

能源结构、雾霾治理与可持续增长

陈诗一 陈登科*

摘要:中国雾霾频发引起了国内外的广泛关注,与此同时经济发展进入“新常态”阶段,经济下行压力增加。在此背景下,雾霾的形成机制是什么以及如何实现治霾和增长双赢的目标是亟需回答的问题。为此,本文综合运用联立方程组模型与增长核算分析框架测算了主要污染物对雾霾的贡献度,并在此基础上进一步模拟了实现治霾和经济增长双赢目标的能源结构演化路径与相应的政策选择。研究发现:(1)煤炭消耗是雾霾主要污染物 $PM_{2.5}$ 的首要贡献者;(2)为同时实现2025年经济增长率保持6.5%和 $PM_{2.5}$ 浓度在2013年的基础上下降30%的大气防治双赢目标,工业耗煤占一次工业能源消费的比重须从2013年的68.5%下降到2025年的50%;(3)能源结构的合理演化不会自发形成,需要政府进行合理的财政补贴。

关键词:能源结构;治霾和经济增长双赢;财政补贴

一、问题的提出

如何在降低雾霾浓度、改善环境质量的同时,保持经济增长在合理区间运行,是当前政府、学界共同面临的重大现实课题。改革开放以来,中国经济迅猛发展,一跃成为世界第二大经济体,但与之相伴的是,生态环境恶化问题日趋严重。特别是近年来,全国各地雾霾污染事件频发^①,引起了国内社会各界,甚至是国际社会的广泛关注。事实上,始于2013年的全国大气霾污染虽经国家和地方政府的多方治理有所减缓,但是并没有得到根本解决。2015年11月,沈阳市 $PM_{2.5}$ 浓度一度达到1155微克/立方米,局地甚至突破1400微克/立方米,北京市 $PM_{2.5}$ 浓度也一

*陈诗一,复旦大学经济学院,邮政编码:210043,电子信箱:shiyichen@fudan.edu.cn;陈登科(通讯作者),复旦大学经济学院,邮政编码:210043,电子信箱:13110680005@fudan.edu.cn。

作者感谢教育部长江学者奖励计划、国家杰出青年科学基金(71525006)、上海市领军人才和复旦大学卓识人才计划的资助。本文也是国家社科基金重大项目“雾霾治理与经济发展方式转变机制研究”(14ZDB144)的阶段性成果。感谢匿名审稿人的意见,文责自负。

①由于雾霾成分较为复杂,同时结合数据的可得性,本文雾霾浓度主要是指 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 这两种对人体健康损害较大、社会关注度较高的污染物浓度。

度飙升到1000微克/立方米,而世界卫生组织(WHO)所公布的对人体健康的无害标准只有25微克/立方米。严重的雾霾污染仍然是老百姓的“心肺之患”。雾霾不仅严重威胁了公众的生活和健康,而且对社会经济产生诸多负面影响。雾霾已经成为中国吸引外商来华投资、引进国外人才以及发展旅游服务业等方面的重要障碍,其影响远超过经济利益损失本身(魏巍贤、马喜立,2015)。由此可见,雾霾治理刻不容缓。

中国雾霾具有爆发频率高、影响范围广的特点,这给雾霾治理带来了极大挑战。以2013年为例,京津冀、长三角、珠三角地区雾霾天数占全年的1/3以上,100多个大中城市、20个省份均出现了不同程度的雾霾污染天气。除此之外,当前中国经济发展步入“新常态”阶段,经济下行压力不断增大,这也加大了雾霾治理难度。究其原因在于,雾霾治理不仅要应对爆发频率高、影响范围广的问题,而且还要切实考虑到雾霾治理对经济增长的影响。大规模简单地关停“高污染、高耗能、高排放”企业,固然短期内能够在降低雾霾浓度方面产生立竿见影的效果,但也有可能导致部分地区经济增长和行业增长遭遇断崖式下跌,引起工人下岗,影响社会和谐,甚至还有可能诱发社会不稳定因素。有鉴于此,如何实现雾霾浓度下降与经济增长并行的双赢目标是本文尝试回答的核心问题。

科学合理地制定、推行雾霾治理政策,实现雾霾浓度下降与经济增长双赢的目标,离不开对如下两个问题的研究:第一,中国雾霾污染的形成机制是什么,尤其是不同因素对雾霾的贡献率多大以及何种因素是雾霾形成的主要贡献者;第二,从定量的视角分析,降低雾霾浓度将在多大程度上减缓经济增长,以及采取何种方式弥补因雾霾治理而引致的经济增长缺口。

针对第一点,已有文献展开了较为丰富的经验研究。其中,绿色和平组织的研究就有一定的代表性,其研究发现,燃煤对 $PM_{2.5}$ 的贡献率最高,达到49%(马骏等,2013),紧随其后的是汽车燃油,贡献率为16%。图1也进一步支持了该发现。

Hu等(2014)的研究结果显示,包括燃煤和石油在内的化石燃料的燃烧对 $PM_{2.5}$ 的贡献高达60%~70%。郝新东和刘菲(2013)也证明了煤炭消耗是我国雾霾形成的主要因素。何枫和马栋栋(2015)从产业结构的视角探讨了雾霾的来源,发现重工业比重显著增加了雾霾污染天数,重工业化比重每提高1%,雾霾天数将增加1天左右。齐园和张永安(2015)、Han等(2014)以及郭俊华和刘奕玮(2014)亦发现,长期而言,工业发展特别是重工业的膨胀是 $PM_{2.5}$ 居高不下的的重要原因。图2也表明了我国重工业比重越高的城市, $PM_{2.5}$ 浓度也越高。此外,还有学者从空间的视角探讨了雾霾形成机制(向堃、宋德勇,2015;马丽梅、张晓,2014)。然而,关于前文提到的第二个问题的研究,现有文献较少涉及,换言之,如何在进行雾霾治理同时保持经济增长在合理区间运行还尚待回答。针对已有相关文献在这方面所存在的空缺,本文在以下方面展开了创新性的研究:在一个统一的框架内,不仅测算出主要污染物对雾霾贡献率,而且还在此基础上模拟得出将雾霾浓度降至特定水平对主要城市经济增长率的影响,并进一步针对研究

