

基于 LMDI 的能源消费碳排放影响因素研究

——以唐山市为例

梁启迪, 冯相昭, 杜晓林, 赵梦雪, 王敏

(生态环境部环境与经济政策研究中心, 北京 100029)

【摘要】唐山市作为我国钢铁和焦炭产能最为集中的城市, 产业结构偏重, 能源消费结构以煤为主, 温室气体减排压力巨大。本文分析了唐山市 2010—2017 年能源消费和碳排放的变化特征, 然后通过 LMDI 分解方法对唐山市能源消费碳排放因素进行分解, 发现经济发展是其碳排放增长最主要的拉动因素, 人口增长也对碳排放有一定贡献, 而能源强度下降则很大程度上抑制了碳排放的增加, 产业结构调整 and 能源结构改善虽也起到了一定的抑制作用, 但影响十分有限。唐山市应继续推进能源结构低碳化, 削减煤炭消费总量并提高清洁能源使用率, 同时优化产业结构, 持续推进化解钢铁、焦炭过剩产能, 鼓励、推进第三产业和战略性新兴产业的发展, 向绿色低碳发展模式转变。

【关键词】LMDI 分解; 碳排放; 低碳发展

中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2020)01-0150-05 DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202001150

气候变化引发的各类问题制约全球经济和社会的可持续发展, 日益成为国际社会普遍关注的问题。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告指出, 工业化以来, 人类活动导致全球温室气体排放量不断增加, 化石燃料的燃烧是全球以二氧化碳为首的温室气体浓度增加的主要原因。碳排放强度下降不仅是国家履行《巴黎协定》自主承诺目标的需求, 也是地方实现碳减排约束性目标的现实要求。唐山市作为我国钢铁和焦炭产能最为集中的城市, 产业结构偏重, 能源消费结构以煤为主。《“十三五”控制温室气体排放工作方案》对国家和河北省分别设立了到 2020 年碳强度比 2015 年下降 18% 和 20.5% 的目标, 而《河北省“十三五”控制温室气体排放工作实施方案》则进一步对唐山市提出了碳强度比 2015 年下降 22% 的要求, 唐山市温室气体减排压力巨大。本文通过对碳排放影响因素及变化趋势进行分析, 对于唐山市制定科学合理的碳减排政策具有重大的现实意义, 并且对其他工业型城市减排也具有示范性意义。

1 研究方法 & 数据来源

1.1 研究方法 & 模型构建

1.1.1 研究方法

对唐山市能源消费碳排放进行因素分解, 来分析各种因素的趋势及作用强度。常见的因素分解方法主要包括两种: 指数分解方法 IDA (Index Decomposition Analysis) 和结构分解方法 SDA (Structural Decomposition

Analysis)。IDA 相比之下更为简便, 只需使用部门加总数据, 因此得到了广泛应用。IDA 又可进一步分为 Laspeyres (拉氏分解法) 和 Divisia (迪氏分解法) 两大类, 而 B. W. Ang (2003)^[1] 提出的 LMDI 分解法属于迪氏分解法的一个分支, 这种方法可以做到全分解、无残差, 是一种常见的用来研究变化内因及作用强度的对数平均权重法, 在能源及低碳领域得到了广泛的应用。B. W. Ang (2005)^[2] 介绍了 LMDI 方法的运算过程及优势, 并以加拿大工业碳排放数据为例进行了分解示范。Tunç 等 (2009)^[3] 运用该方法对土耳其 1970—2006 年的碳排放因素进行分析, 结果表明经济增长效应和能源强度效应对碳排放影响最大。国内也有学者对碳排放因素分解进行研究。冯相昭等 (2008)^[4] 通过对 1971—2005 年间中国的碳排放进行 Kaya 分解发现, 经济和人口增长对碳排放有促进作用, 而能源结构调整则会抑制 CO₂ 的排放, 提出了加快产业结构调整、发展清洁能源的政策建议。郭朝先 (2010)^[5] 运用 LMDI 方法对中国 1995—2007 年的碳排放进行了基于经济总量、经济结构、能源利用效率、能源消费结构等方面的分解, 发现经济总量增长是我国碳排放高速增长的主因, 能源利用效率提高则是抑制碳排放增长的主要因素。孙耀华等 (2014)^[6] 通过对西北部能源富集地区 10 年的碳排放变化进行因素分解并与东部地区和全国平均水平进行比较, 发现西北部地区经济社会发展具有高碳特征。王莉叶等 (2019)^[7] 运用 LMDI 分解方法将兰州市工业能源消费碳排放的影响因素分解为 4 种效应, 表明经济增长

