基于双重差分模型的清洁取暖补贴效果量化评估

王敏，冯相昭，杜晓林，赵梦雪，王鹏，梁启迪

（生态环境部环境与经济政策研究中心，北京 100029）

【摘要】财政补贴是顺利推进北方地区冬季清洁取暖试点工作的重要保障。本文综合运用双重差分（Difference in Differences，DID）等计量模型统计方法，量化评估了清洁取暖补贴措施对试点城市空气质量的改善效果。研究发现：清洁取暖补贴对试点城市采暖月 CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度均有显著改善作用，且对第一批试点城市的贡献更大，使得第一批试点城市采暖月 CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度分别较补贴前显著降低 0.411mg/m^3、22.53μg/m^3 和 15.45μg/m^3，对污染物浓度下降的贡献度分别为 56.0%、65.2%和 49.8%；清洁取暖补贴对第一批试点城市采暖月 SO_2 浓度的改善效果不显著，却使第二批试点城市采暖月 SO_2 浓度较补贴前显著降低 24.53μg/m^3，对 SO_2 浓度下降的贡献度为 55.2%；清洁取暖补贴效果是地方重视程度、治理能力、一系列污染防治措施以及气象条件等共同作用的结果。建议：第一，构建和完善差异化补贴机制；第二，优化调整清洁取暖补贴资金使用方式；第三，引导地方政府探索建立中长期清洁取暖财政补贴机制。

【关键词】清洁取暖补贴；空气质量；效果评估；双重差分模型

中图分类号：X21 **文献标识码**：A **文章编号**：1673-288X(2020)03-0021-07 **DOI**：10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202003021

财政补贴是顺利推进北方地区冬季清洁取暖试点工作的重要保障。近年来，我国清洁取暖改造工作在北方 15 省区市展开，特别是在中央财政补贴遴选的三个批次共 43 个试点城市积极推进①。各地清洁取暖改造资金主要来源于中央财政奖补资金、地方财政补贴资金和社会资本投入三方面。其中，中央财政奖补资金在 2017—2019 年分别投入 60 亿元、139.2 亿元和 152 亿元；地方财政补贴资金远超中央财政投入，如 2017 年和 2018 年，地方财政补贴资金达到中央财政投入的 2.8 倍。

如此庞大的财政投入对试点城市采暖月空气质量的改善效果究竟如何？目前还没有形成一个统一的、科学的定量化结论。本文综合运用双重差分（Difference in Difference，DID）模型和冗余分析（Redundancy Analysis，RDA）方法，量化评估清洁取暖补贴对第一批试点城市和第二批试点城市采暖月主要污染物浓度的改善效果，以期为清洁取暖试点工作评估和后续补贴政策制定提供技术和决策支撑。

1 模型、方法与数据

1.1 模型介绍与设定

双重差分方法最早由 Ashenfelter 和 Card[1] 于 1985 年提出，主要思想是通过设计处理组和控制组来评价一项政策或机制的实施效果。该方法既可以排除处理组和控制组在政策实施前就存在的差异，又可以控制其他因素对研究对象的影响，被广泛应用于对环境经济政策实施效果的评估，在大气污染防治协作机制[2-3]、中央生态环保督察[4]、强化监督[5]、环境规制[6]等空气质量改善效果方面也有研究案例。本文采用的双重差分模型设定如下：

$$y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 time_{it} + \alpha_2 treated_{it} + \beta(time \times treated)_{it} + \alpha_3 x_{it} + \varepsilon_{it}$$

式中，各变量下角标 i 表示城市；t 表示采暖月份；y 为污染物浓度；*time* 为时间虚拟变量，清洁取暖补贴前取值 0，补贴后取值 1；*treated* 是处理虚拟变量，若该城市有清洁取暖补贴则为处理组取值 1，否则为控制组取值 0；*time*×*treated* 为时间虚拟变量和处理虚拟变量的乘积，其系数 β 为双重差分项。x 是一系列控制变量，即其他可能影响空气质量的因素，ε 为随机扰动项。处理组清洁取暖补贴前后的差分估计项为：$y_{11}-y_{10}=\alpha_1+\beta$，控制组差分估计项为：$y_{01}-y_{00}=\alpha_1$，清洁取暖补贴对空气质量改善作用的净效应为：$(y_{11}-y_{10})-(y_{01}-y_{00})=\beta$。

