



能源基金会
能源基金会



北京市农村建筑节能及清洁取暖改造 经验与启示

北京市可持续发展促进会
中科华跃能源互联网研究院
2021年

项目组成员

章永洁、冯逸夫、张帆、林慧
叶建东、薛志峰、李季、张占省

本项目在执行期内得到多位专家在技术研讨、成果评审的全过程支持和指导，在此一并致谢：

倪江波、杨旭东、王全辉、李惠斌、刘幼农、
胥小龙、邢永杰、王皆腾、高岩、郝斌、
康艳兵、刘安、单明、殷帅、刘晓华

执行摘要

目前，在北京市已完成清洁取暖改造的平原地区及浅山区，面临着技术和设备的更新迭代；另外还有 500 多个山区村庄未进行清洁取暖改造，面临如何选择经济合理的技术方案，进而基本实现整个农村地区的无煤化；同时，在“双碳”目标下，农村又面临着能源体系低碳转型的新需求。因此，[清洁取暖开始从单纯考虑初装成本的补贴时代进入运行成本自担的后补贴时代，从以环境最优的技术路线选择阶段到兼顾经济性的因地制宜方案的选定阶段。](#)

项目组自 2005 年起对农村生活能源消费进行了多次的大规模入户调研，分别建立了 2006 年、2013 年、2018 年及 2020 年农村生活能源消费数据库，对农村建筑节能改造技术、清洁取暖改造方案进行了深入的研究、示范、跟踪测试与效果评价，基于多年的研究基础，在梳理总结北京市农村建筑节能与清洁取暖改造政策与实施情况、技术方案效果评价分析基础上，得出如下结论：

1. 农宅围护结构保温是农村建筑节能降碳的基础

北京市在全国率先在农村开展建筑节能改造，综合节能率达 40–60%，效果显著，为全国提供了良好的示范。我国北方农村地区的建筑保温水平普遍较弱，因此农村建筑本体能效提升是推进农村建筑节能的工作重点，是农村节能降碳的基础。

2. 农村清洁取暖可持续发展的关键是因地制宜选择经济适用的技术方案

北京市在全国最早开展散煤替换，没有现成经验和模式可供参考，出现了一些基础设施建设、设备和运行费用较高的情况。接下来，北京农村现有清洁取暖设备的升级迭代以及山区进一步清洁取暖改造直至全面实现整个农村地区的无煤化，应因地制宜地选择经济合理的如下推荐技术方案：

- ◎具有高能效比、可实现部分空间和部分时间供暖等行为节能以及灵活操作的低温空气源热泵热风机取暖；
- ◎充分利用部分山区丰富的零碳排放能源——农作物秸秆、树枝等各类农林生物质资源进行生物质颗粒炊事采暖，实现本地化收集、生产和利用；
- ◎充分利用农村屋顶闲置资源，发展分布式“光伏+”，满足农村生活、生产和交通用能，富余电力上网，补充电网在用电高峰期的电力不足。

[我国北方农村地区的清洁取暖改造不能完全照搬北京模式，但可充分借鉴北京清洁取暖改造技术方案选择历程的经验，实现政府补贴设备的部分初始投资，少量或没有运行补贴，政府起到引导作用下的政府补得起、农户用得起的低碳可持续的发展模式。](#)

关键词：北京模式，建筑节能，清洁取暖，农村低碳能源体系

目录

CONTENTS

前言	1
1 北京市农村建筑节能与清洁取暖政策演进	2
1.1 建筑节能相关政策	2
1.2 抗震节能改造工作流程	4
1.3 清洁取暖改造相关政策	4
1.4 清洁取暖改造与补贴实施流程	7
2 建筑节能与清洁取暖改造执行情况	8
2.1 抗震节能改造累计完成 85 万余户	8
2.2 约 87% 的村庄完成清洁取暖改造	8
3 经验总结与成效分析	9
3.1 工作流程日趋规范、方案选择更加合理	9
3.2 对本市燃煤污染的降低起到了主要作用	10
4 农村建筑节能与清洁取暖改造调研分析	11
4.1 户均生活能耗降低，能源消费结构以煤为主转变为以电为主	11
4.2 户均采暖面积增加，户均采暖能耗和单位采暖面积能耗均降低	12
4.3 农村污染物排放量大幅降低	12
4.4 建筑节能改造效果提升显著，存在少量施工及质量问题	13
4.5 各种清洁取暖方式的效果与用户满意度差别较大	14
5 建筑节能与清洁取暖改造典型方案效果测试评估	16
5.1 建筑节能改造综合节能率达 40~60%	16
5.2 清洁取暖方案效果测试与评价	19
6 农村建筑节能与清洁取暖可持续发展模式启示	23
6.1 低碳可持续发展模式	24
6.2 技术路径选择建议	25
参考文献	27

前言

北京市自 2006 年开始实施农宅节能保温改造示范，降低采暖能耗，减少散煤污染排放，到 2020 年底，全市累计完成约 85 万余户农宅节能改造、新建翻建和节能抗震加固综合改造；自 2013 年北京市启动农村地区减煤换煤、清洁空气专项行动，截至 2018 年底，累计完成 2963 个村庄、约 110 万农户完成“煤改清洁能源”工作，在全国范围内率先实现了平原地区基本“无煤化”。

梳理总结北京市建筑节能和清洁取暖改造现有经验和启示，可为已完成清洁采暖改造的平原和浅山区，在今后政府补贴取消后避免返烧煤现象的发生，现有清洁取暖设备达到寿命周期后进一步升级改造，以及为下一步北京山区农村清洁取暖技术方案和补贴方式的选择，提供技术支撑；同时也对我国整个北方地区农村清洁取暖工作的实施形成借鉴。

1

北京市农村建筑节能与清洁取暖政策演进

1.1 建筑节能相关政策

2006年，《北京市“十一五”时期建筑节能发展规划》中提到“充分把握社会主义新农村建设的契机，迅速把建筑节能向农村推进”。之后，北京市住房和城乡建设委员会、北京市规划委员会、北京市财政局、北京市审计局、北京市农村工作委员会等部门发布了系列农民住宅建设项目管理办法及抗震节能工作实施方案等政策文件，规定了奖励标准和建设标准。2018年起，奖励

资金纳入美丽乡村建设引导资金统筹管理，分项制定奖励标准，对各区没有具体的补贴配套要求。

2021年12月，北京市住房和城乡建设委员会等4部门关于印发《北京市抗震节能农宅建设工作方案（2021-2025年）》的通知指出，单独实施外墙或门窗节能改造的农宅，市级财政不再给予奖励，区级可结合实际制定鼓励引导措施。



