耗量增长十分显著,2014年的能源消耗量达到 $36\,336 \times 10^4$  t标准煤,比1995年增长了5.2倍,交通业的能源消耗量及碳排放日益突出.广东是中国经济重点省份,20多年来地区生产总值一直居于全国首位,2014年广东交通业增加值占全国交通业增加值比重达到了9.5%,对广东交通碳排放的深入分析将有助于全国低碳交通的研究.

目前已有大量文献从不同角度对交通碳排放展开研究,研究的角度包括交通碳排放效率影响因素<sup>[2]</sup>、居民社会经济特征对交通碳排放的影响<sup>[3-4]</sup>、货物运输的碳排放变化<sup>[5]</sup>、交通能源消费或交通碳排放的预测<sup>[6-9]</sup>以及包括交通措施的改进<sup>[10-11]</sup>、新能源汽车和低排放汽车的使用<sup>[12]</sup>、政府政策推进<sup>[13-14]</sup>等方式在内的对交通碳排放效果的研究.就交通碳排放量的估算方面,贾顺平等<sup>[15]</sup>依据国际口径估算了中国交通运输能源消耗水平,并与其他发达国家的交通能耗水平进行了比较;张秀媛等<sup>[16]</sup>对北京公共交通进行全生命周期的能源消耗和碳排放测算;赵敏等<sup>[17]</sup>对上海私家车、公交车等城市交通碳排放进行了估算;Kakouer等<sup>[18]</sup>对伊朗德黑兰的公交车、出租车、私人汽车和摩托车的碳排放量进行估算.交通碳排放影响因素研究是交通碳排放研究的热点,其中因素分解法是常用的分析方法.从分解的因素来看,通常包括人口规模、交通业发展水平、能源强度及能源结构等<sup>[19-21]</sup>.部分文献还对各种交通工具的碳排放进行了研究,将运输结构作为影响因素进行分析<sup>[22-26]</sup>.

从现有的文献来看,对国内交通领域碳排放的估算和分析多为对具有运营性质的交通运输业的能源消耗碳排放研究,或是从城市的视角来分析城市中的

交通碳排放,鲜见将运营性的交通运输业碳排放和私人交通碳排放结合起来对交通领域碳排放分析的研究.随着私人交通的快速迅猛发展,私人交通碳排放已成为交通碳排放的重要组成部分,因而有必要在进行区域交通碳排放核算时将其纳入核算内容.该文以广东交通碳排放为研究对象,估算了包括交通运输业碳排放及私人交通碳排放的广东交通碳排放量.在此基础上,应用LMDI分解法(对数平均指数法)对广东交通碳排放的变化进行因素分解分析.

## 1 研究方法

### 1.1 广东交通碳排放核算

广东交通碳排放的核算包括两个部分:广东交通运输业能源消耗碳排放核算和广东私人交通能源消耗碳排放核算.首先分别估算广东交通运输业能源消耗量及广东私人交通能源消耗量,在此基础上应用IPCC在温室气体清单指南中提供的方法分别核算广东交通运输业碳排放和广东私人交通碳排放.

#### 1.1.1 交通能源消耗量的估算方法

对于广东交通运输业的能源消耗,根据交通运输业能源消耗的统计数据无法计算出不同交通工具的能源消耗量,因此该文利用不同交通工具的单位周转量能耗数据及相应的周转量数据来估算各种交通工具的能源消耗量<sup>[27]</sup>,具体计算方法:

$$E_i^t = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^2 E_{jki}^t = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^2 x_{jki}^t \times \nu_{jki}^t \quad (1)$$

式中: $i$ 为能源,包括汽油、柴油、燃料油、煤油; $j$ 为交通工具,包括铁路、公路、水运和民航; $k$ 为运输类型,包括客运和货运; $t$ 为年份. $E_i^t$ 为第*i*种能源第*t*年的消耗量; $E_{jki}^t$ 为第*j*种交通工具第*k*种运输类型第*i*种能源在第*t*年的消耗量; $x_{jki}^t$ 为第*j*种交通工具第*k*种运输类型在第*t*年消耗第*i*种能源时的单位周转量能耗; $\nu_{jki}^t$ 为第*j*种交通工具第*k*种运输类型在第*t*年消耗第*i*种能源时的周转量.根据我国统计制度规定的客货换算系数,可以将客运周转量换算为货运周转量来计算.客货换算系数:按铺位折算,铁路、远洋、沿海、内河运输的系数为1;按座位折算,内河为0.330、公路为0.100、航空国内为0.072、国际为

0.075. 铁路运输主要分为蒸汽机车、内燃机车和电力机车三种类型,分别以煤炭、柴油、电力作为驱动能源. 2000年以来蒸汽机车已逐渐淘汰,而电力机车不直接排放二氧化碳,因此文中对铁路交通的能源消耗和碳排放的估算只考虑内燃机车部分. 水路运输能源消耗为燃料油和柴油,其中沿海船舶主要使用燃料油,内河船舶主要使用柴油<sup>[27]</sup>. 公路运输的能源消耗主要为汽油和柴油,民航飞机消耗航空煤油.

