

# 北京城市去煤炭化过程及其驱动因素解析

杨敏, 张鹏鹏, 张力小, 郝岩

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

**摘要:**去煤炭化既是能源转型的重要路径,也是能源转型的主要结果。经过20多年的努力,北京市煤炭消费量得到有效控制。系统分析北京市1995—2017年煤炭消费动态变化过程,并利用LMDI方法对2005—2017年的煤炭消费进行分解。结果表明:(1)研究期内北京市煤炭消费相对量(能源结构中的占比)持续下降,绝对量自2005年开始下降,2017年仅有350.5万tce,降幅为83.8%,去煤炭化效果显著。(2)影响因素方面,除经济规模效应外,能源结构、能耗强度与经济结构等因素变化对煤炭消费增长均有抑制作用。在去煤炭化前期经济结构调整贡献较大,后期主要由能源结构改善驱动。(3)分行业而言,电力、热力部门燃煤效率提高、煤改电、煤改气策略实施以及重工业外迁,是实现煤炭消费量削减的关键因素。(4)北京市去煤炭化过程虽对我国其他城市有一定参考作用,但因其自身具有特殊性,较难复制到其他地区。

**关键词:**能源转型;去煤炭化;LMDI;驱动因素

作为世界上最大的煤炭生产国与消费国<sup>[1]</sup>, 廉价易得的煤炭供应在支撑中国经济快速发展的同时,也带来了严重的大气污染问题,二者在时空分布上存在高度的一致性。为了解决大气污染问题,国务院于2013年发布了《大气污染防治行动计划》,强调必须严格控制煤炭消费总量,到2017年煤炭在全国能源消费总量中的比例降至65%以下。作为北方最大的经济区,京津冀及周边省份是大气污染严重地区,也是我国煤炭消费集中地,单位国土面积煤炭消费量是全国平均水平的4倍以上<sup>[2,3]</sup>。而首都北京由于其特殊的政治、经济和文化地位,无疑是大气污染攻坚战和煤炭消费量削减的核心区域。北京市对绿色、可持续发展理念的践行,也将对全国其他地区产生重要的示范和推动作用。

“能源转型”(Energy Transition)概念最早可追溯至20世纪80年代初期德国科学院出版的《能源转型:没有石油与铀的增长与繁荣》一书。目前国内外关于能源转型概念和内涵的论述聚焦于两方面:一类是从能源种类的变化来阐释,认为新能源的大量使用是能源转型的标志性开始<sup>[4,5]</sup>;另一类是从能源结构的调整来定义,强调能源转型过程包含了一系列能源生产结构和消费结构的变化<sup>[6-8]</sup>。世界能源理事会<sup>[9]</sup>将能源转型定义为:“可再生能源比例上升,化石能源淘汰等引起的能源结构发生根本性改变”。由此可见,去煤炭化既是能源转型的重要路径,也是能源转型的主要结果,许多发达国家如英国、德国和美国等都曾经历这一过程。20世纪60年代,英国煤炭消费占比为60%左右。为了

收稿日期:2020-02-01;修订日期:2020-06-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505703);国家自然科学基金委国际合作与交流项目(71861137001);国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目(51721093)

作者简介:杨敏(1995-),女,云南德宏人,硕士,主要从事能源转型及其资源环境影响研究。

E-mail: yangmin2017@mail.bnu.edu.cn

通讯作者:张力小(1977-),男,山东临沂人,博士,教授,主要从事城市生态系统分析与协同管理研究。

E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

应对能源危机与气候变化问题,英国大力发展可再生能源,削减煤炭消费,到2016年煤炭在一次能源结构中的比例已不足6%<sup>[10,11]</sup>。德国通过鼓励可再生能源开发,促使煤炭在一次能源中的占比降至25%以下<sup>[12]</sup>,而美国通过页岩气革命也使煤炭比例从2000年的25%降至2014年的20%<sup>[13]</sup>。国际上普遍认为,发展可再生能源、降低化石燃料在能源结构中的比例是实现能源转型的有效途径。