基金项目: 生态环境部环境与经济政策研究中心委托课题“应对气候变化工作专项”(221101080010001)

作者简介: 梁启迪, 研究实习员, 硕士, 主要研究方向为环境与气候变化政策

通讯作者: 冯相昭, 研究员, 博士, 主要研究方向为能源、环境与气候变化政策

的累积效应为正, 而能源强度对碳排放有抑制作用, 然后通过设置减排情景, 提出相关低碳政策建议。本文选取唐山市这一典型重工业城市为案例, 用 LMDI 方法对其碳排放影响因素进行分解并对趋势及作用强度进行分析, 然后提出相关政策建议。

1.1.2 模型构建

一个国家或地区的碳排放可根据 Kaya 公式^[8] 进行分解, 如公式(1):

$$C = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{C}{E} \quad (1)$$

其中, C 表示碳排放量, P 表示人口数量, $\frac{GDP}{P}$ 表示人均 GDP, E 表示能源消费量, $\frac{E}{GDP}$ 表示单位 GDP 能耗(即能源强度), $\frac{C}{E}$ 表示单位能源碳强度。

本文将碳排放来源进一步分为生产部门和生活消费, 将上式拓展为:

$$C = \sum_{i,j} P \times GP \times S_i \times EI_i \times ET_{i,j} \times CI_{i,j} \quad (2)$$

其中, i 和 j 分别表示产业类型和能源类型; P 表示人口, $GP = \frac{GDP}{P}$, 表示人均 GDP; $S_i = \frac{GDP_i}{GDP}$, 表示 i 产业增加值占 GDP 比重(对于生活消费而言, S_i 为生活消费占 GDP 比重), $EI_i = \frac{E_i}{GDP_i}$, 表示 i 产业能耗强度, $ET_{i,j} = \frac{EP_{ij}}{EP_i}$, 表示 i 产业 j 能源消费占 i 产业总能源消费的比重, $CI_{i,j} = \frac{CP_{ij}}{EP_{ij}}$, 表示 i 产业 j 能源的碳排放强度。

碳排放量差异用报告期减去基期得到:

$$\Delta C = C^t - C^0 \quad (3)$$

其中, C^t 和 C^0 分别为第 t 期和基期的能源消费碳排放量。

对上式进行 LMDI 分解。LMDI 方法包括加法分解

和乘法分解两种具体方法, 但结果一致^[1], 本文采用加法分解, 如公式(4)所示:

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_p + \Delta C_{GP} + \Delta C_s + \Delta C_{EI} + \Delta C_{ET} + \Delta C_{CI} \quad (4)$$

上式中, ΔC_p 反映人口效应, ΔC_{GP} 反映经济增长效应, ΔC_s 反映产业结构效应, ΔC_{EI} 反映能源强度效应, ΔC_{ET} 反映能源结构效应, ΔC_{CI} 反映碳排放系数效应。各效应表达式如下:

$$\Delta C_p = \sum_{ij} \frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^0}{\ln C_{i,j}^t - \ln C_{i,j}^0} \ln\left(\frac{P^t}{P^0}\right) \quad (5)$$

$$\Delta C_{GP} = \sum_{ij} \frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^0}{\ln C_{i,j}^t - \ln C_{i,j}^0} \ln\left(\frac{GP^t}{GP^0}\right) \quad (6)$$

$$\Delta C_s = \sum_{ij} \frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^0}{\ln C_{i,j}^t - \ln C_{i,j}^0} \ln\left(\frac{S_i^t}{S_i^0}\right) \quad (7)$$

$$\Delta C_{EI} = \sum_{ij} \frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^0}{\ln C_{i,j}^t - \ln C_{i,j}^0} \ln\left(\frac{EI_i^t}{EI_i^0}\right) \quad (8)$$

$$\Delta C_{ET} = \sum_{ij} \frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^0}{\ln C_{i,j}^t - \ln C_{i,j}^0} \ln\left(\frac{ET_{i,j}^t}{ET_{i,j}^0}\right) \quad (9)$$

$$\Delta C_{CI} = \sum_{ij} \frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^0}{\ln C_{i,j}^t - \ln C_{i,j}^0} \ln\left(\frac{CI_{i,j}^t}{CI_{i,j}^0}\right) \quad (10)$$

