北方地区清洁取暖的影响因素及 污染物减排贡献分析

杜晓林, 冯相昭, 王敏, 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】截至 2018 年采暖季结束,清洁取暖工作总体开展较好,北方 15 省区市清洁取暖率达到 50.7%,《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》设定的中期目标已基本实现。从区域层面看,清洁取暖率排序依次是京津冀及周边地区(64%)、西北地区(49%)、东北地区(35%);从省级层面看,清洁取暖率差异较大,农村地区提高最大的是京津冀及周边地区,内蒙古、新疆、青海、宁夏农村清洁取暖增长率几乎为零;从城市层面看,试点城市、"2+26"通道城市和汾渭平原城市明显高于其他一般城市。影响因素分析结果显示,影响地方清洁取暖率较为明显的因素是经济水平、气象因素、社会因素和环境因素,资金投入越高、各地区冬季气温越低、城镇化率越高、环境质量相对较差地区的清洁取暖工作推进越积极,清洁取暖率越高。清洁取暖污染物减排贡献量化分析发现,清洁取暖对烟(粉)尘减排 19.23%,贡献最为显著;对二氧化硫减排 5.33%,也比较突出;对氮氧化物减排贡献较为一般,减排量占比 0.8%。建议重点关注农村地区清洁取暖改造情况,重点考虑如何在现有资金条件下保证清洁取暖的可持续性效果,完善地方环境质量考核评价机制。

【关键词】北方地区;清洁取暖;影响因素;减排贡献 中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2020)03-0016-05 **DOI**: 10.19758/j. cnki. issn1673-288x. 202003016

1 研究区概况

1.1 北方地区清洁取暖工作总体开展较好,中期目标 基本实现

为贯彻落实《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》(以下简称《规划》)的目标任务要求,我国北方地区自2017年以来积极推进冬季取暖清洁化改造工作。截至2018年采暖季结束,北方地区15个省区市清洁取暖面积较2016年增加了36亿平方米,清洁取暖率从38%提高到50.7%,增加了12.7个百分点。北方地区总体情况如下[1]:北方地区15个省区市城乡总采暖建筑面积约为199亿平方米,清洁取暖面积达到101亿平方米,总的清洁取暖率达到50.7%。其中,城镇地区采暖建筑面积共计127亿平方米,清洁取暖面积约为87亿平方米,清洁取暖率69%;农村地区采暖户数共有6529万户、采暖建筑面积共计72亿平方米,清洁取暖户数为1583万户,清洁取暖率为24%。

1.2 不同地区清洁取暖率差异较大

作为大气污染防治重点区域,京津冀及周边地区的 清洁取暖率高达 64%,西北地区为 49%,东北地区最 低,为 35%,因此清洁取暖率情况为:京津冀及周边地 区>全国平均>西北地区>东北地区。各省区市农村地区

的清洁取暖率京津冀及周边地区各省市完成情况最好, 其次是河南、陕西, 西北地区的内蒙古、新疆、青海、 宁夏增长率几乎为零。"2+26"通道城市和第一批试点 城市清洁取暖率已达到72%,明显高于其他地区;其次 是汾渭平原、清洁取暖率为51%、与北方地区总体水平 基本持平。清洁取暖率一般城市主要集中在东北和西北 地区,平均值低于北方地区平均水平。城镇和农村清洁 取暖率差距较大, 城镇清洁取暖率显著高于农村地区。 农村地区 2019 年度清洁取暖目标完成率高于城镇地区, 北方城镇清洁取暖率总体为69%,农村地区为24%,各 地区城镇与农村的取暖率差值为35%~57%,其中第一 批试点城市的城乡差距最小, 西北地区城乡差距最大。 城镇地区的清洁取暖率均未达到 2019 年采暖季结束的 目标值,但接近目标值,差距较小;"2+26"城市和第 一批试点城市的农村地区已完成 2019 年度目标值, 但 不同地区的完成情况差距较大。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究中所用的北方地区清洁取暖数据来源于"北方地区冬季清洁取暖规划中期评估调研组",各省区市的 GDP 及其增长率、人口密度、人均可支配收入、空