基金项目：生态环境部 2019 年度财政预算项目“重点区域农村清洁取暖协同效应评价案例研究”（2110106）

作者简介：王敏，助理研究员，硕士，主要从事气候变化与环境政策研究

通讯作者：冯相昭，研究员，博士，主要从事气候变化与环境经济学研究

①第一批试点城市包括天津、唐山、石家庄、保定、廊坊、衡水、太原、济南、郑州、开封、鹤壁、新乡 12 个城市；第二批试点城市包括邯郸、沧州、邢台、张家口、安阳、焦作、濮阳、洛阳、淄博、德州、济宁、滨州、聊城、菏泽、晋中、长治、晋城、运城、临汾、吕梁、阳泉、西安、咸阳 23 个城市；第三批试点城市包括定州、辛集、三门峡、济源、铜川、渭南、宝鸡、杨凌示范区 8 个城市（示范区）。

1.2 变量及描述性统计

本文选取的被解释变量包括 SO_2、CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 4 种大气污染物采暖月浓度②，解释变量包括处理虚拟变量(*treated*)、时间虚拟变量(*time*)和双重差分项(*treated*×*time*)。其中，处理虚拟变量(*treated*)设置为：第一批试点城市(12 个)和第二批试点城市(23 个)分别为处理组取值 1，未实施清洁取暖补贴的 20 个城市为控制组取值 0；时间虚拟变量(*time*)设置为：2018—2019 年采暖月(补贴后)取值 1，2016—2017 年采暖月(补贴前)取值 0。控制组城市③均位于京津冀及周边地区和汾渭平原所涉及的省份，且在地域上与第一批试点城市最为接近，以减小区域分布差异带来的影响。结合图 1 来看，清洁取暖补贴前后第一批试点城市和控制组城市采暖月 SO_2、CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度均值的变化趋势基本一致，说明满足共同趋势的前提假设要求。

