

华北地区清洁取暖政策费用-效益分析

组队完成：崔霆予¹ 房晨¹ 游威¹²

(1 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2 北京大学光华管理学院, 北京 100871)

摘要 针对华北地区的大气污染情况,以“煤改气”、“煤改电”为主体的清洁取暖政策在北方地区广泛推行。本论文总结 2015-2017 年间的清洁取暖改造进度,在效益端,运用双重差分法(DID)量化了各个省份推行清洁取暖改造对各省大气污染优化的贡献,并进一步运用能源-环境-经济可持续发展综合评价模型健康效应部分(IMED-HEL)、IER 与 GEMM 等模型评估政策的健康影响,运用支付意愿法和人力资本法定量计算货币化健康效益。在费用端,将清洁取暖的政策成本分为能源成本与改造成本分别核算。通过模型得到 2015-2017 年间华北清洁取暖政策在京津冀鲁豫五省共减少约 1.5 万人的过早死亡,减少 11.2 万人因空气污染患病,并产生 215.86 亿元的健康效益;同时产生 155.54 亿元的政策成本。清洁取暖政策整体取得成效,但空气污染治理给不同省份带来的净效益不同,应积极倡导跨省协作。此外,建议综合运用财政补贴手段、行政手段和技术手段,提升政策的实施效果。

关键词 清洁取暖; 费用效益分析; PM_{2.5}; IMED 模型

Cost-Benefit Analysis on the Clean Energy Heating Policy in the North China Region

Teamwork: CUI Tingyu¹ FANG Chen¹ YOU Wei¹²

(1 College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2 Guanghua School of Management, Peking University, Beijing 100871)

Abstract In view of the air pollution in North China, the Clean Energy Heating policy, including “Coal-to-Gas” and “Coal-to-Electricity”, has been widely performed. This paper collects the progress of Clean Energy Heating policy between 2015 and 2017 and carries out a cost-benefit analysis. On the benefit side, we use DID method to quantify the contribution of the Clean Energy Heating policy. We use the IMED-HEL, IER and GEMM models to assess the health impacts of the policy, and then monetize the health impacts using human capital method and willing-to-pay method. On the expense side, the cost of Clean Energy Heating policy is divided into energy cost and renovation cost. According to our model, from 2015 to 2017, the Clean Energy Heating policy in North China region reduced about 15,000 premature deaths and 112,000 illnesses caused by air pollution in Beijing, Tianjin, Hebei, Shandong and Henan, and generated health benefits worth ¥21.586 billion. At the same time, ¥15.554 billion of costs were incurred. The Clean Energy Heating policy achieved positive overall results, but the net benefits are different for provinces. We advise active inter-provincial cooperation and a comprehensive use of financial subsidy means, administrative means and technical means to improve the implementation effect of the policy.

Key words Clean Energy Heating; Cost-Benefit Analysis; PM_{2.5}; IMED model

1 引言

近年来,随着我国经济的高速发展,能源消耗逐渐增多,其中煤炭消耗占比很大。散煤主要是指小锅炉、家庭取暖、餐饮用煤等民用煤,其燃烧效率要比洁净型煤蜂窝煤低很多,且排放产生大量的空气污染物,比如大气细颗粒物、氮氧化物、二氧化硫、挥发性有机物等,致使灰霾和二氧化硫污染等问题逐渐加剧。在冬季,散煤常被用于家庭取暖,是大气污染的主要肇因之一,对人民健康产生较大危害。^[1]

为此,近年来国家推行“煤改气”、“煤改电”的清洁取暖政策来缓解大气污染。2017年政府工作报告提出“坚决打好蓝天保卫战”重点工作任务,在华北地区开始全面布局冬季清洁取暖改造。^[2]清洁取暖政策自推行以来得到了政府的大力推广,对我国北方PM_{2.5}下降作出了重要贡献;但由于清洁取暖成本较高,政策推进上也遇到了一些困难。^[3]

为评估清洁取暖政策的成效,本小组从环境效益、健康效益以及经济效益入手,对中国北方重点实施“煤改气”、“煤改电”的省份进行费用-效益分析(Cost-Benefit Analysis, CBA),评估该政策在各省实施的健康效益、经济影响和实施成本,并据此提出一些切实可行的政策建议。