私人交通的能源消耗主要为汽油和柴油,可以根据生活消费的汽油和柴油量来获得.

### 1.1.2 交通碳排放计算方法

能源消耗的二氧化碳排放量计算采用 IPCC 在 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》中提供的 CO<sub>2</sub> 排放的估算方法:

$$CO_2 = \sum_{i=1}^4 (CO_2)_i = \sum_{i=1}^4 E_i \times NCV_i \times CEF_i \times COF_i \times 44/12 \quad (2)$$

式中  $E_i$  为第  $i$  种能源的消耗量,  $NCV_i$  为第  $i$  种能源的平均低位发热量,  $CEF_i$  为第  $i$  种能源单位热量的含碳水平,  $COF_i$  为第  $i$  种能源燃烧时的氧化率, 44 和 12 分别为二氧化碳和碳的分子量.

### 1.2 广东交通碳排放因素分解模型

在对碳排放的因素分解方法中,应用最多的是指数分解法 (IDA), 而指数分解法又以 Laspeyres 和 Divisia 分解方法的应用最为普遍. Divisia 分解法中的对数平均 Divisia 指数分解法 (LMDI) 可以有效解决分解中的剩余问题和数据中的 0 值及负值问题<sup>[28-30]</sup>, 因此该文采用 LMDI 法对广东交通碳排放进行因素分解, 建立影响因素模型:

$$C = \sum_{i=1}^4 \frac{C_j}{E_j} \times \frac{E_j}{V_j} \times \frac{V_j}{V} \times \frac{V}{Y} \times Y + \frac{C_s}{E_s} \times \frac{E_s}{K} \times K \quad (3)$$

$$C = \sum_{j=1}^4 YE_j \times YI_j \times YG_j \times YF \times Y + SE \times SI \times K \quad (4)$$

式中:  $C$  为广东交通碳排放量;  $C_j/E_j = YE_j$  为第  $j$  种交通工具能源消耗碳排放系数;  $E_j/V_j = YI_j$  为第  $j$  种交通工具单位周转量的能源消耗量, 代表第  $j$  种交通工具的能源强度;  $V_i/V = YG_j$  为第  $j$  种交通工具周转量占四种交通工具总周转量的比重, 代表运输结构;  $V/Y = YF$  为单位交通运输业增加值的周转量, 代表运输强度;  $Y$  为交通运输业增加值;  $C_s/E_s = SE$  为私人交通能源消耗碳排放系数;  $E_s/K = SI$  为私人交通单位车

辆消耗的能源;  $K$  表示私人车辆的数量. 式 (3) 表示广东交通碳排放量为交通运输业碳排放量与私人交通碳排放量之和; 式 (4) 的前半部分表示交通运输业碳排放分解为五个影响因素, 后半部分表示私人交通碳排放分解为三个影响因素.

第  $t$  年相对于基年的交通碳排放量的变化可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta C &= C^t - C^0 = \sum_{j=1}^4 YE_j^t \times YI_j^t \times YG_j^t \times YF^t \times Y^t + SE^t \times SI^t \times K^t - \\ &\left( \sum_{j=1}^4 YE_j^0 \times YI_j^0 \times YG_j^0 \times YF^0 \times Y^0 + SE^0 \times SI^0 \times K^0 \right) \\ &= \sum_{j=1}^4 YE_j^t \times YI_j^t \times YG_j^t \times YF^t \times Y^t - \sum_{j=1}^4 YE_j^0 \times YI_j^0 \times YG_j^0 \times YF^0 \times Y^0 + \\ &\quad (SE^t \times SI^t \times K^t - SE^0 \times SI^0 \times K^0) \\ &= (\Delta C_{YE} + \Delta C_{YI} + \Delta C_{YG} + \Delta C_{YF} + \Delta C_Y) + (\Delta C_{SE} + \Delta C_{SI} + \Delta C_K) \quad (5) \end{aligned}$$

式中  $\Delta C_{YE}$  为交通运输能源碳排放因子效应,  $\Delta C_{YI}$  为能源强度效应,  $\Delta C_{YG}$  为运输结构效应,  $\Delta C_{YF}$  为运输强度效应,  $\Delta C_Y$  为交通运输业发展水平效应,  $\Delta C_{SE}$  为私人交通能源消耗碳排放因子效应,  $\Delta C_{SI}$  为私人交通单位车辆能耗效应,  $\Delta C_K$  为私人车辆的数量规模效应.