图1 北京市农宅抗震节能改造政策演进

表1 北京市农宅抗震节能改造相关政策主要内容

发布时间	名称	主要 内 容
2006年	《北京市“十一五”时期建筑节能发展规划》	充分把握社会主义新农村建设的契机，迅速把建筑节能向农村推进。
2006年	《北京市农民住宅建筑节能墙改示范项目管理办法》	对农民住宅建筑节能墙改示范项目的补助标准为每套住宅2万元。
2008年	《2008年北京市开展既有农民住宅节能保温改造示范项目实施办法》	农民住宅节能保温改造采用定额奖励方式。奖励补贴标准原则上为投资额的60%，每户住房保温改造奖励8500-11000元。
2010年	《北京市抗震节能型农民住宅建设项目管理办法》	对满足北京地区抗震和建筑节能标准等规定的新农宅项目，按每户住宅2万元的标准对农民给予奖励。
2011年	《北京市农民住宅抗震节能工作实施方案（2011-2012年）》	市区（县）政府采取以奖代补的形式，对农宅抗震节能改造予以补贴。市政府按照新建翻建及综合改造每户2万元，单项改造每户1万元的标准予以奖励。
2018年	《北京市抗震节能农宅建设工作方案（2021-2025年）》	新建翻建、实施抗震加固及节能两项改造的市级财政按照2万元/户的标准给予奖励，只实施抗震加固的市级财政按照1万元/户的标准给予奖励；同时实施门窗和外墙两项改造的农宅，市级财政按照1万元/宅的标准给予奖励；实施门窗或外墙一项改造的农宅，市级财政按照0.5万元/宅的标准给予奖励；建设超低能耗农宅的农户，按照《北京市超低能耗建筑示范工程项目及奖励资金管理暂行办法》（京建法〔2017〕11号）规定的标准和期限享受奖励政策。
2021年	《北京市抗震节能农宅建设工作方案（2021-2025年）》	单独实施外墙或门窗节能改造的农宅，市级财政不再给与奖励。

1.2 抗震节能改造工作流程

北京市农宅抗震节能改造工作流程主要由申报、确户、施工、验收以及资金拨付五部分组成。在实施过程中各区具体操作细节会略有差别。

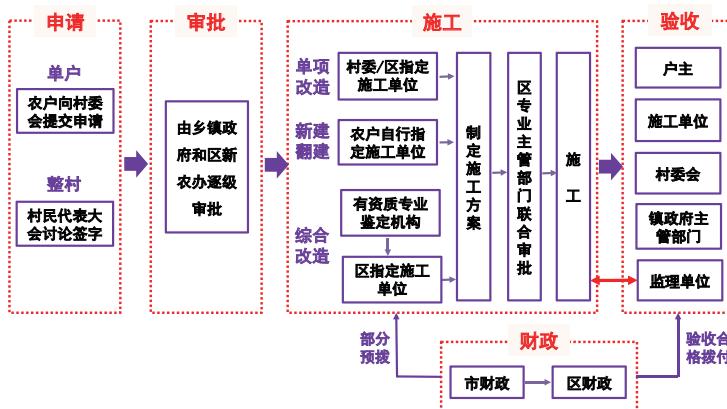


图2 北京市农宅抗震节能改造工作实施流程

1.3 清洁取暖改造相关政策

为贯彻落实党中央、国务院对首都大气污染防治工作的整体部署，2013年，北京市政府启动了农村地区“减煤换煤清洁空气行动”，并于2013年9月将其纳入《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》。按照“五个一批”（即城市化改造上楼一批、拆除违建减少一批、

炊事气化解决一批、城市管网辐射一批、优质燃煤替代一批）的工作思路，在农村地区启动了“减煤换煤”工作。之后，相继制定了各年度农村地区“减煤换煤、清洁空气”、“清洁取暖”工作方案。

