

# 政策驱动下的中国北方农村地区清洁取暖方式

周淑慧<sup>1</sup> 孙慧<sup>1</sup> 王晨龙<sup>2</sup> 梁严<sup>1</sup>

1. 中国石油规划总院 2. 北京市劳动保护科学研究所

**摘要：**北方农村地区冬季清洁取暖是我国能源消费革命、农村生活方式革命的重要内容，也是重大民生工程 and 暖心工程，如何兼顾其经济性、适用性和环保要求备受关注。为此，以农村清洁取暖重点地区——京津冀及周边“2+26”城市为研究对象，在现场调研、入户实测的基础上，从技术、经济和环保3个维度，对该区4种主要的清洁取暖方式（燃气壁挂炉、蓄热式电暖器、空气源热泵和清洁煤炭取暖）进行对比分析，并提出了针对性的建议。研究表明：①燃气壁挂炉替代燃煤取暖是较为经济的选择，但应严把产品能效和排放准入关，建议城镇和经济较发达的农村地区燃气采暖普及推广节能环保的冷凝式壁挂炉；②农村既有建筑普遍缺乏保温措施、采暖能耗高，应重视保温隔热措施，建议推进清洁采暖过程中同步实施房屋节能改造并给予适当补贴，结合农村新型城镇化建设推进集中供暖；③洁净煤取暖在部分农村地区较长时间内仍将存在，但须严格煤质监管，建议采取“洁净型煤+专用炉具+一氧化碳监测”整套措施；④坚持因地制宜方略，各地应立足资源禀赋，选择合适的取暖路径和取暖设备，可再生能源丰富、电网配套条件好的地区，宜重点推广蓄热式电暖器或空气源热泵取暖；⑤关注农村“后煤改气、煤改电”时代的平稳运行问题，建议从国家层面统筹研究制定补贴退出方式及退出后的贫困户精准补贴问题，注重环保政策和绿色发展理念的宣传贯彻，真正做到“改得起、用得起、愿意用”。

**关键词：**中国北方农村地区；清洁取暖；燃气壁挂炉；清洁煤炭取暖；电暖器；空气源热泵；经济性；污染物

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.03.018

## Policy-driven clean heating modes in the rural areas of the northern China

ZHOU Shuhui<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>1</sup>, WANG Chenlong<sup>2</sup>, LIANG Yan<sup>1</sup>

(1. PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China; 2. Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100050, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 3, pp.146-156, 3/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** Clean heating in the rural areas of the northern China in winters is an important part of the energy consumption revolution and rural lifestyle revolution, and it is also a major livelihood project and a heart-warming project. Therefore, it is widely concerned to give considerations to its economy, applicability and environmental requirements. In this paper, "2+26" cities in the Beijing-Tianjin-Hebei area and its periphery, which is an important area with clean heating in the countryside, were taken as the research object. Based on field survey and household measurement, four main clean heating methods (wall-mounted gas boiler, regenerative electric heater, air source heat pump and clean coal heating) in this area were analyzed and compared in terms of technology, economy and environment. In addition, some specific suggestions were proposed. And the following research results were obtained. First, wall-mounted gas boiler is a more cost-effective alternative to coal-fired heating, but the access to product's energy efficiency and emission shall be controlled strictly. It is recommended to popularize energy-saving and environmentally-friendly condensing wall-mounted boilers in cities and in economically developed rural areas. Second, there are no thermal insulation measures in existing buildings in rural areas and heating energy consumption is high, so more attention shall be paid to thermal insulation measures. And it is suggested to carry out energy-saving transformation on houses and provide appropriate subsidies while promoting clean heating, and to propel the centralized heating during the construction of new urbanization in rural areas. Third, clean-coal heating will still exist in some rural areas for a long time. Therefore, it is necessary to strengthen the supervision of coal quality, and it is recommended to adopt a set of "clean coal + special stove + carbon monoxide monitoring" measures. Fourth, it is necessary to adopt measures according to local conditions. That is to choose the appropriate heating path and heating equipment on the basis of local resource characteristics. In the areas with abundant renewable energy and good grid supporting conditions, it is advisable to focus on the popularization of regenerative electric heaters or air source heat pumps for heating. Fifth, to ensure the stable operation of rural areas in the era of "post coal to gas and coal to electricity", it is recommended that the state shall conduct a comprehensive study on the formulation of subsidy exit mode and precise subsidies for poor households after the exit and strengthen the implementation of environmental protection policies and green development concepts, so as to truly reach the goal of "affordable transformation, affordable utilization, and content utilization".

**Keywords:** Rural area of northern China; Clean heating; Wall-mounted gas boiler; Clean coal heating; Electric heater; Air source heat pump; Economical efficiency; Pollutant

**作者简介：**周淑慧，女，1971年生，正高级工程师；主要从事天然气战略、规划和市场等方面的研究工作。地址：(100083)北京市海淀区志新西路3号。ORCID: 0000-0002-1419-3910。E-mail: zhoushuhui@petrochina.com.cn

## 0 引言

在国家大气污染治理、打赢蓝天保卫战等政策驱动下，北方农村地区取暖方式正由传统粗放式燃煤取暖，向多种清洁取暖方式转变，其中清洁煤炭取暖、燃气壁挂炉、蓄热式电暖器和空气源热泵是主要的方式。其他新兴取暖方式在少数地区也有使用，但尚未普及且需要一定的资源条件。如地热能取暖需要有稳定可靠的地热资源，且打井、铺设管网投资大，适合城镇或农村集中连片式供暖；太阳能取暖需要配套电加热或其他取暖设施，晚上和阴雨天太阳能不足时由电或其他加热设施提供，因此这种方式单位取暖面积投资大，比较适合在办公楼、学校等只有在白天有采暖需求的建筑；生物质直燃供暖存在着烟气污染物排放量偏高的问题<sup>[1]</sup>，需要配套高效除尘设施，比较适合以热电联产或锅炉房的方式向县城、工商业、公服和居民小区供暖。经过2017—2018年和2018—2019年两个采暖季的实践，洁净型煤和燃气壁挂炉取暖实际污染物排放情况如何，燃气壁挂炉和空气源热泵的经济、适用性如何都是公众关心的问题。为此笔者聚焦上述问题，选取我国北方农村清洁取暖重点地区——京津冀及周边“2+26”城市（京津冀大气污染传输通道）为研究对象，在现场调研、入户实测的基础上，从技术、经济和环保3个维度对上述4种主要的农村清洁取暖方式进行了对比分析。

## 1 不同清洁取暖方式的性能与特点

### 1.1 天然气取暖

天然气作为燃料取暖有燃气锅炉房、燃气热电联产、分布式能源和燃气壁挂炉4种方式，农村地区由于居住分散、人口密度低，通常采取分户式燃气壁挂炉取暖。燃气壁挂炉学名为燃气采暖热水炉，是一种既可用于家庭供暖，又可提供卫生和生活热水的壁挂式家用燃气具，最早起源于西欧，20世纪90年代初引入中国市场，初期多应用于别墅及联排住宅中，近几年在国家“煤改气”、清洁取暖等政策

