

DOI: 10.5846/stxb201901290215

郑颖, 逯非, 刘晶茹, 王效科. 我国典型城市化石能源消费 CO₂ 排放及其影响因素比较研究. 生态学报, 2020, 40(10): 3315-3327.

Zheng Y, Lu F, Liu J R, Wang X K. Comparative study on CO₂ emissions from fossil energy consumption and its influencing factors in typical cities of China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3315-3327.

我国典型城市化石能源消费 CO₂ 排放及其影响因素比较研究

郑 颖^{1,2}, 逯 非^{1,*}, 刘晶茹¹, 王效科¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:城市是化石能源消费和 CO₂ 排放的主要区域。分析典型城市化石能源消费 CO₂ 排放特征, 明确不同城市 CO₂ 排放动态及主要影响因素的差异, 是开展城市减排行动的重要科学依据。采用 IPCC 推荐方法及中国的排放参数核算 11 个典型城市 2006—2015 年间化石能源消费产生的 CO₂ 排放量。根据各城市经济发展和 CO₂ 排放特征将之分为四类: 经济高度发达城市(北京、上海、广州)、高碳排放城市(重庆、乌鲁木齐、唐山)、低排放低增长城市(哈尔滨、呼和浩特和大庆)和低排放高增长城市(贵阳、合肥), 并运用对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, 即 LMDI 分解法)对比分析了四类城市 CO₂ 排放量的影响因素。结果表明: (1) 研究期内大部分城市 CO₂ 排放总量有所增加, 仅北京和广州呈下降趋势, 工业部门 CO₂ 排放放在城市排放总量及其变化中占据主导地位; 四类城市的人均 CO₂ 排放量表现出与排放总量相似的变化趋势; CO₂ 排放强度整体上表现为经济高度发达城市(均值为 0.88 t CO₂/万元) < 低排放低增长城市(均值为 2.82 t CO₂/万元) < 低排放高增长城市(均值为 3.05 t CO₂/万元) < 高碳排放城市(均值为 6.62 t CO₂/万元)。(2) 在城市 CO₂ 排放的影响因素中, 经济发展和人口规模均是 4 类城市 CO₂ 排放增长的促进因素, 但经济发展效应的累积贡献值大于人口规模效应; 能源强度降低是 4 类城市 CO₂ 排放最主要的抑制因素, 且经济高度发达和高碳排放城市的抑制作用强于其他两类城市; 对第三产业 GDP 年平均增速高于第二产业的 6 个城市来说, 产业结构是 CO₂ 排放的抑制因素; 能源结构的变化仅对煤炭消费比重较低且降幅较大的北京和广州的 CO₂ 排放是抑制作用, 累积贡献值分别为 -21.73 Mt 和 -0.03 Mt, 而对其他城市, 特别是高碳排放城市的 CO₂ 排放具有明显的促进作用。

关键词:城市; CO₂ 排放; 化石能源; 对数平均迪氏指数法; 影响因素

Comparative study on CO₂ emissions from fossil energy consumption and its influencing factors in typical cities of China

ZHENG Ying^{1,2}, LU Fei^{1,*}, LIU Jingru¹, WANG Xiaoke¹

1 State key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Cities are the main regions of fossil energy consumption and CO₂ emissions. Analysis of characteristics of the CO₂ emissions from fossil energy consumption in typical cities, and clarification of the dynamics and critical influencing factors of the CO₂ emissions in different cities could provide important scientific basis for CO₂ mitigation action in urban areas. With the IPCC recommended methods and China-specific emission parameters, the CO₂ emissions from fossil fuel combustion were estimated in 11 typical cities from 2006 to 2015. Based on the emission characters and economic development, the 11

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目(71533005)

收稿日期: 2019-01-29; 网络出版日期: 2020-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: feilu@rcees.ac.cn

cities are categorized into four groups, namely, cities with highly developed economy (including Beijing, Shanghai and Guangzhou), cities with high carbon emission (including Chongqing, Urumqi and Tangshan), cities with low emission and low economic growth (including Harbin, Hohhot and Daqing), and the cities with low emission but high economic growth (including Guiyang and Hefei). Then the urban CO₂ emissions were decomposed by Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method to compare the differences of influencing factors among the above four categories of cities. The results indicated that CO₂ emissions from most cities increased during the study period, while the CO₂ emissions of Beijing and Guangzhou showed a decreasing trend. The emissions from the industrial sector took the dominant position in both of the total emissions from the cities and their dynamics. The per capita CO₂ emissions of different cities showed a similar variation pattern to that of the total CO₂ emissions. Cities with highly developed economy had the lowest CO₂ emissions intensity (avg. 0.088t CO₂/k Yuan), and the values went gradually higher for cities with low emission and low economic growth (avg. 0.282t CO₂/k Yuan), cities with low emission but high economic growth (avg. 0.305t CO₂/k Yuan), and cities with high carbon emission (avg. 0.662t CO₂/k Yuan). For all the 4 categories of cities, both economic development and population size enlargement could lead to CO₂ emissions increment, but economic development made the major contribution while the effects of population size were relatively small. Meanwhile, the decrease of energy intensity effect acted as the main driving factor of CO₂ emissions reduction, and this reduction effect is stronger in cities with highly developed economy or with high carbon emission than those in the rest two categories of cities. The effect of industrial structure promotion restrained CO₂ emissions in 6 cities where the average annual growth rate of the tertiary industry GDP was higher than the secondary industry. The energy structure effect only inhibits the CO₂ emissions of Beijing and Guangzhou (with the accumulative contribution at -21.73Mt and -0.03Mt, respectively), where coal's proportion in fossil energy consumption was low and going down fast. While in the cities with high carbon emission, the change of energy structure has the most obvious promoting effect on the CO₂ emissions.

Key Words: city; CO₂ emissions; fossil energy; Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI); influencing factors

IPCC 第五次评估报告 (AR5) 指出, 大气中以二氧化碳 (CO₂) 为主的温室气体含量的急剧增加是近几十年全球平均气温上升的主要原因之一^[1]。国际能源署 (IEA) 的数据显示, 近年来全球与能源相关的 CO₂ 排放持续增加, 2017 年达到 325 亿吨的历史最高水平。中国作为当今世界最大的碳排放国, 2017 年能源消费产生的 CO₂ 排放量约为 91 亿吨^[2]。尽管我国已经做出了 CO₂ 排放自主贡献承诺, 但随着工业化和城市化进程的加速推进, 化石能源消费和 CO₂ 排放日趋增加, 与 2030 年达峰并争取尽早达峰的减排承诺之间的矛盾越来越突出, 碳减排任务十分艰巨^[3]。

全球城市面积只占陆地面积的 2%, 但能源消费和 CO₂ 排放却达到 75% 和 78%^[4]。日益增长的城市人口和随之产生的消费模式的变化, 使得城市中化石能源消费和 CO₂ 排放量不断增加^[5]。随着国际社会对城市 CO₂ 排放问题的关注, 越来越多的学者把研究重点放在分析 CO₂ 排放的影响因素上。大部分研究确定了经济增长是 CO₂ 排放的主要促进因素, 如: Sheinbaum 等^[6] 基于 LMDI 分解法得到 1970—2006 年间经济增长对墨西哥钢铁工业 CO₂ 排放增加的贡献率达到 133.6%; de Freitas 和 Kaneko^[7] 同样基于 LMDI 模型发现经济发展是巴西 2004—2009 年间 CO₂ 排放增长的主要影响因素; Li 等^[8] 利用 STIRPAT 模型得到经济发展对南京市 2000—2016 年间的碳排放增长有显著的正向影响。而能源强度的降低是 CO₂ 排放的主要抑制因素, Pardo 等^[9] 基于 LMDI 模型定量分析了墨西哥制造业 CO₂ 排放的影响因素, 发现能源强度的下降使 CO₂ 排放降低了 11%; 曹甲威和赵翠薇^[10] 同样采用 LMDI 分解法得到能源强度为贵阳市交通运输业 CO₂ 排放的主要抑制因素, 贡献率为 -37.46%。城市化水平、产业结构和能源结构等因素的影响作用随研究区域和研究时段的不同而有明显差别。