二、模型设定与数据说明

(一) 计量模型设定

结合前文,为实现降低雾霾浓度与保持经济增长双赢目标,需要在一个统一的框架内考察雾霾的形成机制以及雾霾治理对经济增长的影响。结合已有文献关于产出与雾霾影响因素的分析,本文设定如下计量回归模型:

$$\begin{cases} \ln GDP = \alpha_0 + \alpha_1 \ln K + \alpha_2 \ln L + \alpha_3 \ln IC + \varepsilon_1 \\ \ln PM = \beta_0 + \beta_1 \ln IC + \beta_2 \ln LC + \beta_3 \ln Car + \beta_4 \ln BL + \beta_5 \ln GA + \beta_6 \ln CA + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (1)$$

模型(1)中,第一个方程为产出方程, GDP 、 K 与 L 分别表示产出水平、资本存量^①和劳动投入, IC 代表工业煤炭消耗, ε_1 为产出方程误差项;第二个方程为雾霾污染排放方程, PM 为雾霾浓度(包括 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 两类雾霾污染类型), LC 表示生活煤炭消耗, Car 为汽车保有量, BL 、 GA 与 CA 分别代表建筑施工面积、绿化面积与城市面积, ε_2 为雾霾污染排放方程随机扰动项。最后,为了使得变量系数具有更直观的解释,所有变量取自然对数,符号 \ln 表示自然对数(下同)。

不难发现,计量模型(1)通过工业煤炭消耗同时将产出与雾霾浓度联系在一起,使得在一个统一的框架内考察雾霾的形成机制以及雾霾治理对经济增长的影响成为了可能。然而,计量模型(1)没有引入内生变量,并非真正意义上的联立方程组模型。鉴于工业煤炭消耗是同时影响产出与雾霾浓度的关键变量,本文在模型(1)中进一步引入工业煤炭消耗方程,构建了如下联立方程组计量回归模型:

$$\begin{cases} \ln GDP = \alpha_0 + \alpha_1 \ln K + \alpha_2 \ln L + \alpha_3 \ln IC + \varepsilon_1 \\ \ln PM = \beta_0 + \beta_1 \ln IC + \beta_2 \ln LC + \beta_3 \ln Car + \beta_4 \ln BL + \beta_5 \ln GA + \beta_6 \ln CA + \varepsilon_2 \\ \ln IC = \gamma_0 + \gamma_1 \ln HI + \gamma_2 \ln Indus2 + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (2)$$

模型(2)中,最后一个方程为煤炭消耗方程, HI 为重工业总产值, $Indus2$ 表示第二产业占GDP比重, ε_3 是煤炭消耗方程随机扰动项。第一、第二个方程以及符号与模型(1)有着相同的解释。需要说明的是,影响计量模型(2)估计结果准确性的一个因素是工业煤炭消耗 IC 可能存在一定的内生性:一方面,工业煤炭消耗影响产出水平 GDP 与雾霾浓度 PM ;另一方面,产出水平特别是雾霾浓度也会影响工业煤炭的消耗(比如,一些地区通过行政命令关停高煤耗企业,以减少工业煤炭消耗来降低当地雾霾污染)。虽然煤炭消耗方程通过控制重工业总产值以及第二产业比重在一定程度上缓解了前述内生性问题,考虑到结果的稳健性,本文进一步在煤

^①地级市资本存量参考柯善咨和向娟(2012)的做法,由作者根据永续盘存法估算得出。

炭消耗方程中控制了能源禀赋 *Coal_Rich* (用富煤城市来表示能源禀赋,如存在年产量在 500 吨以上的大型煤矿为富煤城市)^①。纳入 *Coal_Rich* 能够较好地缓解内生性的原因在于:一方面,若一地区煤炭资源比较丰富,那么该地区煤炭消耗倾向越高;另一方面,一个地区煤炭资源是否丰富具有很强的外生性,它由自然地理条件所决定,并不受经济发展水平与雾霾浓度的影响。综上,本文构建了如下模型:

$$\begin{cases} \ln GDP = \alpha_0 + \alpha_1 \ln K + \alpha_2 \ln L + \alpha_3 \ln IC + \varepsilon_1 \\ \ln PM = \beta_0 + \beta_1 \ln IC + \beta_2 \ln LC + \beta_3 \ln Car + \beta_4 \ln BL + \beta_5 \ln GA + \beta_6 \ln CA + \varepsilon_2 \\ \ln IC = \gamma_0 + \gamma_1 \ln HI + \gamma_2 \ln Indus2 + \gamma_3 \ln Coal_Rich + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (3)$$

(二)数据说明

综合数据的可得性、准确性以及研究对象的差异性,本文以 2013 年中国 74 个首批 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 监测城市的截面数据为研究样本^②。另外,为进一步测算各类因素对雾霾浓度增加的贡献以及生产投入要素对产出增长的贡献,本文还在基于以上 74 个城市数据进行联立方程组模型估计的基础上,结合 27 个省会城市与 4 个直辖市 2003–2013 年度雾霾和经济历史数据进行增长核算分析。表 1 是前述 74 个城市在 2013 年主要变量的统计描述。

表 1 主要变量统计描述

变量符号	变量名	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$ (微克/立方米)	74	72.16	27.83	26.00	160.00
PM_{10}	PM_{10} (微克/立方米)	74	118.43	50.73	47.00	305.00
GDP	产出(亿元)	74	4855.46	4321.71	304.87	21602.12
K	资本存量(亿元)	72	7790.18	6023.97	1516.13	28776.20
L	单位从业人数(万人)	72	105.36	130.42	5.30	724.40
IC	工业用煤(万吨)	64	2344.06	2649.40	2.30	16174.39
LC	生活用煤(万吨)	54	92.43	194.06	0.00	1347.00
Car	汽车保有量(万辆)	52	105.51	78.70	2.44	426.50
BL	建筑施工面积(万平方米)	65	5494.42	4845.40	0.30	26300.00
GA	绿化面积(公顷)	74	11930.43	11582.49	1462.00	66750.00
CA	城市面积(平方公里)	74	12438.88	11902.09	1455.00	82374.00
HI	重工业产值(亿元)	71	2583.82	2262.53	14.62	10497.97
Indus2	第二产业比例(%)	74	47.79	7.34	22.32	61.92
Coal_Rich	能源禀赋	74	0.31	0.47	0.00	1.00