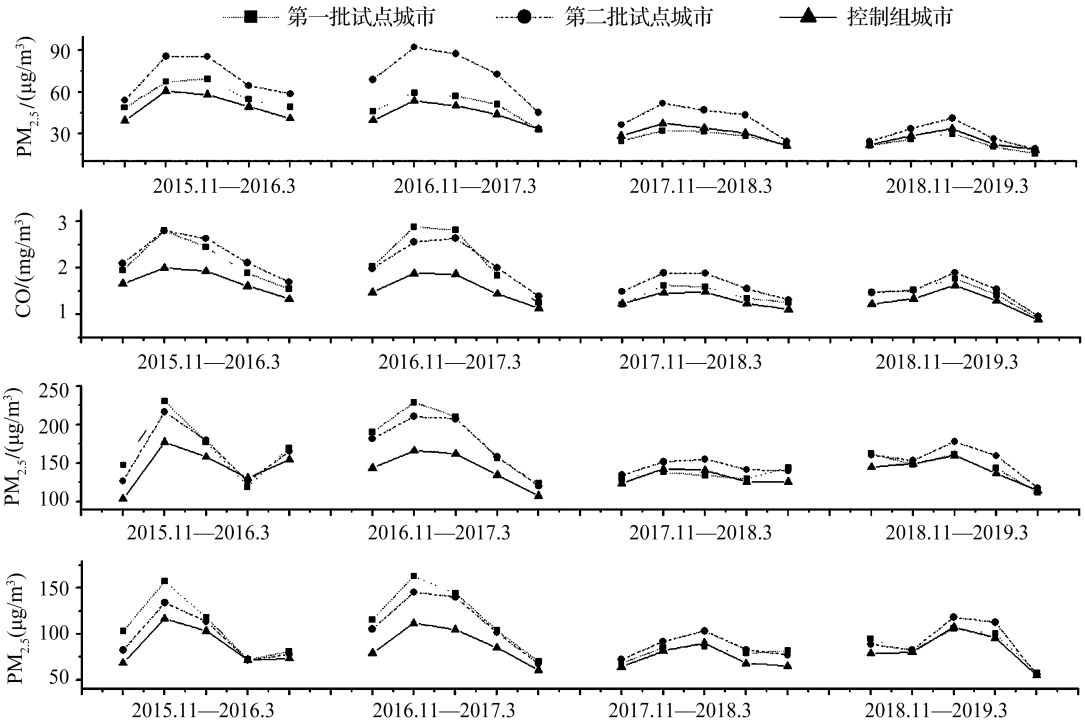

图 1 第一批试点城市、第二批试点城市及控制组采暖月污染物浓度

此外，本文还引入了一系列控制变量，以进一步减少因遗漏变量导致出现非平行趋势的可能。控制变量包括两类：一类是气象变量，包括平均气温(tem)、平均气压(prs)、平均相对湿度(rhu)、平均风速(win)、降水量(pre)和日照时间(ssd)6 个变量④；另一类是社会经济变量，包括城市年末常住人口(lnpop)、GDP(lngdp)、固定资产投资(lnfai)、人均国民生产总值(lnpgdp)、二产占 GDP 比重(secgdp)、人口密度(lnpopd)和万元 GDP 能耗(gdpec)7 个变量⑤，分别用于反映城市规模、经济规模、投资规模、发达程度、产业结构、环境压力和能源利用程度。其中，除 secgdp 和 gdpec 外，其余均进行对数化处理。变量描述性统计结果见表 1。

1.3 变量解释率排序

冗余分析(Redundancy Analysis，RDA)是一种回归分析结合主成分分析的排序方法，能将多变量直接进行梯度分析，结合蒙特卡罗(Monte Carlo)置换检验可得到各解释变量的重要性排序，同时消除解释变量之间的共线性问题。本文基于第一批试点城市、第二批试点城市及控制组城市共 55 个城市 2015 年以来 4 个采暖季的空气质量和控制变量月数据，采用冗余分析和蒙特卡罗置换检验方法，优化确定能最大限度地反映 4 种污染物浓度变化的控制变量线性组合，作为每种污染物对应的控制变量，结果如表 2 所示。

②数据来源于生态环境部综合业务门户网站(http://10.100.249.24/)公布的城市空气质量日数据，统一为标准状况并处理成月数据。
③20 个控制组城市：宝鸡、大同、东营、临沂、漯河、平顶山、三门峡、商洛、商丘、朔州、忻州、泰安、铜川、潍坊、渭南、许昌、延安、榆林、枣庄、周口。
④基于中国气象数据网(http://www.nmic.cn)发布的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)处理成月数据。
⑤数据来自各省区市统计年鉴及部分城市国民经济和社会发展统计公报，均采用年度数据。

表 1 变量描述性统计结果

变量	变量属性	第一批试点城市(12 个)			控制组城市(20 个)			第二批试点城市(23 个)		
		样本数	均值	标准差	样本数	均值	标准差	样本数	均值	标准差
SO_2/(μg/m^3)	被解释变量	120	35.95	27.34	200	34.43	24.61	230	50.92	50.10
CO/(mg/m^3)	被解释变量	120	1.80	0.73	200	1.41	0.46	230	1.79	0.68
PM_{10}/(μg/m^3)	被解释变量	120	164.86	46.47	200	142.21	34.22	230	164.93	44.77
$PM_{2.5}$/(μg/m^3)	被解释变量	120	104.36	36.89	200	85.76	28.55	230	101.68	38.04
time	解释变量	120	0.50	0.50	200	0.50	0.50	230	0.50	0.50
treated	解释变量	120	1.00	0	200	0	0	230	1.00	1.00
time×treated	解释变量	120	0.50	0.50	200	0	0	230	0.50	0.50
tem/℃	控制变量	120	3.15	4.76	200	2.50	5.04	230	3.10	4.74
prs/hPa	控制变量	120	1010.75	25.07	200	962.54	56.21	230	974.72	55.62
pre/mm	控制变量	120	7.60	7.45	200	13.85	12.79	230	8.77	8.89
ssd/h	控制变量	120	4.97	1.70	200	5.10	1.63	230	4.99	1.65
win/m/s	控制变量	120	1.93	0.40	200	2.21	1.06	230	2.30	0.95
rhu/%	控制变量	120	59.59	13.65	200	61.03	13.23	230	59.11	13.40
lngdp	控制变量	120	8.26	0.83	200	7.52	0.68	230	7.73	0.56
secgdp/%	控制变量	120	44.59	7.92	200	50.54	8.21	230	47.92	6.64
lnfai	控制变量	120	8.05	0.81	200	7.44	0.76	230	7.45	0.85
lnpgdp	控制变量	120	11.01	0.44	200	10.82	0.46	230	10.75	0.34
lnpop	控制变量	120	6.46	0.58	200	5.91	0.61	230	6.20	0.46
lnpopd	控制变量	120	6.38	0.55	200	5.88	0.81	230	6.27	0.37
gdpec	控制变量	120	0.67	0.19	200	0.81	0.33	230	1.03	0.48