2 相关工作

之前的研究已经通过不同的模型对“煤改气”、“煤改电”进行了较为充分的效益与政策分析。

一类研究关注了政策对空气污染物浓度降低的贡献。祝婕等利用空气质量模型MM5/CALPUFF模拟“煤改气”前后乌鲁木齐市主要大气污染物浓度以及分布空间的变化,发现SO₂、NO₂浓度显著降低,但PM_{2.5}、PM₁₀浓度的改善效果有限,市区的大气污染类型已由煤烟型向机动车尾气混合型转化,且市区内不同区域降幅存在着差异。^[4]薛亦峰等采用自下而上排放因子法,对燃煤控制对于北京市空气质量的改善程度进行了量化,估算燃煤产生的大气污染物,并利用ADMS-Urban模型模拟了其对环境空气质量的改善,得到了煤炭减量,各种主要大气污染物的减排量与密度的下降程度以及减排的空间分布情况。^[5]

另一类研究关注政策的经济效益方面,主要集中在探讨政策对经济的影响以及能源消费的成本变化。李少林等选取全国41个城市数据,运用DID模型

和PSM-DID模型进行回归分析与共同趋势假设检验,发现“煤改气”、“煤改电”政策对单位GDP能耗影响不显著,对居民人工煤气、天然气用气人口数有显著负向影响。^[6]张翔等则利用IMED模型对京津冀三地“煤改电”政策的健康与经济效益进行了评估,发现三地居民生活部门的电力需求会随着替代技术的不同而有较大差异,但致病案例数以及由于空气污染致死数都会有所降低,并从净效益最大化的角度得出结论:北京市和河北省宜采用“空气源热泵+可再生能源供电”方式,天津市则宜采用“蓄热式电暖器+可再生能源供电”的方式。^[7]

相较之前研究,我们将系统地从环境效益、经济效益以及政策建议三方面探讨“煤改气”、“煤改电”的影响,同时还会简要分析三者的关联与相互作用。但我们主要讨论“煤改气”中居民散煤改造对环境与经济的效益影响,并不包括工业层面的锅炉改造,和之前研究相比有所细化。在研究对象方面,我们以“2+26”城市所在的省市为主,同时还兼顾其他省市自治区,与之前研究相比涵盖的面更广,也更有利于在对比中分析这一政策的各方面影响。从研究方法的角度,我们创新性地将经济学领域的DID模型与北京大学能源环境经济与政策研究室(LEEEP)的IMED模型相结合,分别对环境效益与经济成本进行衡量,并参照结果提出政策建议。

3 清洁取暖政策效益分析

3.1 清洁取暖政策对空气质量的影响

首先,我们需要验证在全国层面上,清洁取暖政策的实施强度与污染物浓度存在负相关关系。我们使用每个省份清洁取暖改造户数与省份面积的比衡量清洁取暖的实施强度,控制省份固定效应后,对各个省份六种污染物年均浓度分别作初步回归:

$$\text{pollutant} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{ceh}_{it} + \alpha_i + \varepsilon_{it}$$

其中ceh为清洁取暖改造户数与省份面积的比,来自于公开数据整理。如表1所示,控制省份固定效应后,各个省份的PM_{2.5}、SO₂及CO等污染物浓度均与清洁取暖的实施强度相关。然而,由于可能存在的内生性问题,这里的相关性并不能代表因果关系。例如,清洁取暖的实施可能与其他类型的污染控制措施同步进行,清洁取暖措施较为深入的地方,其余类型的污染控制措施也较为深入,从而导致污染物浓度的降低也较大。

为消除内生性问题,我们引入双重差分(DID)的方法,引入各省份在全省开始施行“煤改电”、“煤

“煤改电”、“煤改气”政策在北方地区的实施时间普遍在 2014-2017 年之间，各个省份尚有一定自主性，政策的施行时间有一定外生性，而整个华北地区较为普遍、严厉的政策措施从 2017 年以后才开始普遍施行，因此可以作为一项外生性冲击。政策强度的衡量因素则仍然沿用清洁取暖的实施强度。清洁取暖政策对区域年平均污染物浓度的影响，我们采用如下的固定效应模型。其中， $shock_{it}$ 表示是否实行“煤改电”、“煤改气”政策的逻辑变量， x_{it} 表示其他控制变量， α_i 表示省份固定效应。

$$pollutant = \beta_0 + \beta_1 \cdot (ceh_{it} * shock_{it}) + \beta_2 \cdot shock_{it} + \gamma \cdot x_{it} + \alpha_i + \varepsilon_{it}$$

在基准模型中，我们暂不考虑其他控制变量，回归得到的结果如表 2 所示。在所有大气污染物中，

仅在对 $PM_{2.5}$ 回归时，清洁取暖政策强度与政策实施与否交叉的系数显著为负，表明清洁取暖政策的实施确实有助于空气质量中 $PM_{2.5}$ 浓度的改善。在对其余污染物回归时，模型结果均不显著。