驱动下，在北方农村地区开始普及。根据国家燃气供热专业委员会的调研报告<sup>[2]</sup>，2009年以来的十年间，我国家用燃气壁挂炉销量年均增长率达26%，远远超出经济发展的平均速度（表1）。从该报告还可以看出“煤改气”政策对壁挂炉销量的带动作用：2016年，全国燃气壁挂炉总销售量为 $210 \times 10^4$ 台，其中煤改气工程销售 $40 \times 10^4$ 台，占比19%；2017年销量达到峰值 $550 \times 10^4$ 台，其中禁煤区“煤改气”工程销售 $377.5 \times 10^4$ 台，占比高达68.6%；2018年，煤改气工程回归理性，节奏放缓，壁挂炉销售重回正常增长轨道，全年实现销量 $320 \times 10^4$ 台，其中“煤改气”工程销量 $145 \times 10^4$ 台，占总销量的45%。相关调研结果显示，2019年全国“煤改气”项目燃气壁挂炉招标台数接近 $280 \times 10^4$ 台，是2018年的1.93倍，其中河北省仍然是“煤改气”的主战场，总招标数高达 $214 \times 10^4$ 台，占比高达76.5%。

从市场销售的主流产品看，燃气壁挂炉分为普通炉和全预混冷凝炉两种。前者由于没有实时控制燃气与空气的混合比例且燃烧后烟气排放温度高（超过 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ），因而热效率较低，普遍介于85%~90%，满足国家二级及以下标准<sup>[3]</sup>；氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）排放浓度高，一般只能达到国家三级及以下标准<sup>[4]</sup>；在欧洲发达国家，现已禁止销售。而后者由于采取了变频、预混和冷凝技术，效率可达109%，超过国家1级能效标准，比普通壁挂炉高出20%~25%； $\text{NO}_x$ 排放强度低于 $30 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，优于国家五级排放标准。后者的节能环保原理主要为：①采用预混燃烧技术，精确控制空气的吸入量，实时保证燃气和空气的最佳配比，使燃烧更完全；②采用冷凝技术，将烟气排放温度降到 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，充分回收利用了烟气中水蒸气的潜热。从近3年我国燃气壁挂炉的销量可以看出，更加节能环保的冷凝炉在中高端市场越来越受欢迎<sup>[2]</sup>：2016年冷凝式燃气采暖热水炉销量为 $14.3 \times 10^4$ 台，占全年总销量的6.8%；2017年销售量增加到 $38.1 \times 10^4$ 台，占全年总销量的7.9%；2018年销售 $28.0 \times 10^4$ 台，占全年总销量的8.8%，尽管销量相比2017年减少26.5%，但占比提高了约1%。

表1 国内家用燃气壁挂炉销售量统计表

壁挂炉分类	年销售量/ $10^4$ 台									
	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	
国产	52	77	91	117	120	117	158	480	256	
原装进口	18	21	29	35	44	44	52	70	64	
总销售量	70	98	120	152	164	161	210	550	320	

## 1.2 电取暖

电取暖分为电直热和电蓄热两种, 适合农村地区分户式电取暖的主要方式有蓄热式电暖器、电热膜、发热电缆、碳晶板, 后 3 种均为电直热。电取暖的主要优点是会给取暖家庭带来大气污染, 还可以充分利用低谷时段过剩的风电资源, 缺点是对电网负荷要求高, 电网升级改造投入大。

电热膜取暖系统的核心部件是电热膜, 通电后电热膜中的碳分子团在电场的作用下进行“布朗运动”, 碳分子之间发生剧烈的摩擦和撞击, 产生的热能以远红外辐射和对流的形式对外传递, 电能与热能的转换率超过 98%。经历了第一代棚膜、第二代墙膜后, 目前进入了第三代地膜发展阶段。电热地膜采暖系统由电热膜、智能温度器、连接电缆、通讯单元等组成。这种取暖方式不耗水, 不占地, 开关自主, 符合低碳减排的政策导向。但对于农村平房住户而言, 电热地膜直接与地面长期接触, 尽管有绝热保温层阻隔, 也会产生较大热损失, 既有建筑更不适合采用这种方式。

发热电缆取暖是利用发热电缆将电能转换为热能的一种取暖方式, 一般铺设在地板下。通电后发热电缆温度上升到 40 ~ 60 °C, 通过热传导方式加热其周围的水泥层, 再传向地板, 最后通过对流方式加热空气, 对流传导热量约占 50%, 另外 50% 的热量通过发热电缆产生的 7 ~ 10 μm 的远红外线向人体和空间辐射, 电热转换效率超过 97%。发热电缆取暖系统由发热电缆、感温探头、温控器、地面保温层、混凝土层、地板装饰层等组成, 在欧美国家已推行 30 多年, 2000 年左右进入我国, 在北京、哈尔滨、沈阳等城市有较大面积推广。类似电热地膜, 发热电缆取暖在农村平房使用也存在热损失, 电能消耗比较大。

碳晶板取暖是以碳素晶体发热板为核心部件, 开发出的一种新型的低温辐射采暖系统, 其电能与热能的转换率超过 98%。碳晶辐射供暖系统主要部件有碳晶发热板、保温板、铁丝网、温控器, 由发热系统、保温系统、控温系统、电路系统四大子系统构成, 目前该技术已经非常成熟, 安全性好、安装灵活方便, 可根据需要铺设在地板下或安装在墙壁上, 也可做成可移动式。

蓄热式电暖器的工作原理是通过耐高温的电发热元件加热特制的蓄热材料——高比热容、高比重的磁性蓄热砖, 外部包裹耐高温、低导热的保温材料, 钢制喷塑外壳对整个设备起到保护和美化作用, 工作时

蓄热砖的温度可超过 700 °C。蓄热式电暖器为独立设备, 类似于传统油汀电暖气, 可以根据需要放置和移动。这种采暖方式的最大优势是可以利用夜间低价的低谷电加热 8 ~ 10 h, 白天电网高峰时段供暖时只需将贮存的热量释放出来, 还可以调节热量释放的速度, 从而既实现全天 24 h 室内供暖, 又达到节省电费的效果, 因此特别适用于执行峰谷电价的地区。

## 1.3 热泵取暖

热泵取暖有空气源热泵、水源热泵、地源热泵 3 种方式, 其中空气源热泵较适合于农村分户式取暖, 水源和地源热泵需要有特定的水资源条件和打井场地。热泵实质是一种热量提升装置, 把蕴含在空气、土壤、水中等不能直接利用的低位热能转换为可以利用的高位热能, 从而达到节约部分高位能的目的。热泵取暖耗电量只有电取暖的 1/3 左右, 已成为京津地区农村取暖“煤改气”重点推广方式, 且一套装置可以满足供暖和制冷两方面的需求。