各分解因素贡献值的表达式如下:

$$\Delta C_{YE} = \sum_{j=1}^4 W_{1j} \cdot \ln \frac{YE_j^t}{YE_j^0} \quad (6)$$

$$\Delta C_{YI} = \sum_{j=1}^4 W_{1j} \cdot \ln \frac{YI_j^t}{YI_j^0} \quad (7)$$

$$\Delta C_{YG} = \sum_{j=1}^4 W_{1j} \cdot \ln \frac{YG_j^t}{YG_j^0} \quad (8)$$

$$\Delta C_{YF} = \sum_{j=1}^4 W_{1j} \cdot \ln \frac{YF^t}{YF^0} \quad (9)$$

$$\Delta C_Y = \sum_{j=1}^4 W_{1j} \cdot \ln \frac{Y^t}{Y^0} \quad (10)$$

$$\Delta C_{SE} = W_2 \cdot \ln \frac{SE^t}{SE^0} \quad (11)$$

$$\Delta C_{SI} = W_2 \cdot \ln \frac{SI^t}{SI^0} \quad (12)$$

$$\Delta C_K = W_2 \cdot \ln \frac{K^t}{K^0} \quad (13)$$

式 (6) ~ (10) 中的  $W_{1j}$  及式 (11) ~ (13) 中的  $W_2$

为权重系数:

$$W_{1j} = \frac{C_j^t - C_j^0}{\ln C_j^t - \ln C_j^0} \quad (14)$$

$$W_2 = \frac{C_s^t - C_s^0}{\ln C_s^t - \ln C_s^0} \quad (15)$$

由于  $\Delta C_{YE}$  及  $\Delta C_{SE}$  均表示能源消耗碳排放因子效应,因此令  $\Delta C_{YE} + \Delta C_{SE} = \Delta C_{YSE}$ ,  $\Delta C_{YSE}$  为交通能源碳排放因子效应。

## 2 数据来源

铁路和民航 2001—2010 年、公路和水运 2001—2007 年的单位周转量能耗数据来自于历年《中国交通年鉴》,公路和水运 2010 年单位周转量能耗数据根据交通运输部“2010 年公路水路交通运输业发展统计公报”中的减排成果估算,公路和水运 2008—2009 年单位周转量能耗数据依据 2007 年和 2010 年的数据进行平均增长率估算。铁路柴油消耗的客货运的周转量数据根据《铁路统计资料汇编》中内燃机车工作量的比例计算得出,因资料获取原因部分数据按照年均增长率估算。2001—2005 年公路客货运的汽油和柴油的周转量数据根据相应年份营运客货车汽油和柴油的消耗量<sup>[31]</sup>及单位周转能耗相除得出公路客货运的汽油和柴油的周转量比重,再与《广东统计年鉴》中公路客、货运的周转量相乘获得。同时,依据《全国交通统计资料汇编》及相关文献<sup>[32]</sup>中交通业汽、柴油的消耗量数据,可见 2005—2010 年全国交通业的汽油和柴油的消耗量比例基本趋于稳定,由此 2006—2010 年公路客货运的汽油和柴油的周转量数据均以 2005 年公路客货运的汽油和柴油的周转量比例来估算。水运客货运周转量数据来自《中国交通年鉴》,民航客货运周转量数据来自《广东统计年鉴》。出于对数据连续性及口径一致性的考虑,文中的研究时段为 2001—2010 年。

私人交通消耗的汽油和柴油数据来源于历年《中国能源统计年鉴》能源平衡表中生活消费的汽油和柴油量。平均低位发热量数值来自《中国能源统计年鉴》,含碳水平采用 IPCC 参考值,氧化率采用 IPCC 默认值 100%。

因素分解模型中的交通运输业增加值数据来自《广东统计年鉴》,并依据年鉴中的交通运输业增加值指数调整为以 2000 年价格计算的不变价交通运输业增加值。私人车辆的数量采用《中国交通年鉴》的私人汽车数量。

表 1 各类能源二氧化碳排放系数

Table 1 Carbon emissions coefficient of different energy sources

| 能源种类 | 平均低位<br>发热量/<br>(kJ/kg) | 单位热值<br>含碳量/<br>(kg/GJ) | 碳氧化率/<br>% | 二氧化碳<br>排放系数/<br>(kg/kg) |
|------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|
| 汽油   | 43 070                  | 18.9                    | 100        | 2.98                     |
| 柴油   | 42 652                  | 20.2                    | 100        | 3.16                     |
| 燃料油  | 41 816                  | 21.1                    | 100        | 3.24                     |
| 煤油   | 43 070                  | 19.6                    | 100        | 3.10                     |

## 3 结果与分析

### 3.1 广东交通碳排放分析

广东交通碳排放量总体为上升趋势。2001 年交通碳排放量为  $1\,950.98 \times 10^4$  t, 2010 年增至  $6\,068.41 \times 10^4$  t, 增长量为  $4\,117.43 \times 10^4$  t, 增长了 2.1 倍。其中交通运输业碳排放量从 2001 年的  $1\,815.01 \times 10^4$  t 增至 2010 年的  $5\,133.92 \times 10^4$  t, 增长了 1.8 倍, 年均增长率为 12.2%。交通运输业碳排放量在 2003 年和 2006 年分别出现了 3% 和 5.6% 的小幅下降, 而 2007 年出现 40% 的最大环比增长。2007 年的大幅增长主要是因为此期间水运单位周转量能耗大幅增加致使水运碳排放量环比提高了 1.4 倍, 从而带动了交通运输业整体碳排放的大幅增加。广东私人交通碳排放量也呈上升趋势, 2001 年私人交通碳排放量为  $135.97 \times 10^4$  t, 2010 年达到  $934.48 \times 10^4$  t, 增长了 5.8 倍, 年均增长率 23.9%。2001—2006 年是私人交通碳排放快速增长时期, 其中 2005 年增长最快, 环比增长超过 80%。2007—2008 年私人交通碳排放量增长放缓, 环比增长率分别降至 5.7% 及 9.3%, 2009 年开始又恢复快速增长势头。2008 年的金融危机对我国的经济造成了较大冲击, 消费者购买力下降, 特别是作为非生活必需品的汽车, 其消费支出受到了明