表 2 通过蒙特卡罗(Monte Carlo)置换检验的变量及其解释率

控制变量	被解释变量			
	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$
tem/℃	10.7***	21.9***	—	—
prs/hPa	1.2***	—	—	—
win/m/s	—	—	—	0.9**
rhu/%	1.2***	—	—	1.3***
ssd/h	—	—	5.9***	27.4***
pre/mm	—	—	9.9***	6.7**
lnpop	—	1.1***	—	—
lnpopd	—	—	13.3***	8.6***
lngdp	—	—	—	—
lnfai	—	—	1.2***	—
secgdp	0.8**	8.0***	3.2***	—
lnpgdp	—	3.0***	—	1.3***
gdpec	34.6*	0.5***	2.7***	—

2 对空气质量改善作用的效果评估

2.1 清洁取暖补贴前后的对比

从污染物浓度均值变化率(图 2)看，2018—2019 年采暖月相比 2016—2017 年采暖月，SO_2 浓度降低率表现为第二批试点城市>第一批试点城市>控制组，CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度降低率均表现为第一批试点城市>第二批试点城市>控制组城市。其中，试点城市 SO_2 浓度降幅最大，在 54.1%~60.7%之间；CO 次之，降幅在 30.2%~34.4%之间；PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度降幅相对较小，在 12.3%~26.0%之间。

结合污染物浓度分布格局(图 3)看，在 2018—2019 年采暖月，所有城市的 SO_2 浓度以及除大同市和枣庄市之外的所有城市 CO 浓度较 2016—2017 年均有所下降；个别试点城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度不降反升，如阳泉市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度较 2016—2017 年采暖月分别上升 7.1%和 6.8%，济宁市 PM_{10} 浓度较 2016—2017 年采暖月上升 2.6%；控制组城市中的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度反弹现象明显，其中，泰安、榆林、商洛和周口 4 市的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度以及商丘、临沂、漯河和枣庄 4 市的 $PM_{2.5}$ 浓度均有不同程度的上升。

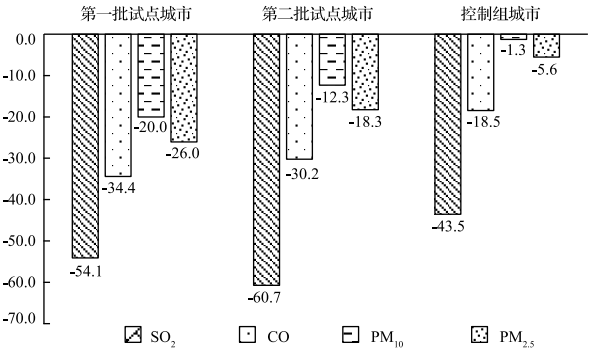

图 2 2018—2019 年采暖月污染物浓度较 2016—2017 年变化率均值(%)

2.2 清洁取暖补贴效果的检验

清洁取暖补贴对第一批试点城市和第二批试点城市采暖月空气质量改善效果的双重差分结果如表 3 所示。从 SO_2 检验结果看，第一批试点城市补贴后较补贴前的双重差分项不显著，第二批试点城市清洁取暖补贴后较

补贴前的双重差分项显著为负，说明清洁取暖补贴对第一批试点城市 SO_2 浓度改善作用不显著，但使得第二批试点城市 SO_2 浓度较补贴前显著降低 24.53μg/m³，对污染物浓度下降的贡献度(以下简称贡献度)为 55.2%。从 CO 检验结果看，第一批试点城市和第二批试点城市的双重差分项均显著为负，说明清洁取暖补贴使得第一批试点城市采暖月 CO 浓度较补贴前显著降低 0.411mg/m³(贡献度为 56.0%)，使得第二批试点城市采暖月 CO 浓度较补贴前显著降低 0.345mg/m³(贡献度为 54.0%)。从 PM_{10} 的检验结果看，第一批试点城市和第二批试点城市的双重差分项均显著为负，说明清洁取暖补贴使得第一批试点城市采暖月 PM_{10} 浓度较补贴前显著降低 22.53μg/m³(贡献度为 65.2%)，使得第二批试点城市采暖月 CO 浓度较补贴前显著降低 13.33μg/m³(贡献度为 61.5%)。从 $PM_{2.5}$ 检验结果看，第一批试点城市和第二批试点城市的双重差分项均显著为负，说明清洁取暖补贴使得第一批试点城市采暖月 $PM_{2.5}$ 浓度较补贴前显著降低 15.45μg/m³(贡献度为 49.8%)，使得第二批试点城市采暖月 CO 浓度较补贴前显著降低 9.506μg/m³(贡献度为 46.5%)。