接下来，考虑一系列控制变量。我们选取能源平衡表(来源于 CEIC 数据库转引国家统计局数据)中各省每年转化为其他类型能源的煤炭消耗量，以及非煤炭的各项能源消耗量作为控制变量，依次回归如表 3 所示，得到清洁取暖政策强度与政策实施与否交叉的系数显著为负。这说明考虑了各项控制变量之后，清洁取暖改造政策对 $PM_{2.5}$ 浓度的降低仍然有显著效果。具体来看，若一个省份在其每万平方公里的省份面积上对 1 万户使用散煤或小锅炉进行取暖的居民家庭进行清洁取暖改造，则平均能够使该省年均 $PM_{2.5}$ 浓度下降 0.531 微克/立方米。

表 1 初步回归模型结果

VARIABLES	(1) PM _{2.5}	(2) SO ₂	(3) NO ₂	(4) CO	(5) O ₃
ceh	-0.477*** (0.114)	-0.263** (0.107)	0.00897 (0.0716)	-0.00343* (0.00198)	0.188 (0.125)
Constant	48.62*** (0.522)	22.80*** (0.491)	30.99*** (0.330)	1.044*** (0.00910)	56.45*** (0.577)
Observations	116	116	116	116	116
R-squared	0.170	0.066	0.000	0.034	0.026
Number of prov	29	29	29	29	29

括号内为标准差, *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

表 2 使用模型结果

VARIABLES	(1) PM _{2.5}	(2) O ₃	(3) SO ₂	(4) NO ₂	(5) CO
ceh	-0.364*** (0.130)	0.0338 (0.142)	0.00346 (0.111)	0.0344 (0.0834)	-0.00222 (0.00229)
shock	-4.442* (2.598)	6.093** (2.840)	-10.52*** (2.204)	-1.003 (1.663)	-0.0478 (0.0457)
Constant	48.91*** (0.543)	56.06*** (0.594)	23.48*** (0.461)	31.05*** (0.348)	1.047*** (0.00956)
Observations	116	116	116	116	116
R-squared	0.198	0.076	0.264	0.004	0.046
Number of prov	29	29	29	29	29

括号内为标准差, *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

表 3 含控制变量的使用模型

		(1)	(2)	(3)
VARIABLES		PM _{2.5}	PM _{2.5}	PM _{2.5}
面板A	ceh*shock	-0.364*** (0.130)	-0.563** (0.226)	-0.531** (0.230)
研究变量	shock	-4.442* (2.598)	-3.084 (2.952)	0.798 (2.902)
面板B	gene (火力发电)		0.00837 (0.00593)	0.0120** (0.00568)
煤转化为其他 能源	ther (统一供热)		-0.000728 (0.00159)	-0.000774 (0.00176)
	wash (洗选煤)		-0.00296 (0.00192)	-0.00277 (0.00177)
	tar (炼焦煤)		-0.00550 (0.00561)	-0.00410 (0.00560)
	gas (产气)		-0.0186 (0.0221)	-0.0176 (0.0202)
	copro (煤制品加工)		0.0256 (0.0912)	0.100 (0.0877)
面板C	eleccon (电能)			-0.000801 (0.000579)
非煤能源的消 耗量	gascon (天然气)			-0.0160 (0.0503)
	lpgcon (液化石油气)			-0.00286 (0.0166)
	oilcon (油品)			-0.0131* (0.00682)
面板D	Constant	48.91*** (0.543)	45.43*** (9.067)	87.69*** (13.78)
关键数据	Province FE	Y	Y	Y
	Observations	116	116	116
	R-squared	0.198	0.276	0.428
	Number of prov	29	29	29

括号内为标准差, *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

3.2 健康影响评估

本研究使用由北京大学环境科学与工程学院绿色低碳可持续发展研究室开发的能源-环境-经济可持续发展综合评价模型(IMED)。根据其中的 IMED-HEL 模型,我们可以通过室外污染物 PM_{2.5} 浓度的减少量计算“煤改气”“煤改电”所产生的健康损害的减少情况。在评估过程中,由于早期研究认为污染与慢性暴露致死之间呈线性关系,但最新研究显示二者之间的关系是非线性的,因此这里我们采用