空气源热泵基本原理是逆卡诺循环, 用制冷剂作为媒介(通常称之为冷媒), 冷媒在 -40 °C 即可汽化。工作时, 冷媒通过蒸发器吸收外界空气中的热量后汽化, 然后通过电机驱动的压缩机压缩变成高温高压气体, 再进入热交换器(也称为冷凝器)与室内供暖管路中的循环水交换热量, 之后经膨胀阀释放压力, 回到低温低压的液化状态, 完成一个循环。如此往复, 冷媒不断吸收外界大气中的热传递给循环水, 吸热升温后的循环水通过管路循环到散热器末端给居室供暖或提供生活用水。热泵的性能通常用 COP 系数来评价, 即单位功耗所能获得的热量或冷量。标准工况下热泵的 COP 值介于 2.9 ~ 4.5, 当外界环境温度低于 5 °C 后, 机组能效开始下降, 普通空气源热泵在 -5 °C 以下几乎不能使用, 因此严寒地区需要使用超低温空气源热泵, 这类热泵可以在 -25 °C 的低温环境下正常制冷, 但 COP 值会下降至 2.0 左右。空气源热泵根据室内配套供暖末端的不同, 可分为热风型和热水型两类, 前者室内取暖末端类似于常规空调室内机, 可落地或低壁挂安装, 优点是安装方便快捷, 开关和调节方便, 且一次投入少, 缺点是有噪音, 空气干燥; 后者室内配套热水循环管路、散热片或地暖系统, 也可以配风机盘管, 优点是体感舒适, 特别是配套地暖系统时由于对出水温度要求低而更加节能, 缺点是一次投入费用较高, 工程安装环节多、耗时较长, 冬季长期不用还需做好管路的保温, 因此更适合室内既有热水采暖末端、

家中长期有人居住的家庭。

地源热泵工作原理与空气源热泵类似，只是热源取自地下水或土壤，采用地埋管方式换热，埋管深度介于100~200 m；水作为循环工质，在地埋管的环路中闭式循环，与地下不发生物质交换。地源热泵系统需要有足够的场地以供打井埋管，投资较多且需要日常维护，因而更适合用于有较多采暖、制冷、热水需求的住宅小区、学校或连片村镇集中供暖使用，不适宜农村分户式独立供暖。同时考虑冬季采暖和夏季制冷时，地源热泵在一个水文年应达到热均衡。若土壤长年热不均衡将导致温度失衡，系统效率下降，影响周围生态。

水源热泵与地源热泵的主要区别在于取暖或制冷循环用水直接取自地下水（需分别打取水井和注水井）、地表水、污水等，水被直接用来取热或排热，并按要求排放回原取水点，是一种开式的取水方式。我国北方地区特别是东北、西北严寒地区冬季气温低，加之水资源相对匮乏，可利用的江河和水库资源有限，地表水源热泵的推广和使用受到限制。城市居民集中区可以考虑开发污水源热泵取暖，农村分户式独立供暖则不适宜。

#### 1.4 燃煤取暖

农村地区传统的燃煤取暖方式有火坑、火盆和结构简单的圆筒炉具，燃料也可使用树枝、秸秆等，均会产生大量烟气污染室内和大气环境。炊事烤火炉和水暖炉都是由圆筒炉具演化而来，对炉膛结构和外观进行了优化设计，增加了二次配风，来满足用户不同的采暖需求。炊事烤火炉上部一般装有圆盘可以放置物品。水暖炉具增设了水套、水循环系统和防暴沸安全系统等，利用水循环加热更多房间，其水循环系统与城市集中供热暖气片排布基本一致，增加了居住的舒适性。在国家清洁取暖政策带动下，国家大力推广节能环保型炉具，目前市场上外型美观大方、做工用料结实耐用的新型燃煤取暖炉具花样繁多，有的还具备自动调节火力、控温功能，配套壁挂式暖气片、地暖系统或暖风机，采暖舒适度接近城市集中供暖方式。

## 2 不同取暖方式的经济性比较

北方农村住宅属于合院式建筑体系，基本由正房、左右厢房围合而成，正房为3间、4间或5间房，建筑以单层平房居多，一般实际取暖面积不超过80 m<sup>2</sup>，多数家庭只给卧室和客厅供暖，室内温度

在15℃左右。目前我国建筑采暖耗热指标主要针对城市制定，《民用建筑能耗标准：GB/T 51161—2016》给出了不同地区建筑耗热量指标的约束值和引导值<sup>[5]</sup>，石家庄地区城市建筑采暖指标约束值为0.23 GJ/(m<sup>2</sup>·a)，折合约22.2 W/m<sup>2</sup>。既有农村建筑外墙很少有保温措施，门窗也基本是单层，保温隔热性能差、采暖单耗高，采暖耗热指标取40 W/m<sup>2</sup>。笔者参考实地调研走访的保定、廊坊、石家庄农村居民采暖情况，以户为基础，比较不同采暖方式的经济性，包括采暖炉具购置费、配套入村与入户天然气管网、电网改造费，以及燃料费支出。另外，考虑到农村煤改清洁能源采暖基本是既有房屋，已配有水暖式末端换热设施，因此未考虑室内末端换热设施的费用。采暖期为120 d。

### 2.1 燃气壁挂炉取暖

#### 2.1.1 设备购置费

河北省为国家大气污染防治重点省份，2017年开始实施大规模清洁取暖，采暖设施由政府统一组织招标采购，国家、省和市县3级财政提供资金补贴。受财力所限，各市政府统一招标采购的壁挂炉绝大部分为国产普通炉。以廊坊市为例，禁煤区农村“煤改气”取暖按燃气壁挂炉设备购置和安装投入的70%给予补贴，每户最高补贴金额不超过2700元，从政府补贴额度可以大致估算采暖设备购置和安装费用平均为3857元/台。笔者经济性比较参考廊坊禁煤区实际支付水平，取3900元/台，其价格比同等功率、同品牌的燃气壁挂炉的市场零售价低30%左右。这一价格水平的机组能效最高只能达到二级，NO<sub>x</sub>排放达到国家2级或3级标准。另外，从京东、淘宝等电商平台报价看，2019—2020年采暖季适用于80~100 m<sup>2</sup>采暖面积，能效达到1级、NO<sub>x</sub>排放达到5级标准的高效节能冷凝式壁挂炉市场销售价格在8500~10000元，约是“煤改气”工程招标价的3倍。

#### 2.1.2 设施配套费

农村燃气壁挂炉供暖需要配套解决气源，并建设入村、入户配气管线、燃气表等。

气源解决方式与用气规模大小和既有管网设施条件等有关，主要有以下3种形式：①从就近的天然气管线或支干线管道接气，建设支线管道，其费用的高低与管道长度、管径、征地补偿等密切相关；②“LNG气化站+中压管道”，适用于居民较多的乡镇，一座LNG气化站供应几个村庄并将各个气化站

通过中压管道联通；③ LNG撬装站，适用于单个村庄供气。本文气源费用参考雄安新区某企业气代煤项目实际支出情况，该项目采用“LNG气化站+中压管道”方式供气，共建设9座LNG气化站和约80 km中压管道，气化站用地“以租代买”，先后完成了4个乡镇42个村18 771户的“气代煤”工程。在不考虑上游资源企业干线管道和储气调峰设施投资情况下，平均每户投资约3 700元。

入村和入户配气管道（含燃气表）投资，参考2017年河北省补贴水平，取4 000元/户，与燃气公司的实际建设成本基本持平。综上，燃气壁挂炉取暖设施配套费用约7 700元/户。