气质量数据、气象数据等各项指标分别来源于各省区市 各省区市《生态环境质量公报》以及国家气象信息中年鉴、2018年城市《国民经济和社会发展统计公报》、 心等。

+ 4	
表 1	全国分地区清洁取暖率

单位: 亿平方米

地区	总采暖建筑	总体清洁	城镇采暖	城镇清洁	农村采暖	农村清洁
	面积	取暖率	建筑面积	取暖率	面积	取暖率
全国平均	199	50.7%	127	69.0%	72	24. 0%
京津冀及周边地区	113	64.0%	73	82.0%	40	32.0%
西北地区	23	49.0%	16	64.0%	7	11.0%
东北地区	49	35.0%	38	42.0%	11	4.0%

2.2 影响因素研究方法

本研究通过对北方 15 省区市清洁取暖的基本情况进行分析,在众多影响清洁取暖率的指标中找出主要因素,并确定各指标对清洁取暖率的影响程度。研究分析思路如下:首先利用 SPSS 23.0 版本相关性分析软件对各个指标进行相关性检验,以便对各指标的数据特征有一个概括的认识,同时筛选出具有相关性的指标;然后用主成分分析法找出可以明显描述清洁取暖率的指标,找出对清洁取暖率影响较为明显的因素,分析影响清洁取暖发展的决定因素;最后用回归分析法确定这些因素对清洁取暖发展的影响方向和强弱。

(1)数据标准化处理

目前数据标准化方法有多种, SPSS 描述指令中采用 Z 标准化,即标准差标准化。经过处理的数据符合标准正态分布,即均值为 0,标准差为 1,其转化函数为:

$$X^* = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

其中 μ 为所有样本数据的均值, σ 为所有样本数据的标准差。

(2)相关性分析

相关系数(correlation coefficient)是反映变量之间关系密切程度的统计指标,相关系数的取值区间在1到-1之间。1表示两个变量完全线性相关,-1表示两个变量完全负相关,0表示两个变量不相关。数据越趋近于0表示相关关系越弱。以下是相关系数的计算公式。

$$\gamma = \frac{Sxy}{Sx \times Sy}$$

其中 γ 表示样本相关系数, Sxy表示样本协方差, Sx表示x的样本标准差, Sy表示y的样本标准差。下面分别是 Sxy 协方差、Sx和 Sy标准差的计算公式。由于是样本协方差和样本标准差,因此分母使用的是 n-1。

Sxy 样本协方差计算公式:

$$Sxy = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Xi - \overline{X})(Yi - \overline{Y})}{n-1}$$

Sx 样本标准差计算公式:

$$Sx = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})2}{n-1}}$$

Sv 样本标准差计算公式:

$$Sy = \sqrt{\frac{\sum (yi - \overline{y})2}{n-1}}$$

通过分析,选取与清洁取暖相关的参考指标共 25 个^[2],涵盖经济、人口、社会、环境、气象等指标参数。抽选出与研究区域清洁取暖率具有相关性的指标。

(3)主成分分析

选择与研究区域清洁取暖率具有相关性的指标并设定参数顺序和符号。首先进行相关性检验,通过变量之间的相关系数矩阵可以直观地看到 KMO 值和巴特利特球形度检验 ρ 值,由此判断变量之间是否存在相关性,是否可以进行因子分析。然后提取主成分和公因子,选择特征值大于 1 的主成分,他们合计能解释 85% 以上的方差,若可以进行有效分析,则将其余成分舍去。最后根据特征值和特征向量写出主成分回归方程。

(4)聚类分析

根据所提取的主成分得分进行聚类分析,将 15 个 省区市得分进行归类,得出影响不同省区市清洁取暖率 的主要因素。

2.3 污染物减排贡献分析方法

采用排放系数法建立民用煤大气污染物清单,公式来源于《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》(以下简称《指南》)。具体公式为:

$$E_i = \sum_m (A_m \times E_{Fi, m})/1000$$

式中: E_i 为排放量(t); A_m 为排放源活动水平(t); E_{Fi} , $E_{Fi,m}$ 为排放系数(kg/t); i 为某种大气污染物; m 为煤的类型。