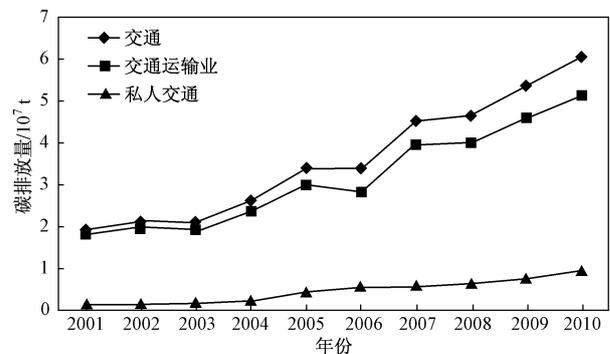


图 1 广东交通碳排放量、交通运输业碳排放量及私人交通碳排放量

Fig. 1 CO<sub>2</sub> emissions of transport sector in Guangdong: commercial transport sector and private vehicle

显的抑制<sup>[33]</sup> ,因此私人交通碳排放量也出现了较大的波动.

对于铁路、公路、水运和民航四种交通方式,其碳排放量占交通运输业碳排放总量的比例各有其变化特征.从图2可以看出,2001—2010年公路的碳排放量占比最高,从58.9%增至64.8%;铁路的碳排放量占比最低,从1.64%降至0.59%.2001—2008年,水运碳排放占比基本位于第二位,而2009—2010年,民航碳排放量超越了水运碳排放量位居第二.从图3的四种交通工具的周转量占比来看,水运和公路的周转量占绝对地位,2010年二者的周转量占比分别为60.29%及31.82%,铁路和民航分别为5.99%及1.9%.结合碳排放量与周转量来看,四种交通方式中水运具有较大节能优势,而民航单位周转量能源消耗大,碳排放比较突出.

图4显示引起私人交通碳排放的私人汽车数量增长迅速.2001年,广东私人汽车的数量为 $105.69 \times 10^4$ 辆,2010年为 $628.98 \times 10^4$ 辆,增长了4.9倍.在私人汽车中载客汽车的占比较大且增长较快,从2001年的52.3%增至2010年的85.3%,数量增长了8.7倍,表明随着经济的发展,越来越多的人选择私人汽车出行.私人汽车逐渐成为居民交通出行的重要工具.私人交通碳排放与交通运输业中的公路碳排放均属于道路碳排放的范畴,将二者之和作为道路碳排放.如图4显示,私人交通碳排放占道路碳排放的比例呈上升趋势,从2001年的11.3%提高到2010年

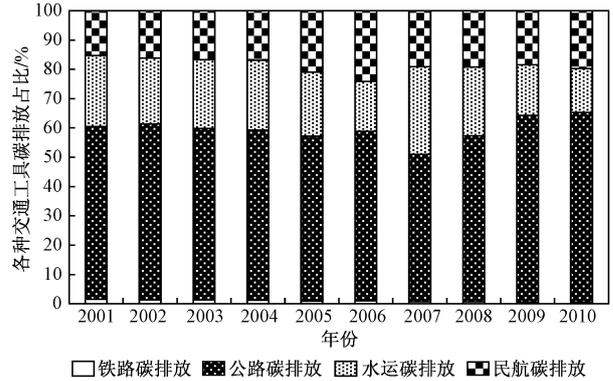


图2 各种交通运输工具碳排放占比的变化  
Fig. 2 Contributions of commercial transport sector CO<sub>2</sub> emissions by each transport mode

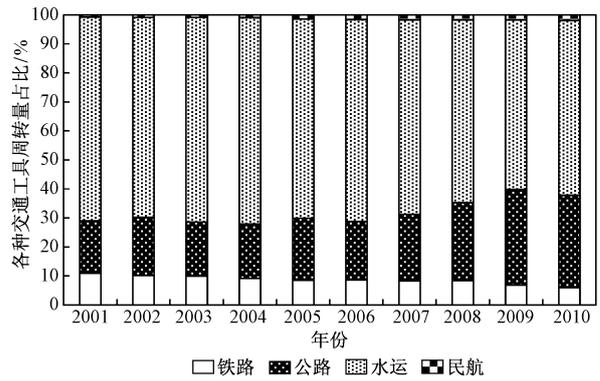


图3 各种交通运输工具周转量占比的变化  
Fig. 3 Contributions of traffic turnover by each transport mode