IER 方程(较符合实际情况的非线性关系方程)^[8]进行相对风险(Relative Risk, RR)的计算,之后再利用RR计算健康终点(Endpoint, EP, 指因 PM_{2.5} 污染而过早死亡或患病的劳动者人数)。其中EP所对应的致病病症主要是心脑血管慢性病以及部分呼吸道疾病,包含缺血性心脏病(IHD)、脑卒中(Stroke)、肺癌(LC)、急性下呼吸道感染(ALRI)、慢性阻塞性肺疾病(COPD)等。

计算RR和EP的方程如下所示:

$$RR_{p,r,s,y,m,\delta,g} = 1 + \alpha \left(1 - e^{-\gamma (C_{p,r,s,y} - CO_p)^s} \right), C_{p,r,s,y} > CO_p$$

$$EP_{p,r,s,y,m,\delta,g} = P_{r,y,m} \times \frac{I_{r,\delta}}{RR_{r,\delta}(C)} \times (RR_{p,r,s,y,m,\delta,g}(C) - 1)$$

其中RR(C)指浓度为C时的相对风险；EP指健康终点，此处主要指上面提到的五种病症；CO指产生健康影响的PM_{2.5}浓度阈值，这里取10 μg/m³（年均浓度）；P为人口，其中劳动损失人口年龄为15-65岁，缺血性疾病和脑血管疾病年龄25-65岁，其他健康终点适用于全人群。I为假设的基准发病率（年龄特异性死亡率），下角标p, r, s, y, m, δ, g分别表示污染物类型（本文为PM_{2.5}）、地区、情景、年份、健康终点分类（致病或致死）、健康终点和取值范围（中、低和高值）。[7]

根据3.1节得到的数据（即每1万平方公里改造1万户，年均PM_{2.5}浓度下降值为μ=0.531μg/m³；该数据的置信区间取μ ± 1.97σ, σ=0.230），我们可以计算得出由于清洁取暖改造而导致的各省PM_{2.5}浓度的下降情况，以及这一下降对不同类型疾病的患病或死亡案例减少量的贡献。

从结果中可以分析得到，对于本研究中的五个省份（京津冀、山东和河南），2015年到2017年的清洁取暖改造对于空气污染致死与致病的情况有较大的改善效果。从疾病种类的角度分析，肺癌与慢阻肺的致死人数的减少最为显著，均超过了0.2万，而急性下呼吸道感染由于致病率很高（大约1500/10万人）因此改造后致病人数的减少量也最大，达到了9.4万左右。从年份分析，由于该五省在前期主要进行的是试点的工作，改造的户数较少，因此三年内改造规模呈现逐年扩大的趋势，过早死亡与致病案例的减少数也因而基本呈逐年上升的趋势。

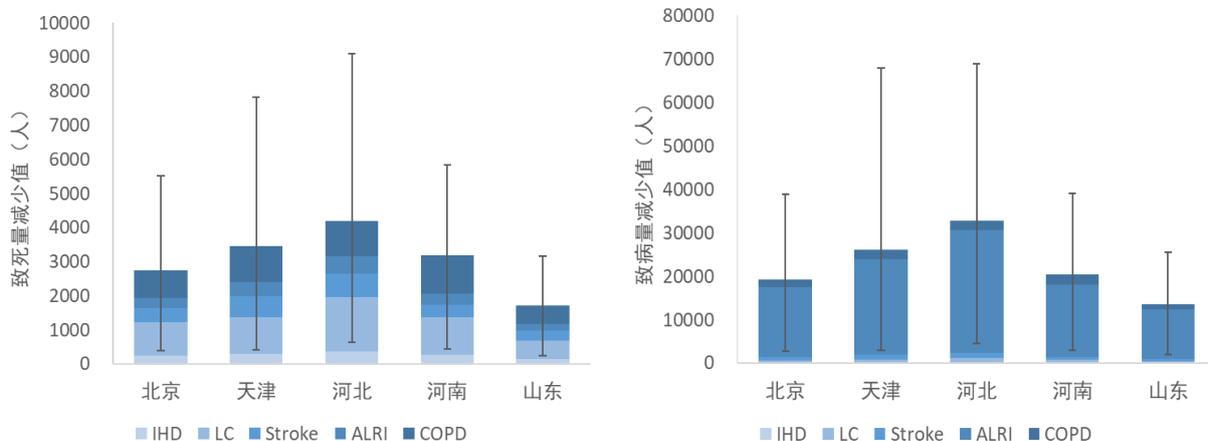


图1 京津冀豫鲁五省 2015-2017年清洁取暖政策带来的致死量减少值（左）和致病量减少值（右）

IER模型只衡量了上述的五种疾病的健康效益，但实际生活中因空气污染而患的疾病种类会更多。另一个健康效益模型GEMM同时考虑了“5-COD”（即上述五种疾病）以及“NCD+LRI”（所有非传播性疾病+下呼吸道感染LRI的死亡率），并将计算结果与IER模型进行了比较，得出致死率方面IER与GEMM二者结果比值近似为0.45。^[9]因此，我们根据这一比值可以得出三年五省的清洁取暖改造实际上可以避免约1.5万人的过早死亡。