根据颜丙磊等^[3] 的研究,民用煤主要包括原煤、洗选精煤、型煤及焦炭。近13年来,民用煤中原煤平均占比超过81%,洗选精煤占9%左右,型煤和焦炭占

比总共不超过 10%。从煤种看,民用煤以烟煤为主,部分地区使用少量褐煤。从煤质情况分析,我国民用煤煤质干燥基灰分 $(A_{\rm d})$ 为 $10.16\%\sim26.69\%$,干燥无灰基挥发分 $(V_{\rm daf})$ 为 $11.7%\sim33.56\%$,干燥无灰基硫分 $(S_{\rm t,daf})$ 为 $0.39\%\sim2.2\%$ 。本研究界定散煤类型为烟煤,最终确定具体排放系数见表 2。所涉及的煤炭类型排放系数为《指南》中推荐的排放系数。

表 2 民用煤排放系数推荐值 单位: kg/t-煤

污染物	排放系数	排放系数等级
SO_2	7. 4S _{t,d}	В
NOx	1.6	В
CO	140. 1	В
VOCs	4. 0	С
PM_{10}	13. 5	С
PM _{2.5}	10. 8	С

3 结果与分析

3.1 清洁取暖影响因素分析

由 SPSS 输出结果可以看出, 所有指标中共有 11 个指标与研究区域清洁取暖率具有显著相关性, 如表 1 所示。因此选取这 11 个指标进行主成分分析, 其余不相关指标舍去。

表 3 清洁取暖指标参数表

指标类别	指标名称		
农村指标	农村清洁取暖率/%		
	人均 GDP/元		
经济指标	全体人均可支配收入/元		
	农村人均可支配收入/元		
	城镇人均可支配收入/元		
	城区建成区面积/平方千米		
社会指标	城市人口密度/(人/平方千米)		
	农村人口比重/%		
气象指标	采暖季平均气温/摄氏度		
ARAIG 48.4-1	农村用电量/亿千瓦时		
能源指标	城市集中供热管道长度/千米		

由变量之间的相关系数矩阵可以直观地看到,两个指标值 KMO 值是 0.532,巴特利特球形度检验 ρ 值小于 0.001,说明变量之间存在相关性,可以进行因子分析。成分 1-3 的特征值大于 1,它们合计能解释 88.59%的方差,所以可以提取 1-3 作为主成分,其余成分信息舍去。

根据输出提取的成分矩阵,从因子旋转得到的输出结果可以看出,3个主成分中起主导作用的影响因素各不相同,成分1具有显著相关的因子是人均 GDP、城镇和农村人均可支配收入、乡村人口的比重等,其所代表的是城市现阶段的经济水平;成分2具有显著相关的因子是城区建成区面积、城市集中供热管道长度、农村用电量等,代表的是社会因素;成分3具有显著影响因子

的是采暖季平均气温和城市人口密度,代表的是气象 因素。

通过对主成分进行回归分析,分别输入第一、第二、第三主成分得分作为自变量,研究区域清洁取暖率作为因变量,进行回归模型的优劣检验(R检验,R表示拟合优度,用来衡量估计模型对观测值的拟合程度,R值越接近1说明模型越好)。调整之后的 R^2 为0.561,说明拟合程度较好。通过F检验和T检验,显著性水平均小于0.05,则拒绝原假设,即认为列入模型的各个解释变量联合起来对清洁取暖率有显著影响。

为更好地区分每个城市的主要影响因素和影响程度,进一步通过主成分得分进行聚类分析,得到不同省份的主要影响因素和指标值,如表4所示。在成果显著性检验的基础下得到各省份的聚类和距离以及各省份距离的量化分析,如表4所示。