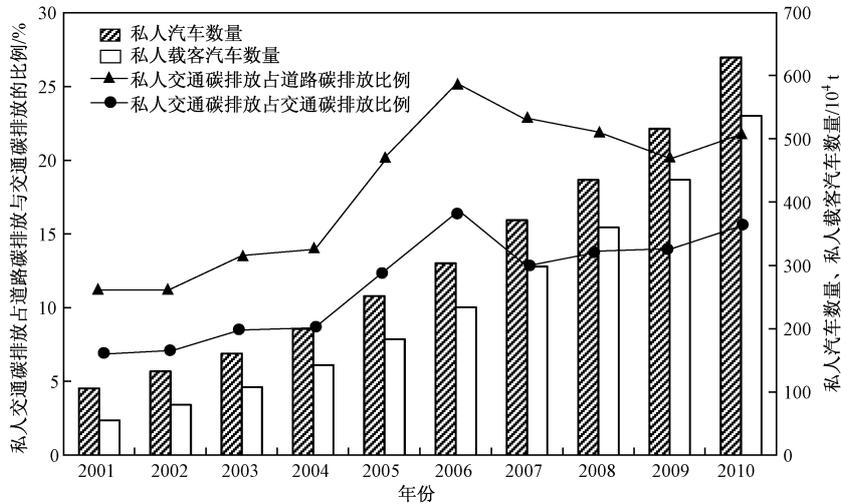


图4 私人汽车、私人载客汽车数量及私人交通碳排放占道路碳排放、交通碳排放的比例  
Fig. 4 Private vehicle numbers, private passenger vehicle numbers and the proportion of private vehicle CO<sub>2</sub> emissions to road and transport sector CO<sub>2</sub> emissions

的21.9%,表明私人交通碳排放的增长快于公路碳排放的增长。私人交通碳排放逐步成为道路碳排放的重要组成部分。2001—2010年私人交通碳排放占交通碳排放的比例同样呈上升趋势,从2001年的6.9%升至2010年的15.4%,比例提高了1.2倍,表明私人交通碳排放的增长总体上快于交通运输业碳排放的增长,在交通碳排放中的作用日益突出。

### 3.2 广东交通碳排放影响因素分解分析

广东2010年交通碳排放比2001年增加了 $4\,117.43 \times 10^4$  t,其中交通运输业碳排放增加了 $3\,318.92 \times 10^4$  t,私人交通碳排放增加了 $798.51 \times$

$10^4$  t。根据式(3)~(15)对广东交通碳排放进行LMDI分解,得到各因素的贡献值及贡献率见表2。从分解的各因素来看,交通运输业发展水平、运输结构、私人汽车数量规模、私人汽车单位车辆能耗、交通能源碳排放因子分别使广东交通碳排放量增加了 $2\,832.44 \times 10^4$ 、 $1\,487.86 \times 10^4$ 、 $768.26 \times 10^4$ 、 $32.03 \times 10^4$ 、 $8.14 \times 10^4$  t,对广东交通碳排放量增加的贡献率分别为68.79%、36.14%、18.66%、0.78%、0.20%;而运输强度及能源强度分别使广东交通碳排放量减少了745.25、 $266.06 \times 10^4$  t,贡献率分别为-18.1%、-6.46%。

表2 广东交通碳排放影响因素分解贡献值与贡献率  
Table 2 Decomposition effect of CO<sub>2</sub> emissions from the transport sector

| 时间                  | 贡献值/(10 <sup>4</sup> t)         |                           |                           |                           |                           |                                 |                            |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|
|                     | 交通能源碳排放因子效应( $\Delta C_{YSE}$ ) | 能源强度效应( $\Delta C_{YI}$ ) | 运输结构效应( $\Delta C_{YG}$ ) | 运输强度效应( $\Delta C_{YF}$ ) | 运输业发展水平效应( $\Delta C_Y$ ) | 私人汽车单位车辆能耗效应( $\Delta C_{SI}$ ) | 私人汽车数量规模效应( $\Delta C_k$ ) |
| 2001—2002年          | 4.91                            | 4.60                      | 166.97                    | -124.89                   | 115.94                    | -17.06                          | 32.49                      |
| 2002—2003年          | 4.60                            | 30.39                     | -70.82                    | -139.22                   | 115.72                    | -5.80                           | 31.65                      |
| 2003—2004年          | -1.55                           | -34.21                    | 27.93                     | 215.30                    | 244.42                    | 6.58                            | 44.20                      |
| 2004—2005年          | 1.17                            | 139.12                    | 393.57                    | -374.67                   | 459.60                    | 126.75                          | 72.52                      |
| 2005—2006年          | 0.36                            | -186.10                   | -20.23                    | -400.50                   | 438.65                    | 37.76                           | 91.06                      |
| 2006—2007年          | -1.34                           | 649.21                    | 272.54                    | -133.01                   | 347.16                    | -84.21                          | 116.01                     |
| 2007—2008年          | -0.66                           | -220.99                   | 273.70                    | -331.46                   | 318.76                    | -42.10                          | 96.81                      |
| 2008—2009年          | 0.62                            | -312.29                   | 464.77                    | 203.82                    | 242.94                    | -13.87                          | 118.09                     |
| 2009—2010年          | 0.03                            | -335.80                   | -20.57                    | 339.39                    | 549.26                    | 23.99                           | 165.43                     |
| 2001—2010年          | 8.14                            | -266.06                   | 1\,487.86                 | -745.25                   | 2\,832.44                 | 32.03                           | 768.26                     |
| 2001—2010年<br>贡献率/% | 0.20                            | -6.46                     | 36.14                     | -18.10                    | 68.79                     | 0.78                            | 18.66                      |