城市化是中国经济增长的主要驱动力,中国的 CO₂排放有 85%来自城市,因此,城市在减少 CO₂排放方面发挥着越来越重要的作用^[11]。然而与发达国家的城市(Urban Area)定义不同,中国的城市是行政区划中的一级,这使得城市成为一个区域概念,如果把全国城市的 CO₂排放总和等同于全国的 CO₂排放量,就无法凸显城市的特征、作用和问题^[12]。并且,由于能源消费量数据的限制,国内能源消费 CO₂排放的研究主要集中在北京、上海、广州等较大城市^[13-16]或城市群^[17]、以及不同地区之间^[18-19]。而中国作为一个在经济发展、人口规模、能源结构和技术水平等方面存在较大空间异质性的国家^[20],化石能源消费和 CO₂排放存在明显的城市地区差异,并受到多种因素的影响,这些影响因素在我国不同城市地区的作用及其异同尚未明确。

综上所述,为了明确不同类型城市间 CO₂排放特征及其影响因素的差异,本文基于化石能源消费数据获取的完备性及连续性,从中国九大城市群中选取 11 个城市市辖区作为研究对象,基于中国本地化排放参数,采用 IPCC 推荐的参考方法,明确典型城市化石能源消费 CO₂排放的时空格局。再利用 LMDI 因素分解法定量分析 11 个城市市辖区 CO₂排放的影响因素。通过比较分析典型城市化石能源消费 CO₂排放总量、人均 CO₂排放量和 CO₂排放强度特征,以及影响因素的差异,以期为今后制定典型城市地区有针对性的减排策略提供理论参考。

1 研究对象、数据来源与研究方法

1.1 研究对象

本文的研究区域为“市辖区”——即城市内的区(不包括县),一般是中国城市中经济活动强度较大的区域,着重对比不同特点城市间的化石能源消费 CO₂排放差异。综合考虑以下 4 点因素:1)不同城市群;2)不同的经济发展水平;3)不同的城市规模;4)能源消耗和产业结构变化不同。根据十年的化石能源消费数据的完备性与连续性,从 9 个不同的城市群中选取了 11 个城市市辖区作为研究对象,各城市的基本信息见表 1。所选研究区下文简称为北京、上海、重庆、广州、乌鲁木齐、唐山、合肥、贵阳、大庆、呼和浩特和哈尔滨。

表 1 11 个城市基本信息一览表(2015 年)
Table 1 List of basic information of 11 cities (2015)

城市 Cities	城市群 Urban agglomeration	地区生产总值 GDP/ (十亿元)	年末人口 Population/ (万人)	年平均能 源消耗量 Average annual energy consumption/ (万吨标准煤)	第二产业地区生产 总值年平均增长率 The average annual GDP growth rate of the secondary industry/%	第三产业地区生产 总值年平均增长率 The average annual GDP growth rate of the tertiary industry/%
北京	京津冀	2302	1345	3315	7.72%	9.65%
上海	长三角	2484	1376	6430	6.60%	10.71%
广州	珠三角	1810	854.2	3163	10.30%	12.39%
唐山	京津冀	316.5	334.3	5925	10.97%	10.73%
哈尔滨	哈长	421.2	548.7	1612	11.46%	11.56%
合肥	长江中游	376.7	251	1111	17.74%	12.14%
大庆	哈长	244.8	135.9	1624	7.59%	13.80%
呼和浩特	呼包鄂榆	230.4	130.1	1503	12.86%	12.35%
重庆	成渝	1321	2129	3908	17.10%	11.83%
贵阳	黔中	222.8	236.2	1219	13.57%	13.82%
乌鲁木齐	天山北坡	261	260.5	3746	12.26%	13.69%

1.2 数据来源

由于中国大部分城市能源数据不完备,因此本文的化石能源消费量数据主要来源于:(1)北京、上海、重庆和唐山来源于相应的《能源统计年鉴 2007—2016》中的实物量能源平衡表;(2)其余 7 个统计年鉴中没有实物量能源平衡表的城市,采用 Shan 等^[21]提供的方法,根据相应的省级能源平衡表来推算,可选用人口、经济

等指标占全省的比重折算。在城市边界内产生的热力和电力的排放按原煤等一次能源投入使用情况计算,为避免重复,不再单独计算电力和热力的 CO₂排放量。2006—2015 年市辖区人口和地区生产总值来源于《中国城市统计年鉴(2007—2016)》^[22],地区生产总值以 2006 年为基期,剔除价格水平的影响。

1.3 化石能源消费 CO₂排放量核算方法

本文核算了 2006—2015 年 17 种化石能源(具体能源种类见表 2)消费产生的直接 CO₂排放量。考虑到城市市辖区的非农性质,本文暂不考虑第一产业(农、林、牧、渔业)和居民生活部门中农村居民能源消费。核算方法采用 IPCC 推荐的参考方法,即与化石能源相关的 CO₂排放量等于活动数据乘以排放系数,公式如下:

$$C = \sum_i \sum_j C_{ij} = \sum_i \sum_j E_{ij} \times CV_i \times EF_i \times O_{ij} \times \frac{12}{44}, i \in [1, 17], j \in [1, 45] \quad (1)$$

式中, C_{ij} 为化石能源消费产生的 CO₂排放总量(百万吨, Mt), E_{ij} 为化石能源消费总量(10^4 t 或 10^8 m³), CV_i 为第 i 种化石能源的平均低位发热量(PJ/ 10^4 t, 10^8 m³), EF_i 为化石能源单位热值含碳量(t-CO₂/TJ)^[23]; O_{ij} 为第 j 个社会经济部门第 i 种化石能源燃烧的碳氧化率(%)^[24], $\frac{44}{12}$ 为二氧化碳与碳相对分子量比值。为了增强 CO₂核算结果的准确性,尽可能的选用适合中国本地化的碳排放参数。折标准煤系数来源于《中国能源统计年鉴 2016》^[25]。各参数的具体取值见表 2。

表 2 化石能源消费 CO₂排放核算参数

Table 2 Calculation parameters of carbon dioxide emissions

能源类型 Energy types	折标准煤系数 Standard coal coefficient / (10^4 tce/ 10^4 t, 10^8 m ³)	发热量 Calorific value/ (PJ/ 10^4 t, 10^8 m ³)	二氧化碳 排放系数 Carbon emission factor/ (t-CO ₂ /TJ)	能源类型 Energy types	折标准煤系数 Standard coal coefficient / (10^4 tce/ 10^4 t, 10^8 m ³)	发热量 Calorific value/ (PJ/ 10^4 t, 10^8 m ³)	二氧化碳 排放系数 Carbon emission factor/ (t-CO ₂ /TJ)
原煤 Raw coal	0.7143	0.21	26.32	汽油 Gasoline	1.4714	0.44	18.90
洗精煤 Cleaned coal	0.9000	0.26	26.32	煤油 Kerosene	1.4714	0.44	19.60
其他洗煤 Other washed coal	0.2850	0.15	26.32	柴油 Diesel oil	1.4571	0.43	20.20
型煤 Coke	0.6000	0.18	26.32	燃料油 Fuel oil	1.4286	0.43	21.10
焦炭 Hard coke	0.9714	0.28	31.38	液化石油气 Liquefied petroleum gas	1.7143	0.51	20.00
焦炉煤气 Coke oven gas	6.1430	1.61	21.49	炼厂干气 Refinery gas	1.5714	0.47	20.20
其他煤气 Converter gas	3.5701	0.83	21.49	其他石油制品 Other petroleum products	1.2000	0.43	17.20
其他焦化产品 Other coking products	1.3000	0.28	27.45	天然气 Natural gas	12.1430	3.89	15.32
原油 Crude oil	1.4286	0.43	20.08				