驱动因素分析是能源转型理论与实践研究的重要内容,而分解分析方法是其中最为重要的方法之一。自20世纪70年代被首次用于工业能源需求变化的影响因素分析以来<sup>[14]</sup>,该方法体系逐渐成熟,并被广泛用于能源消费及其相关碳排放驱动因素分析中。目前应用较为广泛的分解方法主要有两种,分别是结构分解分析法(Structural Decomposition Analysis, SDA)和指数分解方法(Index Decomposition Analysis, IDA),两种方法在数据要求和应用领域上各有不同。其中,SDA以投入产出模型为基础,考虑直接需求和间接需求的影响效应,能够对行业间的相互作用进行细致分析<sup>[15-17]</sup>。例如,Xie<sup>[18]</sup>利用SDA方法解析1992—2010中国能源消费的主要驱动因素,Zhang等<sup>[19]</sup>针对北京市1987—2010年能源消费变化进行结构分解分析。由于中国相关投入产出表每逢2、7年份编制调查表,逢0、5年份编制延长表,更新周期较长,所以难以获取最新年份的数据。IDA相较于SDA来说,数据获取较为容易,能够进行长时间、连续序列的分析比较<sup>[20-25]</sup>。如孙倩等<sup>[26]</sup>对城市2010—2016年能源消费总量进行分解,李慧芳等<sup>[27]</sup>对2006—2015年中国能耗变动影响因素进行了分析。由于近年来北京市能源消费变化显著,为了探究煤炭消费影响因素的变化规律,本文将采用指数分解中的对数平均迪氏指数方法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)对煤炭消费变化进行分解分析。

煤炭曾是北京城市生产、生活的重要能源。元代《析津志》记载,北京“城中内外经纪之人,每至九月间买牛装车,往西山窑头载取煤炭”。当然,大量煤炭的燃烧也是造成北京大气污染的主要原因。为治理大气环境污染,北京市颁布了一系列的政策和措施,对煤炭消费进行管控。1998年北京市发布《北京市人民政府关于采取紧急措施控制北京大气污染的通告》,要求推进低硫煤使用,并提出建设无煤区;2013年政府部门出台了《北京市2013—2017年清洁空气行动计划》,计划未来5年内将煤炭在能源结构中的比例降至10%以下<sup>[28]</sup>。本文将系统分析北京市1995年以来的煤炭消费总量与结构变化特征,并利用LMDI方法识别北京市煤炭消费总量下降过程(2005年开始)的主要驱动因素以及重点行业,为北京市乃至全国其他地区能源转型提供量化分析依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 桑基图

桑基图(Sankey Diagram)基于能量守恒原理,能够清晰直观地将能源供给与需求以及加工转换过程中的能源流动变化呈现出来。目前桑基图已经被广泛应用于能源系统的分析与展示<sup>[29-32]</sup>。本文将煤炭的流动划分为三个阶段,即(1)煤炭供给,(2)煤炭加工转换,(3)煤炭在各部门的终端消费。在桑基图中,线条的宽度表示煤炭流动过程数值的大小,其中,煤炭的供给主要包括本地生产和外地调入两个部分,一部分煤炭流入系统后直接用于服务业、工业等部门的终端消费,还有一部分煤炭用于加工转换,产出电力、热力等二次能源后再被终端消费部门利用。

## 1.2 LMDI分解模型

LMDI分解模型能够针对长时间序列的对象进行因素分解分析且不存在不能解释的余项，因而分解结果具有较强的说服力。这一方法也被广泛地应用于能源消费的影响因素分解研究中<sup>[33-35]</sup>。研究时段 $t$ 的煤炭消费量可通过如下公式进行分解：

$$C = \sum C_i = \sum \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E_i}{G_i} \times \frac{G_i}{GT} \times GT \quad (1)$$

式中： $C$ 为煤炭消费量（万tce）； $C_i$ 为 $i$ 行业煤炭消费量（万tce）； $E_i$ 为 $i$ 行业能源消费量（万tce）； $G_i$ 为 $i$ 行业生产总值（亿元）； $GT$ 为北京市地区生产总值（亿元）。令 $CE_i = \frac{C_i}{E_i}$ 表示 $i$ 行业煤炭消费量在能源消费总量中的占比； $EG_i = \frac{E_i}{G_i}$ 表示 $i$ 行业的能源消费强度； $GGT_i = \frac{G_i}{GT}$ 表示 $i$ 行业产值在北京市地区生产总值中所占的比例。式（1）可进一步表示为：

$$C = \sum CE_i \times EG_i \times GGT_i \times GT \quad (2)$$

记第0年煤炭消费量为 $C^0$ ，第 $t$ 年煤炭消费量为 $C^t$ ，变化量为 $\Delta C_{tot}$ ，利用LMDI加和分解法对式（2）进行分解，则煤炭消费变化量可以表示为：

$$\Delta C_{tot} = \Delta C_{CE} + \Delta C_{EG} + \Delta C_{GGT} + \Delta C_{GT} \quad (3)$$

其中：

$$\Delta C_{CE} = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln(C_i^t) - \ln(C_i^0)} \ln \left( \frac{CE_i^t}{CE_i^0} \right) \quad (4)$$

$$\Delta C_{EG} = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln(C_i^t) - \ln(C_i^0)} \ln \left( \frac{EG_i^t}{EG_i^0} \right) \quad (5)$$

$$\Delta C_{GGT} = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln(C_i^t) - \ln(C_i^0)} \ln \left( \frac{GGT_i^t}{GGT_i^0} \right) \quad (6)$$

$$\Delta C_{GT} = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln(C_i^t) - \ln(C_i^0)} \ln \left( \frac{GT^t}{GT^0} \right) \quad (7)$$