表 4 不同省区市影响指标和影响程度

序号	省区市	聚类	距离
1	北京	1	1. 19068
2	天津	1	1. 19068
3	河北	3	1. 29219
4	山西	2	0. 54561
5	山东	3	0. 97528
6	河南	2	2. 10187
7	陕西	2	1. 49093
8	吉林	2	1. 24073
9	辽宁	3	1. 19021
10	黑龙江	2	0. 14885
11	内蒙古	2	1. 13627
12	甘肃	2	0. 50799
13	宁夏	2	0. 73459
14	新疆	2	0. 79318
15	青海	2	0. 70592

由表 4 可以看出,有 2 个城市(北京和天津)的主要驱动因素是经济水平,有 10 个省份(河南、陕西、吉林、山西、黑龙江、内蒙古、甘肃、宁夏、新疆、青海)的主要影响因素是社会因素,有 3 个省份(河北、山东、辽宁)的主要影响因素是气象因素。清洁取暖影响因素的构成主要是农村清洁取暖工作进展、资金投入、气象因素、社会因素和环境因素。

对地方清洁取暖率影响较为明显的成分因素是农村清洁取暖工作进展(煤改气、农村清洁取暖率)、经济水平(GDP、人均可支配收入、城镇化率等)、气象因素(冬季最高温和最低温)和环境因素(AQI、PM_{2.5})。在所有影响因素中,农村地区清洁取暖工作的进展是影响研究区域清洁取暖率的最主要因素;其次是资金投入,即财政支持越高,清洁取暖率完成度越好;第三是气象因素,各地区冬季气温越低,越有助于推动清洁取暖工作;第四是社会因素,城镇化率和经济水平越高,清洁

取暖率越高;第五是环境因素,环境质量相对较差的城市清洁取暖工作推进较为积极。

进一步分析首要影响因素即农村清洁取暖率的影 响指标。由调研数据可知,农村地区清洁取暖路径以 天然气取暖和电采暖为主,农村累计"煤改气"约 825 万户,占总清洁取暖比例的52%;"煤改电"约为 623万户,占总清洁取暖比例的39%;生物质能、地 热、太阳能、工业余热等其他清洁能源取暖户数为 142万户, 占比9%。进一步分析可知, 农村"煤改 气"是影响清洁取暖率的关键因素。影响农村地区 "煤改气"进展的主要因素:一是居民的消费水平: 李秋波等[4] 在调研中发现,有61.43%的人认为"煤 改气"后取暖费用增加。农村大多数群体处于中低收 入水平, 因此影响群众实施"煤改气"的积极性; 二 是政府的"煤改气"财政补贴: 当地政府对于设计 费、改造费、管网建设费、设备购置费以及气价运行 补贴等方面财政投入的支出能力成为影响"煤改气" 进展的第二大因素,这直接影响到"煤改气"工程的 推进和实施; 三是农村环境的复杂性使得部分地区管 道难以通达[5]:农村供气方式主要是由燃气公司从输 气管道上开口接通天然气管网对用户供气。在部分地 区,采用管道供气需要穿越铁路、河流、高速公路、 国防光缆等复杂地形,管道供气难度很大且成本较高, 加之乡村房屋建筑布局较为分散, 无整体规划, 通信 线路、供电线路与燃气管道存在交叉、并行现象,情

况复杂多样且存在安全隐患,影响"煤改气"工程 进展。

3.2 污染物减排贡献

3.2.1 实现散煤削减

北方地区清洁取暖对减少大气污染物排放起到了显著作用。2017—2018 年北方地区 15 个省区市通过推动清洁取暖共削减散煤约 1.18 亿吨, "2+26" 重点城市2017—2018 年通过推动清洁取暖共削减散煤 5147 万吨,其中完成散煤治理约 1300 万户,削减散煤 1947 万吨;拆除低效供热小锅炉约 8 万蒸吨(蒸吨为热力计量单位,1 蒸吨=0.7MW),削减煤炭消费 3200 万吨,占同期北方地区散煤燃烧大气污染物减排量的 43.62%。