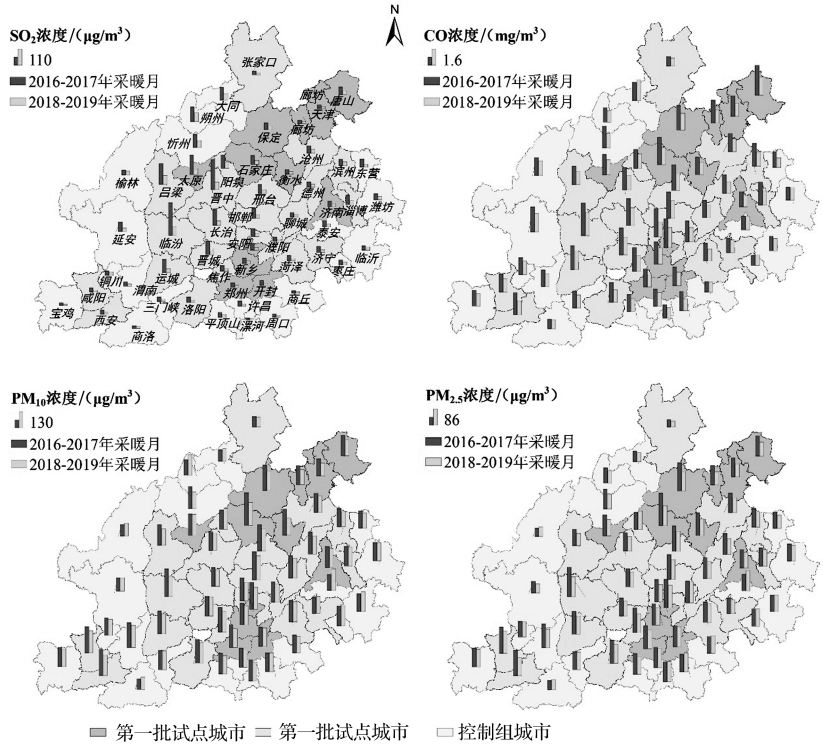

图 3　2016—2017 年和 2018—2019 年采暖月污染物浓度分布格局示意图

表 3　双重差分结果

变量	第一批试点城市				第二批试点城市			
	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$
time	−19.33***	−0.288***	−7.606	−13.82***	−17.59***	−0.274***	−10.02*	−14.49***
	(−8.74)	(−5.59)	(−1.92)	(−4.57)	(−7.55)	(−5.33)	(−2.44)	(−5.03)
treated	10.50*	0.772***	29.18***	17.36***	18.61***	0.485***	19.16***	13.14***
	(2.31)	(7.94)	(5.34)	(3.87)	(4.85)	(6.40)	(3.94)	(3.77)
_diff	−7.722	−0.411***	−22.53**	−15.45**	−24.53***	−0.345***	−13.33*	−9.506*
	(−1.74)	(−4.41)	(−3.32)	(−3.08)	(−4.86)	(−3.97)	(−2.34)	(−2.24)
tem	−1.761***	−0.0711***	—	—	−1.938***	−0.0472***	—	—
	(−9.02)	(−15.34)	—	—	(−7.22)	(−10.23)	—	—
prs	−0.0388	—	—	—	0.0343	—	—	—
	(−1.27)	—	—	—	(1.26)	—	—	—
rhu	−0.0899	—	—	−0.168	−0.102	—	—	−0.403***
	(−1.32)	—	—	(−1.55)	(−1.21)	—	—	(−3.75)