总体结果如图1所示，2015~2017年三年的清洁取暖改造对于华北区域的五省能够在很大程度上产生健康效益，减少约1.5万人的过早死亡，11.2万人因空气污染患上呼吸系统或心脑血管的疾病。

3.3 货币化效益分析

根据上文剂量-效应方程计算所得出的患病人数及死亡人数，我们可以将此健康效益进行货币化处理。这里主要应用支付意愿法和人力资本法进行定量分析，其中的支付意愿法主要计算空气污染引起的非自然死亡的经济损失，人力资本法的分析内容类似于疾病成本法，主要计算大气污染相关疾病的医疗费用。支付意愿法的计算式如下：

$$Death. loss = VSL \cdot n1$$

其中VSL为统计生命价值参数，n1代表清洁取暖政策所贡献的空气污染相关疾病死亡患者减少量。根据靳雅娜博士离散选择实验的结果，北京市2016年于空气污染相关的统计生命价值参数VSL(2016)数值为230万元，^[10]再根据2015-2017年的GDP平减指数估计出2015和2017年北京市的VSL，之后根据五省之间人均GDP的差别分别换算出各省各年的VSL（不考虑未推广清洁取暖政策的年份），如表4所示。

表 4 京津冀豫鲁五省 2015-2017 年折算 VSL 数值
(单位: 万元)

省份 VSL	北京	天津	河北	河南	山东
2015	228				
2016	230	127		79	
2017	251	138	71	86	108

疾病成本的计算采用人力资本法, 主要计算住院费、门诊费用、手术治疗费、药物费等产生的医疗费用, 计算式如下:

$$Med. expense = Ms \cdot n2$$

其中, M_s 代表人均医疗费用, $n2$ 代表清洁取暖政策所贡献的空气污染相关患病人数减少量。这里的人均医疗费用 (M_s) 根据 IMED-HEL 模型估算, 北京市为 3.45 万元/人, 天津市为 3.00 万元/人, 河北省为 1.98 万元/人,^[11]并根据河北、山东、河南的人均 GDP 换算出河南省为 2.14 万元/人, 山东省为 2.68 万元/人。最终计算得到五省三年内清洁取暖所带来的健康效益总量为 215.86 亿元, 各省份的效益如图 2 所示。

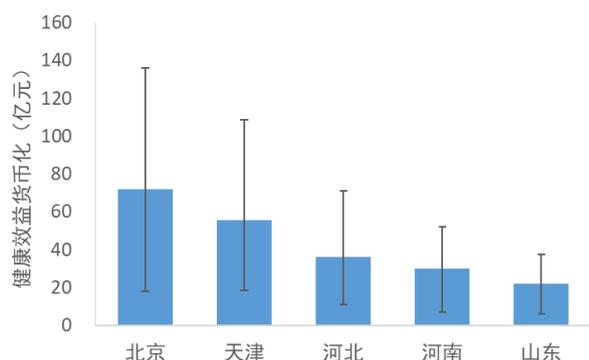


图 2 京津冀豫鲁五省 2015-2017 年清洁采暖政策的货币化健康效益数额

值得注意的是, 这里的疾病成本的计算并未考虑疾病引起的苦痛等不良状态对于工作的影响以及额外医疗费用的贡献, 也没有考虑不同疾病对于患病者亲属的影响。另外, 由于缺少相应数据, 这里的疾病成本法并未考虑因病误工所产生的工作时长损失及其经济损失。因此, 第二部进行疾病成本计算时, 本小组基于人力资本法所得的货币化健康效益是一个低值。

4 清洁取暖政策成本分析

4.1 能源成本

我们对煤与天然气, 煤与电分别进行换算。天

然气热值为 $35600\text{kJ}/\text{m}^3$, 考虑天然气燃烧效率为 80%。热值为 $29300\text{kJ}/\text{kg}$ 的燃煤为标准煤, 而实际情况下农村居民购买的散煤, 其热值要低于标准煤的热值, 一般为 $23000\text{kJ}/\text{kg}$ 。综上可换算得出一吨散煤约相当于 600m^3 天然气。对于“煤改电”, 根据现如今国家发改委的标准, 综合考量燃烧与发电的效率以及煤的品质等因素, 大约 360 克标准煤可以产生一度电。