由于 11 个典型城市人口规模和经济发展程度存在较大差异,CO₂排放总量并不能完全反映出不同城市间 CO₂排放水平的差异,因此还选取了人均 CO₂排放量(CO₂排放总量与人口之比,吨 CO₂/人)和 CO₂排放强度(单位 GDP 所排放的 CO₂,吨 CO₂/万元)作为城市间比较的指标。

1.4 CO₂排放影响因素定量分析

用于分解化石能源消费 CO₂排放并定量分析影响因素的方法虽多,但对数平均迪氏指数法(logarithmic mean divisia index method,即 LMDI 法)是目前广泛应用于 CO₂排放影响因素分解分析的方法^[26]。LMDI 分解法能够有效解决残差项、数据零和负的问题,结果简单且更容易解释。并在城市^[27]、国家^[28-29]、区域^[30-31]尺度的上得到广泛应用。因此,本文采用 LMDI 分解法,扩展 Kaya 恒等式将 CO₂排放总量与各个因素间的关系

分解为:

$$C^t = \sum C_i^t = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}^t}{E_{ij}^t} \times \frac{E_{ij}^t}{E_j^t} \times \frac{E_j^t}{G_j^t} \times \frac{G_j^t}{G^t} \times \frac{G^t}{P^t} \times P^t \quad (2)$$

式中, C 为化石能源消费产生的 CO₂ 排放总量, i 为一次能源种类(煤炭、石油、天然气), j 为产业类型(第二产业、第三产业), C_{ij} 和 E_{ij} 分别为第 j 种产业第 i 种化石能源的 CO₂ 排放量和能源消费量, E_j 和 G_j 分别为第 j 产业的能源消费量和产值, Y 为地区生产总值, P 为市辖区年末总人口数, t 表示年限。令 $U_{ij} = \frac{C_{ij}}{E_{ij}}$, 代表碳排放强度; $M_{ij} = \frac{E_{ij}}{E_j}$, 代表能源结构; $I_j = \frac{E_j}{G_j}$, 代表能源强度; $S_j = \frac{G_j}{G}$, 代表产业结构; $Y = \frac{G}{P}$, 表示人均 GDP, 代表经济发展; P , 代表人口规模。

定义 C_0 为基年 CO₂ 排放量, C_t 为第 t 年 CO₂ 排放量, ΔC 为基年到 t 年 CO₂ 排放量变化值的总效应, 根据 LMDI 模型, 可将总效应分解为碳排放系数效应 (ΔC_U)、能源结构效应 (ΔC_M)、能源强度效应 (ΔC_I)、产业结构效应 (ΔC_S)、经济发展效应 (ΔC_Y)、人口规模效应 (ΔC_P), 各影响因素分解效应的表达式如下:

$$\text{能源结构效应:} \quad \Delta C_M = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \left(\frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \right) \times \ln \frac{M_i^t}{M_i^0} \quad (3)$$

$$\text{能源强度效应:} \quad \Delta C_I = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \left(\frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \right) \times \ln \frac{I_i^t}{I_i^0} \quad (4)$$

$$\text{产业结构效应:} \quad \Delta C_S = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \left(\frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \right) \times \ln \frac{S_i^t}{S_i^0} \quad (5)$$

$$\text{经济发展效应:} \quad \Delta C_Y = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \left(\frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \right) \times \ln \frac{Y_i^t}{Y_i^0} \quad (6)$$

$$\text{人口规模效应:} \quad \Delta C_P = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \left(\frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \right) \times \ln \frac{P_i^t}{P_i^0} \quad (7)$$

由于不同能源种类所对应的 CO₂ 排放系数值保持不变, 因此默认碳排放系数效应 $\Delta C_U = 0$, 故城市化石能源消费 CO₂ 排放量变化的综合效应可表示为:

$$\Delta C = C_0 - C_t = \Delta C_M + \Delta C_I + \Delta C_S + \Delta C_Y + \Delta C_P \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 CO₂ 排放特征分析

2.1.1 CO₂ 排放总量

11 个典型城市十年间累积排放了 104.8 亿吨 CO₂, 其中唐山排放最多, 年均 CO₂ 排放量达到 215.9Mt, 大庆最少, 年均排放量仅 33.91Mt(图 1)。2006—2010 年 CO₂ 排放量最多的是上海, 唐山于 2010 年超过上海, 在 2011 年达到峰值(293.8Mt)后, CO₂ 排放量虽有下降, 但仍远高于其他城市。2015 年乌鲁木齐超过上海, 成为 11 个城市中 CO₂ 排放第二多的城市(图 2)。2006—2015 年间, 上海和唐山的 CO₂ 排放量均在 140Mt 以上, 这与两个城市能源消费量过高有关。而经济和人口规模都较小的大庆和贵阳的 CO₂ 排放量均未超过 50Mt。11 个城市中 CO₂ 排放增长速度最快的依次是乌鲁木齐、合肥和重庆, 年平均增长率分别为 14.87%、10.56% 和 7.32%, 北京和广州的 CO₂ 排放总量呈下降趋势, 年平均增长率分别为 -0.12% 和 -11.82%(图 1)。十年间, 累积 CO₂ 排放量最多的城市依次为唐山(2159Mt)、上海(1832Mt)、乌鲁木齐(1258Mt)和重庆(1199Mt), 分别占 11 个典型城市总量的 20.60%、17.48%、12.01% 和 11.44%(图 1)。

从分部门化石能源消费 CO₂ 排放来看, 工业是 CO₂ 排放量最多的部门(图 2), 同时也是城市 CO₂ 排放变化的主导因素。2006—2015 年, 乌鲁木齐和呼和浩特工业 CO₂ 排放占总排放量的比例上升, 乌鲁木齐从

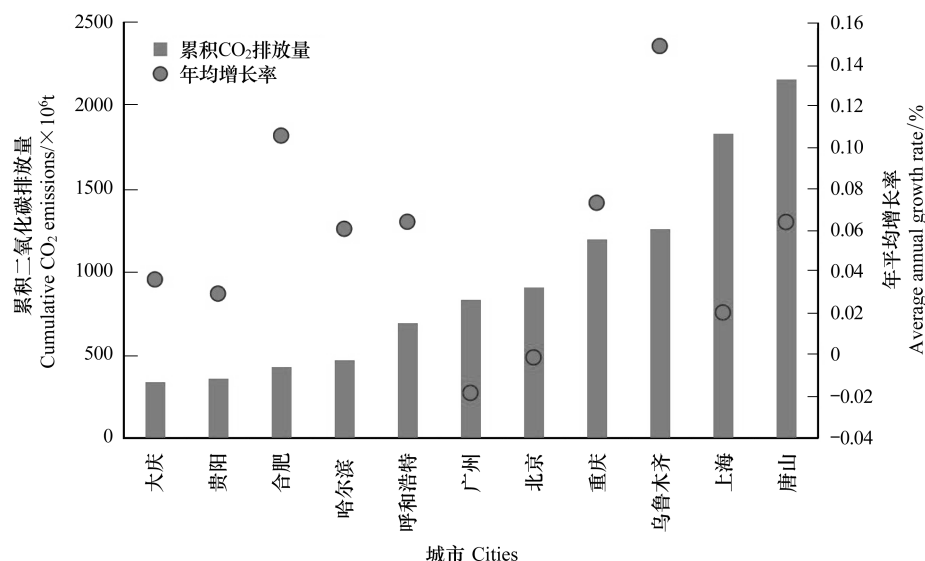


图1 11个城市CO₂排放年平均增长率和累积CO₂排放量

Fig.1 The average annual growth rate and the cumulative CO₂ emissions in the 11 cities