### 2.1.3 燃料费用

对河北廊坊、保定农村壁挂炉实际用气情况调研发现，农村取暖时间普遍在每年的11月底开始，2月中下旬结束，共3个月左右，比城市集中供暖少20~30天。如果整个采暖季大部分时间都在使用燃气壁挂炉采暖，每户天然气用量约1 200 m<sup>3</sup>（折合10 m<sup>3</sup>/d）。但实际情况是，部分村民白天在附近务工，晚上回家休息；部分村民进城务工，仅在周末或春节前后回乡；还有少部分村民因经济能力有限，即使白天家中有人也不舍得开火取暖。因此，大范围平均看，每户每个采暖季天然气用量约1 000 m<sup>3</sup>（折合约8 m<sup>3</sup>/d）。为了将几种取暖方式在同一水平线上进行比较，笔者按照每户每个采暖季天然气用量1 200 m<sup>3</sup>计算，这与文献[6]关于河北省采暖“煤改气”每个家庭天然气需求1 116 m<sup>3</sup>的研究结论基本一致；单位取暖面积一个采暖季耗气量为15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>，与文献[7]关于北京市平房用户采暖耗气量调查结果12 m<sup>3</sup>相比高出25%。天然气价格，选取2017—2018年采暖季河北省农村壁挂炉采暖供气价格2.4元/m<sup>3</sup>，则整个采暖季户均燃料费用支出为2 880元。

## 2.2 蓄热式电暖器取暖

### 2.2.1 设备购置费

在低谷电价优惠政策驱动下，蓄热式电暖器在“2+26”农村地区得到较大范围的推广。河北省禁煤区农村电代煤推荐选取蓄热式电暖器，并按设备购置安装（含户内线路改造）投资的85%给予补贴，每户最高补贴金额不超过7 400元<sup>[8-9]</sup>，据此测算户均采暖设备购置费约为8 700元/户。另外，从2019—2020年采暖季电商平台企业报价看，适用于12~15 m<sup>2</sup>大小房间、功率为1 600 W的中低档蓄热式电暖器的销售价格在1 500元左右。蓄热式电暖器在断电

放热阶段其放热量衰减较多，故实际配备功率一般按热负荷的3倍左右考虑，相当于每户采暖用电负荷9.6 kW，与电力行业相关研究采用的数据基本一致<sup>[10]</sup>。取暖面积为80 m<sup>2</sup>的家庭需要安装6台左右，设备总费用7 500~9 000元。本文蓄热式电取暖设备购置费按9 000元/户考虑。

### 2.2.2 设施配套费

蓄热式电暖气功率大，大面积推进实施须进行电网改造。参考电力行业数据和文献<sup>[11]</sup>，考虑变压器更换、10 kV以下线路改造、老旧电表更换等费用，平均改造配套费取3万元/户。

### 2.2.3 燃料费用

蓄热式电暖器取暖耗电量可根据电暖器的功率和通电加热时间计算。参考市场销售的某品牌产品介绍，功率为1 600 W电暖器可供12~15 m<sup>2</sup>大小房间取暖，通电8~10 h可满足全天采暖需求。基于现阶段河北省煤改电采暖政策，农村居民采暖用电执行峰谷电价，谷段为20时一次日8时，峰段为8时—20时；供暖期居民采暖用电价格执行阶梯电价一档标准，谷电电价为0.31元/(kW·h)。笔者按晚上通电10 h、白天断电放热、全屋配备6台设备计算，则整个采暖季80 m<sup>2</sup>房间耗电量约11 520 kW·h，需要支付采暖费用3 570元。

## 2.3 空气源热泵取暖

### 2.3.1 设备购置费

华北地区空气源热泵取暖大规模推广从北京开始。2017年北京市政府对空气源热泵取暖“煤改气”按照每户取暖面积100 m<sup>2</sup>、设备购置费用的1/3进行补贴，每户补贴额最高不超过1.2万元。从补贴额度看，空气源热泵采购价格大致为3.6万元/户<sup>[12]</sup>。2018年，河北省开始选择条件好的农村地区家庭试点推行热泵取暖等新型供暖方式，空气源热泵和地源热泵设备购置省市县财政给予90%补贴，最高不超过2万元<sup>[8]</sup>，由此可以推算空气源热泵集中采购价格约为2.2万元/户。经过近3年的推广，厂家的热泵制造能力得以快速提升，市场销售价格也有较大幅度的下降，但不同品牌仍然有较大差别。本文空气源热泵设备购置费参考北京市、河北省部分地市集中采购及电商平台品牌产品2019—2020年采暖季报价情况，取2.2万元/户。

### 2.3.2 设施配套费

在电网比较薄弱的农村地区，实施热泵取暖也

需要对电网进行升级改造。但是，空气源热泵与电暖器取暖相比，在同等制热量输出的情况下，一份电力输入可产生2~3倍的热量，因而这类“煤改电”可在较大程度上减少农村电网及线路改造费用投入，在既有农村建筑中更易实施。参考电力行业调研数据，考虑变压器更换增容、10 kV配网线路改造、老旧电表更换及施工、管理等费用，改造配套费取2万元/户<sup>[11]</sup>。

### 2.3.3 燃料费用

空气源热泵耗电量可以基于热泵性能系数、单位面积耗热量、实际取暖面积来测算。热泵性能系数参考北京、河北地区用户实际情况，平均取2.2；另外还适当考虑热泵机组开停系数、采暖系统漏热系数等因素。按一天24 h取暖计算，则单位采暖面积一个采暖季120 d消耗电量约73 kW·h，与文献[13]调研结果比较接近。电价按照河北电采暖峰谷电价平均值0.44元/(kW·h)考虑[峰电0.57元/(kW·h)，谷电0.31元/(kW·h)，各12 h]，则对于采暖面积80 m<sup>2</sup>的家庭，整个采暖季所需电费为2 570元。

## 2.4 清洁煤炭取暖

### 2.4.1 设备购置费

从调研情况看，农村居民燃煤取暖炉具以“三合一”炉为主，即兼具做饭、烧水和取暖3种功能，个别富裕家庭为单独的采暖炉，只取暖不做饭。炉具档次不同，价格差异较大，一般家庭采暖炉具价格介于1 200~1 300元，少数富裕农户达到3 000元，并且只用于采暖，末端散热设施配套地暖。鉴于燃煤清洁化趋势和农民生活水平逐渐提高，本文洁净型煤采暖炉具购置费按2 000元/户考虑。

### 2.4.2 设施配套费

燃煤取暖除在室内配备散热片和热水循环管路外，户外不需要额外建设其他配套设施，故没有配套费支出。

### 2.4.3 燃料费用

根据调研结果，每户每个采暖季燃煤量介于2~4 t，其中2 t左右居多，少量在1.5 t左右，3~4 t的则是人口较多、面积较大的家庭。2017—2018年采暖季，石家庄地区煤球和蜂窝煤价格基本维持在790元/t。参考实地调研数据，本文清洁型煤取暖经济性测算按照每户每个采暖季燃煤2.0 t、价格790元/t考虑，则采暖季户均燃料费用支出约1 580元。

## 2.5 经济性比较结果

### 2.5.1 无补贴情况

由于不同取暖方式设备购置费、设施配套费和燃料费有较大差别，采用费用现值法进行粗略经济比较。立足长远，取暖时间取30年，折现率取6%。设备使用寿命燃气壁挂炉取值10年、空气源热泵取值15年、蓄热式电暖气取值10年、燃煤炉具取值10年。不考虑取暖补贴，也不考虑采暖设备、配套气网及电网的年维护费用，比较结果如表2所示。