## 1.3 数据来源

各个行业产值以及北京地区生产总值等数据主要来自于《北京统计年鉴》。为了消除价格变动对研究结果的影响，经济指标以2005年可比价格表示；能源数据主要来自于《中国能源统计年鉴》《北京统计年鉴》中的能源平衡表、分行业能源消费总量和主要能源品种消费量等，并将单位统一折算为万t标准煤（万tce）。

## 2 结果分析

### 2.1 北京市煤炭消费总量变化

从总体上来看，1995—2017年间北京市地区生产总值持续快速增长，在这一时期，能源消费总量与地区生产总值呈现基本一致的增长趋势（图1），经济增长与能源消费耦合特征明显。但是从能源结构来看，电力、天然气消费比例持续增加，相应的煤炭消费占比下降，呈现明显的三阶段特征。

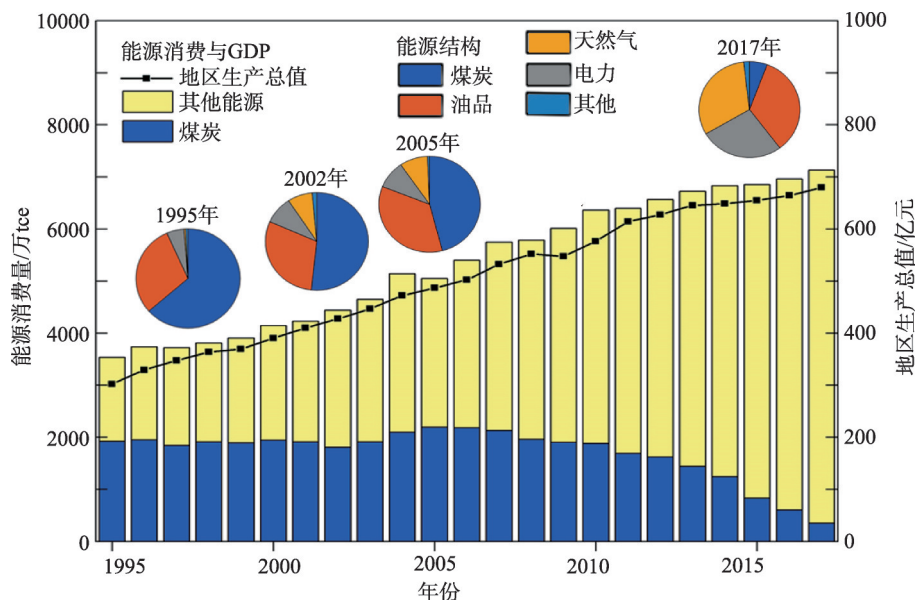


图1 1995—2017年北京市能源消费量与地区生产总值

Fig. 1 Energy consumption and GDP in Beijing, 1995-2017

从1995年开始,北京告别了20多年拉闸限电的历史,与此同时能源与经济也呈现出较快的增长趋势。北京市GDP从1995年的301.9亿元增长至2002年的427.3亿元,与此同时,能源消费总量从1995年的3533.3万tce增长至2002年的4436.1万tce。但从1998年开始,由于北京市颁布了一系列大气污染控制法律法规,这一时期,北京市煤炭消费量基本维持在1800万~1900万tce的范围内。为了满足不断增长的能源需求,天然气、电力消费量在这一阶段不断增加,使得煤炭消费占比从64%下降至52%,但其在能源消费总量中的占比仍然高达一半以上。

2002—2005年是中国加入WTO与北京奥运会初期建设的叠加期,煤炭消费量在这一时期出现小幅增长,2005年消费量达到2162.1万tce。虽然煤炭消费量有所增加,但同期油品、天然气、电力消费量分别增加了613.1万tce、123.9万tce和149.8万tce,因此煤炭在能源结构中的占比仍在持续下降,到2005年降为46%。由此可见,1995—2005年间,在煤炭消费总量维持稳定或者略有上升的情况下,消费占比在不断下降,能源相对结构上呈现出去煤炭化特征。

2005年开始,北京市煤炭消费的绝对量开始持续下降,到2017年北京市煤炭消费量以年均14%的速率减少至350.5万tce。与此同时,陕京二、三、四线输气工程先后建成投产,四大燃气热电中心建设持续推进,北京市外调电力不断增加,天然气、电力消费量快速上升,煤炭在能源结构中的占比逐渐下降至2017年的6%。这一时期,北京市真正从数量上开始了去煤炭化过程。