90.27%上升至91.49%,呼和浩特从80.95%上升至81.81%。其余9个城市工业CO₂排放量呈下降趋势,下降幅度最大的依次为广州、贵阳和北京,分别下降了42.97%、36.07%和30.91%。2015年,仅北京和广州工业CO₂排放量占比降至50%以下,北京从55.65Mt降至38.05Mt,占总排放量的43.52%,广州从58.06Mt降至28.06Mt,占总排放量的43.97%,与两个城市CO₂排放总量的下降趋势相同。CO₂排放总量较多的唐山和乌鲁木齐10年间工业CO₂排放占比均保持在90%以上。人口较多、经济发达的巨大型城市北京和上海交通运输部门的CO₂排放量较多,约占20%。建筑业、批发零售和住宿餐饮业、其他行业以及城市居民能源消费产生的CO₂排放量逐年增加,但排放量远小于工业(占总量的10%左右),且变化幅度不大。

2.1.2 人均CO₂排放量

人均CO₂排放量的高低反映了不同地区人口对CO₂排放空间的占有程度。CO₂总量呈下降趋势的北京和广州的人均CO₂排放量也呈下降趋势,人均CO₂排放量年平均增长率分别为-2.06%和-3.34%(表3)。其余九个城市的人均CO₂排放量呈现出不同程度的增长,乌鲁木齐的人均CO₂排放年平均增长率最高(11.11%)。唐山、乌鲁木齐和呼和浩特的人均CO₂排放量较高,平均CO₂排放量分别为68.90吨/人、51.61吨/人和56.99吨/人。重庆的经济规模和CO₂排放量在11个城市中偏高,但人均CO₂排放量却最低,主要是因为重庆的人口远远高于其余10个城市(表1)。

表3 2006年和2015年11个城市人均CO₂排放量和CO₂排放强度

Table 3 Per capita CO₂ emission and CO₂ emission intensity in the 11 cities in 2006 and 2015

城市 Cities	人均二氧化碳排放量/(t/人) Per capita CO ₂ emission				二氧化碳排放强度/(t/万元) CO ₂ emission intensity			
	2006	2015	平均值	年平均增长率/%	2006	2015	降幅	年平均增长率/%
北京	7.84	6.50	7.53	-2.06	1.10	0.50	-54.69	-8.42
上海	12.23	13.84	13.63	1.39	1.55	0.86	-44.48	-6.33
重庆	4.95	6.63	7.00	3.31	2.44	1.41	-42.15	-5.90
广州	12.04	8.87	12.37	-3.34	1.27	0.40	-68.02	-11.90
哈尔滨	7.40	10.84	9.76	4.33	1.98	1.32	-33.45	-4.42
唐山	48.14	75.79	68.90	5.17	6.88	4.96	-27.99	-3.58
贵阳	15.72	18.14	16.21	1.61	5.84	2.62	-55.09	-8.51

城市 Cities	人均二氧化碳排放量/(t/人) Per capita CO ₂ emission				二氧化碳排放强度/(t/万元) CO ₂ emission intensity			
	2006	2015	平均值	年平均增长率/%	2006	2015	降幅	年平均增长率/%
	2006	2015	平均值	年平均增长率/%	2006	2015	降幅	年平均增长率/%
乌鲁木齐	29.60	76.40	51.61	11.11	8.54	9.92	16.18	1.68
大庆	23.11	29.41	25.48	2.71	1.85	1.19	-35.35	-4.73
呼和浩特	41.91	62.83	56.99	4.60	5.34	3.33	-37.59	-5.10
合肥	12.73	24.17	19.02	7.38	2.32	1.67	-28.18	-3.61

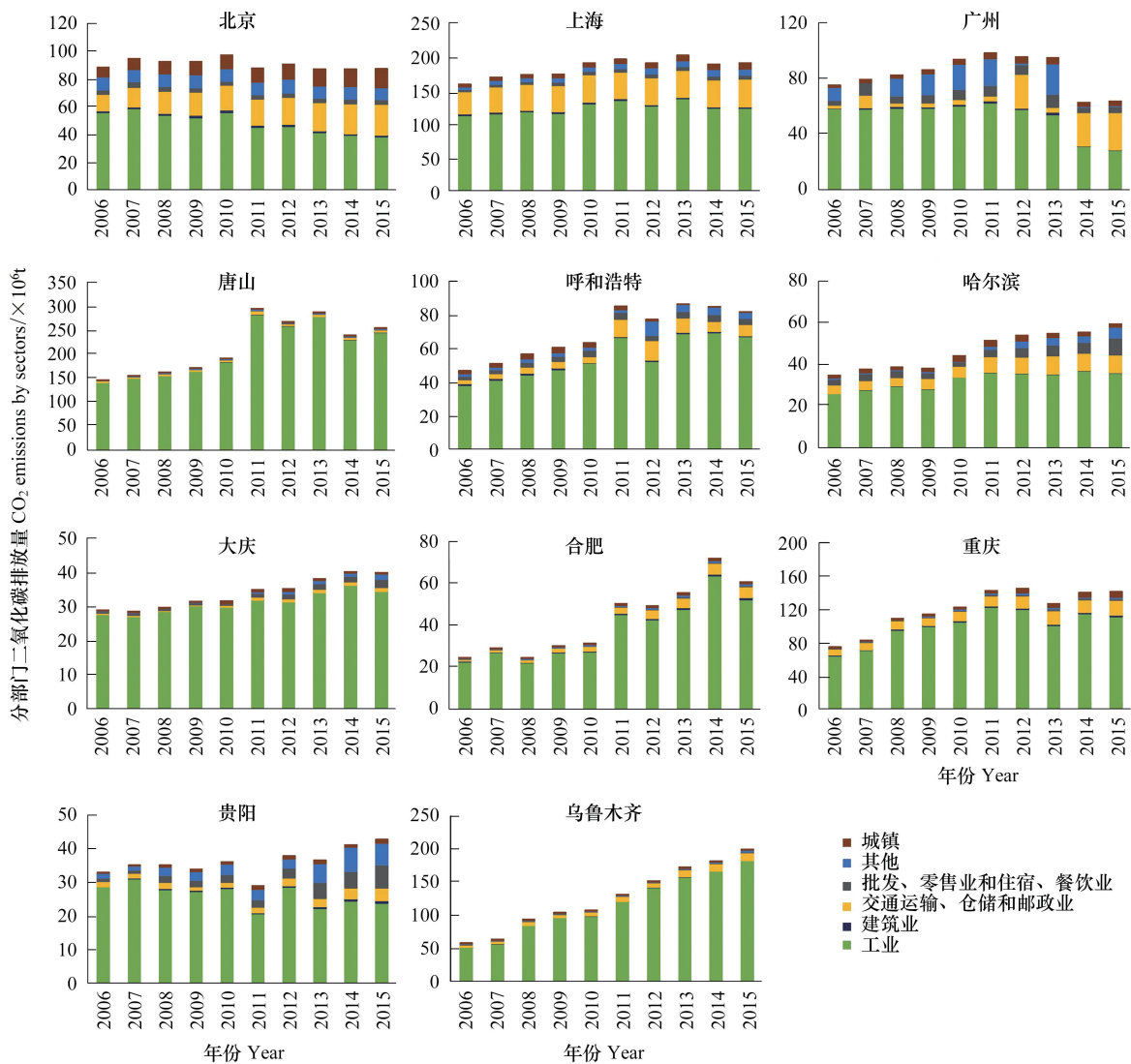


图 2 2006—2015 年 11 个城市 CO₂排放总量和分部门 CO₂排放量

Fig.2 Total CO₂ emissions and sector CO₂emissions in the 11 cities from 2006 to 2015