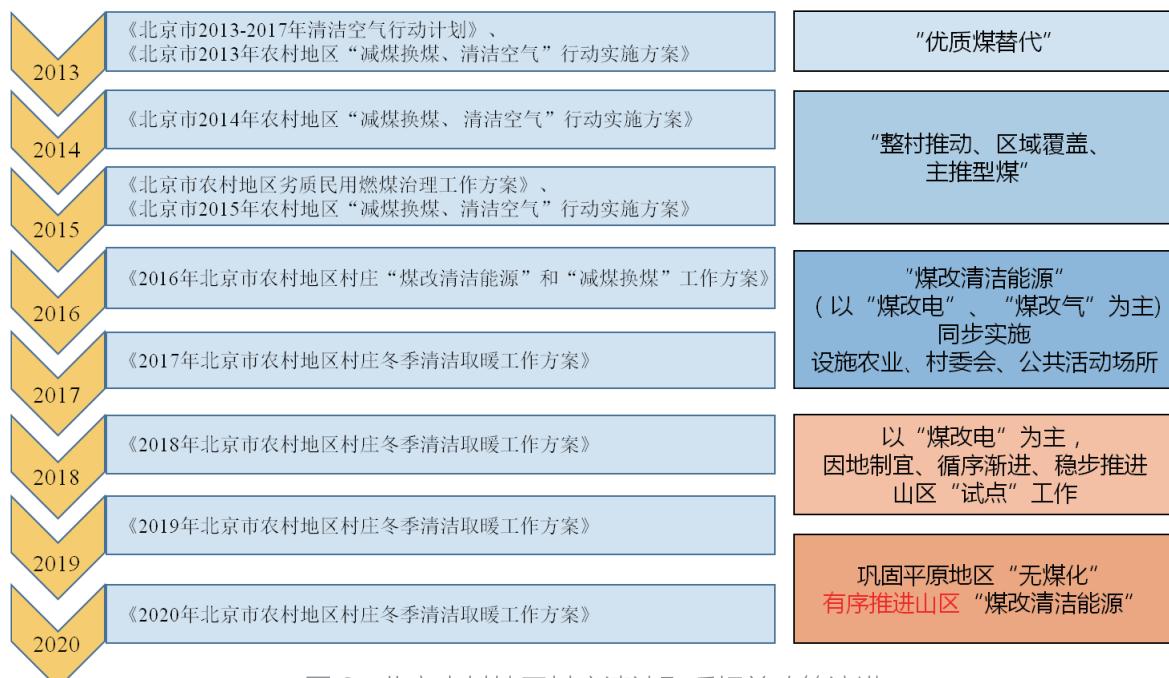


图3 北京农村地区村庄清洁取暖相关政策演进

2021年7月，北京市人民政府印发《北京市“十四五”时期乡村振兴战略实施规划》，提出到2025年农村地区基本实现无煤化。

表2 北京市农村冬季清洁取暖改造相关政策主要内容

发布时间	文件名	主要内容
2013年	《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》	<ul style="list-style-type: none"> ◆在城乡结合部和农村地区综合推广电力、热泵、太阳能等清洁能源采暖方式，削减散煤使用量。 ◆到2017年，力争完成20万户电采暖改造任务。
2013年	《北京市2013年农村地区“减煤换煤、清洁空气”行动实施方案》	<ul style="list-style-type: none"> ◆重点在农村地区实施优质燃煤替代、取暖煤改电、天然气入户、太阳能热利用、液化石油气下乡及沼气利用、农民住宅抗震节能改造和城镇化建设等工程。 ◆将“两区三镇”（门头沟区全区、城乡结合部地区227个行政村和延庆县八达岭镇、昌平区十三陵镇、顺义区马坡镇）作为2013年推进工作的重点区域，其余农村地区要全部实现不使用劣质燃煤。
2014年	《北京市2014年农村地区“减煤换煤、清洁空气”行动实施方案》	<ul style="list-style-type: none"> ◆以“整村推动、区域覆盖、主推型煤”为原则推进农村地区“减煤换煤”工作。全市累计实现50%以上的农村住户实施“减煤换煤”。 ◆以推广符合北京燃煤排放标准的优质型煤为主。
2015年	《北京市2015年农村地区“减煤换煤、清洁空气”行动实施方案》	<ul style="list-style-type: none"> ◆按照“整村推进、区域覆盖、主推型煤”的原则推进农村地区“减煤换煤”工作。实现全市农村地区住户使用优质燃煤基本覆盖，鼓励各区县开展“无煤村”建设。 ◆确保完成5万户农村“煤改电”工程；大力推动“百村天然气进村入户”工程，力争完成20个村庄的市政天然气管网和CNG（压缩天然气）、LNG（液化天然气）进村及入户取暖工程建设。
2016年	《2016年北京市农村地区村庄“煤改清洁能源”和“减煤换煤”工作方案》	<ul style="list-style-type: none"> ◆到2016年底，完成“十三五”时期平原地区村庄“煤改清洁能源”（以“煤改电”、“煤改气”为主）计划制定工作； ◆完成400个村庄整体“煤改清洁能源”任务，确保不再使用燃煤；未纳入2016年度“煤改清洁能源”计划的村庄，全部实施优质燃煤替代；对纳入2017年度计划的村庄，完成各项前期基础工作及外围保障工作。
2017年	《2017年北京市农村地区村庄冬季清洁取暖工作方案》	<ul style="list-style-type: none"> ◆2017年10月31日前，完成700个农村地区村庄内住户“煤改清洁能源”任务，同步实施1400个村委会和村民公共活动场所、79万平方米籽种农业设施的“煤改清洁能源”工作，朝阳、海淀、丰台、房山、通州、大兴6个区平原地区村庄内住户基本实现“无煤化”。 ◆对未纳入2017年度“煤改清洁能源”计划的村庄，全部实施优质燃煤替代。
2018年	《2018年北京市农村地区村庄冬季清洁取暖工作方案》	<ul style="list-style-type: none"> ◆科学选择技术路线，以“煤改电”为主，因地制宜、循序渐进推进农村地区村庄冬季清洁取暖工作； ◆2018年10月31日前，完成450个农村地区村庄住户“煤改清洁能源”任务，同步完成450个村委会和村民公共活动场所、5.38万平方米籽种农业设施“煤改清洁能源”工作，基本实现全市平原地区村庄住户“无煤化”。 ◆积极推进山区电力、燃气配套设施建设，稳步推进山区村庄冬季清洁取暖试点工作。 ◆剩余尚未实施冬季清洁取暖改造的村庄，全部实施优质燃煤替代。
2018年	《北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划》	<ul style="list-style-type: none"> ◆2019年，制定科学有效的山区“煤改清洁能源”技术路线，破解采暖期长、温差大等难题，有序推进山区村庄的“煤改清洁能源”工作。 ◆巩固“无煤化”治理成果。 ◆建立健全清洁取暖设备的运维服务机制，确保安全、稳定运行。 ◆尚未改用清洁能源的村庄，全部使用优质煤。
2020年	《北京市污染防治攻坚战2020年行动计划》	<ul style="list-style-type: none"> ◆巩固平原地区“无煤化”成果； ◆各区健全清洁取暖设备的运维服务机制； ◆组织有序推进山区村庄的煤改清洁能源工作。
2021年	《北京市“十四五”时期乡村振兴战略实施规划》	<ul style="list-style-type: none"> ◆到2025年，实现农村地区基本无煤化。

补贴政策具体为：

(1) 减煤换煤补贴

市财政采取以奖代补方式对区县实行奖励，2013年起按照200元/吨的标准进行奖励，农村住户烟煤炉具更换为无烟煤炉具的购置费用，市、区县财政和农村住户各承担三分之一。

(2) 对“煤改电”、“煤改气”外部管网建设的补贴政策

10kV以下、住户电表（含）之前的电网扩容投资由市电力公司承担70%，市政府固定资产投资承担30%。住户户内线路（即住户电表至取暖设备）的改造费用由各相关区政府制定具体补贴政策。

天然气管网中压管线及调压箱（即入村前工程及设备）投资由具备资质的燃气公司承担；调压箱到住户燃气表（含表）之前（即村内管线）的投资由具备资质的燃气公司承担70%，市政府固定资产投资承担30%。

(3) 对清洁取暖设备的补贴政策

对使用空气源热泵、非整村安装地源热泵取暖的，市财政按照采暖面积每平方米100元的标准进行补贴；对使用其他清洁能源取暖设备的，市财政按照设备采购价格的1/3进行补贴。市财政对各类清洁能源取暖设备的补贴限额为每户最高1.2万元；区财政在配套同等补贴资金的基础上，可进一步加大补贴力度，减少住户负担。

“煤改气”住户取暖用终端设备由市财政按照每户燃气取暖炉具购置价格的1/3进行补贴，补贴金额最高2200元；区财政在配套同等补贴金额的基础上，可进一步加大补贴力度，减轻住户负担。

(4) 对运行的补贴政策

电价优惠及补贴政策：完成“煤改电”改造任务的村庄，住户在取暖季期间，由最初的当日22:00至次日6:00享受0.3元/度的低谷电价，2015年调整为当日21:00至次日6:00享受0.3元/度的低谷电价，同时市、区两级财政再各补贴0.1元/度；2017年，为进一步降低农村地区清洁取暖设备运行费用，推行夜间谷电时段再延长3小时，即当日20:00至次日8:00享受0.3元/度的低谷电价，同时电费补贴方式由收取后再返还调整为农户直接按照0.1元/度缴纳。补贴用电限额为每个取暖季每户1万度。

天然气价格支持政策：2017年起，调整农村地区市政管道天然气分户自采暖用户阶梯气量，并执行相应阶梯用气价格。补贴用气限额为每个采暖季每户820m³，补贴标准实行动态调整机制，即随居民用管道天然气销售价格调整同步变动的天然气分户采暖补贴标准动态调整机制。2020—2021年采暖季，天然气分户采暖居民用户采暖用气补贴标准为每立方米补贴0.73元。采用压缩天然气（CNG）、液化天然气（LNG）方式的，高出市政管道天然气供气价格的部分，由市财政按照每个取暖季每户最高1300元的标准进行气价补贴，不足部分由区财政安排。

1.4 清洁取暖改造与补贴实施流程

◆通过招投标方式确定优质煤或采暖设备供应企业

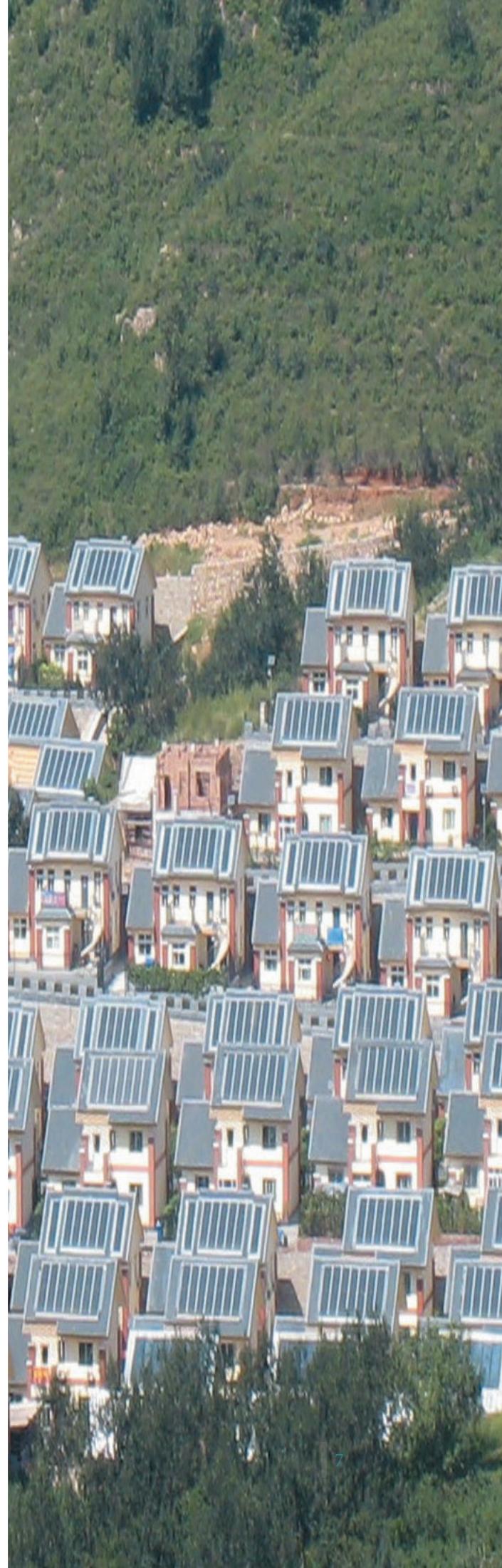
由各区农业农村工作部门根据实际需求通过招标程序确定优质燃煤、清洁采暖设备等的供应企业。