1.2 数据来源及处理

本文中人口、GDP、各产业增加值、居民消费及能源消费量等数据来源于历年《唐山统计年鉴》, 其中 GDP、各产业增加值及居民消费以 2010 年不变价计算。

碳排放数据以唐山市各类能源消费量与碳排放系数计算得出。我国各类能源的碳排放系数参考 IPCC 温室气体指南及我国《省级温室气体清单编制指南》^[9] 中的碳氧化率、平均低位发热量等指标(见表 1)计算, 计算公式为:

$$\text{碳排放量} = \text{能源消费量} \times \text{碳排放系数} \quad (11)$$

$$\text{碳排放系数} = \text{平均低位发热量} \times \text{碳排放因子} \times \text{碳氧化率} \quad (12)$$

表 1 各类能源碳排放系数

能源种类	平均低位发热量/(kJ/kg)	碳排放因子	碳氧化率	碳排放系数
原煤	20908	26.37	0.94	1.9003kgCO ₂ /kg
焦炭	28435	29.5	0.93	2.8604kgCO ₂ /kg
原油	41816	20.1	0.98	3.0202kgCO ₂ /kg
燃料油	41816	21.1	0.98	3.1705kgCO ₂ /kg
汽油	20908	18.9	0.98	2.9251kgCO ₂ /kg
煤油	43070	19.5	0.98	3.0179kgCO ₂ /kg
柴油	42652	20.2	0.98	3.0959kgCO ₂ /kg
液化石油气	50179	17.2	0.98	3.1013kgCO ₂ /kg
炼厂干气	46055	18.2	0.98	3.0119kgCO ₂ /kg
油田天然气	38931	15.3	0.99	2.1622kgCO ₂ /m ³

2 能源消费分析及碳排放测算

唐山市 2010—2013 年能源消费量逐渐增加, 2014—2015 年略有降低, 2015 年至 2017 年又有所回升, 如图 1 所示。由于唐山市钢铁行业发达、钢铁企业密集、煤炭消耗量大, 煤炭在唐山市总能源消费量中占比最大, 约 90%, 石油和天然气使用量有所增加但相比之下数量仍较少, 能源结构不合理(如图 2)。但唐山市单位 GDP 能耗呈现下降趋势(如图 3, 表明其能源效率逐步提高。其单位工业增加值能耗也在逐年降低(如图 4), 但 2015—2017 年下降幅度小于 2010—2015 年。