## 2.2 北京市煤炭消费结构变化

伴随着消费总量的变化,煤炭供需结构也发生了显著改变(图2)。从供应端来看,本地煤炭生产量除了在2002—2005年有短暂的上升外,总体上北京市本地的煤炭生产量逐年减少,且下降趋势明显。1995年本地煤炭生产量为711.0万tce,到了2017年,本地煤炭生产量仅为1995年的四分之一(182.2万tce)。为了满足北京市能源需求,煤炭外调

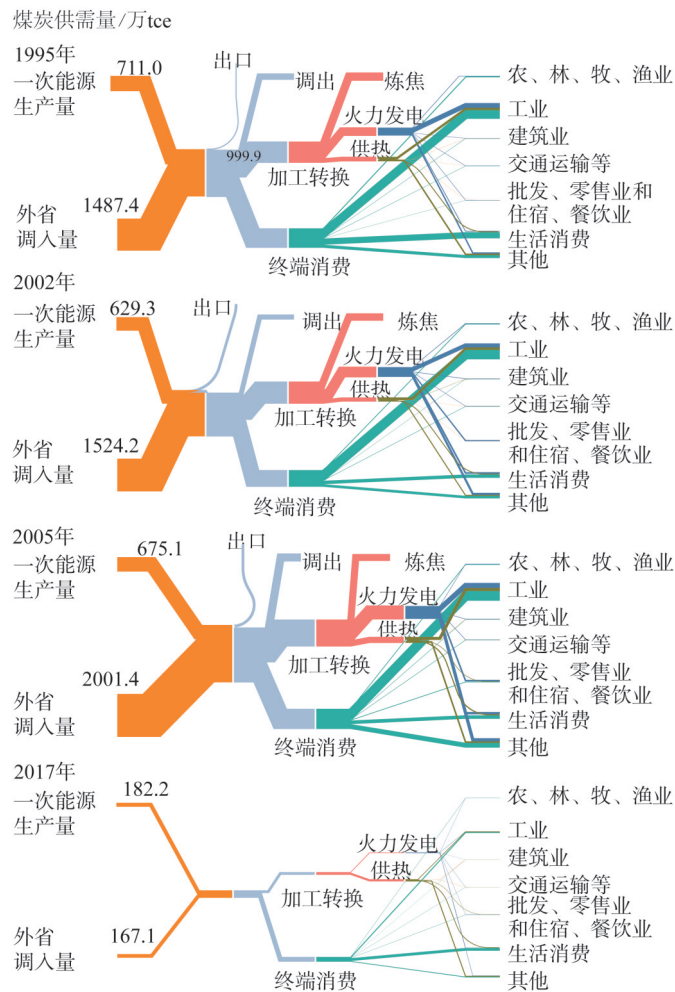


图2 北京市煤炭消费能流图

Fig. 2 Flow chart of coal consumption in Beijing

量在1995—2005年间有所上升,从1487.4万tce增加至2001.4万tce。2005年后北京市煤炭消费总量逐年减少,对外地调入需求也持续下降,2017年调入量为167.1万tce,不足2005年的十分之一。

从需求端来看,北京市一部分煤炭直接用于终端消费,还有一部分煤炭先经过电力、热力部门的加工转换再被终端消费部门利用。1995—2005年间用于加工转换过程的煤炭逐年增加,这一部分煤炭消费占煤炭消费总量的50%以上,主要用于供热、火力发电和炼焦。2005年后随着陕京天然气管道的建成和天然气发电项目的推进,用于加工转换过程的煤炭从2005年的1253.1万tce下降至2017年的124.9万tce。由于首钢搬迁、焦化厂停产,用于炼焦的煤炭消费在2010年以后基本为零。煤炭消费的重心向终端消费部门转移,到2017年终端消费部门利用量占比达到64%。终端消费部门中,工业长期以来一直是煤炭消费的重要部门,消费占比高达44%以上,但是随着近年来一系列产业结构调整措施的出台以及煤控政策的实施,2005年开始工业部门煤炭消费量呈现下降趋势,到2017年工业部门的终端煤炭消费共削减了412.6万tce。相应地,居民生活消费在北京

市煤炭消费中也占据了重要位置,2017年居民煤炭消费仍有129.2万tce,占北京市煤炭终端消费量的58%,尽管北京市近年来一直大力实施居民生活“煤改电、煤改气”项目,但是由于农村地区管道、线路架设困难,在北京郊区农村仍有一部分居民将煤炭作为主要家庭燃料。

### 2.3 北京市去煤炭化因素分解结果

由分解结果来看,2005—2017年间北京市经济部门煤炭消费量减少1804.3万tce。其中,能源结构调整对去煤炭化过程的贡献为-1816.5万tce,能耗强度变化促使煤炭消费量减少了555.5万tce,经济结构调整削减煤炭消费量279.5万tce,而经济发展是促进北京市煤炭消费增长的主要因素,经济规模的不断扩大使煤炭消费量增加847.2万tce。