①本文所使用的 74 个城市样本(2013 年中国 74 个首批 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 监测城市)中,富煤城市有:邢台、石家庄、邯郸、唐山、保定、济南、衡水、廊坊、西安、郑州、天津、乌鲁木齐、太原、沧州、徐州、秦皇岛、呼和浩特、哈尔滨、银川、青岛、承德、张家口和贵阳。值得说明的是,西安市并无年产 500 万吨以上的煤矿,考虑到陕西是我国的产煤大省且本文研究样本中该省的城市仅有西安,本文将西安视为富煤城市。考虑到稳健性,作者还尝试将西安定义为非富煤城市,发现基本不影响回归结果。

②何枫和马栋栋(2015)采用同样的样本,基于 Tobit 模型实证考察了工业化对雾霾污染的影响。

三、实证分析

(一)联立方程组估计结果

表2列出了基于联立方程组模型所得到的估计结果^①。

表2 联立方程组估计结果

	(1)		(2)		(3)	
	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}
产出方程						
资本 ($\ln K$)	0.528*** (0.121)	0.531*** (0.121)	0.427*** (0.117)	0.413*** (0.114)	0.478*** (0.123)	0.464*** (0.118)
劳动 ($\ln L$)	0.260** (0.115)	0.261** (0.115)	0.305*** (0.113)	0.315*** (0.111)	0.283** (0.119)	0.298*** (0.114)
工业用煤 ($\ln IC$)	0.093 (0.058)	0.093 (0.058)	0.307*** (0.081)	0.313*** (0.081)	0.229*** (0.082)	0.229*** (0.082)
常数项 ($Cons$)	8.097*** (1.391)	8.056*** (1.391)	5.617*** (1.596)	5.661*** (1.592)	6.365*** (1.611)	6.484*** (1.593)
排放方程						
工业用煤 ($\ln IC$)	0.066 (0.051)	0.091** (0.044)	0.246*** (0.088)	0.160** (0.073)	0.241*** (0.084)	0.223*** (0.070)
生活用煤 ($\ln LC$)	0.122*** (0.031)	0.121*** (0.027)	0.109*** (0.033)	0.112*** (0.029)	0.093*** (0.032)	0.089*** (0.027)
汽车保有量 ($\ln Car$)	0.070 (0.059)	0.081 (0.051)	0.072 (0.059)	0.080 (0.052)	0.061 (0.056)	0.070 (0.047)
建筑施工面积 ($\ln BL$)	0.055 (0.183)	0.022 (0.160)	0.069 (0.181)	0.033 (0.159)	0.138 (0.173)	0.102 (0.146)
绿化面积 ($\ln GA$)	-0.165 (0.193)	-0.243 (0.168)	-0.230 (0.191)	-0.268 (0.168)	-0.279 (0.183)	-0.335** (0.154)
城市面积 ($\ln CA$)	-0.068 (0.077)	-0.054 (0.067)	-0.065 (0.080)	-0.055 (0.070)	-0.029 (0.077)	-0.022 (0.065)
常数项 ($Cons$)	2.534** (1.151)	3.240*** (1.004)	0.138 (1.461)	2.396** (1.218)	0.318 (1.440)	1.709 (1.197)
能源方程						
重工业产值 ($\ln HI$)			0.671*** (0.149)	0.662*** (0.152)	0.636*** (0.131)	0.581*** (0.132)
第二产业比重 ($\ln Indus2$)			0.013 (0.011)	0.008 (0.012)	0.017* (0.010)	0.012 (0.010)
能源禀赋 ($\ln Coal_Rich$)					0.580*** (0.200)	0.731*** (0.203)
常数项 ($Cons$)			3.228 (2.889)	3.629 (2.940)	3.536 (2.549)	4.794* (2.570)

注释:括号中的数值为标准误差,*代表 $p < 0.1$,**代表 $p < 0.05$,***代表 $p < 0.01$ 。

①审稿人指出工业用煤等能源消费对 $PM_{2.5}$ 的影响受到自然环境因素的干扰。作者非常感谢审稿人提出的建设性意见。由于本文基于年度平均数据回归,因此可能在一定程度上缓解这一问题。

具体地,表中第(1)、(2)和(3)列分别对应前文计量模型(1)、(2)和(3)。首先,模型(1)估算结果显示,产出方程中资本、劳动系数显著为正,表明资本、劳动要素投入是推动中国经济增长的重要因素;雾霾污染排放方程中的生活用煤系数显著为正意味着,生活用煤量越高的城市,雾霾污染程度也越深;然而,需要特别指出的是,虽然工业用煤对产出与 $PM_{2.5}$ 浓度的影响为正,但是在统计层面并不显著,这并不符合中国经济运行的现实,究其原因可能是由于模型(1)未纳入能源方程,导致模型估计出现偏差。其次,第(2)列汇报了模型(2)的估计结果,不难发现,在引入能源方程后,产出方程与雾霾污染排放方程中工业用煤的系数为正,而且均通过了显著性检验,这说明工业用煤在促进经济增长的同时,也加剧了大气污染;就能源方程而言,第(2)列中重工业产值系数显著为正表明,重工业产值越高的城市,煤炭消耗越高,这亦与预期相符;在控制了重工业产值后,第二产业比重对工业用煤的影响不显著。最后,为缓解内生性,模型(3)在模型(2)的基础上进一步将一地区 $Coal_Rich$ 这一外生变量引入能源方程,发现基本不影响模型(2)的回归结果,这也表明了本文结果的稳健性;此外,第(3)列能源方程中 $Coal_Rich$ 的系数显著为正反映出能源禀赋本身对能源消耗的影响。

就其他解释变量的系数而言,虽然汽车保有量、建筑施工面积、绿化面积等变量的系数不显著,但是其符号均与预期相符:汽车保有量的系数为正,说明汽车尾气排放增加了雾霾浓度;建筑施工面积的系数为正则说明建筑扬尘加剧了雾霾污染严重程度;而绿化面积系数为负,表明增加城市绿化有助于降低雾霾污染浓度。

(二)增长核算分析

基于联立方程组模型的估算结果,表2报告了相关投入变量对产出、雾霾浓度以及工业煤耗的影响,这有助于我们认识雾霾的形成机制。然而,定量考察主要投入要素对产出增长以及不同因素对雾霾形成的贡献度,还需借助于标准的增长核算分析框架。为此,本文利用表2所报告的联立方程组估计结果,同时结合27个省会城市与4个直辖市2003-2013年度雾霾和经济历史数据进行了标准的增长核算分析。表3与表4以地区为单位分别报告了主要投入要素对产出的贡献度以及主要污染物对雾霾污染的贡献度(包括技术进步在内的其他因素的综合贡献度则由误差项刻画)。根据表3可以发现,资本投入是驱动中国经济增长的主要引擎,其次是劳动,再次是工业煤耗;从地域比较的视角来看,以工业用煤对产出的贡献为例,京津冀地区的数值最高,达到10.2%,珠三角的数值最低,仅为0.96%,这与我们的预期一致。