续表 3

变量	第一批试点城市				第二批试点城市			
	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$
secgdp	−0.241*	0.0227***	0.299	—	0.227	0.0162***	0.249	—
	(−2.08)	(5.84)	(1.23)	—	(1.59)	(3.80)	(1.03)	—
gdpec	26.08***	−0.0171	56.02***	—	50.21***	0.332***	15.23*	—
	(6.20)	(−0.16)	(6.54)	—	(7.27)	(3.71)	(2.45)	—
lnpop	—	0.0909	—	—	—	0.195***	—	—
	—	(1.95)	—	—	—	(3.75)	—	—
lnpgdp	—	−0.276***	—	1.892	—	−0.129*	—	6.878*
	—	(−5.26)	—	(0.77)	—	(−2.20)	—	(2.40)
ssd	—	—	−14.18***	−14.40***	—	—	−14.80***	−16.91***
	—	—	(−11.45)	(−14.60)	—	—	(−14.81)	(−19.40)
pre	—	—	−0.291	−0.446**	—	—	−0.384*	−0.290*
	—	—	(−1.57)	(−2.91)	—	—	(−2.59)	(−2.30)
lnpopd	—	—	8.395**	9.589***	—	—	10.04***	9.033***
	—	—	(2.96)	(5.44)	—	—	(3.46)	(4.50)
lnfai	—	—	10.94**	—	—	—	4.009	—
	—	—	(3.32)	—	—	—	(1.28)	—
win	—	—	—	3.549*	—	—	—	5.293***
	—	—	—	(2.37)	—	—	—	(4.54)
_cons	82.39*	3.051***	31.02	97.76**	−30.81	0.823	114.2**	68.51
	(2.57)	(4.35)	(0.98)	(3.13)	(−0.99)	(1.08)	(2.87)	(1.72)
N	320	320	320	320	430	430	430	430
R^2	0.53	0.60	0.53	0.59	0.56	0.45	0.49	0.59

注：_diff 为双重差分项；_cons 为常数项；*N* 为样本数量；R^2 为相关系数；括号内数据为 *T* 检验值。

为进一步验证双重差分结果的可靠性，本文开展了安慰剂检验。重新设置时间变量，将 2016—2017 年采暖月取值为 1，将 2015—2016 年采暖月取值为 0(两个时段均未实施清洁取暖补贴)，其他变量设置不变。安慰剂检验结果如表 4 所示，第一批试点城市和第二批试点城市 4 种污染物的检验结果均不显著或均不是显著为负，进一步说明上述 4 种污染物的双重差分结果具有较高的可靠性。

表 4　安慰剂检验结果

变量	第一批试点城市				第二批试点城市			
	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$
time	−2.335	−0.0451	−2.708	0.706	−1.056	−0.0707	−3.641	0.553
	(−0.89)	(−0.76)	(−0.60)	(0.21)	(−0.39)	(−1.12)	(−0.80)	(0.17)
treated	11.92***	0.656***	10.50	8.093	7.386*	0.443***	7.220	−1.562
	(3.61)	(7.89)	(1.69)	(1.70)	(2.09)	(5.19)	(1.38)	(−0.45)
_diff	−2.510	0.197	10.82	6.536	10.65	0.00888	11.07	11.70*
	(−0.50)	(1.75)	(1.29)	(1.08)	(1.86)	(0.08)	(1.61)	(2.34)
tem	−2.134***	−0.0749***	—	—	−2.460***	−0.0449***	—	—
	(−7.79)	(−12.42)	—	—	(−7.02)	(−7.55)	—	—
prs	0.00621	—	—	—	0.0497	—	—	—
	(0.19)	—	—	—	(1.65)	—	—	—
rhu	−0.130	—	—	0.243	−0.190*	—	—	0.0317
	(−1.44)	—	—	(1.00)	(−1.97)	—	—	(0.16)
secgdp	−0.304*	0.0336***	1.047**	—	0.191	0.0258***	1.168***	—
	(−2.18)	(7.71)	(3.29)	—	(1.17)	(4.67)	(4.06)	—
gdpec	34.31***	−0.000724	10.27	—	52.10***	0.443***	−7.285	—
	(7.42)	(−0.01)	(1.14)	—	(7.32)	(4.63)	(−1.20)	—
lnpop	—	0.123*	—	—	—	0.291***	—	—
	—	(2.20)	—	—	—	(4.50)	—	—