2.1.3 CO₂排放强度

CO₂排放强度是用来衡量 CO₂排放与经济发展的重要指标,当一个地区经济增长时,CO₂排放强度越低,就能说明该地区以较少的碳排放实现了经济发展。11 个典型城市中,CO₂排放强度较低的北京、上海和广州经济发展水平较高、第三产业比值较大,也是能源输入城市。CO₂排放强度较高的乌鲁木齐和唐山,是能源输出城市,经济发展多依赖于重工业,能源利用效率较低(表 3)。从变化幅度来看,除乌鲁木齐外,其余 10 个城

市 CO₂ 排放强度呈负增长趋势,但下降幅度不同(表 3)。而乌鲁木齐的 CO₂ 排放强度升高是因为地区生产总值的年平均增长率(12.97%)小于 CO₂ 排放量的年平均增长率(14.87%)。虽然在研究期内有 10 个城市的 CO₂ 排放强度在降低,但各城市间仍存一定差距,广州、贵阳和北京分别下降了 68.02%、55.09% 和 54.69%,唐山、合肥和哈尔滨的 CO₂ 排放强度分别下降 27.99%、28.18% 和 33.45%。

2.1.4 基于经济发展和 CO₂ 排放的城市分类

为了更好的对比分析 11 个城市化石能源消费 CO₂ 排放的影响因素及影响作用的差异,综合考虑 CO₂ 排放量和经济发展现状,将这 11 个典型城市分为以下四类:经济高度发达城市,包括北京、上海和广州;高碳排放城市,包括重庆、乌鲁木齐和唐山;低排放低增长城市,包括哈尔滨、呼和浩特和大庆;低排放高增长城市,包括贵阳和合肥(图 3)。

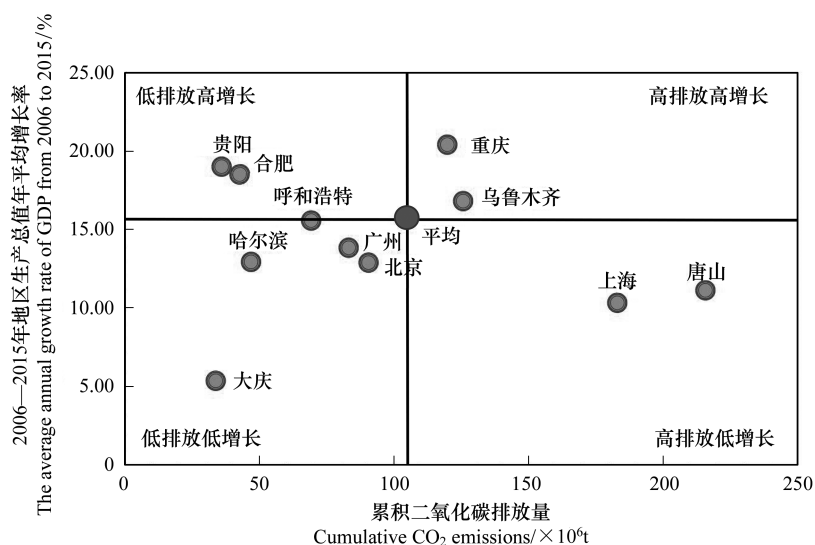


图 3 不同城市 CO₂ 排放和经济增长模式

Fig.3 Different growth models of urban economy and CO₂ emission

2.2 CO₂ 排放影响因素分解分析

2.2.1 城市 CO₂ 排放因素分解

本文将 11 个城市 2006—2015 年化石能源消费产生的 CO₂ 排放总量按经济发展、人口规模、能源、产业结构和能源结构进行分解,分解结果见表 4。

2.2.2 各因素对城市能源 CO₂ 排放的驱动作用

经济发展是 11 个城市 CO₂ 排放最大的正向驱动因素。经济发展对上海、重庆和乌鲁木齐的 CO₂ 排放累积贡献值最大,分别使 CO₂ 排放累积增加了 100.9Mt、84.39Mt 和 80.15Mt。对大庆的贡献值最小,CO₂ 排放累积增加了 18.97Mt(表 4)。整体来看,经济发展效应对经济高度发达城市和高碳排放城市的 CO₂ 排放贡献值高于低排放低增长和低排放高增长城市。人口规模效应对 11 个典型城市的 CO₂ 排放均产生促进作用,但正向促进作用小于经济发展(图 4)。人口规模效应对 CO₂ 排放增长贡献最大的是高碳排放城市中的重庆和乌鲁木齐,累积贡献值分别为 37.56Mt 和 17.57Mt。人口规模效应对大庆的 CO₂ 排放促进作用最小(2.18Mt),大庆的人口规模也相对较小,2015 年人口规模(135.9 万人)仅为重庆的 6.38%,年平均增长率仅 0.90%。能源强度是 11 个城市 CO₂ 排放最大的负向驱动因素。2006—2015 年间 4 类城市的能源强度整体呈下降趋势,相应的能源强度效应的累积贡献值均为负值(表 4)。北京和广州能源强度对 CO₂ 排放的累积贡献值最大,分别为 -76.51Mt 和 -77.17Mt,同时能源强度效应的累积贡献值抵消了其他因素引起的 CO₂ 排放增加量,使这两个城市在研究期内 CO₂ 排放累积降低了 44.64Mt 和 2.18Mt。

表 4 2006—2015 年间 11 个城市 CO₂排放增量因素分解

Table 4 Factors decomposition of carbon dioxide emissions increment in the 11 cities during 2006—2015

城市分类 City classification	城市 Cities	经济发展 Economic development	人口规模 Population size	能源强度 Energy intensity	产业结构 Industrial structure	能源结构 Energy structure	二氧化碳 排放增量 CO ₂ emissions increment
经济高度发达城市 Cities with highly developed economy	北京	44.32	13.02	-76.51	-3.74	-21.73	-44.64
	上海	100.91	8.3	-58.48	-9.51	11.53	52.75
	广州	67.2	10.62	-77.17	-2.8	-0.03	-2.18
高碳排放城市 Cities with high carbon emission	重庆	84.39	37.56	-71.01	12.51	71.13	134.6
	乌鲁木齐	80.15	17.57	-44.12	-9.56	40.2	84.24
	唐山	62.38	7.64	-37.43	0.57	6.78	39.94
低排放低增长城市 Cities with low emission and low economic growth	哈尔滨	34.09	8.25	-24.95	0.03	20.18	37.60
	呼和浩特	57.52	10.06	-37.05	1.09	42.25	73.87
	大庆	18.97	2.18	-10.43	-1.53	7.69	16.88
低排放高增长城市 Cities with low emission but high economic growth	合肥	34.09	10.05	-25.09	4.31	23.14	46.50
	贵阳	34.09	4.03	-32.91	-0.74	10.86	15.33