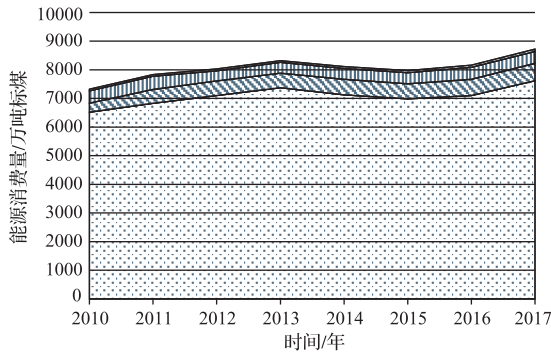


图 1 唐山市 2010—2017 年不同产业部门能源消费量变化

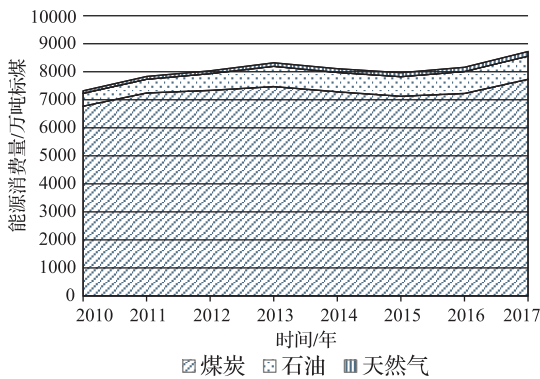


图 2 唐山市 2010—2017 年不同品种能源消费量变化

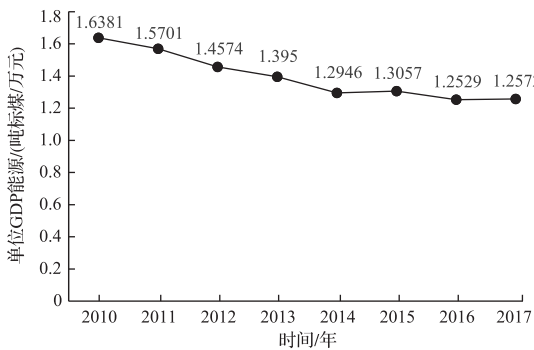


图 3 唐山市 2010—2018 年能源消费强度变化

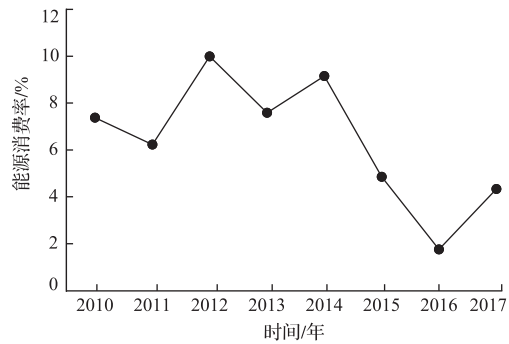


图 4 唐山市 2010—2017 年单位工业增加值能耗降低率

根据不同种类能源的二氧化碳排放系数(如表 1 所示), 对唐山市二氧化碳排放量做估算(如图 5 和图 6), 结果显示: 2010—2017 年, 在能源消费的带动下, 唐山市碳排放量也出现了波动, 虽然 2013 年开始降低, 但 2016 年后又出现了反弹。其碳排放强度虽在 2015 年完成了河北省“十二五”提出的单位 GDP 二氧化碳排放下降目标(即比 2010 年下降 18%), 但 2016 年之后又增高(如图 7)。因此, 要想达到《河北省“十三五”控制温室气体排放工作方案》提出的到 2020 年唐山市碳强度比 2015 年下降 22% 的目标, 形势不容乐观。

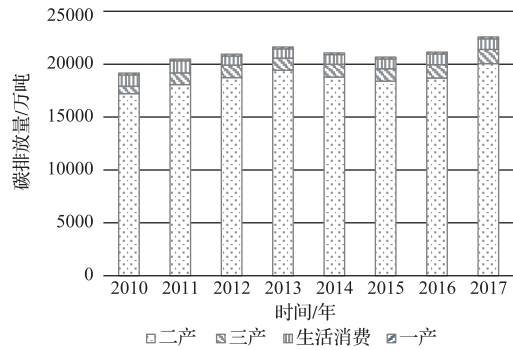


图 5 唐山市 2010—2017 年不同产业部门碳排放量变化

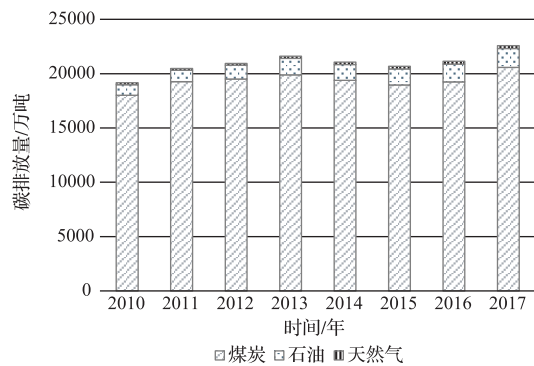


图 6 唐山市 2010—2017 年不同品种能源碳排放量变化

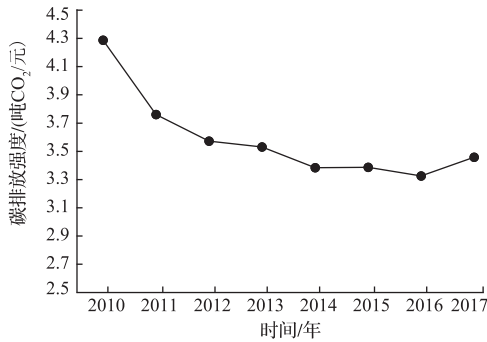


图7 唐山市 2010—2017 年单位 GDP 碳排放强度变化

3 能源消费碳排放因素分解

以 2010 年为基年, 运用扩展的 Kaya 公式和 LMDI 分解方法对唐山市 2010—2017 年三大产业和生活消费的能源消费碳排放进行了分解, 并计算出各分解因素逐年效应(如表 2 所示)。

3.1 人口效应分析

人口效应是唐山市能源消费碳排放的正向驱动因素(见图 8), 即人口的增加会促进碳排放量的增长。从年度效应看, 人口的各年度次效应均为正值, 但其绝对值较小, 表明尽管人口变动对碳排放增长有持续作用, 但作用强度不大。分析其原因发现, 2010—2017 年唐山市人口自然增长率维持在较低水平。