交通运输业的发展是广东交通碳排放量增加的主导因素,对广东交通碳排放量增加的贡献率最大,达到68.79%。以2000年不变价格计算,2001—2010年广东交通运输业增加值从 $1\,069.72 \times 10^8$ 元增至 $2\,661.65 \times 10^8$ 元,增加了1.5倍,同期交通碳排放量增加了 $2\,831.47 \times 10^4$  t,比2001年增加了1.8倍。经济的发展带来了行业活跃度的提高,而活跃的交通运输必然带来碳排放的增加。

运输结构对广东交通碳排放量增长的正向影响也较为显著。从各种交通工具的碳排放量和周转量来看,单位周转量碳排放中民航最高,公路次之。而从周转量来看,2001—2010年除铁路基本持平以外,公路、水运和民航的周转量都为增长趋势,且公路周转量和民航周转量分别增长2.2和3.9倍,高于水运

周转量的0.5倍的增长。公路周转量占总周转量的比例从2001年的18.2%增至31.8%,民航从0.7%增至1.9%,而铁路与水运的周转量占比分别下降了4.95%和9.93%。因此,除2003年、2006年和2010年公路周转量占比略有下降,运输结构表现出对交通碳排放量增长的影响为负值,其余年份运输结构均表现为对交通碳排放量增长的正向影响。

私人汽车数量和私人汽车单位车辆能耗总体上也表现了对交通碳排放量增长的正向影响。随着经济的发展,人民生活水平的提高,越来越多的人利用私人汽车出行。广东城镇居民平均每百户耐用品家用汽车的数量从2001年的2.3辆迅速增至2010年的26.58辆,增长了10.6倍,私人汽车总量也在2001—2010年增加了4.9倍。私人汽车拥有量的大

幅增长,使得私人汽车的碳排放逐渐上升并趋向于主导方向发展<sup>[34]</sup>。2001年私人汽车单位车辆能耗为629.42 kg标准煤,2010年增至730.12 kg标准煤,单位车辆能耗的增加表明私人汽车在节能减排方面还有很大的发展空间。

交通能源碳排放因子对广东交通碳排放增长总体上起到了促进的作用。交通能源碳排放因子反映了交通部门能源消耗结构的变化。对于交通运输业的四种交通方式,主要涉及的能源种类是汽油、柴油、煤油、燃料油,而根据表1显示的二氧化碳排放系数从大到小依次为燃料油、柴油、煤油和汽油。2001—2010年,交通运输业的燃料油消费量增长幅度最大,增长了3.71倍,柴油、煤油、汽油依次增长了2.12、1.67、3.68倍。同时,燃料油的占比始终最大,2010年达到46.9%,而柴油、煤油、汽油的占比分别为20%、13.1%及20.1%。由此表明交通运输业的能源消耗结构没有明显的改善,交通运输业能源碳排放因子对广东交通碳排放增长的贡献值表现为 $9.92 \times 10^4$  t。在私人交通方面,主要涉及的能源是汽油和柴油,2001—2010年汽油的占比从88.9%升至95.5%,柴油的占比从11.1%降至4.5%,私人交通能源消耗碳排放因子对广东交通碳排放增长的贡献值表现为 $-1.78 \times 10^4$  t。结合交通运输业能源碳排放因子和私人交通能源碳排放因子,交通能源碳排放因子对广东交通碳排放增长的贡献值为 $8.14 \times 10^4$  t。

运输强度与能源强度总体来说均对广东交通碳排放变化表现出负向效应。运输强度与能源强度均是效率因素的体现。运输强度是一定时期内运输周转量与交通运输增加值的比值,低运输强度代表了高运输效率。研究期内,运输强度从 $3.31 \times 10^8$  t·km/( $10^8$ 元)降至 $2.27 \times 10^8$  t·km/( $10^8$ 元),下降了27.4%,运输强度的下降使交通碳排放量减少了 $745.25 \times 10^4$  t,对碳排放量的减少起到了有效的抑制作用。能源强度是能源消费量与交通周转量的比值,能源强度的下降可以促进能源消耗量的减少。2001—2010年,能源强度对交通运输碳排放量增长既有促进作用,也有抑制作用,但总体看来能源强度对交通运输碳排放起到了抑制的作用,贡献值为 $-266.06 \times 10^4$  t。