从表2可得出以下结论：

1) 空气源热泵设备购置费最高，超过清洁型煤炉具的10倍；燃气壁挂炉接近清洁型煤的2倍，是空气源热泵的17.7%。

2) 年燃料费用支出最高的是蓄热式电暖器，接近清洁型煤的2.3倍；燃气壁挂炉燃料费支出是蓄热式电暖器的80%。

3) 清洁型煤采暖不需要配套线、网投入，蓄热式电暖器取暖和空气源热泵取暖均需要较高的配电网改造投入，燃气壁挂炉配套气源和管网投入约为蓄热式电取暖的1/4。

4) 30年费用现值，以清洁型煤采暖最为节省，空气源热泵和蓄热式电采暖都比较高，燃气壁挂炉费用现值处于中间水平，是燃煤采暖的2.1倍，是空气源热泵的64%，是蓄热式电采暖的58%。

### 2.5.2 有补贴情况

京津冀及周边省市大气污染综合治理行动中，

表2 无取暖补贴下农村地区家庭不同取暖方式经济性比较表

取暖方式	燃料费用 / (元·户 <sup>-1</sup> )	设备购置费 / (元·户 <sup>-1</sup> )	设备使用年限 / 年	配套输配电(气)网投资 / (元·户 <sup>-1</sup> )	30年费用现值 / 万元
清洁型煤	1 580	2 000	20	/	2.53
燃气壁挂炉	2 880	3 900	10	7 700	5.38
空气源热泵	2 570	22 000	15	20 000	8.37
蓄热式电暖器	3 570	9 000	10	30 000	9.33

注：采暖用气、用电价格取河北省2017—2018年采暖季实际价格，电费考虑了峰、谷电价情况。

国家和地方政府对采暖“煤改气”“煤改电”都有不同程度的财政补贴。以河北省廊坊和保定地区2017年的补贴情况为例<sup>[8-9,14-15]</sup>,分析补贴对“煤改气”工程经济性的影响。

气代煤补贴包括3个部分:①采暖设备购置安装费。按投资额的70%予以补助,最多不超过2700元/户,由省和县各承担50%,其余由用户承担;②村内入户管线建设投资补贴。为4000元/户,省级财政承担1000元/户,市县承担3000元/户;③采暖期用气补贴。标准为1.0元/m<sup>3</sup>,每户最高补贴气量1200m<sup>3</sup>,由省、市、县各承担1/3,补贴政策及标准暂定3年,气代煤用户不再执行阶梯气价。

电代煤补贴包括两个部分:①户内取暖设备购

置安装费(含户内线路改造)补贴。蓄热式电暖器按投资的85%给予补贴,每户最高补贴金额不超过7400元;对空气能热泵取暖给予90%补贴,每户最高补贴金额不超过20000元,由省和县各承担1/2,其余由用户承担。②采暖期电费补贴。电价补贴0.2元/(kW·h),每户最高补贴电量10000kW·h,由省、市、县各承担1/3;电代煤用户采暖期可选择执行峰谷电价。

考虑上述补贴后,经济性比较结果如表3所示。从表3可看出,除煤以外的几种清洁取暖方式费用现值有所下降,但经济性排序则未改变,依然是蓄热式电暖器最高,燃气壁挂炉优于空气源热泵和蓄热式电暖器。

表3 取暖补贴后农村地区家庭不同取暖方式经济性比较表

取暖方式	燃料费用 / (元·户 <sup>-1</sup> )	补贴后设备购置费 / (元·户 <sup>-1</sup> )	设备使用年限 / 年	配套输配电(气)网投资 / (元·户 <sup>-1</sup> )	30年费用现值 / 万元
清洁型煤	1580	2000	10	/	2.53
燃气壁挂炉	前3年1680 其余各年2880	1200 (补贴2700)	10	7700	4.43
空气源热泵	前3年1402 其余各年2570	2000 (补贴2000)	15	20000	6.17
蓄热式电暖器	前3年1571 其余各年3570	1600 (补贴7400)	10	30000	8.1

注:经济测算没有考虑采暖设备、配套气网及电网的年维护费用;采暖用气、用电价格取河北省2017—2018年采暖季实际价格,电费考虑了峰、谷电价情况;燃料费补贴期限按3年考虑;采暖设备更新不再考虑补贴。

### 3 不同取暖方式的大气污染物排放

#### 3.1 大气污染物排放标准

##### 3.1.1 燃气壁挂炉

燃气壁挂炉取暖烟气污染物排放最关注的是NO<sub>x</sub>。NO<sub>x</sub>与空气中的水分反应生成的硝酸和亚硝酸是酸雨的主要成分,同时NO<sub>x</sub>与空气中的碳氢化合物经紫外线照射会生成光化学烟雾,是PM2.5的重要前体物。燃气壁挂炉排放遵循国家标准《燃气采暖热水炉:GB 25034—2010》<sup>[4]</sup>(以下简称《GB 25034—2010》),最高等级NO<sub>x</sub>排放强度应不超过70mg/(kW·h),折合质量浓度限值为60mg/m<sup>3</sup>(表4)。需要说明的是,《GB 25034—2010》对NO<sub>x</sub>排放量未做强制性要求,仅作为资料性附录,而在欧洲标准中(EN 483和EN 625)则是强制性标识要求。近几年环保政策驱动下的北方大规模清洁采暖,受政府财力和农户经济承受能力限制,各省“煤改气”统一招标配售壁挂炉一般为2级及以下能效产品,NO<sub>x</sub>

表4 家用燃气壁挂炉NO<sub>x</sub>排放分级表

NO <sub>x</sub> 排放 分级	NO <sub>x</sub> 排放强度上限 / [mg·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	折合NO <sub>x</sub> 排放浓度上限 / (mg·m <sup>-3</sup> )
5	70	60
4	100	85
3	150	128
2	200	171
1	260	222

注:污染物浓度换算系数取自《GB 25034—2010》,12t天然气NO<sub>x</sub>排放量换算单位为1ppm,相当于1.7554mg/(kW·h),同时相当于2.054mg/m<sup>3</sup>。

排放强度基本都高于150mg/(kW·h)。

随着国家大气污染治理力度的不断加大,国家对锅炉排放要求日趋严格。《锅炉大气污染物排放标准:GB 13271—2014》<sup>[16]</sup>(以下简称《GB 13271—2014》)提出了现有、新建和特别排放限值3套排放标准,重点地区执行特别排放限值;燃煤锅炉NO<sub>x</sub>特别排放限值为200mg/m<sup>3</sup>,燃气锅炉NO<sub>x</sub>特别排

放限值为  $150 \text{ mg/m}^3$ 。实施打赢蓝天保卫战行动计划以来，重点区域尤其是“2+26”城市的全部行政区域均已执行特别排放限值，且北京、上海、天津、山东、江苏、广东等省市新出台的地方锅炉标准排放要求已远高于 GB 13271—2014。例如，北京市自 2017 年 4 月 1 日起执行《锅炉大气污染物排放标准：DB 11/139—2015》<sup>[17]</sup>（以下简称《DB 11/139—2015》）第 II 阶段排放限值，要求新建锅炉  $\text{NO}_x$  排放浓度需控制在  $30 \text{ mg/m}^3$  以内，高污染燃料禁燃区内的在用锅炉需控制在  $80 \text{ mg/m}^3$  以内。天津、山东、上海等省市对新建燃煤和燃气锅炉均提出了超低排放要求， $\text{NO}_x$  排放浓度需控制在  $30 \sim 50 \text{ mg/m}^3$  以内。