表 2 唐山市 2010—2017 年能源消费碳排放量变化效应分解

单位: 万吨 CO₂

年份	人口效应	经济增长效应	产业结构效应	能源强度效应	能源结构效应	综合效应
2010—2011	129.43	2061.10	529.77	-1428.68	16.18	1307.80
2011—2012	112.30	1935.25	-224.48	-1296.08	-59.27	467.72
2012—2013	271.12	2446.44	-468.93	-2061.81	-86.02	100.79
2013—2014	166.01	895.41	-273.98	-1351.19	13.92	-549.84
2014—2015	88.46	1048.61	-782.46	-734.07	-13.47	-392.93
2015—2016	113.30	1261.81	-19.86	-869.61	-23.53	462.12
2016—2017	148.26	1186.73	243.62	-124.35	-4.63	1449.62

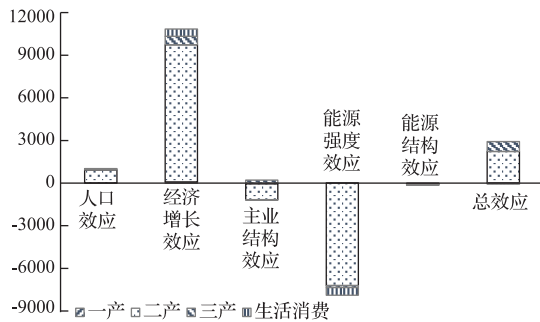


图 8 唐山市 2010—2017 年分产业累积效应碳排放量

有一定关系, 以钢铁产能为例, 2013 年之前, 唐山市钢铁产能达 1.5 亿吨, 每年持续压减产能, 到 2017 年压减至 1.33 亿吨。从年度变化效应的分解来看, 产业结构效应呈现正负交替(如图 9): 2010—2011 年产业结构效应为正, 之后连续 5 年均均为负值, 2016—2017 年又为正值, 与第二产业增加值 GDP 占比的变化趋势基本吻合。然而, 虽然唐山市已采取措施调整产业结构, 化解煤炭、钢铁、炼铁、玻璃等过剩产能, 但未来唐山市以重工业为主的产业结构仍将长期持续, 这也为唐山市的碳减排带来压力。

3.2 经济增长效应分析

经济增长效应对唐山市能源消费碳排放起到正向驱动作用。经济增长的各年度效应值均为正值, 且绝对值较大(如图 8), 说明经济增长对唐山市能源消费碳排放增长起到了持续拉动的作用, 表明经济增长的同时也消耗了大量能源, 并产生了大量温室气体排放。其中, 第二产业的经济增长效应在总经济增长效应中的各年度贡献均超过 88%, 因此调整第二产业增加值与碳排放的关系是减排的重要任务。

3.3 产业结构效应分析

产业结构效应对唐山市能源消费碳排放起到负向驱动作用(如图 8), 说明分析期内产业结构调整对碳排放的影响是积极的。这与唐山市近年来持续压减过剩产能

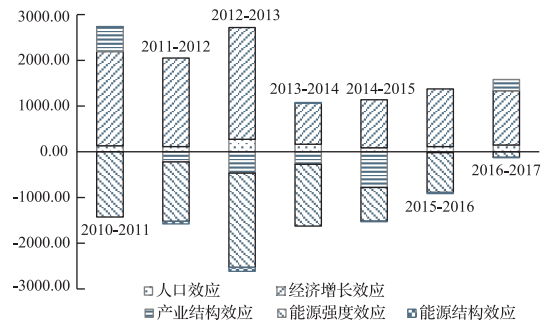


图 9 唐山市 2010—2017 年碳排放量变化分解

3.4 能源强度效应分析

能源强度效应对唐山市能源消费碳排放起到负向驱动效应。各年度的能源强度效应均为负值, 且绝对值相

对较大,说明能源强度在减排中有积极影响,在一定程度上抑制了能源消费碳排放的增长,尤其是第二产业的贡献值超过90%,显示出了巨大的减排潜力。从图3和图4也可看出,唐山市2010—2017年单位GDP能耗和单位工业增加值能耗均呈现出逐年降低的趋势。因此,唐山市控制能源消费碳排放的重点手段之一在于提高工业能源效率。

3.5 能源结构效应分析

能源结构效应对唐山市能源消费碳排放起到负向驱动效应,但绝对值较小,表明能源消费结构的总体变动对分析期内唐山市碳排放有抑制作用,但作用十分有限。从逐年效应来看,有2010—2011年和2013—2014年2个正值,其余4个为负值,反映出唐山市能源结构调整优化不足,工业发展过度依赖化石能源的局面仍然存在,对清洁能源和新能源的大规模开发利用仍然不足。