根据刘亚非等的统计, 在清洁取暖改造之前, 北京每户每年的散煤使用量约为 3.3 吨, 河北、山东每户每年的用煤量约为 2.3 吨, 河南、天津约为 2.1 吨。^[12]我们从 CEIC 数据库转引国家发改委价格司的能源价格数据, 对于散煤的价格, 我们取 550 元/吨, 天然气市价取 2.5 元/ m^3 , 电取单价为 52.5 元每百千瓦时, 这几种能源的价格近年来均较为平稳。

因此可通过分别计算使用散煤的成本(单价×使用量)以及使用散煤对应的电与气的成本得出能源成本的价差。具体数值如表 5 所示。

表 5 京津冀豫鲁五省“煤改气”、“煤改电”的能源成本价差(单位: 元/(户·年))

省份	煤改气	煤改电
北京	3135	3043
河南、天津	1995	1937
山东、河北	2185	2121

我们参考罗宏等统计的各省“煤改气”、“煤改电”的改造户数比例,^[13]对能源成本分别进行折算再求和, 即能得到每个省份因清洁取暖改造而多承担的成本值。

4.2 清洁取暖改造成本

除能源变化带来的成本之外, 清洁取暖改造也会带来额外的成本。具体来说, 改造成本可以分为设备成本和管道成本。无论是采取“煤改气”还是“煤改电”的方式进行清洁取暖改造, 都需要每户额外添置取暖设备; 而在“煤改气”的模式下, 如果采用管道天然气方式供气, 则也需要考虑管道敷设的成本。也即:

$$C_r = C_e + C_t$$

在设备成本方面, 根据唐山市政府数据, 北方清洁取暖区域乡村常用的采暖功率在 20 千瓦, 其通过政府采购方式统一招标采购的采暖设备(壁挂炉)价格为 2700 元/台,^[14]我们参照这一数据为中心, 核算年化设备成本。

$$C_e = P \times \frac{R(1+R)^T}{(1+R)^T - 1}$$

其中P为设备价格，R为社会折现率（取4%），T为使用年限。取使用年限3-10年，设备价格1000-6000元，分别对年均设备成本 C_e 进行敏感性分析如表6所示，取均值得年化设备成本 C_e 约为453.14元。

表6 年化设备成本核算及敏感性分析
(单位：元/(户·年))

年限 价格	5	8	11	15
1000	224.63	148.53	114.15	89.94
2000	449.25	297.06	228.30	179.88
2700	606.49	401.03	308.20	242.84
4000	898.51	594.11	456.60	359.76
6000	1347.76	891.17	684.89	539.65

在管线成本方面，不同农村家庭管线铺设的费用，依其居住区域有很大不同。但我们考虑到，清洁取暖改造的主要对象是农村未统一供暖的区域，农村地区面积广阔而居住分散，对于边远的零散用户，管道成本过高时会选择使用液化石油气、液化天然气等方式供气。因此，管道成本不会过高。根据中国北方各地政府对管道建设的财政补助，^[13]我们取1000-5000元作为管道成本的估计值，采使用年限15-30年对年均管道成本 C_t 进行敏感性分析如表7，取均值得到年化管道成本 C_t 约为214.02元。

表7 年化管道成本核算及敏感性分析
(单位：元/(户·年))

年限 价格	10	15	20	25
1000	89.94	73.58	64.01	57.83
3000	269.82	220.75	192.04	173.49
5000	449.71	367.91	320.06	289.15

5 讨论和政策建议

5.1 费用效益分析

综合前述对于清洁取暖政策效益和成本的分析，得2015-2017年我国北方主要实施清洁取暖改造的北京、天津、河北、河南、山东五省市的费用效益结构，如图3所示。累计的货币化健康效益分别为72.05、55.48、36.21、29.94、22.18亿元，合计为215.86亿元；累计的改造成本（年化）分别为19.46、13.10、72.16、36.56、14.26亿元，合计为155.54亿元。清洁取暖政策总体的效益超过成本，3年产生的净效益为60.32亿元，表明清洁取暖政策整体取得成效。