◆用电补贴由“先用后补”转为“实时到位”

2013年试点之初，电采暖的补贴采用“先用后补”的方式，即在每个采暖季结束后，由市农委根据区供电公司核准的数据，将补贴资金拨付各乡镇，由各乡镇发放至各村，最后补贴给各户。从2016年开始，国网北京电力承担了农村地区“煤改电”用户的补贴代发放工作，利用“电采暖用户补贴代发放系统”，将发放流程简化为“一提数、两核对、一下发”，即在采暖季到来之前确定享受补贴的用户明细，实现补贴实时到位。

◆燃气据实予以等值气量补贴

农村村庄家庭天然气分户采暖用气据实补贴，以燃气供应企业两次取得住户燃气表底数测算出采暖用气量，按补贴标准计算核定补贴量后，燃气供应企业向用户予以等值气量补贴，补贴上限为每户820立方米。





2 建筑节能与清洁取暖改造执行情况

2.1 抗震节能改造累计完成 85 万余户

2006年,开展新建抗震节能型新农宅试点;

2007年,全市启动既有农宅节能保温改造试点;

2008年,新建抗震节能型新农宅工作和既有农宅节能保温改造工作均列入了北京市政府的“实事工程”和“社会主义新农村建设折子工程”,被群众称为“暖心暖居工程”;

从2010年起,在全市郊区实施了规模化农宅抗震节能改造;

十一五时期,共完成新建抗震节能型农宅9789户,既有农宅节能改造18552户,抗震节能型示范农宅476户;

十二五时期,共完成48万户农宅抗震节能改造;

根据住建委公布的数据,估算到2020年底,全市累计完成农宅抗震节能改造约85万余户。

2.2 约 87% 的村庄完成清洁取暖改造

2014年,全市累计实现50%以上的农村住户实施“减煤换煤”;

2015年,实现全市农村地区住户使用优质燃煤基本覆盖;

2016年,大规模实施整村“煤改清洁能源”,完成了663个村庄、22.7万户的改造任务;

2018年全市累计完成2963个村庄、110万户的“煤改清洁能源”任务,平原地区基本实现“无煤化”;

根据《北京统计年鉴2021》,北京市共有3887个村。截止2020年,全市约87%的村完成了清洁能源改造,其中,煤改电占八成,煤改气占两成。剩余约500个山区村庄未实施清洁取暖改造。



3 经验总结与成效分析

3.1 工作流程日趋规范、方案选择更加合理

◆抗震节能改造工作流程日趋合理、规范

抗震节能改造过程有施工监理以及验收等环节，同时，由北京市住房和城乡建设委员会建立了信息管理平台。

◆取暖设备参数要求、企业资质要求日趋完善

在招标文件中对生产、研发、安装及售后服务能力更加重视；招标文件明确对设备参数的要求。

◆技术方案从以“换煤”为主向“煤改清洁能源”转变

2013-2014年开展了以“优质煤替换散煤”为主要内容的“减煤换煤”行动，同时开展了蓄能式电暖器以及其他电取暖替代散煤采暖试点；2015年开展了空气源热泵替代散煤采暖的

试点推广，自2016年起明确禁止使用没有节能特点的直热式电锅炉，限制推广蓄能式电暖器，推荐使用具有节能效果的电驱空气源热泵。鉴于2017年出现的燃气供应紧张的形势，在2018年的工作要求中明确提出农村地区清洁取暖工作要坚持“煤改电”优先，因地制宜选择技术设备，原则上不新建以液化天然气(LNG)、压缩天然气(CNG)为气源的“煤改气”工程，避免供应无保障、价格涨幅大的风险。

北京市农村地区冬季清洁取暖工作实现了以“换煤”为主向以“煤改清洁能源”主的转变，同时实现了从原来的直热式电暖器、蓄能式电暖器为主向以电驱地源热泵、空气源热泵和燃气壁挂炉为主转变；从原来的散户试点为主向整村、整区域推进转变。

3.2 对本市燃煤污染的降低起到了主要作用

2014年，北京市首轮细颗粒物（PM2.5）来源解析表明，北京市全年PM2.5来源中区域传输贡献约占28-36%，本地污染排放贡献占64-72%。在本地污染贡献中，机动车、燃煤、工业生产、扬尘为主要来源，分别占31.1%、22.4%、18.1%和14.3%。

2018年北京市发布的新一轮细颗粒物来源解析表明，北京市全年PM2.5主要来源中本地排放占三分之二，本地排放贡献中燃煤源占3%。2021年北京市发布的第三轮细颗粒物来源解析最新研究表明，现阶段北京市PM2.5主要来源中本地排放近六成，其中燃煤源分担率为3%。

由此可见，北京市本地污染中燃煤污染占比由2014年排名仅次于机动车、占比22.4%下降到2018年3%，且随着本地污染总量“瘦身”的情况下，2021年燃煤污染占比保持3%不增。

根据项目组承担的科技部“十二五”科技支撑计划项目《北京地区民用燃煤及扬尘污染控制关键技术研究与示范》研究结果：北京农村家庭固体燃料燃烧的总PM2.5排放对本地污染排放的贡献率是城市燃煤锅炉贡献的两倍左右。由此得出，北京农村地区农宅节能与清洁取暖改造对本市燃煤污染的降低起到了主要作用。