续表 4

变量	第一批试点城市				第二批试点城市			
	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$
lnpgdp	—	−0.454***	—	2.523	—	−0.203**	—	13.11***
	—	(−6.81)	—	(0.73)	—	(−2.78)	—	(4.15)
ssd	—	—	−14.27***	−13.01***	—	—	−14.67***	−14.81***
	—	—	(−9.26)	(−7.84)	—	—	(−11.56)	(−10.83)
pre	—	—	−1.179***	−0.879***	—	—	−1.248***	−0.886***
	—	—	(−8.74)	(−8.23)	—	—	(−10.66)	(−9.73)
lnpopd	—	—	18.23***	9.646***	—	—	20.65***	13.38***
	—	—	(5.15)	(5.43)	—	—	(6.48)	(7.59)
lnfai	—	—	2.990	—	—	—	2.668	—
	—	—	(0.75)	—	—	—	(0.75)	—
win	—	—	—	1.663	—	—	—	3.131**
	—	—	—	(1.01)	—	—	—	(3.04)
_cons	41.24	4.264***	49.63	68.86	−37.43	0.536	50.47	−47.68
	(1.23)	(5.16)	(1.19)	(1.80)	(−1.10)	(0.56)	(1.23)	(−1.17)
N	320	320	320	320	430	430	430	430
R^2	0.43	0.50	0.48	0.54	0.48	0.33	0.48	0.52

注：_diff 为双重差分项；_cons 为常数项；*N* 为样本数量；R^2 为相关系数；括号内数据为 *T* 检验值。

2.3 部分检验结果的原因分析

清洁取暖补贴对第一批试点城市 SO_2 浓度改善效果不显著而对第二批试点城市改善作用显著的原因主要是：(1)与试点城市产业结构和能耗水平差异有关。第二批试点城市二产占 GDP 比重和万元 GDP 能耗均值明显大于第一批试点城市(表 1)，且第二批试点城市包括许多煤炭资源型城市，一定程度上说明第二批试点城市工业燃煤锅炉和散煤污染治理带来的 SO_2 减排量占比相对较大，导致清洁取暖补贴带来的改善效果可能被高估；(2)与试点城市 SO_2 污染减排压力大小有关。第一批试点城市 2016—2017 年采暖月 SO_2 浓度为 49.16μg/m^3，而第二批试点城市达到 73.12μg/m^3，其所面临的 SO_2 污染减排压力更大，使得其清洁取暖改造工作推进更为积极。

清洁取暖补贴对第一批试点城市 CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的改善幅度大于第二批试点城市的原因主要是：(1)与清洁取暖补贴和工作推进早晚有关。第一批试点城市在 2017 年 5 月就被正式列入试点，而第二批试点城市中位于京津冀及周边地区的 16 个城市，虽在 2017 年就开始推进清洁取暖改造，但在 2018 年 7 月才被正式列入试点补贴范围，其他 7 个城市则是在被列入试点后才开始实施清洁取暖改造。(2)与中央和地方财政投入、社会经济发展水平和空气质量改善压力等因素有关。第一批试点城市多为直辖市和省会城市，中央财政奖补资金力度相对较大，且社会经济发展水平和空气质量改善压力大于第二批试点城市，从而使得第一批试点城市清洁取暖改造工作推进相对较快。

3 结论与建议

3.1 主要结论

一是清洁取暖补贴对第一批试点城市采暖月 SO_2 浓度的改善效果不显著，但对第二批试点城市的改善作用显著。SO_2 双重差分结果显示，清洁取暖补贴对第一批试点城市 SO_2 浓度改善作用不显著，但使得第二批试点城市较补贴前显著降低 24.53μg/m^3，对 SO_2 浓度下降的贡献度为 55.2%。这主要与试点城市二产占 GDP 比重、能源综合利用程度和 SO_2 污染减排压力等存在差异有关。

二是清洁取暖补贴对试点城市采暖月 CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度均有显著改善作用，且对第一批试点城市的贡献更大。第一批试点城市补贴后采暖月 CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度分别较补贴前显著降低 0.411mg/m^3、22.53μg/m^3、15.45μg/m^3，贡献度分别为 56.0%、65.2%、49.8%，均大于第二批试点城市的改善幅度(分别显著降低 0.345mg/m^3、13.33μg/m^3、9.506μg/m^3，贡献度分别为 54.0%、61.5%、46.5%)。这主要与清洁取暖改造实施年限、中央和地方财政投入、社会经济发展水平、空气质量改善压力等因素有关。

三是清洁取暖补贴后，个别试点城市采暖月 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度未实现下降。2018—2019 年采暖月，第一批试点城市的 4 种污染物浓度较 2016—2017 年均有不同程度降低，第二批试点城市 SO_2 和 CO 也实现了下