表3 主要投入要素对产出的贡献 (单位:%)

投入要素	全国	京津冀	长三角	珠三角
资本	55.0	62.1	46.9	55.2
劳动	11.9	2.7	20.8	18.8
工业用煤	8.1	10.2	7.3	0.96

观察表4,可以发现,煤炭消耗是中国雾霾污染的首要贡献者。如果仅考虑原始排放,在全国和京津冀、长三角两个重霾污染区域 $PM_{2.5}$ 增长中(珠三角 $PM_{2.5}$ 污染程度相对较轻,以2013年为例,珠三角 $PM_{2.5}$ 浓度分别是长三角地区的64%,京津冀地区的44%),煤炭消耗都是首要贡献者,贡献度分别达到56.5%、63%和46.1%,其中工业耗煤的贡献度分别为33.8%、36.6%和33.4%,生活用煤的贡献度分别为22.7%、26.4%和12.7%,进一步彰显出工业部门耗煤在 $PM_{2.5}$ 排放源中的最高排位以及用于采暖的生活用煤在北方相比南方地区对雾霾排放具有更大贡献。而在全国和京津冀、长三角地区,机动车尾气排放和建筑扬尘的贡献度则位居其后,机动车分别为25.8%、21.2%和32.7%,扬尘为12.7%、10.8%和16.2%。珠三角雾霾污染较轻,煤炭消耗贡献度只有10.7%,让位于机动车尾气和扬尘。与 $PM_{2.5}$ 的情形基本类似,煤炭消耗亦是 PM_{10} 增长首要贡献者:全国平均贡献度为54.7%,在雾霾污染最为严重的京津冀地区,煤炭消耗对 PM_{10} 增长的贡献高达61.4%。值得说明的是,珠三角地区汽车尾气排放对 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的贡献显著高于煤炭消耗,究其原因在于,该地区工业煤炭消耗占能源消耗量相对较低,生活煤炭消耗几乎为0。

表4 各类因素对 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的贡献 (单位:%)

因素	$PM_{2.5}$				PM_{10}			
	全国	京津冀	长三角	珠三角	全国	京津冀	长三角	珠三角
工业用煤	33.8	36.6	33.4	8.2	32.3	35.2	31.7	7.5
生活用煤	22.7	26.4	12.7	2.5	22.4	26.2	12.5	2.3
汽车保有量	25.8	21.2	32.7	59.4	30.6	25.2	38.4	66.9
建筑施工面积	12.7	10.8	16.2	24.9	9.7	8.4	12.4	18.2

作为最脏的化石能源,煤炭在国际上受到了严格排放标准的限制而未能大量使用,国际上煤炭在一次能源消耗的平均占比不足20%,比如OECD国家和美国在1980年就只有19.8%和14.3%,到2012年则进一步下降到15.9%和14.8%。而我国由于富煤以及低煤价导致煤炭被过度使用,其在一次能源消费中的比例一直高居不下,1980年为72.2%,2013年仍高达67.4%,绝对消耗量达到了42.4亿吨,而美国同期不足10亿吨。可以说,环境低标准所导致的煤炭高消耗使得煤炭成为了我国雾霾重污染区域的首要贡献者,要从根本上降低雾霾排放,必须下定决心切实减少煤炭消耗总量,比如关停转并小火电、小钢铁、小水泥、小石化等高排放企业,严控煤炭散烧,将终端耗煤洁净化,将煤炭优先用于发电、集中供热、金属冶炼等低排放领域,培育大气环保产业等。

(三) 实现雾霾下降目标的减煤量及降霾减煤的经济压力测试

如前所述,煤炭消耗特别是工业煤炭消耗是我国雾霾污染的首要贡献者。因此,实现降低雾霾污染的特定目标,首当其冲的是工业煤炭的消耗。本节尝试回答的问题是,为实现2020年

与2025年大气污染物 $PM_{2.5}$ 浓度分别在2013年的基础上下降15%与30%的大气污染防治目标,本文研究的样本城市(74个 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 重点监测城市)各自工业用煤的减少量。若假设雾霾污染排放方程中生活用煤、汽车保有量、建筑施工面积、绿化面积以及城市面积等变量继续按照2003-2013年平均增长率增长,根据联立方程组估计的变量系数可以计算得出,若要实现2020年与2025年大气污染物 $PM_{2.5}$ 浓度分别在2013年的基础上下降15%与25%的目标,2020年与2025年的工业用煤需要在2013年的基础上分别平均降低15%和21%之多。依据此比例,再结合研究样本城市2013年工业用煤量可以测算得到具体城市层面的减煤量,表5报告了这一结果。

表5 实现降霾目标的减煤量 (单位:万吨)

城市	2020年	2025年	城市	2020年	2025年
北京	501.3	705.7	湖州	107.7	151.6
天津	299.9	422.1	绍兴	164.4	231.5
石家庄	1053.1	1482.4	金华	132.1	185.9
唐山	2417.8	3403.5	衢州	138.6	195.1
秦皇岛	167.4	235.7	舟山	29.6	41.6
邯郸	1404.7	1977.3	台州	199.0	280.1
邢台	102.1	143.7	丽水	11.0	15.5
保定	102.8	144.7	合肥	188.9	266.0
张家口	56.8	80.0	福州	334.5	470.9
承德	68.5	96.4	厦门	73.4	103.3
沧州	185.4	261.0	南昌	101.9	143.4
廊坊	95.2	134.0	济南	277.6	390.8
衡水	39.6	55.8	青岛	259.0	364.5
太原	1037.6	1460.7	郑州	557.1	784.2
呼和浩特	440.6	620.3	武汉	511.8	720.4
沈阳	448.4	631.1	长沙	77.3	108.8
大连	310.7	437.4	广州	276.5	389.3
长春	407.3	573.3	深圳	60.2	84.7
哈尔滨	280.2	394.5	珠海	103.5	145.7
上海	216.1	304.2	佛山	184.7	260.0
南京	605.6	852.5	江门	53.2	74.9
无锡	524.4	738.2	肇庆	70.4	99.1
徐州	992.1	1396.6	惠州	101.8	143.3
常州	260.3	366.5	东莞	54.9	77.3
苏州	1098.2	1545.9	中山	22.3	31.5
南通	299.3	421.4	南宁	108.8	153.1
连云港	125.6	176.8	海口	0.3	0.5
淮安	173.7	244.6	重庆	802.5	1129.6
盐城	187.4	263.8	成都	98.9	139.2