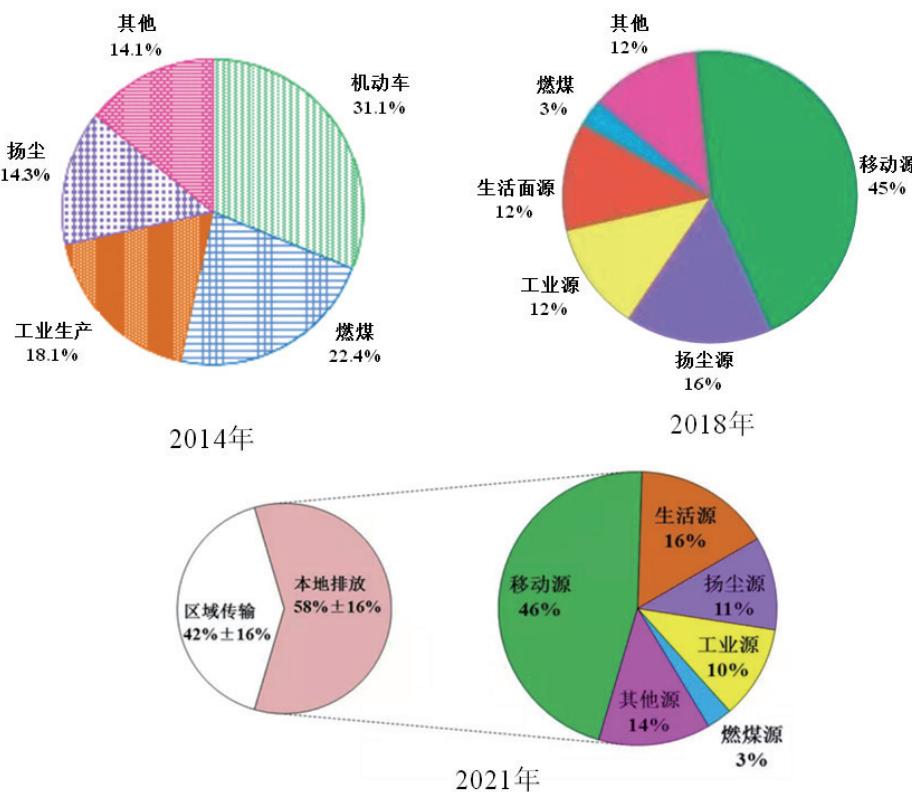


图4 北京市大气PM2.5来源解析结果

4

农村建筑节能与清洁取暖改造调研分析

项目组分别在 2018 年和 2021 年对北京市农村生活能源消费情况进行了调研，调研样本量合计为 6500 份，涉及北京市 10 个区，同时与项目组在 2013 年的调研结果进行对比分析。



图 5 农宅现场图

4.1 户均生活能耗降低，能源消费结构以煤为主转变为以电为主

随着农村经济水平的提升以及建筑节能改造、清洁取暖改造工作的开展，农村生活能耗的总量和各类能耗占比发生了较大的变化。户均能耗从 2013 年的 3.25 tce 降低至 2.72 tce。其中用电占比从 2013 年的 26.26% 提升到 2020 年的 67.19%；耗煤占生活能耗总量的 20.41%，与 2013 年 56.61% 相比实现了大幅度下降。

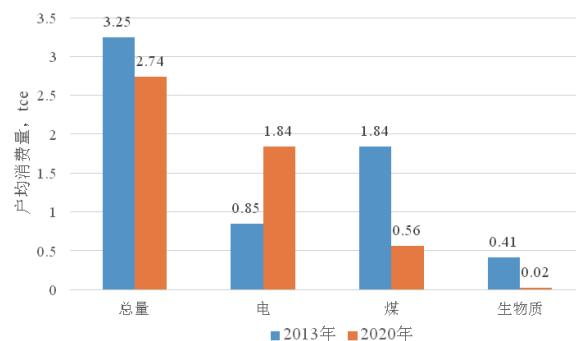


图 6 户均能源消费量变化

4.2 户均采暖面积增加，户均采暖能耗和单位采暖面积能耗均降低

从以散煤小锅炉采暖为主转变为以电采暖设备为主，采暖面积增大，户均由2013年的 80 m^2 增加到2020年的 106.3 m^2 ；采暖用能占总能耗的70.65%，其中，用于采暖的电耗占总电耗量的72.56%，用于采暖的天然气耗量占总天然气耗量的89.52%。由于围护结构保温改造及采暖设备能效提升，单位面积采暖能耗大幅度降低，由2013年的 28.3 kgce/m^2 到2020年降低到 18.3 kgce/m^2 。



图7 户均采暖面积与单位采暖能耗对比

4.3 农村污染物排放量大幅降低

基于项目组对散煤、型煤及秸秆燃烧污染物($\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 CO_2)排放因子的测试，根据调研统计数据计算得出户均污染物排放量变化情况。

由此可以看出， $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 CO_2 等污染物排放均明显降低，其中 $\text{PM}_{2.5}$ 排放降低近78%。



图8 户均污染物排放情况

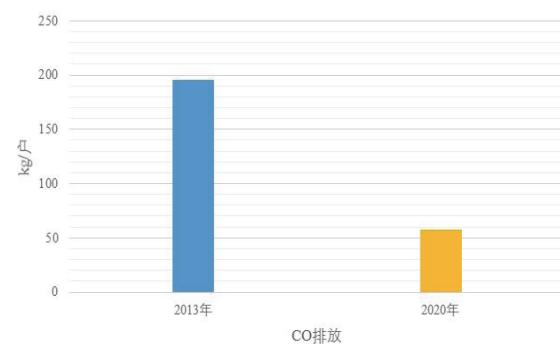


图9 户均CO排放量变化

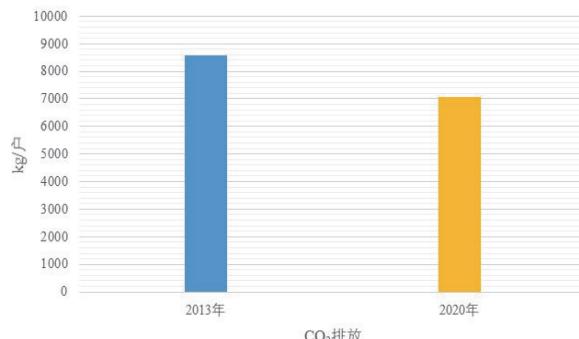


图10 户均 CO_2 排放量变化

由以上分析可知，由于围护结构保温改造及采暖设备能效提升，采暖能耗强度显著降低，以电为主替代了以散煤为主的采暖用能结构，大大降低了农村污染物的排放水平。

4.4 建筑节能改造效果提升显著，存在少量施工及质量问题

◆ 室内温度整体提升 2.6℃

农宅增加保温后可以显著改善室内热环境状况，提升冬季室内温度。通过入户调研数据统计后发现，农户在进行节能改造前的室内平均温度为 15.3℃，进行节能改造后的平均温度为 17.8℃，整体提升了 2.6℃。

◆ 实施满意度 80% 以上

由农户对抗震节能改造工作满意度统计结果可知，80% 以上的农户对操作流程、施工质量、

节能效果和自筹费用等方面达到满意和非常满意，不满意农户比例均在 10% 以下。

◆ 存在少量墙皮脱落开裂、窗户质量差等问题

调研过程中发现保温外侧保护层较薄，存在脱皮开裂等现象，保温板有着火隐患。

有些新安装的窗户玻璃中间有水雾，致使玻璃常年浑浊；窗墙间有缝隙；有的门窗框质量较差，打开阻力大；门窗无配套纱窗且未留安装纱窗槽口，导致屋内灰尘及蚊虫较多，夏天无法开门开窗。



图 11 保温板外侧保护层脱皮开裂



图 12 窗墙间存在的缝隙

此外，部分区县没有区级补贴，有些农户反映补贴资金偏少，且返回补贴时间较长，尤其是新建翻建；少数农宅未能达到理想节能保温效果；施工过程中，少数农户与施工单位沟通不畅，导致工作停滞；施工单位后期质保问题无法得到及时的解决等问题。

4.5 各种清洁取暖方式的效果与用户满意度差别较大

◆蓄热式和直热式电采暖室温不升反降，其他采暖方式室温均有1~3℃的提升

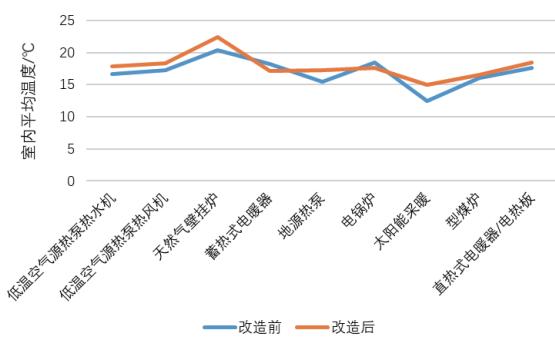


图13 不同采暖方式改造前后室内平均温度

除蓄热式电暖器和电锅炉相对于改造前室内温度有1℃左右的降低外，其余采暖方式的农宅采暖房间温度均有1~3℃的增加，平均升温1.5℃。用户反馈蓄热式电暖器日间放热持续时间不够，此外采用电锅炉的用户，用户担心锅炉功率过大引起高额的采暖费用，而会采取手动关闭设备，因而这两种采暖方式的农宅室温没有明显提升。