4 结论与建议

本文将唐山市能源消费碳排放影响因素分解为人口、经济增长、产业结构、能源强度和能源结构5个变量,结果表明:(1)人口增长对碳排放有正驱动作用,但作用强度不大;(2)经济增长是促进碳排放增长的主要因素,这意味着如何平衡经济发展和碳排放的关系是唐山市乃至全社会低碳发展的关键;(3)单位GDP能耗强度的降低对碳排放的抑制作用显著,因此提高能源利用效率是未来工业领域技术发展创新的重要方向;(4)产业结构和能源结构调整对碳排放也有抑制作用,但目前唐山市两大结构优化调整不足,对控制碳排放的作用十分有限。

唐山市存在着产业结构和能源结构不合理的瓶颈问题。2016年之后,其能源消费总量和碳排放强度均出现

了反弹,若想达到“十三五”提出的温室气体控制目标形势不容乐观。基于上述分析,对唐山市提出以下低碳化政策建议:(1)优化能源消费结构,强化煤炭消费总量和强度双控,以压减工业燃煤和治理散煤为重点,深化燃煤锅炉治理,强化散煤治理和煤炭市场监管,并加快发展可再生能源、提高清洁能源使用率,加强沿海风电基地建设及光伏、核电等多元化利用。(2)加快产业结构调整,持续推进化解钢铁、焦炭等过剩产能,加快重点污染工业企业退城、入园,推动钢铁等重化企业临港临铁布局,加快向沿海集中、向园区聚集,同时推进制造业高端化发展并鼓励第三产业和战略性新兴产业的发展,向绿色低碳发展模式转变。(3)控制工业领域温室气体排放,利用京津科技创新资源,在钢铁、焦化、电力等重点行业积极推动工艺创新和升级以达到能效提高的目的,并增加生态系统碳汇,加快推进国土绿化行动,全面加强森林经营和湿地保护与恢复。

参考文献:

- [1] ANG B, LIU F & CHEW E. Perfect Decomposition Techniques in Energy and Environmental Analysis [J]. *Energy Policy*, 2003(31): 1561-1566.
- [2] ANG, B. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005(7): 867-871.
- [3] TUNC G, TURUT-ASIK S, AKBOSTANCI E. A decomposition analysis of CO₂ emissions from energy use: Turkish case [J]. *Energy Policy*, 2009(11): 4689-4699.
- [4] 冯相昭, 邹冀. 中国CO₂排放趋势的经济分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2008(3): 43-47.
- [5] 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(12): 4-9.
- [6] 孙耀华, 仲伟周. 基于LMDI的能源富集地区碳排放影响因素研究 [J]. *软科学*, 2014(6): 131-135.
- [7] 王莉叶, 叶兴鹏, 庞家幸, 等. 基于LMDI的能源消费碳排放因素分解及情景分析: 以兰州市为例 [J]. *生态经济*, 2019(9): 38-44.
- [8] KAYA Yoichi. Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios [R]. Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC, Paris, 1989.
- [9] 省级温室气体清单编写组. 省级温室气体清单编制指南 [M]. 2010.

Study on the influencing factors of carbon emissions from energy consumption based on LMDI method: taking Tangshan City as an example

LIANG Qidi, FENG Xiangzhao, DU Xiaolin, ZHAO Mengxue, WANG Min

(Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China)

Abstract: As the city with the most concentrated steel and coke production capacity in China, Tangshan City has an overweight industrial structure, and its energy consumption structure is dominated by coal, the pressure for reducing greenhouse gas emissions is huge. This paper analyses the change characteristics of energy consumption and carbon emission in Tangshan City from 2010 to 2017, then the LMDI decomposition method was used to decompose the carbon emission factors of energy consumption in Tangshan City. It is found that economic development is the main driving factor for the carbon emission growth, population growth also contributes to carbon emissions, and energy intensity was largely suppressed the increase in carbon emissions, although the industrial structure and energy structure also play a certain role in restraining, the impacts are quite limited. Tangshan City should continue to promote the adjustment of energy structure, reduce the total coal consumption and improve the utilization rate of clean energy, optimize the industrial structure, continue to promote the resolution of excess capacity of steel and coke, encourage and promote the development of the tertiary industry and strategic emerging industries, and change to the green and low-carbon development mode.

Keywords: LMDI decomposition method; carbon emission; low-carbon development