续表 5

实现降霾目标的减煤量

(单位:万吨)

城市	2020年	2025年	城市	2020年	2025年
扬州	197.7	278.3	贵阳	198.3	279.1
镇江	311.7	438.8	昆明	314.4	442.5
泰州	154.2	217.1	拉萨	2.8	3.9
宿迁	35.1	49.4	西安	152.6	214.8
杭州	229.2	322.6	兰州	219.1	308.4
宁波	680.2	957.6	西宁	113.0	159.0
温州	146.6	206.3	银川	748.0	1052.9
嘉兴	275.7	388.1	乌鲁木齐	384.4	541.1
全国	54411.26	76592.87			

前文联立方程组估算结果显示,工业用煤投入是推动中国产出增长的重要引擎。简单地减少煤炭消耗必定会对以煤炭为主导的中国能源驱动式粗放增长带来较大影响。结合联立方程组估计系数与经济增长拟合方程^①,本文测算了前述降霾减煤对GDP的影响,表6报告了这一压力测试结果。从表中可以看出,降霾减煤将导致全国GDP水平在2020年和2025年平均分别下降3.4%和4.8%。从具体城市来看,降霾减煤对重工业城市的负面影响更大。比如,京津冀地区雾霾比较严重的邯郸市和唐山市,其工业煤炭消耗占比在2013年高达94%和91%,重工业比重也达到了76%和71%,经济压力测试显示,降霾减煤将会造成这两个城市GDP在2020年和2025年分别下降8.8%、8.4%以及7.6%、7.2%;再看长三角雾霾比较严重的徐州市,其工业煤炭占比也高达92%,降霾减煤将导致其GDP在2020年和2025年分别下降4.3%和4.1%。

表 6

经济压力测试:降霾减煤所引致的GDP减少

(单位:%)

城市	2020年	2025年	城市	2020年	2025年
北京	0.50	0.47	湖州	1.15	1.09
天津	0.40	0.38	绍兴	0.80	0.76
石家庄	4.17	3.97	金华	0.86	0.82
唐山	7.61	7.23	衢州	2.53	2.40
秦皇岛	2.76	2.62	舟山	0.61	0.58
邯郸	8.84	8.40	台州	1.22	1.16
邢台	1.23	1.17	丽水	0.22	0.21
保定	0.68	0.65	合肥	0.78	0.74
张家口	0.83	0.79	福州	1.38	1.31
承德	1.04	0.99	厦门	0.47	0.45
沧州	1.19	1.13	南昌	0.59	0.56
廊坊	0.94	0.90	济南	1.02	0.97
衡水	0.71	0.68	青岛	0.62	0.59

^①本文采用能源消耗变量的二次型对GDP进行拟合。

续表6 经济压力测试:降霾减煤所引致的GDP减少 (单位:%)

城市	2020年	2025年	城市	2020年	2025年
太原	8.28	7.88	郑州	1.73	1.65
呼和浩特	3.13	2.98	武汉	1.09	1.04
沈阳	1.21	1.15	长沙	0.21	0.20
大连	0.78	0.74	广州	0.35	0.33
长春	1.57	1.49	深圳	0.08	0.08
哈尔滨	1.08	1.02	珠海	1.20	1.14
上海	0.19	0.18	佛山	0.51	0.48
南京	1.46	1.38	江门	0.51	0.49
无锡	1.25	1.19	肇庆	0.82	0.78
徐州	4.31	4.10	惠州	0.73	0.70
常州	1.15	1.09	东莞	0.19	0.18
苏州	1.62	1.55	中山	0.16	0.16
南通	1.14	1.09	南宁	0.75	0.71
连云港	1.36	1.29	海口	0.01	0.01
淮安	1.55	1.48	重庆	1.22	1.16
盐城	1.04	0.99	成都	0.21	0.20
扬州	1.17	1.11	贵阳	1.83	1.74
镇江	2.05	1.95	昆明	1.77	1.69
泰州	0.99	0.94	拉萨	0.17	0.17
宿迁	0.40	0.38	西安	0.60	0.57
杭州	0.53	0.50	兰州	2.38	2.26
宁波	1.84	1.75	西宁	2.22	2.11
温州	0.71	0.67	银川	11.18	10.63
嘉兴	1.69	1.60	乌鲁木齐	3.36	3.20
全国	3.4	4.8			

(四) 弥补煤炭消耗缺口的能源结构演化路径

结合前文,合理的煤炭减量化区间不仅要考虑雾霾降低的约束性指标,还要同时考虑“新常态”下保持中高速增长的经济目标。因此,本文又设定了到2025年中国经济保持6.5%增速情景,根据经济增长方程计算出必须保证此增速的煤炭投入量,再结合上述 $PM_{2.5}$ 减排情景和雾霾污染排放方程计算出的煤炭实际消耗量,得出我国工业耗煤2020年和2025年实际分别需要减少5.4亿吨和7.7亿吨,分别达到31.1亿吨和28.7亿吨。如此大的工业耗煤减少虽然降低了雾霾,但是必须通过更洁净的能源替代才能保证中高速增长所需要的能源投入。

本文把上述由减煤降霾所引起的能源消费缺口按现有能源结构的一个合理变动范围分解到石油、天然气和以风能、太阳能为代表的新能源上^①,计算得到了未来两个五年规划(“十三五”“十四五”)期间全国、京津冀、长三角、珠三角和74个城市实现治霾和增长双赢目标的能源结构演化合理轨迹。图3绘制了全国、京津冀、长三角和珠三角区域煤炭比例动态演化路径,表