◆大多数农户可接受的采暖运行费用为20元/m²以内

对政府补贴前和补贴后的单位面积运行费用及用户对费用的接受程度统计分析结果表明，补贴后用户对运行费用的接受程度明显增加，20元/m²以内的运行费用对于用户来说比较能接受，高于30元/m²则有较多用户表示难以接受。另外，蓄热式电暖器虽然与电锅炉相比运行费用相当甚至较低一点，但是用户反映蓄热式电暖气夜间所蓄热量不足以支撑日间的采暖需求，蓄放热特性不可控，不满意程度稍高。

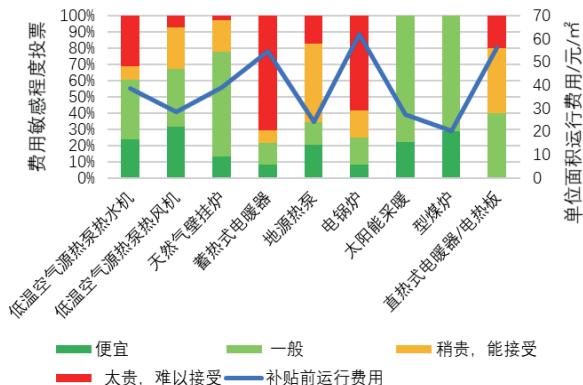


图14 补贴前用户对采暖设备运行费用的接受程度

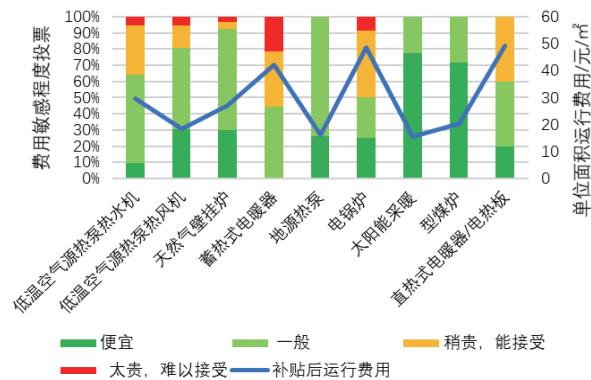


图15 补贴后用户对采暖设备运行费用的接受程度

◆热泵类采暖效果评价较好

采暖效果上，直热式电暖气、蓄热式电暖器和电锅炉这三类电采暖设备功率高、能耗大，约50%的用户认为采暖效果不好；三类热泵和天然气壁挂炉及太阳能采暖均获得较好的采暖效果评价。

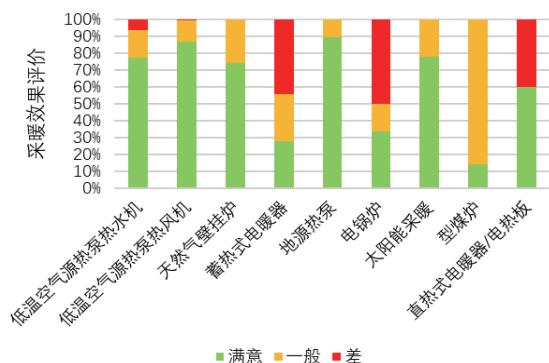


图16 不同采暖方式采暖效果满意程度评价

◆型煤、直热、蓄热式采暖用户的升级改造意愿大

农户对采暖技术的满意程度和对清洁采暖方式的了解程度、接受度也体现在是否希望继续改造成其他方式的意愿上。

表3 农户希望进一步改造和建议信息表

采暖方式	期望进一步改造用户占比	改造建议
低温空气源热泵热水机	4%	太贵，以前烧煤时才一千多元； 故障解决不及时，白天可以低温运行或关机， 封院子增加建筑保温性能
低温空气源热泵热风机	4%	少数安装在屋顶上，安装不合理
天然气壁挂炉	6%	换成费用较低的方式
蓄热式电暖器	76%	蓄热性能差，采暖效果不好， 希望换成空气源热泵
地源热泵	4%	机子质量不好，希望换空气源热泵热风机
电锅炉	50%	运行费用较低的如空气源热泵
太阳能采暖	20%	换成空气源热泵
型煤炉	90%	换成干净的电采暖方式，如空气源热泵
直热式电暖器 / 电热板	88%	希望换成更好的采暖方式

由用户改造意愿的调研可以看出：

使用型煤炉以及直热式的电采暖方式（包括蓄热式电暖器、电锅炉、直热式电暖器 / 电热板）的用户的改造意愿很大，50% 以上的这几类设备用户都期望进一步改造。

5 建筑节能与清洁取暖改造典型方案效果测试评估

5.1 建筑节能改造综合节能率达 40–60%

在房山区、门头沟区选择典型节能改造的农宅进行了围护结构传热系数、冷风渗透次数、室内外温度和冬季能耗情况的实地测试。

- ◆ 墙体保温传热系数降低 50% 以上



图 17 墙体传热系数测试现场图

表 4 墙体传热系数 K 值

墙体形式	实测 K 值 (W/m ² ·K)	理论 K 值 (W/m ² ·K)
37 砖墙	1.57	0.98
24 砖墙	2.11	1.40
37 砖墙加 5cm 膨胀聚苯板	0.70	0.47
37 砖墙加 9cm 膨胀聚苯板	0.37	0.33
37 砖墙加 6cm 挤塑聚苯板	0.38	0.35

几种保温方式墙体的传热系数测试计算结果表明，增加保温层后，传热系数明显降低，均降低 55% 以上，但因受施工工艺、材料吸水以及测试误差等因素的影响，实测结果均比相应的理论值大。

◆换气次数降低 50% 左右

采用风门负压法测试围护结构密封性。根据记录数据分析常压下排风量与房间体积的比值，可计算出冷风渗透次数。

冷风渗透次数测试结果表明，改造后的农宅，在门窗关闭情况下的换气次数为 0.5 次 /h 左右，与未改造的农宅相比，换气次数降低 50% 左右，农宅气密性能得到了加强。

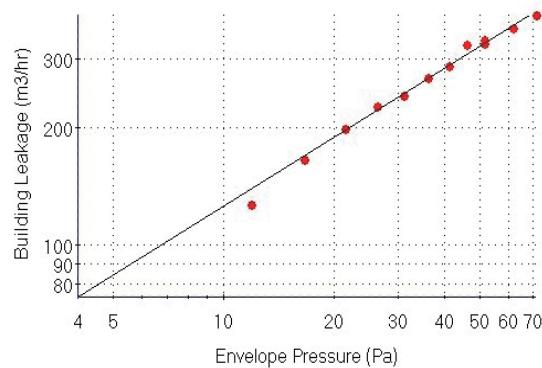


图 18 测试典型户数据拟合曲线

◆综合节能率达 40%-60%

围护结构热工性能的改进在提高农宅冬季室内热环境的同时，也降低了采暖能耗量。根据实测结果，农宅改造后，采暖季平均室温较原来提高了 4~7℃，综合节能率可达 40%-60%。典型改造方案的测试模拟结果如下：