产业结构效应对经济高度发达城市的 CO₂排放均有削减作用,累积贡献值为-3.74Mt、-9.51Mt 和-2.8Mt,这三个城市二、三产业 GDP 年均增长率分别为:7.72%、9.65%、6.60%、10.71%和 10.30%、12.39%。产业结构的变化对重庆的 CO₂排放促进作用最大,累计贡献值为 12.51Mt,二、三产业 GDP 年平均增长率分别为 17.10%和 11.83%,促进作用远小于人口规模、经济发展和能源结构。整体来看,产业结构的变化对北京、上海、广州、乌鲁木齐、大庆和贵阳的 CO₂排放是抑制作用,这 6 个城市第三产业 GDP 年平均增长速率均大于第二产业(表 1)。从能源结构的变化来看,仅对经济高度发达城市中的北京和广州有抑制作用,并且北京的(-21.73Mt)CO₂排放累积削减值大于广州(-0.03Mt)。能源结构的变化对上海的 CO₂排放有一定促进作用,但累积贡献值较其他三类城市偏小(11.53Mt)。能源结构效应对高碳排放城市的 CO₂排放促进作用较明显,使重庆和乌鲁木齐的 CO₂排放量累积增加了 71.13Mt 和 40.2Mt,但促进作用小于经济发展效应。整体来看,能源结构的变化对低排放低增长和低排放高增长城市的促进作用都较小。

3 讨论

3.1 CO₂排放

3.1.1 CO₂排放总量

十年间累积 CO₂排放量较高的重庆、乌鲁木齐和唐山组成高碳排放城市,这三个城市工业 CO₂排放较多且占据主导地位,重庆工业 CO₂排放占比在 80%左右,而乌鲁木齐和唐山的工业 CO₂排放量占比均在 90%以上。对于经济高度发达的三个城市北京、上海和广州来说(2015 年市辖区 GDP 超过 1800 十亿元),2006—2015 年,北京和广州的 CO₂排放量呈下降趋势,这与研究期内工业 CO₂排放量占比降至 50%以下,煤炭消费比重降幅较大有关(北京下降了 67.15%,广州下降了 30.27%),并且 CO₂排放的下降趋势与刘兆龙等^[31]和王长建等^[32]的研究一致;而上海的 CO₂排放呈增长趋势,主要因为上海的能源消费量较高,从 2006 年消费 5286 万吨标准煤增加到 2015 年 7325 万吨标准煤,因此与之相关的 CO₂排放也较高。以上研究结果与 Cai 等^[33]的研究相符,CO₂排放总量较高的城市为超大城市或以工业为主的城市。十年间,低排放低增长城市得经济增长速度较慢,大庆和呼和浩特的 GDP 年平均增长率在 11 个城市中最小,分别为 5.34%和 6.41%;低排放高增长城市中合肥和贵阳的 GDP 年平均增长率较高(18.50%和 19.00%)。但这两类城市的经济水平相对较低(2015 年市辖区 GDP 均未达到 5000 亿元),CO₂排放量相较于另两类城市也较低。

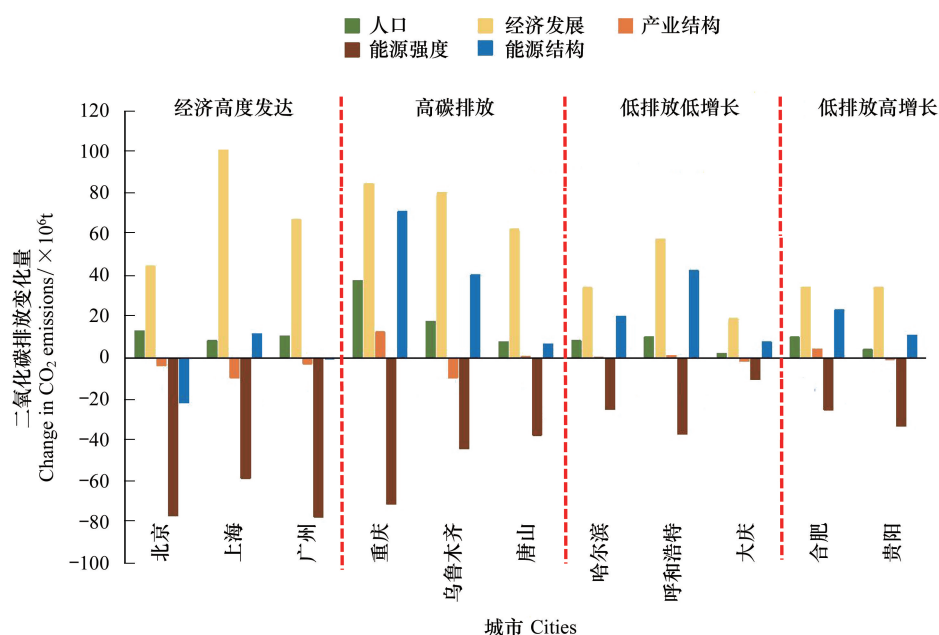


图4 十年间11个城市CO₂排放影响因素分解结果

Fig.4 Decomposition results of factors affecting CO₂ emissions in the 11 cities from 2005 to 2010

3.1.2 人均CO₂排放量

四类城市的人均CO₂排放量差异较大,且表现出与CO₂排放总量相似的变化趋势,CO₂排放总量降低的北京和广州,人均CO₂排放量也出现负增长,年平均增长率分别为-2.06%和-3.34%,这与两个城市人口稳定增长、CO₂排放总量降低有关。高碳排放、低人口规模造成高碳排放城市中的唐山和乌鲁木齐的人均CO₂排放量远高于其他城市,而重庆由于人口规模最高,相应的人均CO₂排放量也较低。

3.1.3 CO₂排放强度

CO₂排放强度整体上表现为:经济高度发达城市(均值为0.88tCO₂/万元)<低排放低增长城市(均值为2.82tCO₂/万元)<低排放高增长城市(均值为3.05tCO₂/万元)<高碳排放城市(均值为6.62tCO₂/万元)。对比来看,高碳排放城市的CO₂排放强度最高,这类城市CO₂排放总量较高,经济水平又低于经济高度发达城市。而经济高度发达的城市CO₂排放强度较低,因为这类城市经济基础雄厚,在资源、技术、交通等方面更有优势,随着低碳技术的革新,通过技术进步促进产业结构升级和优化,能源利用效率不断提高^[34]。

3.2 CO₂排放影响因素

2006—2015年,经济发展是11个典型城市化石能源消费CO₂排放量增加最主要的正向促进因素,这与国际上一些研究结果相似^[35-37]。虽然在国家尺度上,关于经济增长与城市CO₂排放关系的研究结果还存在一些不确定性^[38],但Azizalrahman和Hasyimi^[39]指出高收入和中高收入国家的城市CO₂排放与GDP存在倒“U”型关系,而中低收入国家城市的CO₂排放和GDP则为线性正相关关系。郭建科^[40]的研究也表明我国还需要更高的经济发展水平来支撑碳排放峰值的出现。本文的结果显示11个典型城市经济发展所引起的CO₂排放累积增加量远高于其他正向促进因素,其中,大庆的经济增长速度是11个城市中最低的,经济规模也较低(2448亿元),但经济发展对CO₂排放的累积贡献值远高于其他4个影响因素。因此协调经济增长与CO₂排放之间的矛盾依然是今后研究的重点。

人口规模效应是11个典型城市化石能源消费CO₂排放增加的促进因素,但累积贡献值小于经济发展效应,这可能与人口增长速度小于经济发展速度有关(图5)。人口规模效应对CO₂排放增长贡献作用最大的是

高碳排放城市中的重庆和乌鲁木齐,这与两个城市快速的人口扩张速度有关,年平均增长率分别为 3.88% 和 3.38% (图 5)。而人口规模效应对大庆的 CO₂ 排放促进作用最小,因为大庆的人口规模和增长速度都较小,分别为 135.9 万人 (表 1) 和 0.90%。随着城市化进程的推进,城市人口增长将带来化石能源消费和 CO₂ 排放量的增加。