分阶段来看,除了能源结构改善对北京市去煤炭化的影响逐渐增加外,其余三个因素的影响都在逐渐减小。或者说,近几年的煤炭下降主要是靠能源结构调整驱动,而节能减排与产业结构调整潜力已经挖掘殆尽。同时,也可以看到随着经济增速放缓,经济发展对煤炭消费的正向拉动效应也逐渐减弱。由图3可以看出,产业结构调整在北京市去煤炭化前期发挥了重要作用,2005—2009年间,产业结构调整使北京市煤炭消费量下降498.7万tce,对这一时期煤炭消费量减少的贡献率为157%。与此同时,在2005—2017年间的三个阶段,能源结构变化对去煤炭化的贡献逐渐增加,使北京市煤炭消费量下降438.3万tce、726.0万tce、895.8万tce,分别占不同阶段三个因素引起的下降量的34%、75%、78%。由此可见,北京市兴建天然气输气工程、大力推进煤改电和煤改气工程等一系列举措对于控制煤炭消费量起到重要作用。另外,能耗强度的下降也对去煤炭化起到了促进作用,但是在后期相较于能源结构调整来说略显动力不足,所以需要进一步改善技术水平以提高能耗强度对煤炭消费控制的贡献。

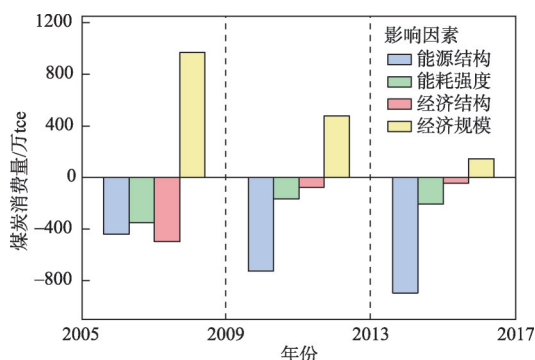


图3 北京市去煤炭化影响因素分析

Fig. 3 Contributions of four driving factors to the de-coal process in Beijing

### 2.4 去煤炭化行业分解结果

图4显示的是不同行业对煤炭消费量削减的贡献。其中图4a是能源结构调整引起的各行业煤炭消费量变化。可以看出,除了2005—2009年间黑色金属冶炼及压延加工业的能源结构变化使煤炭消费量增加外,其余各行业的煤炭消费量在能源结构中的比例均有不同程度的下降。其中电力、热力的生产和供应业的能源结构调整,在三个阶段分别使煤炭消费量减少170.9万tce、360.6万tce和634.5万tce。特别是在2013—2017年间,电力、热力的生产和供应业能源结构调整引起的煤炭消费减少量占有行业减少量的71%。由此可见,北京市建设四大燃气热电中心、关停燃煤发电机组等煤炭消费控制举措对于煤炭消费量的削减发挥了重要作用。图4b显示的是各行业能耗强度变化引起的煤炭消费量变化,从总体上来看各行业在研究期内的能耗强度均有所下降,对去煤炭化起到促进作用,其中电力、热力的生产和供应业仍然是对去煤炭化贡献最大的行业。