在此背景下，现行燃气采暖热水炉  $\text{NO}_x$  排放要求过于宽泛，已经引起了行业和社会的广泛关注。天津市 2017 年 11 月印发的《天津市居民冬季清洁取暖工作方案》<sup>[18]</sup> 中提出，为确保环保达标，燃气壁挂炉  $\text{NO}_x$  排放强度应低于  $100 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ （折合质量浓度约为  $85 \text{ mg/m}^3$ ），即应满足《GB 25034—2010》附录 E 中的 4 级要求。2019 年 5 月北京市建委发布“关于《北京市禁止使用建筑材料目录（2018 年版）》的通知”<sup>[19]</sup>，规定自 2019 年 10 月 1 日起在北京市禁止使用能效标识 1 级及以下、 $\text{NO}_x$  排放等级未达到《GB 25034—2010》5 级要求的燃气采暖热水炉。基于此通知要求，今后北京市行政辖区内新安装的燃气壁挂炉采暖状态下最低能效需达到  $95\% \sim 99\%$ （分别对应 100% 和 30% 工作负荷）， $\text{NO}_x$  排放强度需低于  $70 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，目前只有全预混冷凝炉可以满足上述两项指标要求。从市场在售全预混冷凝炉技术指标看，热效率可达 108%，比普通壁挂炉高出  $20\% \sim 25\%$ ； $\text{NO}_x$  排放强度低于  $30 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，优于国家 5 级排放标准。此外，为了增强抗酸性和抗腐蚀性，冷凝式壁挂炉材质选用不锈钢或硅铝合金，寿命可超过 20 年，相比普通壁挂炉 10~15 年的寿命更加耐用。

### 3.1.2 燃煤采暖炉

传统上的家用燃煤采暖炉供暖效率低、污染物排放浓度高，并且大部分采暖炉兼具炊事、热水功能，进一步降低了热效率，间接加剧污染物排放<sup>[20]</sup>。《民用水暖煤炉通用技术条件：GB 16154—2005》（以下简称《GB 16154—2005》）规定，家用燃煤炉具大气污染物排放需符合《锅炉大气污染物排放标准》（当时有效标准为 GB 13271—2001）。《GB 13271—2001》规定，民用水暖煤炉  $\text{SO}_2$  排放浓度不得高于

$900 \text{ mg/m}^3$ ，但对  $\text{NO}_x$  的排放强度没有要求，这已经与实际情况脱节。在清洁取暖政策带动下，国家开始大力推广节能环保燃煤采暖炉具和洁净煤，2018 年 10 月国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会颁布了新版《民用水暖煤炉通用技术条件》（GB 16154—2018）<sup>[21]</sup>，规定  $\text{SO}_2$  排放浓度要求不高于  $100 \text{ mg/m}^3$ ， $\text{NO}_x$  排放浓度不高于  $150 \text{ mg/m}^3$ ，同时对热效率的要求提升了 10%（表 5），配套修订的新版《民用水暖煤炉性能试验方法：GB/T 16155—2018》（以下简称《GB/T 16155—2018》）已于 2018 年 9 月 1 日实施。

表 5 民用水暖煤炉大气污染物排放限值表  $\text{mg/m}^3$

烟气污染物	排放浓度
颗粒物	$\leq 50$
$\text{SO}_2$	$\leq 100$
$\text{NO}_x$	$\leq 150$

注：摘自《GB 16154—2018》，该标准适用于以型煤、洗选煤等洁净煤为燃料，额定供热量小于  $50 \text{ kW}$ ，出口水温不高于  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  的民用水暖炉具；标准规定炉具热效率应不低于 65%。

## 3.2 污染物排放实测

研究采用 Testo350 烟气分析仪、崂应 3012H 型烟尘采样器等仪器，遵循《固定污染源废气氮氧化物的测定定电位电解法：HJ 693—2014》、《固定污染源排气中废气——二氧化硫的测定定电位电解法：HJ/T 57—2017》和《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法：GB/T 16157—1996》等标准规范开展污染物采样、测定标准及实测研究。

### 3.2.1 燃气壁挂炉

2018 年 1 月上旬，对 12 个国产品牌，4 个进口品牌，共 23 台燃气壁挂炉的  $\text{NO}_x$  排放情况进行了实测。其中，21 台位于河北廊坊和保定禁煤区，2 台位于北京市区。测试炉型包括普通壁挂炉和全预混冷凝式壁挂炉。基于测试结果，得到以下认识。

1) 不同类型燃气壁挂炉的  $\text{NO}_x$  排放强度差别较大。冷凝式壁挂炉  $\text{NO}_x$  排放强度较低，所测样本  $\text{NO}_x$  平均排放强度仅为  $24 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ （折合  $20.5 \text{ mg/m}^3$ ），优于《GB 25034—2010》所规定的 5 级排放标准。普通壁挂炉的  $\text{NO}_x$  排放强度较冷凝式壁挂炉高出许多，所测国产与进口样本平均排放强度为  $186 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ （折合  $159 \text{ mg/m}^3$ ），仅符合 2 级排放标准。

2) 不同品牌燃气壁挂炉的  $\text{NO}_x$  排放强度也存在

着较大的差别。在普通壁挂炉测试样本中,国产品牌总体比进口品牌排放强度高,不同国产品牌之间也存在差异。所测进口普通壁挂炉样本的平均 $\text{NO}_x$ 排放强度为 $166 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ (折合 $142 \text{ mg}/\text{m}^3$ ),达到2级排放标准;而国产普通壁挂炉样本的平均 $\text{NO}_x$ 排放强度为 $205 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ (折合 $175 \text{ mg}/\text{m}^3$ ),总体上仅能达到最低排放标准,个别品牌甚至排放超标(表6)。

表6 国产普通燃气壁挂炉 $\text{NO}_x$ 排放强度

品牌	实测情况表 $\text{mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$		
	不同功率下 $\text{NO}_x$ 排放强度		
	20 ~ 28 kW	32 ~ 40 kW	平均值
1	/	169	169
2	184	/	184
3	175	195	185
4	/	185	185
5	186	/	186
6	187	/	187
7	195	/	195
8	197	/	197
9	/	203	203
10	219	/	219
11	/	248	248
12	/	304	304
各品牌平均值	192	217	205

3) 运行负荷越高排放强度越大。所测国产普通燃气壁挂炉,其小火状态下的 $\text{NO}_x$ 排放强度约为大火状态下的85%。

### 3.2.2 燃煤采暖炉

2018年2月下旬,对石家庄周边6家农户的燃煤采暖炉具进行了大气污染物实测,测试内容包括颗粒物、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ ,共涉及蜂窝煤、煤球、块煤、煤泥4种煤炭。基于测试结果(表7),得到以下认识。