#### 4 结论

a) 2001—2010年广东交通碳排放从 $1\,950.98 \times 10^4$  t增至 $6\,068.41 \times 10^4$  t。其中,交通运输业碳排放从 $1\,815.01 \times 10^4$  t增至 $5\,133.92 \times 10^4$  t,是广东交通

碳排放的主体;私人交通碳排放从 $135.97 \times 10^4$  t增至 $934.48 \times 10^4$  t,增长速度快于交通运输业碳排放,已成为广东交通碳排放不可忽视的组成部分。

b) 交通运输业中的公路碳排放量占比最大,占56%~64%;铁路的碳排放量占比最小,占0.6%~1.6%之间。民航的碳排放量在2009—2010年超越了水运,跃居第二位。结合四种交通运输工具的周转量来看,水运具有较大的节能优势,而民航单位周转量能源消耗大,碳排放比较突出。

c) 对广东交通碳排放进行因素分解的结果显示,交通运输业发展水平、运输结构、私人汽车数量规模对广东交通碳排放增加的正向影响较为显著,贡献率分别为68.79%、36.14%、18.66%;私人汽车单位车辆能耗及交通能源碳排放因子的贡献率相对较小,分别为0.78%、0.20%;运输强度与能源强度对广东交通碳排放增加具有负向影响,贡献率分别为-18.1%、-6.46%。交通行业的发展、交通运输结构的恶化及私人汽车市场的繁荣是拉动广东交通碳排放增长的主要驱动力,而运输效率和运输业的能源利用效率的提高对交通碳排放的增长发挥了抑制的作用。能源结构及私人汽车的能源利用效率还需要进一步改善。

#### 5 建议

a) 优化交通运输结构,建立高效率交通运输系统。对于广东省交通运输结构中公路和民航碳排放较为突出的特点,可以适当控制公路的发展速度,减少公路的投资比例,同时,加快对环境影响较小的铁路和水运运输的发展,尤其是进一步加快高速铁路的发展,充分利用高速铁路运量大、速度快、安全、舒适、能耗低的优势,较大程度上转移公路和民航的运输量,实现省内交通运输结构的优化。此外,改进交通运输的组织和管理水平,进一步推进智能交通系统,将有利于建立高效率运输体系,实现系统节能。

b) 积极推广替代能源等新技术,减少交通运输业碳排放量。使用替代清洁能源,是发展低碳交通的有效途径。目前作为传统石油的替代,液化石油气和液化天然气已大量应用于广东的公交车和出租车,但利用替代清洁能源的范围还需进一步扩大。同时替代能源的生产、使用和推广离不开政府的扶持,因此政府须积极加大税收优惠和财政补贴,提高清洁替代能源的竞争力,使清洁替代能源的生产和使用得到较快的发展。

c) 对于日益繁荣的私人汽车市场及其带来的越

来越突出的私人交通碳排放,一方面,广东省须进一步完善公共交通体系,配合城市空间结构的变迁,使公共交通覆盖面更广,公共交通设施更加方便、快捷,减少私人汽车的出行;另一方面,鼓励购买低能耗、小排量汽车,进一步普及新能源汽车,减少私人汽车碳排放量。