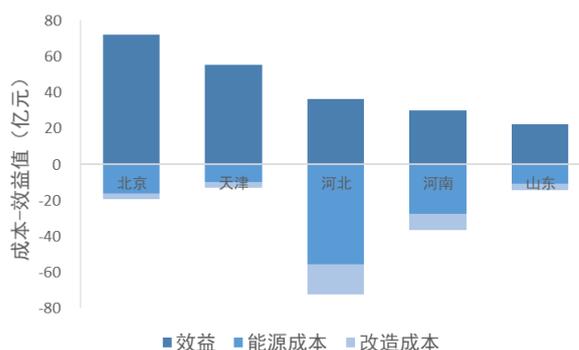


图3 京津冀豫鲁五省2015-2017年清洁取暖政策的费用效益结构

分省来看，北京、天津、山东的改造政策获得正的净效益，而河北、河南净效益为负，但这并不代表两省的清洁取暖政策未发挥其应有效果。在空气污染问题上，华北平原是一个整体，污染物存在跨省传输，^[15]因此尽管清洁取暖政策给各省带来的净效益不同，也应该倡导跨省协作。

5.2 政策建议

5.2.1 财政补贴手段

家庭改用清洁取暖方式需要付出能源和改造两方面的成本，无财政支持下缺乏改用的动力。财政补助在形式上相当于一种逆向的“庇古税”，在居民行为存在外部性的情况下改变其行为的收益，使居民行为向社会最优的方向转变。

根据罗宏等的统计，各省市清洁取暖补贴主要分为设备补贴和用电用气补贴。在设备补贴方面，各省的补贴比例从60%到100%不等；在用电用气补贴方面，采暖期用电价格下调0.2-0.3元/度、用气价格下调约1元/m³，每个采暖季最高补贴900-2400元不等。^[13]我们在表8中以年消耗散煤2.3吨的家庭为例，模拟核算了补贴后家庭清洁采暖的年化支出。

从网络舆论和相关研究可以看出，设备补贴大幅降低了家庭安装清洁取暖设备的成本，从而设备安装较容易推行，“煤改电”经补贴后采暖成本也较低。但与此同时，“煤改气”的补贴不足以弥补能源价格差，表8中补贴后“煤改气”的取暖费用仍然高出燃烧散煤近千元，因此居民仍然有动机在安装天然气取暖设备后采用散煤采暖，这也给基层带来了较高的管理成本，仍然需要采取较为严厉的巡查措施来禁绝散煤的燃用。

我们建议在“煤改气”政策推进期间，进一步提升对天然气的价格补贴，通过经济手段降低居民对政策的抵触心理。同时，通过采暖季阶梯气价、合理设置补贴上限等方式防止燃气的过量使用。

表 8 “煤改气”、“煤改电”补贴后家庭支出核算

采暖方式	消耗量	单价(元)	补贴(元)	年消费额(元)
散煤	2.30 吨	550.00	0.00	1265.00
天然气	1518 m ³	2.50	1.00	2277.00
电热	3220 度	0.525	0.20	1046.50

5.2.2 行政手段

除了补贴等经济调节手段,我们还可以在行政方面探讨清洁取暖政策的改善建议。首要的就是做好散煤的管控工作,我们建议通过控制散煤供应端来控制农村散煤的流动。因为有些乡村的散煤管控工作出现了种种问题,比如执行方式过激,有的乡村工作人员直接入户将居民的燃煤炉用水泥密封,有的农村甚至贴出“谁烧煤,就抓谁”的标语,这些显然是不得当的管控手段。而如果换一个思路,考虑散煤供应链,通过节流上游的散煤供应其实是效率高、执行成本低的举措。此外,建立健全政府部门和企业、民众的沟通反馈体系是很有必要的,因为清洁取暖政策执行的一大阻力就是政策的不同执行主体之间难以获得快速有效的沟通交流。最后,避免“一刀切”式的改造工程也是重要的改善措施,各省市宜应根据区域差异,稳步推进“煤改气”或“煤改电”的改造工作,而非一哄而起直接改造过多户数,导致改造后期能源和配套服务无法衔接的问题。

5.2.3 技术手段

最后可以通过技术手段改善本项政策。可以重新审视各项能源的利用问题,并根据不同地域的特点,定制最适的清洁取暖方案,而不一定非要进行“煤改电”、“煤改气”。风能、地热能、生物质能也是很好的地区性供热能源,甚至是被“取缔”的煤炭资源,也不是退出了供热的历史舞台,国家可以推动煤炭综合利用产业的发展,在山西、甘肃、内蒙古等产煤大省探索煤炭的清洁化利用方式。

6 结论

1) 根据双重差分(DID)模型与固定效应模型分析,我们得到了清洁取暖政策的实施强度与污染物浓度之间的负相关性。之后进一步考虑各项控制变量,发现一省在每平方公里的面积上对1万户居民家庭进行清洁取暖改造,平均能够使该省年均PM_{2.5}浓度下降0.531μg/m³,空气质量因而得以改善。