能源强度是衡量能源利用效率的重要指标,能源强度的降低意味着每单位 GDP 所消耗能源有所减少,这也间接造成 CO₂ 排放量的减少,它对城市和区域的 CO₂ 排放具有重要影响^[41]。在本研究中能源强度为抑制 CO₂ 排放增长的关键因素也是最主要的影响因素,CO₂ 排放总量下降的北京和广州同时具有最快的能源强度下降速度,分别为 8.59% 和 9.46% (图 5),相应的能源强度降低对 CO₂ 排放的累积贡献值也最大。研究期内乌鲁木齐和唐山的能源强度均高于其他城市,然而能源强度效应对 CO₂ 排放的抑制作用却较明显,分别削减了 71.01Mt 和 44.12Mt 的 CO₂ 排放量,说明这类城市通过提高能源利用效率来抑制碳排放的空间较大。整体来看,经济高度发达和高碳排放城市的能源强度抑制作用强于低排放低增长和低排放高增长城市,这就强调了提高能源利用效率对低碳减排的重要性。

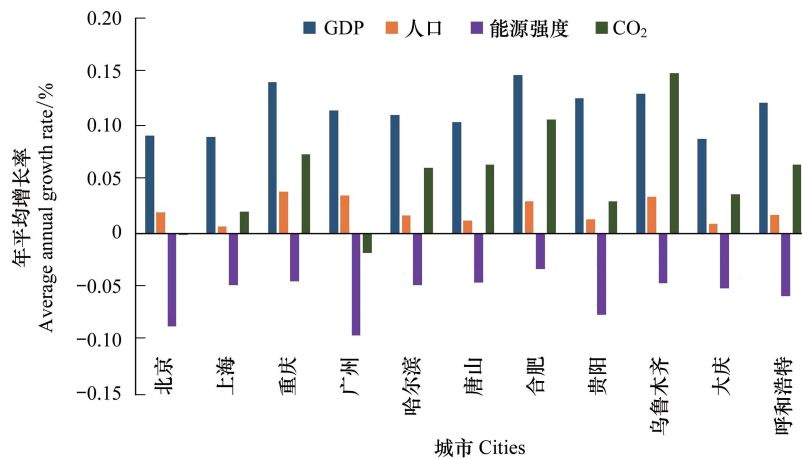


图 5 11 个城市 GDP、人口、能源强度和 CO₂ 排放年平均增长率

Fig.5 The average annual growth rate of GDP, population, energy intensity and CO₂ emissions in the 11 cities

产业结构的变化对北京、上海、广州、乌鲁木齐、大庆和贵阳的 CO₂ 排放是抑制作用,这与 6 个城市第三产业 GDP 年均增长速率大于第二产业有关 (表 1)。产业结构效应对经济高度发达城市的 CO₂ 排放均有削减作用,这三个城市受到国家的重视,大力推进产业结构优化与调整,重点发展第三产业,二、三产业 GDP 年均增长率分别为:7.72%、9.65%、6.60%、10.71% 和 10.30%、12.39%,能源消费和 CO₂ 排放较多的第二产业逐渐降低必然会带来 CO₂ 排放总量降低。产业结构效应对重庆和合肥的促进作用较明显,这两个城市二、三产业 GDP 年平均增长率分别为:17.10%、11.83% 和 17.74%、12.14%。以上结论强调了提高第三产业比重对抑制 CO₂ 排放的重要性。

由于不同种类的能源具有不同的碳排放系数,煤炭的排放系数最高,石油次之,天然气最少。因此消耗等量热值的化石能源时,碳排放系数最高的煤炭所占比例越低,CO₂ 排放量就越少。本文的研究结果显示能源结构的变化仅对北京和广州的 CO₂ 排放有抑制作用,研究期内北京的煤炭消费比重下降了 67.15%,广州下降了 30.27%。虽然上海的煤炭消费比重呈下降趋势,但因上海的能源消费总量远高于其他城市,并且石油消费比重处于较高水平,平均占比约为 78%,因而能源结构的变化对上海 CO₂ 排放存在一定的促进作用,只是促进作用较小。能源结构对高碳排放城市中重庆和乌鲁木齐的 CO₂ 排放促进作用最明显,这两个城市的煤炭消费量高于其他城市,十年间煤炭平均消费量分别为 1951 万吨标准煤和 1562 万吨标准煤,而唐山的煤炭消费占比均在 80% 左右,但能源结构效应的累积贡献值仅 6.87MtCO₂,说明唐山的能源结构调整对减排有一定效果。

高碳排放城市今后应重点优化调整结构,提高清洁能源比重,有计划且积极地开发利用风能、太阳能、生物能等无碳或低碳的绿色可再生能源^[42]。能源结构效应对低排放低增长和低排放高增长城市的促进作用相对较小,但呼和浩特是个例外,因为研究期内呼和浩特的煤炭消费所占比例从 77.77% 上升至 83.99%,而天然气和石油的比值持续下降,能源结构变化的不合理使得 CO₂ 排放量增加。

从化石能源消费 CO₂ 排放影响因素的分析得到,经济发展和人口规模效应对 11 个城市 CO₂ 排放增长均表现为正向促进作用,而能源强度效应是 11 个城市 CO₂ 排放最大的抑制因素。产业结构效应是第三产业 GDP 年均增长速率大于第二产业的 6 个城市 CO₂ 排放的抑制因素,能源结构效应仅对煤炭消费比重降幅较大的北京和广州的 CO₂ 排放有抑制作用。

3.3 不确定性分析

由于中国城市的能源统计数据尚不完备,估算方法不同、CO₂ 排放系数的标准不统一,都会使得 CO₂ 排放核算结果不一致^[43]。Shan 等^[21]提供的用适当的分配系数将省级能源数据分配给城市的方法较好的解决了城市尺度能源数据缺失的问题。Jing 等^[44]用相似的方法估算了中国 41 个城市的 CO₂ 排放量,将结果与中国高分辨率碳排放数据(CHRED)进行比较,差异均在 10% 以内,并强调了使用中国本地化的碳排放因子的必要性。然而该方法因社会经济数据的复杂性和各城市指标选取而存在一定误差,希望在今后的研究中对该方法进行调整,使其能够充分、准确的估算中国不同城市尺度化石能源消费产生的 CO₂ 排放量。又因为 CO₂ 排放过程包含诸多复杂的驱动因素,今后应利用多学科交叉研究,基于不同模型方法深入探究城市尺度 CO₂ 排放及其影响因素的作用,并扩展历史发展、居民生活习惯、气候变化、地理位置等不可量化影响因素与 CO₂ 排放关系的研究。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2013; the physical science basis. Contribution of working group I to the IPCC fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. (2013) [2019-01-15]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- [2] IEA. Global Energy & CO₂ Status Report: The latest trends in energy and emissions in 2018. (2018-03) [2019-01-15]. <https://www.iea.org/geco/emissions/>.
- [3] Sun J Q, Shi J S, Shen B Y, Li S Q, Wang Y W. Nexus among Energy Consumption, Economic Growth, Urbanization and Carbon Emissions: Heterogeneous Panel Evidence Considering China's Regional Differences. *Sustainability*, 2018, 10(7): 2383.
- [4] 尹乐, 吴昌华. 创新与协作的城市力量. *世界环境*, 2007, (5): 34-38.
- [5] Wang Z, Cui C, Peng S. How do urbanization and consumption patterns affect carbon emissions in China? A decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 1201-1208.
- [6] Sheinbaum C, Ozawa L, Castillo D. Using logarithmic mean Divisia index to analyze changes in energy use and carbon dioxide emissions in Mexico's iron and steel industry. *Energy Economics*, 2010, 32(6): 1337-1344.
- [7] de Freitas L C, Kaneko S. Decomposing the decoupling of CO₂ emissions and economic growth in Brazil. *Ecological Economics*, 2011, 70(8): 1459-1469.
- [8] Li K Q, Lu R, Chu R W, Ma D D, Zhu L Q. Trends and Driving Forces of Carbon Emissions from Energy Consumption: A Case Study of Nanjing, China. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4348.
- [9] Pardo C S, Pérez S M, Morales G R. Decomposition of energy consumption and CO₂ emissions in Mexican manufacturing industries: Trends between 1990 and 2008. *Energy for Sustainable Development*, 2012, 16(1): 57-67.
- [10] 曹甲威, 赵翠薇. 基于 LMDI 模型的贵阳市交通碳排放及其影响因素分析. *贵州科学*, 2017, 35(1): 57-61, 93-93.
- [11] Shan Y L, Guan D B, Hubacek K, Zheng B, Davis S J, Jia L C, Liu J H, Liu Z, Fromer N, Mi Z F, Meng J, Deng X Z, Li Y, Lin J T, Schroeder H, Weisz H, Schellnhuber H J. City-level climate change mitigation in China. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaag0390.
- [12] 蔡博峰. 中国城市二氧化碳排放研究. *中国能源*, 2011, 33(6): 28-32, 47-47.
- [13] Yu H, Pan S Y, Tang B J, Mi Z F, Zhang Y, Wei Y M. Urban energy consumption and CO₂ emissions in Beijing: current and future. *Energy Efficiency*, 2015, 8(3): 527-543.
- [14] 孙贵艳, 王胜. 基于 LMDI 模型的重庆直辖以来的能源消费碳排放研究. *重庆理工大学学报: 社会科学*, 2018, 32(7): 30-36.
- [15] 苏王新, 孙然好. 中国典型城市群城镇化碳排放驱动因子. *生态学报*, 2018, 38(6): 1975-1983.
- [16] Zhou Y, Shan Y L, Liu G S, Guan D B. Emissions and low-carbon development in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities and their surroundings. *Applied Energy*, 2018, 228: 1683-1692.