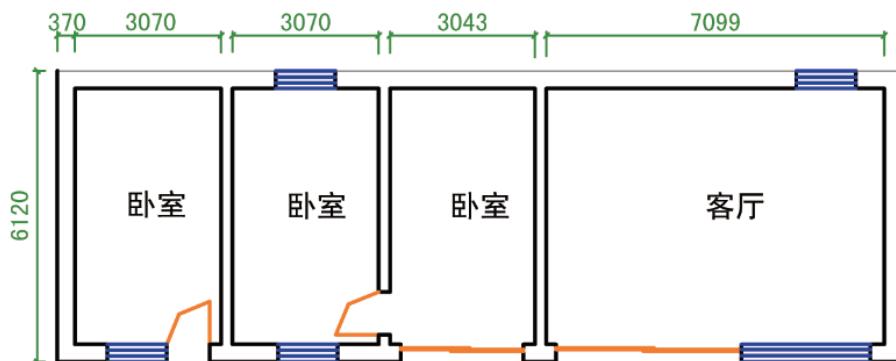


图 19 典型农宅平面图

墙体结构：370 mm 砖墙，保温改造方式：墙体 +5 cm 聚苯板外保温，屋顶 +10 cm 胶粉聚苯颗粒保温，塑钢双玻窗户加装保温窗帘。结合测试数据，通过 DeST-h 能耗模拟计算得到改造后综合节能率达 61%。

表 5 保温改造前后对比

指标	改造前	改造后	
室内温度, °C	8	卧室	13.3
		客厅	15.0
墙体传热系数, W/m ² ·K	1.57	0.70	
屋顶传热系数, W/m ² ·K	1.64	0.82	
换气次数, 次/h	0.9	0.39	
耗热量指标 W/m ²	41.6	16.4	
综合节能率		61%	

◆门窗保温节能效果显著

利用 DeST-h 对典型农宅进行模拟计算，主要分析冬季采暖负荷，采暖期为 120 天，采用温度控制模式，即设定各采暖房间的最低控制温度来进行比较分析，以未保温改造的典型农宅为基础工况计算节能率，不同保温改造措施节能率模拟结果表明，四面墙全部保温改造时，节能率达到 25%，四面墙保温 + 门窗改

造时，节能率增加到 45%，门窗改造节能率达 19%。可见门窗作为空气渗透主要部位，加强保温改造，节能效果明显。

北墙保温 + 门窗改造措施下，节能率达到 26%；北墙保温 + 门窗改造 + 吊顶保温措施下，节能率达到 48%。屋顶作为热量散失主要部位，采用保温措施后，节能效果明显。

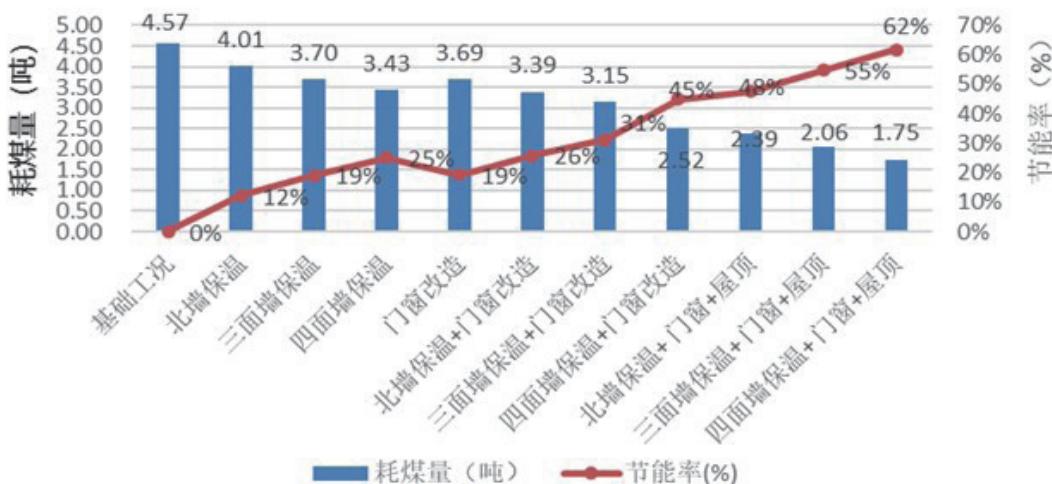


图 20 不同保温改造措施的节能率

5.2 清洁取暖方案效果测试与评价

选取目前北京市农村推广应用的蓄热式电采暖、空气源热泵热水机、空气源热泵热风机、燃气壁挂炉等采暖方式进行测试，测试内容包括室内外温度、设备效率、采暖能源消耗量等，同时与散煤、型煤以及生物质颗粒采暖方式进行对比分析。

◆部分清洁取暖方案运行费用偏高

结合大量调研与测试数据，蓄热式电采暖、空气源热泵热水机、燃气壁挂炉等采暖方案存在采暖能耗高等问题，蓄热式电采暖能耗约 100-120 kWh/m²，空气源热泵热水机能耗约 45-85 kWh/m²，燃气壁挂炉采暖天然气消耗量为 10-20 m³/m²，均超出了农民对运行费用实际可接受程度——20 元 /m² 内。

表 6 清洁取暖方案测试结果

清洁取暖方案	测试户数(户)	平均单位采暖面积能耗
蓄热式电采暖	26	124.0 kWh/m ²
空气源热泵热水机	11	79.1 kWh/m ²
空气源热泵热风机	13	26.7 kWh /m ²
燃气壁挂炉	12	15.0 m ³ /m ²
太阳能 + 燃气壁挂炉	1	7 m ³ /m ²

◆空气源热泵低环温运行良好

运行受气温影响较大的取暖设备为空气源热泵热水机和热风机。以下针对两种空气源热泵在低温天气下的运行情况进行分析。2020 年 1 月 6 日 -7 日，北京受到寒潮影响，1 月 7 日晨，南郊气象站最低气温达 -19.5℃，山区则平均达到了 -26.4℃，山区最低气温在 -30℃ 左右。

(1) 空气源热泵热水机

空气源热泵热水机在 1 月 6 日 -7 日的运行监测情况见图 21。

可以看出，在低环境温度情况下，大部分热泵热水机能正常运转，但处于长时间大功率运行状态；室内气温较平时下降 2-3℃，相较采暖季平均温度下的设备能效比降低 25% 以上；个别设备会出现制热能力不足，主机采取保护措施而停机、开电辅，从而影响系统性能。