7说明了特定年份能源结构的演化。

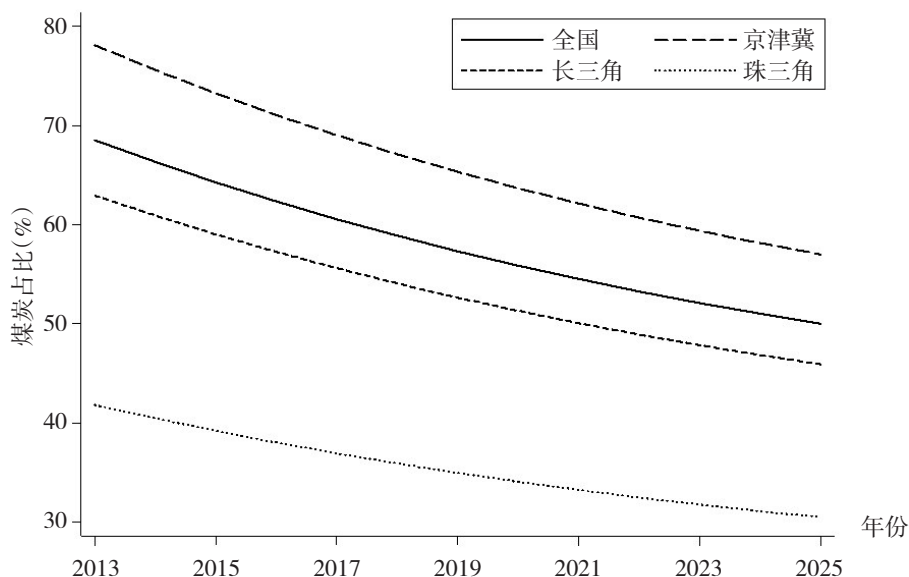


图3 煤炭占能源消耗比例动态演化

表7

全国及主要地区能源结构演化轨迹

能源结构	2013年				2020年				2025年			
	全国	京津冀	长三角	珠三角	全国	京津冀	长三角	珠三角	全国	京津冀	长三角	珠三角
煤炭	68.50	78.07	62.93	41.82	55.85	63.66	51.31	34.10	50.00	57.00	45.94	30.53
石油	17.10	13.47	16.90	27.76	20.79	18.25	20.75	30.32	21.42	19.00	21.35	30.72
天然气	4.05	0.84	3.47	9.83	7.29	4.70	6.57	11.90	9.28	7.06	8.48	13.16
新能源	13.52	7.61	16.71	20.59	18.38	13.40	21.37	23.68	21.36	16.94	24.23	25.58

从全国层面来看,工业耗煤占一次工业能源消费的比重必须从2013年的68.5%下降到2020年的55.9%和2025年的50%,天然气占比则要从2013年的4%增加到2020年的7.3%和2025年的9.3%,而新能源比重则要在2020年达到18.4%,2025年达到21.4%;从京津冀区域看,工业耗煤占比需要从现在的78%下降到2020年和2025年的63.7%和57%,天然气和新能源的占比则要达到2020年的4.7%和13.4%,2025年的7.1%和16.9%;长三角工业耗煤的合理演化结

①《能源发展战略行动计划:2014-2020》指出,截至2020年天然气与非化石能源(新能源)占一次能源消费比重分别提高到10%与15%左右。据此,本文将由于工业煤炭减少所导致的能源缺口的10%与15%的比例分配到天然气和非化石能源上,余下的部分则划分到石油上。

构为2013年62.9%、2020年51.3%和2025年45.9%，天然气结构则要从2013年的3.5%上升到2020年的6.6%和2025年的8.5%，新能源占比在2020年和2025年则应分别达到21.4%和24.2%；珠三角地区煤炭占比本身较低，天然气和新能源在2025年将达到13.2%和25.6%。在所有情形下，石油占比也都有小幅度增加。可以说，深化能源要素市场改革，千方百计增加天然气和新能源消费，提高石油制品质量，能够有效弥补煤炭减量的能源消费缺口。此外，表8还将本文所预测2020年能源结构与马骏等(2013)的相应结果进行了比对，可以看出二者结果较为相近，这也进一步显示了本文结果的稳健性。

表8 本文预测中国2020年能源结构(百分比)与已有文献的比对

能源结构	煤	石油	天然气	风能	太阳能	核能	水电	非化石能源
马骏等(2013)	52.8	20.0	12.0	2.5	0.02	3.2	9.2	14.3
本文	55.85	20.79	7.29					18.38

由于煤炭价格相对较为低廉，煤改气、煤改油、煤改新能源都会导致能源使用成本的较大提高。我们初步测算了使用煤炭与使用石油、天然气和新能源进行替代的各自成本(见表9)^①，发现全国2020年和2025年的能源使用成本需要提高1.9万亿元和2.6万亿元，其中唐山市能源成本在74个城市中增加最高，达到1203亿元和1611亿元；邯郸市次之，为698.6亿元和935.8亿元；苏州市为546.2亿元和731.6亿元；而北上广能源成本在2025年则分别要提高334亿元、143.9亿元和184.2亿元。那么，谁来为雾霾治理和经济增长买单呢？当然，作为市场主体的企业首当其冲，作为公共产品提供者的政府也责无旁贷。如果我们只考虑工业部门新能源成本，并简单假定新能源成本的提高由政府来补贴，表10总结了初步测算结果，从表中可以看出，全国对工业部门新能源的财政补贴在2020年和2025年金额将分别达到0.91万亿元和1.22万亿元，占当年所估算财政支出比例分别为0.48%和0.31%。本文所测算的新能源补贴占政府财政支出的比重与马骏等(2013)具有一定的可比性，其预测结果显示，到2017年对新能源补贴应占财政支出的比例为0.4%。从2025年各城市测算结果看，最高的还是唐山市和邯郸市，其补贴需要达到554亿元和322亿元，占各自财政支出比例为4.2%和3.3%，北上广补贴需要115亿元、50亿元和63.4亿元，财政占比分别为0.1%、0.04%和0.17%。

^①防霾减煤、推广新能源使用成本的计算步骤如下：首先，计算出实现减霾和增长双赢目标的能源演化路径，以2020年为例，工业耗煤占一次工业能源消费的比重须从2013年的68.5%下降到55.9%，天然气占比要从2013年的4%增加到7.3%，而新能源结构则要达到18.4%，石油比例也有小幅增加；其次，设定各类能源的价格，本文依据各类能源现行市场价格，将煤炭、石油、天然气的价格分别设定为600元/吨、6000元/吨与2.7元/立方米，由于新能源种类较多，本文采用新能源的平均电价(0.75元/千瓦时)表示其价格；最后，结合各类能源比例与价格得到相应能源的使用成本，再减去煤炭使用成本即可得到使用石油、天然气和新能源替代煤炭的成本。

表9

对非煤炭能源累计补贴数额

(单位:亿元)