#### 参考文献(References):

- [1] IEA. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion highlights 2016 [EB/OL]. Paris: International Energy Agency, 2016 [2016-10-28]. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2016.html>.
- [2] CUI Q, LI Y. An empirical study on the influencing factors of transportation carbon efficiency: evidences from fifteen countries [J]. Applied Energy 2015, 141: 209-217.
- [3] KO J, PARK D, LIM H, *et al.* Who produces the most CO<sub>2</sub> emissions for trips in the Seoul metropolis area? [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2011, 16: 358-364.
- [4] BARLA P, MIRANDA-MORENO L F, LEE-GOSSELIN M. Urban travel CO<sub>2</sub> emissions and land use: a case study for Quebec City [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16: 423-428.
- [5] EOM J, SCHIPPER L, THOMPSON L. We keep on truckin': trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries [J]. Energy Policy 2012, 45: 327-341.
- [6] DHAR S, SHUKLA P R. Low carbon scenarios for transport in India: co-benefits analysis [J]. Energy Policy 2015, 81(136): 186-198.
- [7] ANABLE J, BRAND C, TRAN M *et al.* Modelling transport energy demand: a socio-technical approach [J]. Energy Policy 2012, 41: 125-138.
- [8] BRAND C, TRAN M, ANABLE J. The UK transport carbon model: an integrated life cycle approach to explore low carbon futures [J]. Energy Policy 2012, 41: 107-124.
- [9] LIMANOND T, JOMNONKWAO S, SRIKAEW A. Projection of future transport energy demand of Thailand [J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2754-2763.
- [10] ALAM A, DIAB E, EL-GENEIDY A *et al.* A simulation of transit bus emissions along an urban corridor: evaluating changes under various service improvement strategies [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2014, 31(5): 189-198.
- [11] ALAM A, HATZOPOULOU M. Investigating the isolated and combined effects of congestion, roadway grade, passenger load, and alternative fuels on transit bus emissions [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2014, 29(6): 12-21.
- [12] OSHIRO K, MASUI T. Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO<sub>2</sub> emission reduction in Japan [J]. Energy Policy, 2015, 81(140): 215-225.
- [13] KII M, AKIMOTO K, DOI K. Measuring the impact of urban policies on transportation energy saving using a land use-transport model [J]. Latss Research 2014, 37(2): 98-109.
- [14] BRAND C, ANABLE J, TRAN M. Accelerating the transformation to a low carbon passenger transport system: the role of car purchase taxes, feebates, road taxes and scrappage incentives in the UK [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice 2013, 49: 132-148.
- [15] 贾顺平, 毛保华, 刘爽, 等. 中国交通运输能源消耗水平测算与分析 [J]. 交通运输系统工程与信息 2010, 10(1): 22-27. JIA Shunping, MAO Baohua, LIU Shuang, *et al.* Calculation and analysis of transportation energy consumption level in China [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology 2010, 10(1): 22-27.
- [16] 张秀媛, 杨新苗, 闫琰. 城市交通能耗和碳排放统计计算方法研究 [J]. 中国软科学 2014(6): 142-150. ZHANG Xiuyuan, YANG Xinmiao, YAN Yan. Statistical estimation method for energy consumption and carbon emissions by urban transport [J]. China Soft Science 2014(6): 142-150.
- [17] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市居民出行方式与城市交通 CO<sub>2</sub> 排放及减排对策 [J]. 环境科学研究 2009, 22(6): 747-752. ZHAO Min, ZHANG Weiguang, YU Lizhong. Resident travel modes and CO<sub>2</sub> emissions by traffic in Shanghai City [J]. Research of Environmental Sciences 2009, 22(6): 747-752.
- [18] KAKOUEI A, VATANI A, IDRIS A K B. An estimation of traffic related CO<sub>2</sub> emissions from motor vehicles in the capital city of Iran [J]. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering 2012, 9(1): 1-5.
- [19] FAN F, LEI Y. Decomposition analysis of energy-related carbon emissions from the transportation sector in Beijing [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2016, 42: 135-145.
- [20] 吴开亚, 何彩虹, 王桂新, 等. 上海市交通能源消费碳排放的测算与分解分析 [J]. 经济地理 2012, 32(11): 45-51. WU Kaiya, HE Caihong, WANG Guixin, *et al.* Measurement and decomposition analysis on carbon emissions of transportation industry in Shanghai [J]. Economic Geography 2012, 32(11): 45-51.
- [21] GUO B, GENG Y, FRANKE B *et al.* Uncovering China's transport CO<sub>2</sub> emissions patterns at the regional level [J]. Energy Policy, 2014, 74: 134-146.
- [22] WANG W W, ZHANG M, ZHOU M. Using LMDI method to analyze transport sector CO<sub>2</sub> emissions in China [J]. Energy, 2011, 36: 5909-5915.
- [23] TIMILSINA G R, SHRESTHA A. Factors affecting transport sector CO<sub>2</sub> emissions growth in Latin American and Caribbean countries: an LMDI decomposition analysis [J]. International Journal of Energy Research 2009, 33(4): 396-414.
- [24] LOO B P Y, LI L. Carbon dioxide emissions from passenger transport in China since 1949: implications for developing sustainable transport [J]. Energy Policy 2012, 50: 464-476.
- [25] TIMILSINA G, SHRESTHA A. Transport sector CO<sub>2</sub> emissions growth in Asia: underlying factors and policy options [J]. Energy

- Policy 2009 37(11):4523-4539.
- [26] SCHIPPER L, SAENGER C, SUDARSHAN A. Transport and carbon emissions in the United States: the long view[J]. Energies, 2011 4(4):563-581.
- [27] 蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 等. 中国交通二氧化碳排放研究[J]. 气候变化研究进展 2011 7(3):197-203.  
CAI Bofeng, CAO Dong, LIU Lancui, et al. China transport CO<sub>2</sub> emission study[J]. Advances in Climate Change Research 2011 7(3):197-203.
- [28] ANG B W, LIU F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation[J]. Energy 2001, 26:537-548.
- [29] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy 2005 33:867-871.
- [30] ANG B W, LIU N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach [J]. Energy Policy, 2007, 35:238-246.
- [31] 亚洲开发银行与中国交通运输部合作项目. 中国公路交通资源优化利用上卷: 政策建议与行动计划[M]. 北京: 中国经济出版社 2009:106-107.
- [32] 李杨. 基于可持续发展理论的我国公路交通发展模式研究[D]. 大连: 大连海事大学 2013:55-57.
- [33] 王莉. 国际金融危机对汽车行业的影响及应对策略[J]. 中国经贸导刊 2009(11):23-24.
- [34] 马静, 柴彦威, 刘志林. 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理[J]. 地理学报 2011 66(8):1023-1032.  
MA Jing, CHAI Yanwei, LIU Zhilin. The mechanism of CO<sub>2</sub> emissions from urban transport based on individuals' travel behavior in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica 2011 66(8):1023-1032.