分年份来看,除了黑色金属冶炼及压延加工业外,其余各行业在2005—2009年由于

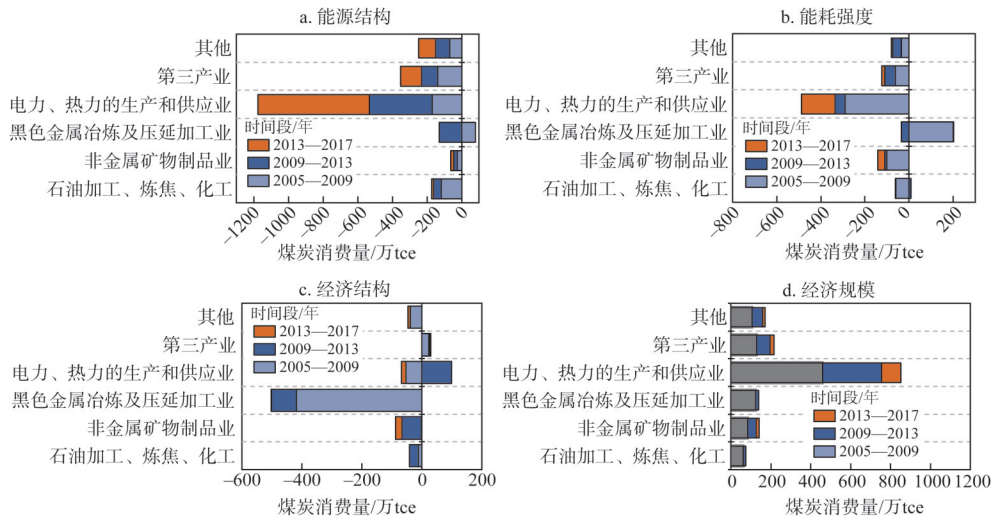


图4 北京市分部门煤炭消费变化分解分析

Fig. 4 Contributions of the change in each sector to coal consumption in Beijing

能耗强度下降引起的煤炭消费量下降均高于其他年份,表明在去煤炭化前期能源使用效率的提高是控制煤炭消费量的重要举措。产业结构调整,特别是2005—2009年首钢搬迁等举措使得黑色金属冶炼及压延加工业的煤炭消费量减少,占经济结构调整引起的煤炭消费减少量的80%(图4c)。经济规模效应始终是煤炭消费最大的促进因素,从图4d可以看出,各行业在三个阶段的经济增长均使煤炭消费量有不同程度的上升,并且在2005—2009年间引起的增加量相较于其他阶段而言更为显著,而在所有行业中,电力、热力的生产和供应业引起的煤炭消费增加量约占经济规模引起的煤炭消费增加量的50%,说明电力、热力的生产和供应业作为能源密集型行业,在去煤炭化过程中扮演着重要的角色,合理推进这一行业的去煤炭化进程,对于整个城市的煤炭消费控制有着重要意义。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

去煤炭化既是能源转型的重要路径,也是能源转型的主要结果。本文系统分析了北京市22年来煤炭消费总量及结构变化特征,利用LMDI模型从经济规模、能源结构、经济结构、能耗强度等四个方面分析不同因素对去煤炭化过程的影响。

研究期内北京市去煤炭化过程呈现相对量下降(1995—2017年)与绝对量下降(2005—2017年)两个阶段,煤炭消费的绝对量从2005年的2162.1万tce下降到2017年的350.5万tce,年均下降速率为14%。从煤炭消费结构来看,中间加工转换过程中电力、热力的生产、炼焦以及终端消费中的工业部门对北京市煤炭消费控制的贡献最大,三者于2005—2017年的下降量占下降总量的72%。

从因素分解结果来看,经济增长是促进煤炭消费量增加的主要正向因素。对北京市而言,经济结构调整在去煤炭化前期对煤炭消费起到了重要抑制作用,后期主要是能源结构调整推动去煤炭化进程,能耗强度的下降也驱动了北京市煤炭消费量的下降。分行

业来看, 电力、热力的生产和供应业的能耗强度降低、能源结构调整以及经济结构中对黑色金属冶炼及压延加工业生产规模的压缩和调整是北京市煤炭消费量下降的主要因素, 相关因素的综合作用极大地抵消了经济规模扩大对煤炭消费量的正向促进作用。

### 3.2 讨论

上述研究结果表明, 20多年以来在一系列政策、措施的推动下, 北京市去煤炭化成效显著, 产业结构调整、能源结构优化以及节能减排技术改进等在不同阶段发挥了重要作用。同时, 也可以看到经济结构调整在去煤炭化前期较大程度地抑制了煤炭消费增长, 北京市的产业从炼钢、炼焦等工业部门逐渐转向第三产业, 高能耗产业的搬迁和转型能够在较短的时间内削减煤炭消费量, 去煤炭化过程对相关政策敏感, 但持续性差。随着后期经济结构调整、产业转型升级逐步趋向稳定, 去煤炭化作用就会趋于弱化, 能源结构的调整、能耗强度的降低对去煤炭化过程的作用日益凸显。因此, 进一步推进煤改气、煤改电工程, 大力开发太阳能、热能等可再生能源, 通过新技术的开发进一步提升能源利用效率, 是在不断完善经济结构的同时需要进一步努力的关键所在。但是, 我们也必须清晰地看到, 北京市的去煤炭化过程对其他城市虽然具有一定的参照作用, 也有其自身的特殊性, 不能盲目照搬。由于首都独特的政治地位和发展要求, 北京市实施了较大规模的产业搬迁以及“煤改电”“煤改气”等项目, 这些经验对于我国其他大部分城市来说很难完全复制。因此, 对其他地区进行煤炭消费变化探究时, 本文中的相关因素分解方法不一定完全适用, 应该在本文方法、思路基础上结合各地区的政策实施情况、措施推动效果来合理选取与煤炭消费密切相关的因素进行研究。但是, 就目前来看, 积极推进产业结构升级、不断优化能源结构、进行节能减排技术升级改造, 依然是各地区减少煤炭使用、降低煤炭污染的必由之路, 各地区应根据自身经济发展、资源禀赋等特点, 探索个性化的去煤炭化与煤炭清洁利用道路。