降，但个别城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度出现反弹。如阳泉市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度较 2016—2017 年相关 7.1% 和 6.8%，济宁市 PM_{10} 浓度较 2016—2017 年反弹 2.6%。这可能与反弹地市清洁取暖改造推进缓慢、取得实效不明显等因素有关。

3.2 对策建议

一是构建和完善差异化补贴机制。以往的清洁取暖试点补贴额度是依据城市行政级别确定，行政级别越高，补贴额度越大。但从空气质量改善效果看，污染物浓度改善效果并不因行政级别高而更好。建议推行差异化补贴机制，对社会经济发展水平低、二产占 GDP 比重小、能源综合利用程度低、农村居民分布密集、空气质量改善压力大的地区予以重点补贴。

二是优化调整清洁取暖补贴资金使用方式。目前，清洁取暖补贴资金主要用于采暖设备购置补贴和运行补贴方面，较少用于农居建筑保温节能改造。建议加大对农居建筑保温节能改造方面的投入，通过实施部分外墙外保温、加装保温窗帘、保温门帘和保温吊顶以及屋顶改造等方式，改善农村建筑热环境和能效水平，实现节能性和经济性兼具的效果。

三是引导地方政府探索建立中长期财政补贴机制。补贴期限到期后，地方财政补贴压力加大，降低清洁取暖补贴投入就显得至关重要。建议地方政府评估现有清洁取暖改造技术路径和实施效果，积极借鉴“鹤壁模式”等地方经验，选择最经济有效的清洁取暖技术改造路径。同时，探索引入社会资本，形成科学合理的商业模式，推动农村清洁取暖市场化运转。

参考文献：

[1] ASHENFELTER O, CARD D. Using the longitudinal structure of earnings to estimate the effect of training programs [J]. The Review of Economics and Statistics, 1985, 67(4): 648-660.

[2] 夏永妹. 长三角区域大气污染防治协作机制是否发挥了作用：基于双重差分模型的实证分析 [J]. 低碳世界, 2018(11): 13-14.

[3] 杨骞, 王弘儒, 刘华军. 区域大气污染联防联控是否取得了预期效果：来自山东省会城市群的经验证据 [J]. 城市与环境研究, 2016(4): 3-21.

[4] 刘张立, 吴建南. 中央环保督察改善空气质量了吗：基于双重差分模型的实证研究 [J]. 公共行政评论, 2019, 12(2): 23-42, 193-194.

[5] 王敏, 冯相昭, 梁启迪, 等. 太原市强化监督定点帮扶对空气质量改善的作用 [J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(1): 160-166.

[6] WANG Kunlun, YIN Hongchun, CHEN Yiwen. The effect of environmental regulation on air quality: a study of new ambient air quality standards in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 268-279.

Quantitative evaluation on the effect of clean heating subsidy based on DID estimation

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

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

Abstract: Financial subsidy is considered as one of the important guarantees for smoothly promoting the implementation of clean heating pilots in winter in Northern China. By using the DID model estimation and RDA statistical methods, this paper conducts the effect evaluation of the policy of clean heating subsidy on the pilot cities. There are the following results: (1) Clean heating subsidy has significantly achieved the monthly average concentration improvement of CO, PM_{10} and $PM_{2.5}$, and contributed much more during the winter heating months for the first pilot cities, which decreases the monthly average concentration of CO, PM_{10} and $PM_{2.5}$ by 0.411mg/m^3, 22.53μg/m^3 and 15.45μg/m^3 respectively, with the corresponding contribution was 56.0%, 65.2% and 49.8%. (2) Clean heating subsidy has no significant effect on the monthly concentration of SO_2 in the heating seasons for the first pilot cities, but the monthly average concentration of SO_2 in the second pilot cities is significantly lower by 24.53μg/m^3 than that before the subsidy policy. (3) Significant progress has been made for clean heating subsidy policy, mainly due to the combined effect of various positive factors such as local emphasis, governance capabilities, a series of pollution prevention measures and meteorological conditions. The following suggestions are put forward: (1) Establish and improve a differentiated subsidy mechanism. (2) Optimize and adjust the reasonable use of clean heating subsidy. (3) Guide local governments to explore the establishment of medium and long-term subsidy mechanisms towards clean heating.

Keywords: clean heating subsidy; air quality; peformance evaluation; Difference in Difference(DID) model