2) 利用IMED-HEL、IER与GEMM等模型,我们可以对清洁取暖政策的健康效益进行评估。借助各省污染物浓度的减少量,通过模型的计算,我

们可以得到由于空气质量的改善可以减少约1.5万人的过早死亡以及11.2万例的致病案例,产生较显著的健康效益。

3) 天然气与电相比于煤均有成本上的提高,对清洁取暖的设备、管线进行改造的费用也会给此政策带来相应的成本。我们综合以上两种来源进行计算可以得到各省的能源成本与改造成本。结合对健康效益进行货币化处理的结果,进行费用效益分析,得到三年清洁取暖政策在五省产生的净效益为60.32亿元,表明政策整体上取得了成效。

4) 对于清洁采暖政策,我们建议政府:进行一定的财政补贴,支持并促进家庭改用清洁方式取暖;加强散煤的管控工作,并同时做好与企业、民众的衔接;考虑其他类型的供热能源的使用或者积极探索煤炭清洁化利用。

7 致谢与分工情况

我们对在研究过程中所有提供帮助的老师和同学致以最真挚的感谢。感谢北京大学环境科学与工程学院的陆克定老师、张世秋老师对选题提出诸多有益的意见,郭松老师提供大气污染物数据,戴瀚程老师、2019级博士生吴雅珍学姐对模型选择、数据处理的耐心指导,以及2017级本科生彭汉唐学长对研究思路的建议。

本小组的分工情况如下:

游威: 3.1 清洁取暖政策对空气质量的影响, 4.2 清洁取暖改造成本, 5.1 成本效益分析, 5.2.1 财政补贴手段, 摘要以及表格绘制。

房晨: 2 相关工作, 3.2 健康影响评估, 4.1 能源成本(“煤改电”部分), 6 结论, 以及 4.1 的表格绘制。

崔霆予: 1 引言, 3.3 货币化效益分析, 4.1 能源成本(“煤改气”部分), 5.2.2 行政手段, 5.2.3 技术手段, 以及柱形图绘制。

参考文献

- [1] 梁云平, 张大伟, 林安国, 等. 北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(005):1775-1782.
- [2] 李克强. 2017 年政府工作报告[M]. 中国网, 引自 http://www.china.com.cn/lianghui/news/2019-02/28/content_74505911.shtml. 2017.
- [3] 董瑞强. 环境部:“煤改气改电”对 PM_{2.5} 下降贡献率在 1/3 以上, 补贴不会轻易退坡[N]. 北京:

- 经济观察报. 2020-05-15.
- [4] 祝婕, 都伟新, 马俊英等. 基于MM5/CALPUFF的乌鲁木齐市"煤改气"工程大气污染物浓度空间变化数值模拟[J]. 干旱区地理, 2017(1).
- [5] 薛亦峰, 闫静, 魏小强. 燃煤控制对北京市空气质量的改善分析[J]. 环境科学研究, 2014(03):32-37.
- [6] 李少林, 陈满满. "煤改气""煤改电"政策对绿色发展的影响研究[J]. 财经问题研究, 2019(7).
- [7] 张翔, 戴瀚程, 靳雅娜, 张世秋. 京津冀居民生活用煤"煤改电"政策的健康与经济效益评估[J]. 北京大学学报自然科学版, 2019, 55(2): 367-376.
- [8] Ghosh, S, Ganguli, et al. An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure [J]. Environmental health perspectives, 2014, 122:397.
- [9] Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115:201803222.
- [10] 靳雅娜. 健康风险价值评估与空气污染控制策略——基于离散选择与成本效益分析的方法与应用研究[D]. 北京: 北京大学, 2017
- [11] 谢杨, 戴瀚程, 花岡達也, 增井利彦. PM_{2.5}污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响[J], 2016, 11, 19-27
- [12] 刘亚非, 张有, 焦铭泽, 陈晓夫, 刘广青, 薛春瑜. 北方农村地区供暖现状与对策[J]. 煤气与热力, 2019, 39(01): 29-32.
- [13] 罗宏, 张志麒, 吕连宏等. 京津冀及周边地区清洁取暖补贴政策现状、问题与对策[J]. 中国环境管理, 2020(2): 34-41.
- [14] 唐山市政府. 农村煤改气壁挂炉是否收费 收费标准是否统一[EB/OL]. 人民网, 引自 <http://iuyan.people.com.cn/threads/content?tid=5869440>. 2019-04-16
- [15] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014年2月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. 环境科学学报, 2016(12).