- [17] Shi X C, Li X Y. Research on three-stage dynamic relationship between carbon emission and urbanization rate in different city groups. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 195-202.
- [18] Sun J Q, Shi J, Shen B Y, Li S Q, Wang Y. Nexus among Energy Consumption, Economic Growth, Urbanization and Carbon Emissions: Heterogeneous Panel Evidence Considering China's Regional Differences. *Sustainability*, 2018, 10(7): 2383.
- [19] Gao C C, Liu Y H, Jin J, Wei T Y, Zhang J Y, Zhu L Z. Driving forces in energy-related carbon dioxide emissions in east and south coastal China: commonality and variations. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 240-250.
- [20] Yu B Y, Wei Y M, Kei G M, Matsuoka Y. Future scenarios for energy consumption and carbon emissions due to demographic transitions in Chinese households. *Nature Energy*, 2018, 3(2): 109-118.
- [21] Shan Y L, Guan D B, Liu J H, Mi Z F, Liu Z, Liu J R, Schroeder H, Cai B F, Chen Y, Shao S, Zhang Q. Methodology and applications of city level CO₂ emission accounts in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1215-1225.
- [22] 国家统计局城市社会经济调查司. ISBN 978-7-5037-8082-0 中国城市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2007-2016.
- [23] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, Ou J M, Li Y, Meng J, Mi Z F, Liu Z, Zhang Q. China CO₂ emission accounts 1997—2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 10.1038.
- [24] Liu Z, Guan D B, Wei W, Davis S J, Ciais P, Bai J, Peng S S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G, Andres R J, Crawford-Brown D, Lin J T, Zhao H Y, Hong C P, Boden T A, Feng K S, Peters G P, Xi F M, Liu J G, Li Y, Zhao Y, Zeng N, He K B. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature*, 2015, 524(7565): 335-338.
- [25] 国家统计局能源司. ISBN 978-7-5037-8064-6 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [26] Ang B W, Liu N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 238-246.
- [27] Shao S, Yang L L, Gan C H, Cao J H, Geng Y, Guan D B. Using an extended LMDI model to explore techno-economic drivers of energy-related industrial CO₂ emission changes: A case study for Shanghai (China). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 516-536.
- [28] Mousavi B, Lopez N S A, Biona J B M, Chiu A S F, Blesl M. Driving forces of Iran's CO₂, emissions from energy consumption: An LMDI decomposition approach. *Applied Energy*, 2017, 206: 804-814.
- [29] Li J X, Chen Y N, Li Z, Liu Z H. Quantitative analysis of the impact factors of conventional energy carbon emissions in Kazakhstan based on LMDI decomposition and STIRPAT model. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(7): 1001-1019.
- [30] Madaleno M, Moutinho V. A new LMDI decomposition approach to explain emission development in the EU: individual and set contribution. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(11): 10234-10257.
- [31] 刘兆龙, 邱坦, 单吉堃. 北京和上海终端能源碳排放量影响因素研究. *安徽农业科学*, 2015, 43(28): 250-253, 367-367.
- [32] 王长建, 张虹鸥, 叶玉瑶, 苏泳娴, 陈伟莲. 广东省能源消费碳排放的多变量驱动因素——基于扩展的 STIRPAT 模型. *科技管理研究*, 2017, 37(3): 210-214.
- [33] Cai B F, Lu J, Wang J N, Dong H J, Liu X M, Chen Y, Chen Z M, Cong J H, Cui Z P, Dai C Y, Fang K, Feng T, Guo J, Li F, Meng F X, Tang W, Wang G Z, Xie Y S, Zhang J J. A benchmark city-level carbon dioxide emission inventory for China in 2005. *Applied Energy*, 2019, 233-234: 659-673.
- [34] 杨青林, 赵荣钦, 邢月, 满洲. 中国城市碳排放的空间分布特征研究. *环境经济研究*, 2017, 2(1): 70-81.
- [35] Shuai C Y, Shen L Y, Jiao L D, Wu Y, Tan Y T. Identifying key impact factors on carbon emission: Evidences from panel and time-series data of 125 countries from 1990 to 2011. *Applied Energy*, 2017, 187: 310-325.
- [36] Sumabat A K, Lopez N S, Yu K D, Hao H, Li R, Geng Y, Chiu A S F. Decomposition analysis of Philippine CO₂ emissions from fuel combustion and electricity generation. *Applied Energy*, 2016, 164: 795-804.
- [37] Shahbaz M, Loganathan N, Muzaffar A T, Ahmed K, Jabran M A. How urbanization affects CO₂ emissions in Malaysia? The application of STIRPAT model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 83-93.
- [38] Antonakakis N, Chatziantoniou I, Filis G. Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: An ethical dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 808-824.
- [39] Azizrahman H, Hasyimi V. A model for urban sector drivers of carbon emissions. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 44: 46-55.
- [40] 郭建科. G7 国家和中国碳排放演变及中国峰值预测. *中外能源*, 2015, 20(2): 1-6.
- [41] Pretis F, Roser M. Carbon dioxide emission-intensity in climate projections: Comparing the observational record to socio-economic scenarios. *Energy*, 2017, 135: 718-725.
- [42] 姜向亚. 基于 LMDI 模型的我国碳排放影响因素的区域分异研究[D]. 开封: 河南大学, 2013.
- [43] 谢守红, 王利霞, 邵珠龙. 国内外碳排放研究综述. *干旱区地理*, 2014, 37(4): 720-730.
- [44] Jing Q N, Bai H T, Luo W, Cai B F, Xu H. A top-bottom method for city-scale energy-related CO₂ emissions estimation: A case study of 41 Chinese cities. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 444-455.