城市	2020年	2025年	城市	2020年	2025年
北京	249.3	334.0	湖州	53.6	71.8
天津	149.1	199.8	绍兴	81.8	109.5
石家庄	523.8	701.6	金华	65.7	88.0
唐山	1203.0	1611.0	衢州	68.9	92.3
秦皇岛	83.3	111.5	舟山	14.7	19.7
邯郸	698.6	935.8	台州	99.0	132.6
邢台	50.8	68.0	丽水	5.5	7.3
保定	51.1	68.5	合肥	94.0	125.9
张家口	28.3	37.9	福州	166.4	222.9
承德	34.1	45.6	厦门	36.5	48.9
沧州	92.2	123.5	南昌	50.7	67.9
廊坊	47.3	63.4	济南	138.1	185.0
衡水	19.7	26.4	青岛	128.8	172.5
太原	516.1	691.3	郑州	277.1	371.1
呼和浩特	219.2	293.6	武汉	254.5	340.9
沈阳	223.0	298.7	长沙	38.4	51.5
大连	154.5	207.0	广州	137.5	184.2
长春	202.6	271.3	深圳	29.9	40.1
哈尔滨	139.4	186.7	珠海	51.5	68.9
上海	107.5	143.9	佛山	91.9	123.1
南京	301.2	403.5	江门	26.4	35.4
无锡	260.8	349.4	肇庆	35.0	46.9
徐州	493.5	661.0	惠州	50.6	67.8
常州	129.5	173.4	东莞	27.3	36.6
苏州	546.2	731.6	中山	11.1	14.9
南通	148.9	199.4	南宁	54.1	72.5
连云港	62.5	93.7	海口	0.17	0.23
淮安	86.4	115.8	重庆	399.1	534.6
盐城	93.2	124.9	成都	49.2	65.9
扬州	98.3	131.7	贵阳	98.6	132.1
镇江	155.0	207.7	昆明	156.4	209.4
泰州	76.7	102.8	拉萨	1.4	1.8
宿迁	174.6	233.9	西安	75.9	101.7
杭州	114.0	152.7	兰州	109.0	145.9
宁波	338.3	453.2	西宁	56.2	75.3
温州	72.9	57.6	银川	372.0	498.3
嘉兴	137.1	183.7	乌鲁木齐	191.2	256.1
全国	19330	25890			

表 10 对新能源累计补贴数额及其占财政支出的比例 (单位:亿元,%)

城市	2020年		2025年		城市	2020年		2025年	
	补贴金额	比例	补贴金额	比例		补贴金额	比例	补贴金额	比例
北京	84.15	0.15	114.96	0.10	湖州	18.08	0.79	24.70	0.55
天津	50.33	0.14	68.76	0.10	绍兴	27.60	0.64	37.71	0.45
石家庄	176.76	2.46	241.48	1.72	金华	22.17	0.50	30.29	0.35
唐山	405.85	5.95	554.43	4.16	衢州	23.26	1.02	31.78	0.72
秦皇岛	28.11	1.02	38.40	0.71	舟山	4.96	0.19	6.78	0.13
邯郸	235.79	4.68	322.11	3.27	台州	33.40	0.74	45.63	0.52
邢台	17.14	0.48	23.41	0.34	丽水	1.85	0.07	2.53	0.05
保定	17.26	0.27	23.58	0.19	合肥	31.71	0.37	43.33	0.26
张家口	9.54	0.24	13.03	0.16	福州	56.15	0.77	76.71	0.54
承德	11.49	0.32	15.70	0.22	厦门	12.32	0.17	16.83	0.12
沧州	31.13	0.64	42.52	0.45	南昌	17.10	0.30	23.36	0.21
廊坊	15.98	0.40	21.83	0.28	济南	46.60	0.65	63.66	0.46
衡水	6.65	0.26	9.09	0.18	青岛	43.47	0.31	59.38	0.22
太原	174.18	3.98	237.94	2.78	郑州	93.51	0.83	127.75	0.58
呼和浩特	73.96	1.83	101.04	1.28	武汉	85.90	0.56	117.35	0.39
沈阳	75.26	0.62	102.81	0.44	长沙	12.97	0.13	17.72	0.09
大连	52.16	0.35	71.25	0.25	广州	46.42	0.24	63.41	0.17
长春	68.36	0.79	93.39	0.55	深圳	10.11	0.04	13.81	0.03
哈尔滨	47.04	0.48	64.26	0.34	珠海	17.37	0.50	23.73	0.35
上海	36.27	0.06	49.55	0.04	佛山	31.00	0.46	42.35	0.32
南京	101.66	0.87	138.88	0.61	江门	8.93	0.31	12.19	0.21
无锡	88.03	0.90	120.26	0.63	肇庆	11.82	0.43	16.15	0.30
徐州	166.54	2.04	227.51	1.42	惠州	17.09	0.38	23.35	0.27
常州	43.70	0.76	59.70	0.53	东莞	9.21	0.15	12.59	0.11
苏州	184.34	1.11	251.82	0.77	中山	3.75	0.12	5.12	0.08
南通	50.25	0.64	68.64	0.44	南宁	18.26	0.32	24.95	0.22
连云港	21.09	0.42	28.81	0.30	海口	0.06	0.00	0.08	0.00
淮安	29.16	0.55	39.84	0.39	重庆	134.70	0.32	184.02	0.22
盐城	31.46	0.41	42.98	0.29	成都	16.60	0.10	22.67	0.07
扬州	33.19	0.76	45.33	0.53	贵阳	33.28	0.62	45.46	0.43
镇江	52.33	1.33	71.48	0.93	昆明	52.77	0.66	72.09	0.46
泰州	25.89	0.55	35.37	0.38	拉萨	0.46	0.03	0.63	0.02
宿迁	5.89	0.14	8.05	0.10	西安	25.62	0.26	35.00	0.18
杭州	38.47	0.33	52.55	0.23	兰州	36.77	1.11	50.23	0.77
宁波	114.18	0.89	155.98	0.62	西宁	18.96	0.67	25.90	0.47
温州	24.60	0.41	33.61	0.29	银川	125.55	4.15	171.52	2.90
嘉兴	46.28	1.11	63.23	0.78	乌鲁木齐	64.53	1.33	88.15	0.93
全国	9133	0.48	12230	0.31					