1) 4种煤炭燃烧, $\text{SO}_2$ 排放浓度均低于 $400 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,但远高于《GB 16154—2018》规定的 $150 \text{ mg}/\text{m}^3$ 标准; $\text{NO}_x$ 排放浓度基本低于 $150 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,满足标准要求,其中蜂窝煤排放约为 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,优于国家标准。

2) 与散煤相比,清洁型煤燃烧后的颗粒物排放浓度大幅度降低,但 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 的排放并没有显著改善。其中,清洁型煤样本的 $\text{NO}_x$ 排放浓度为 $122 \text{ mg}/\text{m}^3$ ;散煤样本的 $\text{NO}_x$ 排放浓度为 $128 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。另

表7 样本家庭燃煤采暖炉具排放浓度实测情况表  $\text{mg}/\text{m}^3$ 

燃料类型	颗粒物	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	
清洁型煤	蜂窝煤	33	435	96
	煤球	50	446	149
	平均值	42	441	122
普通煤炭	普通散煤1	194	475	153
	普通散煤2	181	494	103
	平均值	188	484	128

外,文献[20]对多台改进洁净炉具产品燃用清洁型煤和蓝碳实验室测试结果表明,烟气颗粒物排放浓度介于 $30 \sim 50 \text{ mg}/\text{m}^3$ , $\text{SO}_2$ 排放浓度介于 $139.7 \pm 66.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ , $\text{NO}_x$ 排放浓度介于 $122.7 \pm 53.9 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,仅部分达到《GB 16154—2018》的要求。因此,从重点大气污染物减排角度看,农村燃煤采暖须严格控制普通烟煤使用,大力推广环保节能的新型洁净采暖炉具。

## 4 结论与建议

1) 从30年费用现值看,燃气壁挂炉优于空气源热泵和蓄热式电暖气,是替代燃煤取暖较为经济的选择,但应严把燃气采暖热水炉准入关,严控能效和 $\text{NO}_x$ 排放标准。2018年7月国务院印发的“打赢蓝天保卫战三年行动计划”提出燃气采暖壁挂炉能效不得低于2级,但对 $\text{NO}_x$ 排放没有提及。受制于财政补贴能力,农村“煤改气”工程招标燃气壁挂炉实际排放强度在 $200 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 左右,只能达到国家4级标准。鉴于 $\text{NO}_x$ 是北方地区雾霾的主要成因之一<sup>[22]</sup>,建议借鉴北京和欧洲的做法,提高燃气壁挂炉产品 $\text{NO}_x$ 准入排放标准,在经济发达的城镇先行推广冷凝式壁挂炉。另外,相比普通壁挂炉,冷凝式壁挂炉增加了预混流程,对天然气纯度要求高,不然喷嘴易产生堵塞或损坏;增加了冷凝水管,采暖期结束需要对积存的冷凝水进行处理。因此,冷凝式壁挂炉安装时需要针对各地空气、燃气、水等条件对运行参数进行调试和设定,还需要进行定期保养,这关系到壁挂炉能否正常使用和延长使用寿命,对获得市场认可具有关键性作用。建议由政府或行业协会牵头,推行生产厂家或经销商定期保养制度。

2) 农村地区房屋围护结构与城市不同,既有房屋普遍缺乏保温措施,实现清洁供暖只是第一步,还应做到节约使用。同时,农村人口居住分散且大量

人员长期进城务工或居住, 仅在节假日返乡, “煤改气”和煤改电基础设施一次性投入大, 实际燃气和电力消费并不高, 对于供气和供电企业而言还存在可持续运营问题。建议国家和地方政府高度重视农村居民建筑的节能改造, 清洁采暖和房屋节能改造同步实施, 清洁取暖补贴中适当考虑节能改造费用; 同时, 结合新农村建设, 引导有条件的地区集中建设居民区, 新建房屋采取保温隔热措施, 从而节省基础设施投入, 节约能源。

3) 推进实施农村清洁取暖, 要始终围绕“改善生活环境、增进民生福祉”这一初衷, 立足资源条件和取暖需求特点, 选择合适的取暖路径和供暖设备。热泵取暖环保节能, 相对其他电采暖方式对电网增容改造要求低, 应作为“煤改电”的重点推进方式。对日常居住少、主要是节假日返乡的农村家庭, 可优先选择启停、调节灵活的热风型热泵; 对采暖季持续使用, 取暖面积较大的家庭, 建议选择热水型热泵。近几年内蒙、河北张家口、吉林等北方省市风电和光伏发电快速发展、电力大量过剩, 随着装机成本的快速下降, 发电边际成本持续走低, 在这些地区可考虑选用投资较省的电直热或蓄热式电暖器取暖, 以充分利用可再生能源资源, 特别是配电条件较好或电网已经改造的地区, 新增配电设施投入少, 容易实施。

4) 考虑经济发展的不平衡性和供能条件, 洁净煤取暖在部分农村地区较长时间内仍然有必要保留。燃煤取暖需要采取“洁净型煤+专用炉具+一氧化碳监测”整套措施, 加强煤质监管, 坚持选用低灰、低硫、低挥发分的优质燃, 遴选与洁净型煤燃烧特性相适应的专用炉具, 确保居民燃煤达标排放, 安全取暖。

5) 关注农村“后煤改气、煤改电”时代的平稳运行问题。农村地区清洁取暖可持续发展须做到“改得起、用得起、愿意用”。“改”这一步已经迈出, 2019年国家规划的中期目标已超额完成, 但前期一些地方仓促推进实施, 质量和安全方面仍然存在隐患, 今后还需要重视取暖设施的安全使用、售后服务及配套设施的日常维护。“用得起”这一关, 近几年通过优惠气价、优惠电价和燃料费补贴方式来维持, 这涉及供气和供电企业的长期生存问题, 企业对今后情况心中没底; 同时, 近期河北、天津补贴退坡信号已发出, 用户感觉不踏实。因此, 需要在国家层面统筹研究考虑补贴退出方式、对贫困户精准补贴问题, “扶上马还要送一程”, 用得好才是最终目标。“愿意用”除了经济性因素外, 思想观念非常重

要, 需要进行广泛宣传, 转变百姓的观念, 从内心真正认识到创造清洁优美的生活环境每个人都有义务, 摆脱“等靠要”的思想, 自觉主动燃用清洁能源。

## 参 考 文 献

- [1] 马文超, 台凌宇, 陈冠益, 等. 天津地区典型家用生物质颗粒采暖炉污染物排放分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 845-851.  
MA Wenchao, TAI Lingyu, CHEN Guanyi, et al. Analysis of pollutant emission of typical domestic biomass pellet heating furnaces in Tianjin[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 845-851.
- [2] 中国土木工程学会燃气分会燃气供热专业委员会. 燃气采暖热水炉产品2018年度市场统计公告[J]. 供热制冷, 2019(2): 29-32.  
The Commission Member of Gas Transmission and Distribution Branch of China Civil Engineering Committee. 2018 market statistics announcement of gas heating water heater products[J]. Heating and Refrigeration, 2019(2): 29-32.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 家用燃气快速热水器和燃气采暖热水炉能效限定值及能效等级: GB 20665—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC & Standardization Administration of the PRC. Minimum allowable values of energy efficiency and energy efficiency grades for domestic gas instantaneous water heaters and gas fired heating and hot water combi-boilers: GB 20665-2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 燃气采暖热水炉: GB 25034—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC & Standardization Administration of the PRC. Gas-fired heating and hot water combi-boilers: GB 25034-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 民用建筑能耗标准: GB/T 51161—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the PRC & General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Energy consumption standards for civil buildings: GB/T 51161-2016[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [6] 陈占明, 朱梦舒. 煤改气后河北省居民采暖用气需求预测[J]. 中国物价, 2018(7): 64-66.  
CHEN Zhanming, ZHU Mengshu. Forecast of heating gas demand for Hebei residents after coal to gas[J]. China Price, 2018(7): 64-66.
- [7] 王勋, 乔佳, 姜鑫, 等. 北京农村煤改气用户供暖期用气特点[J]. 煤气与热力, 2019, 39(5): 14-16.  
WANG Xun, QIAO Jia, JIANG Xin, et al. Characteristics of gas consumption during heating period of rural coal-to-gas users in