### 参考文献(References):

- [1] 赵珊. 中国煤炭资源现状及建议. 广州化工, 2014, 42(15): 52-53. [ZHAO S. The status and suggestions of coal resources in China. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(15): 52-53.]
- [2] 冯博, 王雪青. 考虑雾霾效应的京津冀地区能源效率实证研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 1-7. [FENG B, WANG X Q. Research on energy efficiency considering the haze effect in Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(10): 1-7.]
- [3] 章轲. 专家解读三年行动计划正研究制定全国运输结构调整方案. <https://www.yicai.com/news/5436883.html>, 2018-07-05. [ZHANG K. Experts interpretation the three-year action plan study and formulate a plan for adjusting the national transport structure. <https://www.yicai.com/news/5436883.html>, 2018-07-05.]
- [4] SOLOMON B D, KRISHNA K. The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. Energy Policy, 2011, 39(11): 7422-7431.
- [5] HE J K, TENG F, QI Y. Towards a new climate economics: Research areas and prospects. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2015, 13(1): 1-9.
- [6] FOUQUET R. Historical energy transitions: Speed, prices and system transformation. Energy Research & Social Science, 2016, 22: 7-12.
- [7] 舟丹. 全球第三次能源转型的特征. 中外能源, 2017, 22(9): 89. [ZHOU D. Characteristics of the third global energy transition. Sino-Global Energy, 2017, 22(9): 89.]
- [8] FOUQUET R, PEARSON P J G. Past and prospective energy transitions: Insights from history. Energy Policy, 2012, 50: 1-7.
- [9] 世界能源理事会. 全球能源转型(2014). <https://www.atkearney.com/documents/10192/5293225/Global+Energy+Transi->



- tions, 2018-08-01. [World Energy Council. Global energy transition (2014). <https://www.atkearney.com/documents/10192/5293225/Global+Energy+Transitions,2018-08-01>.]
- [10] 吴磊, 詹红兵. 国际能源转型与中国能源革命. 云南大学学报: 社会科学版, 2018, 17(3): 116-127. [WU L, ZHAN H B. International energy transitions and energy revolution in China. Journal of Yunnan University: Social Sciences Edition, 2018, 17(3): 116-127.]
- [11] 刘坚, 任东明. 欧盟能源转型的路径及对我国的启示. 中国能源, 2013, 35(12): 8-11. [LIU J, REN D M. The path of European Union energy transformation and its enlightenment to China. Energy of China, 2013, 35(12): 8-11.]
- [12] 孙宁鸿, THOMAS S D. 德国实现能源转型的措施与挑战. 中国能源, 2012, 34(3): 11-14. [SUN N H, THOMAS S D. Measures and challenges of Germany's energy transformation. Energy of China, 2012, 34(3): 11-14.]
- [13] 朱彤. 德国与美国当前能源转型进程比较分析. 国际石油经济, 2016, 24(5): 9-16. [ZHU T. Comparison analysis on current energy transition in Germany and the United States. International Petroleum Economics, 2016, 24(5): 9-16.]
- [14] ANG B W, ZHANG F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. Energy, 2000, 25(12): 1149-1176.
- [15] CANSINO J M, ROCIO R, MANUEL O. Main drivers of changes in CO<sub>2</sub> emissions in the Spanish economy: A structural decomposition analysis. Energy Policy, 2016, 89: 150-159.
- [16] 李新运, 吴学猛, 马俏俏. 我国行业碳排放量测算及影响因素的结构分解分析. 统计研究, 2014, 31(1): 56-62. [LI X Y, WU X M, MA Q Q. The measure of China's industry carbon emissions and the structural decomposition analysis of influencing factors. Statistical Research, 2014, 31(1): 56-62.]
- [17] 关军, 蒋立红, 张智慧. 我国建筑业物化能增长的结构分解分析. 环境科学研究, 2016, 29(11): 1718-1724. [GUAN J, JIANG L H, ZHANG Z H. Structural decomposition analysis of the growth in the Chinese construction sector's embodied energy. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(11): 1718-1724.]
- [18] XIE S C. The driving forces of China's energy use from 1992 to 2010: An empirical study of input-output and structural decomposition analysis. Energy Policy, 2014, 73(10): 401-415.
- [19] ZHANG P P, ZHANG L X, TIAN X, et al. Urban energy transition in China: Insights from trends, socioeconomic drivers, and environmental impacts of Beijing. Energy Policy, 2018, 117(1): 173-183.
- [20] OLANREWAJU O A, JIMOH A A, KHOLOPANE P A. Assessing the energy potential in the South African industry: A combined IDA- ANN- DEA (Index Decomposition Analysis- Artificial Neural Network- Data Envelopment Analysis) model. Energy, 2013, 63: 225-232.
- [21] ZHA D L, ZHOU D Q, ZHOU P. Driving forces of residential CO<sub>2</sub> emissions in urban and rural China: An index decomposition analysis. Energy Policy, 2010, 38(7): 3377-3383.
- [22] XU X Y, ANG B W. Index decomposition analysis applied to CO<sub>2</sub> emission studies. Ecological Economics, 2013, 93(5): 313-329.
- [23] ANG B W, XU X Y, SU B. Multi-country comparisons of energy performance: The index decomposition analysis approach. Energy Economics, 2015, 47(1): 68-76.
- [24] 崔盼盼, 张艳平, 张丽君, 等. 中国省域隐含碳排放及其驱动机理时空演变分析. 自然资源学报, 2018, 33(5): 879-892. [CUI P P, ZHANG Y P, ZHANG L J, et al. Analysis on the spatial and temporal evolution of indirect carbon emissions and its driving mechanism in China. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 879-892.]
- [25] 李兰兰, 徐婷婷, 李方一, 等. 中国居民天然气消费重心迁移路径及增长动因分解. 自然资源学报, 2017, 32(4): 606-619. [LI L L, XU T T, LI F Y, et al. Gravity center evolution paths and growth factor decomposition of residential natural gas consumption in China. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 606-619.]
- [26] 孙倩, 汪鹏, 蔡国田, 等. 基于LMDI的城市能源消费总量指标评价模型研究. 生态经济, 2019, 35(6): 98-105. [SUN Q, WANG P, CAI G T, et al. Research on evaluation model of urban energy consumption total indicators based on LMDI. Ecological Economy, 2019, 35(6): 98-105.]
- [27] 李慧芳, 聂锐. 中国能耗变动影响因素的LMDI分解. 统计与决策, 2018, 34(13): 135-138. [LI H F, NEI R. LMDI decomposition of influencing factors of energy consumption changes in China. Statistics and Decision, 2018, 34(13): 135-138.]
- [28] 北京市人民政府. 北京市人民政府关于印发北京市2013—2017年清洁空气行动计划的通知. <http://www.beijing.gov.cn/>