3.2.2 污染物减排贡献

清洁取暖对烟(粉)尘减排占比 19.23%, 贡献最为显著; 对二氧化硫减排占比 5.33%, 也比较突出; 对氮氧化物减排贡献较为一般, 减排量占比 0.8%。

截至 2018 年采暖季结束,北方 15 省区市清洁取暖的实施共减少大气污染物排放二氧化硫 87. 32 万吨、氮氧化物 18. 88 万吨、一氧化碳 1653. 18 万吨、挥发性有机物 VOCs 47. 2 万吨、 PM_{10} 159. 3 万吨和 $PM_{2.5}$ 127. 44 万吨。"2+26" 重点城市共减少大气污染物排放二氧化硫 38. 09 万吨、氮氧化物 8. 23 万吨、一氧化碳 721. 09 万吨、挥发性有机物 VOCs 20. 59 万吨、 PM_{10} 69. 48 万吨和 $PM_{2.5}$ 55. 59 万吨,占同期全国散煤燃烧大气污染物减排量的 40. 85%。

SO₂/万吨 NO_x/万吨 PM₁₀/万吨 PM_{2.5}/万吨 燃煤削减量/亿吨 CO/万吨 VOCs/万吨 北方 15 省区市 1.18 87.32 18.88 1653.18 47.20 159.30 127.44 "2+26" 重点城市 8. 23 69.48 0.52 38.09 721.09 20.59 55. 59

表 5 燃煤削减污染物减排量

根据 2019 年中国统计年鉴数据,2017 年全国二氧化硫总排放量为875.42 万吨,氮氧化物总排放量为1258.84 万吨,烟(粉)尘总排放量为796.27 万吨;北方15 省区市二氧化硫排放量为492.87 万吨,氮氧化物排放量为663.56 万吨,烟(粉)尘排放量为502.02 万吨。本研究开展期间,2018 年排放数据尚未公布。为便于对比分析,本研究假设2018 年污染物排放量等同于2017 年排放量,保守计算得出清洁取暖污染物减排量对全国污染物总排放量的占比。由于这些都是低矮面源,实际散

煤燃烧替代对空气质量影响比减排量影响更大。计算结果见表6。

由表 6 可以看出,清洁取暖对烟(粉)尘减排贡献最为显著,排放量减少了 19.23%。对二氧化硫减排量也比较突出,占全国总排放量的 5.33%,对氮氧化物减排贡献较为一般,排放量减少 0.8%。其中北方 15 省区市减排贡献占比较高,二氧化硫、氮氧化物和烟(粉)尘减排占比分别为 8.86%、1.42%和 28.56%。以上数据均为保守计算,实际贡献值会更高一些。

表 6 清洁取暖污染物减排量占污染物排放量的比	例
-------------------------	---

	全国排放量	清洁取暖削减量	占比	北方 15 省区市排放量	清洁取暖削减量	占比
二氧化硫/万吨	1750. 84	93. 24	5. 33%	985. 74	87. 32	8.86%
氮氧化物/万吨	2517. 68	20. 16	0.80%	1327. 12	18. 88	1. 42%
烟(粉)尘/万吨	1592. 54	306. 18	19. 23%	1004. 04	286. 74	28. 56%

4 讨论

要重点关注农村地区清洁取暖改造。清洁取暖重点在农村,农村地区的改造直接影响城市清洁取暖整体进展。但农村地区具有居住分散性、农房多样性、改造复杂性等特点,需要因地制宜进行改造。可根据资源禀赋和条件考虑生物质取暖、地热、太阳能等除"煤改气""煤改电"之外的清洁取暖改造路径^[6],结合乡村振兴、美丽农村建设以及城镇化发展,鼓励农民通过"进城上楼"等多种方式改善农村清洁取暖问题,同时加大农房建筑节能改造力度,节约能源,逐步建立清洁取暖观念。