- Beijing[J]. Gas & Heat, 2019, 39(5): 14-16.
- [8] 河北省气代煤电代煤工作领导小组办公室. 河北省2018年冬季清洁取暖工作实施方案[EB/OL].(2018-07-18)[2020-02-11]. [https://m.sohu.com/a/242931446\\_99909797](https://m.sohu.com/a/242931446_99909797). Hebei Provincial Leading Office of Replacing Coal By Gas and Electricity. Hebei Province's implementation plan for clean heating in winter[EB/OL]. (2018-07-18) [2020-02-11]. [https://m.sohu.com/a/242931446\\_99909797](https://m.sohu.com/a/242931446_99909797).
- [9] 河北省气代煤电代煤工作领导小组办公室. 河北省2017—2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案[EB/OL]. (2017-07-18) [2020-02-11]. <https://max.book118.com/html/2018/1009/6154044003001222.shtm>. Hebei Provincial Leading Office of Replacing Coal by Gas and Electricity. Hebei Province's action plan for comprehensive treatment of air pollution in autumn and winter of 2017-2018[EB/OL].(2017-07-18)[2020-02-11]. <https://max.book118.com/html/2018/1009/6154044003001222.shtm>.
- [10] 刘艳茹, 杨卫红, 王基, 等. “煤改电”工程实施前后农网负荷特性分析[J]. 电气技术, 2017(4): 110-115. LIU Yanru, YANG Weihong, WANG Ji, et al. Load characteristic analysis of rural network before and after the Coal-to-electricity Project[J]. Electrical Engineering, 2017(4): 110-115.
- [11] 何林, 北京农村地区能源应用比较研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018. HE Lin. Comparative study on energy supply of rural construction in Beijing[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018.
- [12] 北京市人民政府办公厅. 2017年北京市农村地区村庄冬季清洁取暖工作方案[EB/OL]. (2017-02-11) [2020-02-11]. <https://wenku.baidu.com/view/8b8339b1580102020740be1e650e52ea5518ce82.html>. General Office of the People's Government of Beijing Municipality. 2017 Beijing rural area villages winter clean heating work plan[EB/OL].(2017-02-11) [2020-02-11]. <https://wenku.baidu.com/view/8b8339b1580102020740be1e650e52ea5518ce82.html>.
- [13] 王会粉, 梁元元, 刘震, 等. 北京农村地区“煤改空气源热泵”实施状况[J]. 建设科技, 2017(5): 16-19. WANG Huifen, LIANG Yuanyuan, LIU Zhen, et al. Implementation status of coal to air source heat pump in rural areas of Beijing[J]. Construction Science and Technology, 2017(5): 16-19.
- [14] 河北省人民政府. 关于加快实施保定廊坊禁煤区电代煤和气代煤的指导意见[EB/OL]. (2016-09-24) [2020-02-11]. <http://info.hebei.gov.cn/eportal/ui?pageId=1962757&articleKey=6665782&columnId=329982>. Hebei Provincial Municipal People's Government. Guiding opinions on accelerating the implementation of electricity substitution and gas substitution for coal in Baoding Langfang prohibited area[EB/OL]. (2016-09-24) [2020-02-11]. <http://info.hebei.gov.cn/eportal/ui?pageId=1962757&articleKey=6665782&columnId=329982>.
- [15] 河北省气代煤电代煤领导小组办公室. 关于调整完善农村地区清洁取暖财政补助政策的通知[EB/OL]. (2018-07-18) [2020-02-11]. [https://www.sohu.com/a/245289623\\_99931482](https://www.sohu.com/a/245289623_99931482). Hebei Provincial Leading Office of Replacing Coal by Gas and Electricity. Notice on adjusting and perfecting financial subsidy policies for clean heating in rural areas[EB/OL].(2018-07-18) [2020-02-11]. [https://www.sohu.com/a/245289623\\_99931482](https://www.sohu.com/a/245289623_99931482).
- [16] 国家环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 锅炉大气污染物排放标准: GB 13271—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2015. Ministry of Environmental Protection, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. Emission standard of air pollutants for boilers: GB 13271-2014[S]. Beijing: China Environment Press, 2015.
- [17] 北京市环保局, 北京市质量技术监督局. 锅炉大气污染物排放标准: DB 11/139—2015[S]. 北京: 中国标准出版社 2015. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Emission standard of air pollutants for coal-burning oil-burning gas-fired boiler: DB 11/139-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [18] 天津市人民政府. 关于印发天津市居民冬季清洁取暖工作方案的通知[J]. 天津市人民政府公报, 2017(23): 27-30. Tianjin Municipal People's Government. Notice on printing and distributing the working plan of Tianjin residents in winter cleaning and heating[J]. Bulletin of Tianjin Municipal People's Government, 2017(23): 27-30.
- [19] 北京市住房和城乡建设委员会, 北京市规划和自然资源委员会, 北京市城市管理委员会. 关于《北京市禁止使用建筑材料目录(2018年版)》的通知[EB/OL].(2019-04-01) [2020-02-11]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-06/25/content\\_5403068.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2019-06/25/content_5403068.htm). Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, Beijing Municipal Commission of Urban Planning and Land and Resources Management, Beijing Municipal Commission of Urban Administration. Notice on the *Catalogue of Prohibited Construction Materials in Beijing (2018 Edition)* [EB/OL]. (2019-04-01) [2020-02-11]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-06/25/content\\_5403068.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2019-06/25/content_5403068.htm).
- [20] 刘亚非. 民用采暖炉具性能及污染减排效果评估分析[D]. 北京: 中国化工大学, 2018. LIU Yafei. Evaluation and analysis on the performance and emissions reduction of residential heating stoves[D]. Beijing: China University of Chemical Technology. 2018.
- [21] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 民用水暖煤炉通用技术条件: GB 16154—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. State Administration for Market Regulation & Standardization Administration of the PRC. General technical specification of civil water heating coal stove: GB 16154-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [22] 财新网. 河北“煤改气”补贴将大幅退坡[EB/OL]. (2019-12-04)[2020-02-11]. <http://companies.caixin.com/2019-12-04/101490329.html>. Caixin.com. Hebei coal to gas subsidy will decline significantly[EB/OL].(2019-12-04)[2020-02-11]. <http://companies.caixin.com/2019-12-04/101490329.html>.