- gov.cn/zhengce/zfwj/zfwj/szfwj/201905/t20190523\_72673.html, 2013-09-12. [The People's Government of Beijing Municipality. Notice of the Beijing municipal people's government on the issuance of the clean air action plan for Beijing from 2013 to 2017. [http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zfwj/zfwj/szfwj/201905/t20190523\\_72673.html](http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zfwj/zfwj/szfwj/201905/t20190523_72673.html), 2013-09-12.]
- [29] CULLEN J M, ALLWOOD J M. The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel to service. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 75-81.
- [30] MA L, ALLWOOD J M, CULLEN J M, et al. The use of energy in China: Tracing the flow of energy from primary source to demand drivers. *Energy*, 2012, 40(1): 174-188.
- [31] ZHANG M, WANG W. Using an energy flow chart to analyze Jiangsu province's energy balance. *Renewable Energy*, 2012, 39(1): 307-312.
- [32] CHONG C H, MA L, LI Z, et al. Logarithmic mean divisia index (LMDI) decomposition of coal consumption in China based on the energy allocation diagram of coal flows. *Energy*, 2015, 85(1): 366-378.
- [33] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [34] 张伟, 张金锁, 孙再罗. 基于LMDI指数分析的中国煤炭消费增长分解研究. *中国矿业*, 2014, 23(8): 42-45. [ZHANG W, ZHANG J S, SUN Z L. Decomposition research of the coal consumption increment of China based on LMDI. *China Mining Magazine*, 2014, 23(8): 52-45.]
- [35] 章景皓. 基于能流图和LMDI的区域能源消费分解方法及案例研究. 北京: 清华大学, 2015. [ZHANG J H. Research on decomposition method and case studies of regional energy consumption growth based on energy flow diagram and LMDI. Beijing: Tsinghua University, 2015.]

## The de-coal process and its driving forces in Beijing

YANG Min, ZHANG Peng-peng, ZHANG Li-xiao, HAO Yan

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** De-coal process has been not only the significant energy transition path, but also the key result of that. After more than 20 years of efforts, coal consumption in Beijing has been effectively controlled. This study systematically analyzed the dynamic changes of coal consumption in Beijing from 1995 to 2017 and used the LMDI method to decompose the changes in coal consumption from 2005 to 2017. The results showed that: (1) Coal consumption began to decline in 2005, reaching 3.5 million tce in 2017 or a decrease of 84%, which means that the effect of de-coal process was remarkable. (2) In terms of driving factors, except the economic scale effect, the other three drivers had negative effects on the growth of coal consumption. In the early stage of de-coal process, economic structure adjustment played an important role in curbing coal consumption, and the change of energy structure drove the later de-coal process. (3) From the perspective of different sectors, the improvements of energy intensity and energy structure in the sector of electricity and hot water production and supply, and the relocation of metallurgy were the main contributor to the decline of coal consumption in Beijing. (4) Beijing's de-coal process had some reference values for other cities in China, but it cannot be blindly copied because of its own special characteristics.

**Keywords:** energy transition; de-coal; LMDI; driving force