经济成本是清洁取暖的首要影响因素,如何在现有资金条件下考虑可持续性效果是重中之重。要实现可持续的清洁取暖,需要"百姓用得起、政府补得起"。农村清洁取暖改造应审慎把握,并基于农户的经济承受能力,综合考虑地方财政和资源禀赋等因素,遵循用户可承受、政府可支撑、运行可持续的原则,制定科学的招标采购、补贴与评估机制^[7],保障企业服务质量及用户

利益,尽量降低因经济影响带来的散煤复烧风险。

建议进一步完善地方环境质量考核评价机制。清洁 取暖受环境和气象因素的刺激影响,在冬季气温较低和 大气环境较差时,人民群众清洁取暖改造意愿强烈^[8], 这与大气环境质量改善程度、地方环境质量考核评价机 制有关。因此,可将清洁取暖工作成效纳入考核指标, 建立健全完整的考核体系和奖惩机制。

参考文献:

- [1] 能源局: 北方地区冬季清洁取暖率已达 50.7% 替代散烧煤约 1 亿吨 [N/OL] (2019-09-20), http://energy.people.com.cn/nl/2019/0920/c7l661-31365262, html.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国 2019 年国民经济和社会发展统计公报 [N]. 中国信息报, 2020-03-02(002).
- [3] 颜丙磊, 唐夕媛, 吕佳霖, 等, 我国民用煤现状及污染物排放分析 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(1): 1-3.
- [4] 李秋波, 孙明阳, 段佳柯, 等. 煤改气工程补贴机制影响因素分析 [J]. 现代营销(经营版), 2018(10); 142-143.
- [5] 于博,魏朋涛. 乡村"煤改气"工程相关问题及解决措施[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(20): 120-121.
- [6] 殷帅,纪博雅,袁闪闪,等. 北方地区清洁取暖试点城市政策实施研究 [J]. 建筑科学,2018(12),6-12.
- [7] 徐伟, 袁闪闪, 孙峙峰, 等. 清洁取暖技术应用适宜性研究 [J]. 建筑科学, 2018, 34(12): 1-5, 9.
- [8] 杜晓林,冯相昭,王敏,等. 京津冀大气传输通道城市清洁取暖现状及影响因素分析[J]. 环境与可持续发展,2020,45(1):155-159.

Analysis on influencing factors of clean heating in North China and contribution of pollutant emission reduction

DU Xiaolin, FENG Xiangzhao, WANG Min, ZHAO Mengxue, WANG Peng, LIANG Qidi (Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China)

Abstract: As of the end of the heating season in 2018, clean heating has generally been well developed. The clean heating rate in 15 northern provinces has reached 50.7%, and the medium-term goals set by the Plan for Clean Heating in Winter in Northern China (2017-2021) have been basically achieved. At the regional level, the clean heating rates are ranked in Beijing-Tianjin-Hebei region and the surrounding areas (64%), Northwest (49%) and Northeast (35%); at the provincial level, the clean heating rates vary widely, and rural areas have the largest improvement. The growth rate of clean heating in rural areas of Inner Mongolia, Xinjiang, Qinghai and Ningxia is almost zero; at the urban level, the pilot cities, the "2+ 26" channel cities and Fen-wei Plains cities are significantly higher than the other ordinary cities. The analysis results of the influencing factors show that the obvious factors affecting the local clean heating rate are economic level, meteorological factors, social factors and environmental factors. The higher the capital investment, the lower the winter temperature in each region, the higher the urbanization rate and the relatively worse environmental quality, the more aggressive cleaning and heating work and the higher the cleaning and heating rate in the area is. From the quantitative analysis of the contribution of clean heating pollutant emission reduction, it is found that clean heating contributes the most significant to the smoke (powder) dust emission reduction for 19.23%, and the sulfur dioxide emission reduction accounted for 5.33%. The contribution to nitrogen oxide emission reduction is relatively general, with the emission reduction rate accounting for 0.8%. It is suggested to focus on the renovation of clean heating in rural areas, to focus on how to ensure the sustainable effect of clean heating under the current funding conditions, and to improve the assessment mechanism of local environmental quality.

Keywords: North of China; clean heating; influencing factors; emission reduction contribution