四、结论与政策建议

在当前中国雾霾“肆虐”,经济发展进入“新常态”,经济增长面临下行压力的大背景下,考察雾霾的形成机制并探讨如何实现治霾和经济增长双赢的目标具有重大意义。本文综合运用联立方程组模型以及增长核算分析测算了各类因素对雾霾主要污染物 $PM_{2.5}$ 的贡献度,并在此基础上进一步模拟了实现治霾和增长双赢目标的能源结构演化路径与相应的政策选择。本文研究发现,煤炭消耗是中国 $PM_{2.5}$ 为污染的主要贡献者,其贡献度平均为 56.5%,就雾霾污染最为严重的京津冀地区而言,煤炭消耗对 $PM_{2.5}$ 增长的贡献高达 63%,长三角地区煤炭消耗对 $PM_{2.5}$ 增长的贡献也接近一半。除了煤炭消耗之外,汽车尾气排放与建筑扬尘也是 $PM_{2.5}$ 污染形成的重要助因,具体地,全国、京津冀、长三角地区的汽车尾气排放贡献度分别为 25.8%、21.2%和 32.7%,扬尘为 12.7%、10.8%和 16.2%。

煤炭消耗是中国雾霾重要组成部分 $PM_{2.5}$ 的主要贡献者,因此减少煤炭消耗就自然成了降低雾霾污染浓度的重要手段。然而,简单地减少煤炭消耗必定会对以煤炭为主导的中国能源驱动式粗放增长带来较大影响。本文压力测试结果显示,降霾减煤将导致全国 GDP 水平在 2020 年和 2025 年分别平均下降 3.4%和 4.8%,以雾霾比较严重的邯郸市和唐山市为例,降霾减煤将导致这两座城市经济增长率在 2025 年分别下降 8.4%和 7.2%。可见,为实现降霾和增长的双赢目标,一方面需要降低煤炭消耗,另一方面需填补因减煤所造成的保持“新常态”下经济增长的能源缺口。特别地,为同时实现 2025 年经济增长率保持 6.5%和 $PM_{2.5}$ 浓度在 2013 年的基础上下降 30%的大气污染防治目标,工业耗煤占一次工业能源消费比重须从 68.5%下降到 50%,天然气和石油占比则要从 4%、17.1%分别增加到 9.3%、21.4%,新能源比重重要达到 21.4%。

由于相对于其他能源价格,煤炭价格比较低廉,因此上述能源结构不会自行优化,需要政府财政补贴。本文初步测算结果显示,为实现降霾与增长的双赢目标,到 2020 年和 2025 年政府对新能源的补贴应分别达到 0.91 万亿元、1.22 万亿元,占当年所估算财政支出比例分别为 0.48%和 0.31%。值得指出的是,本文不仅测算了全国层面的政府补贴数额,而且还针对研究样本中的每个城市提出了政府对新能源的补贴的具体建议。大气雾霾治理投资中,政府的财政支出当然是最为重要的,今后可以通过不断优化资源税和开征环境税来增强政府的相应财力。同时也不能过度依赖政府财政性投入,需要进一步拓宽雾霾治理的投融资渠道,引入民间资本和社会资本,引导银行业加大信贷支持力度,更要强化企业主体责任,通过合理的价格机制使其污染成本内部化,促进其加大投入提高技术以实现低排放。由于雾霾的区域间传输,可考虑在区域间统一分配财政补贴,把有限的资金更多投给那些雾霾污染严重而技术水平较低的地区会收获更好的减排效果。

参考文献:

- [1] 郭俊华,刘奕玮. 我国城市雾霾天气治理的产业结构调整[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版),2014,44(02):85-89.
- [2] 郝新东,刘菲. 我国 $PM_{2.5}$ 污染与煤炭消费关系的面板数据分析[J]. 生产力研究,2013,(02):119-127.
- [3] 何枫,马栋栋. 雾霾与工业化发展的关联研究——中国74个城市的实证研究[J]. 软科学,2015,(06):110-114.
- [4] 柯善咨,向娟. 1996—2009年中国城市固定资产存量估算[J]. 统计研究,2012,29(7):19-24.
- [5] 马骏,施娱,佟江桥. 政策要大变,才能将 $PM_{2.5}$ 降到30[J]. 中国经济观察,2013,(04):1-71.
- [6] 马丽梅,张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J]. 中国工业经济,2014,(04):19-31.
- [7] 齐园,张永安. 北京三次产业演变与 $PM_{2.5}$ 排放的动态关系研究[J]. 中国人口·资源与环境,2015,(07):15-23.
- [8] 魏巍贤,马喜立. 能源结构调整与雾霾治理的最优政策选择[J]. 中国人口·资源与环境,2015,(07):6-14.
- [9] 向堃,宋德勇. 中国省域 $PM_{2.5}$ 污染的空间实证研究[J]. 中国人口·资源与环境,2015,(09):153-159.
- [10] Hu,M., M.L.Zamora, J.Peng, D.J.Shang, J.Zheng, Z.J.Wu, M.Shao, and L.M.Zeng. Elucidating Severe Urban Haze Formation in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(49): 17373-17378.
- [11] Han,L.J., W.Q.Zhou, W.F.Li, and L.Li. Impact of Urbanization Level on Urban Air Quality: A Case of Fine Particles ($PM_{2.5}$) in Chinese Cities[J]. Environmental Pollution, 2014, 194(07): 163-170.

Energy Structure, Haze Governance and Sustainable Growth

Chen Shiyi and Chen Dengke

(School of Economics, Fudan University)

Abstract: While China's economic development has entered the "New Normal" phase and economy downward pressure increases, its heavy haze has caused widespread concern at home and abroad. Therefore, what is the haze formation mechanism and how to achieve win-win goal of reducing haze and promoting economic growth are the urgent questions to be answered. To this end, this paper makes use of simultaneous equations and growth accounting model to calculate the contributions of major pollutants to the haze pollution. Moreover, based on this, the energy dynamic path and policy options to achieve the win-win goal are further simulated. The results imply: (1) Coal consumption is the primary contributor to $PM_{2.5}$ pollution in China; (2) To achieve the win-win goal, that is, economic growth rate stays above 6.5% and $PM_{2.5}$ concentration reduces by 30% in the next ten years, the proportion of industrial energy consumption needs to be reduced from 68.5% in 2013 to 50% in 2025; (3) The reasonable energy structure will not form spontaneously, the government needs to conduct financial subsidies.

Keywords: Energy Structure; Win-win Goal; Financial Subsidies

JEL Classification: C3, Q43, Q51

(责任编辑:朱静静)