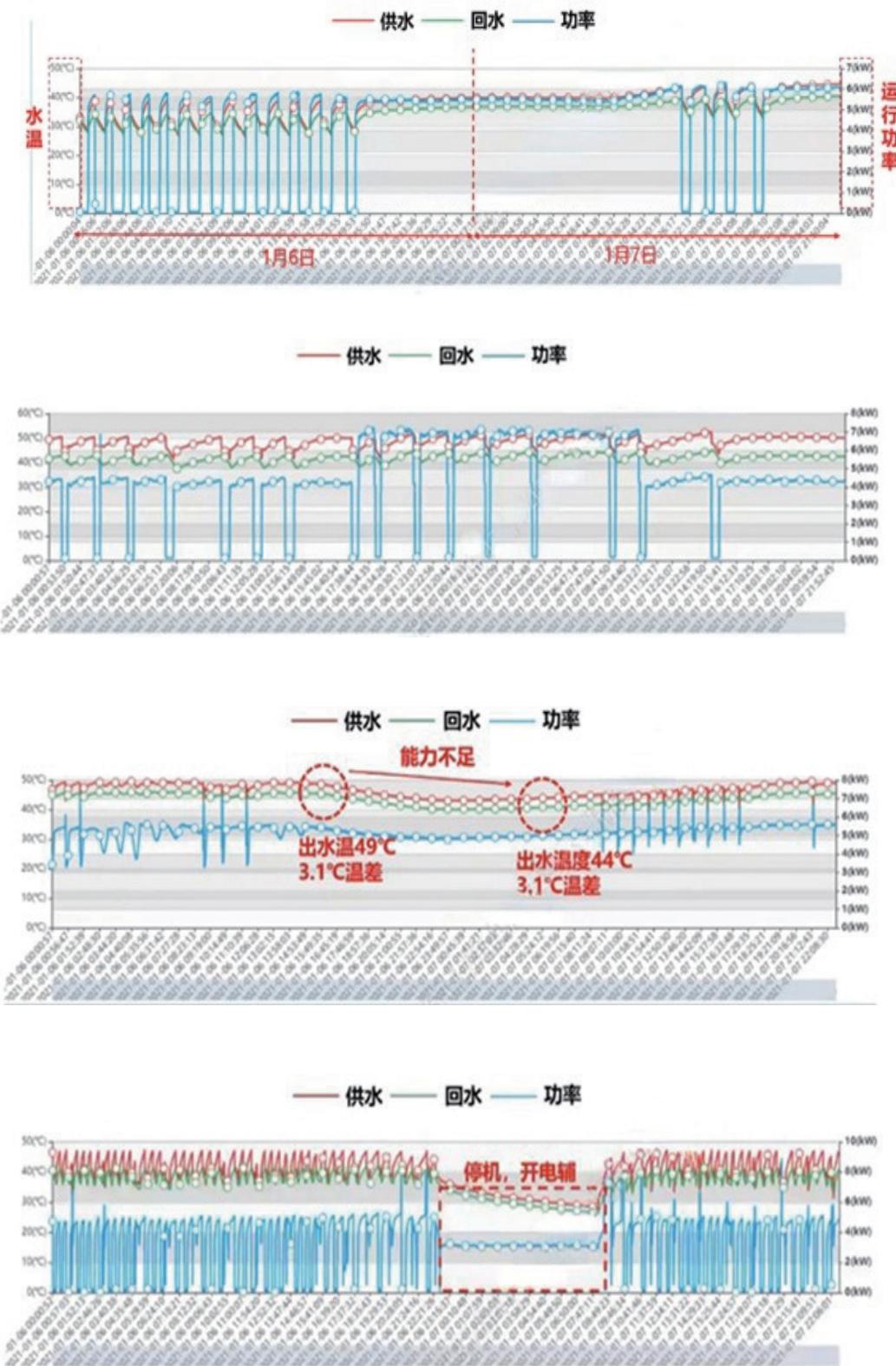


图 21 低温天气空气源热泵热水机运行情况
 (图片来源:国家空调设备质量监督检验中心)

表 7 低温天气对空气源热泵热水机的影响

参数	半个供暖季平均		2021.1.6		2021.1.7	
	平原	山区	平原	山区	平原	山区
室外平均温度 (℃)	-1.9	-4.6	-12.4	-15.1	-14.0	-15.7
室外最低温度 (℃)	-22.4	-26.5	-19.2	-26.4	-22.4	-26.5
室内平均温度 (℃)	18.1	18.6	16.6	16.4	15.6	15.9
供水温度 (℃)	41.5	41.4	42.6	42.4	42.0	41.8
系统能效比	2.12	2.07	1.73	1.61	1.69	1.57

(数据来源: 国家空调设备质量监督检验中心)

(2) 空气源热泵热风机

图 22 是两户空气源热泵热风机采暖典型户极寒天气前后时间段内的运行监测情况, 可见, 在低环境温度下, 设定温度分别为 24.5℃ 和 19℃, 实际室内温度分别达到了 24.2℃ 和

18.3℃, 均能满足实际需求; 在低环境温度下, 设备主机较平时启动更频繁, 在保温密封性能不太好的房间, 设备处于较大功率条件下的运行时间长, 从而设备性能会受到一定的影响。

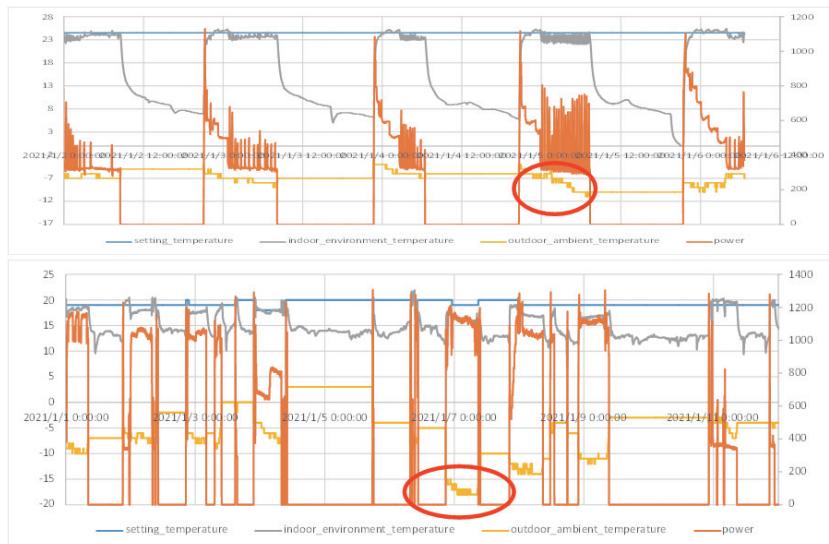


图 22 低温天气空气源热泵热风机运行情况

◆空气源热泵热风机费用年值最低

实际测试户的采暖面积、人员构成和作息习惯、使用习惯存在很大差异，仅从实际使用的能耗量进行对比不具备参考性，为了更科学合理的评价各采暖方案的运行效果和经济性，

采取测试和能耗模拟结合对采暖方案进行寿命周期内费用年值的计算方法来评价，同时与散煤采暖方式及项目组生物质颗粒采暖示范方案进行对比分析。

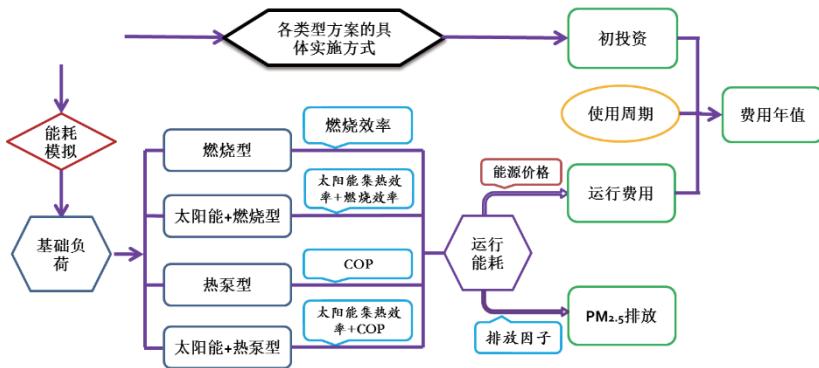


图 23 各类型采暖方案的寿命周期内费用年值比较方法

选取典型农宅，采暖面积 80 m^2 ，在保证农宅室内温度维持在 16°C 左右的条件下，围护结构有保温措施的农宅的采暖季热负荷指标为 23.53 W/m^2 ，全年累计热负荷为 6040.38

kWh ，约合 $2.1745 \times 10^4 \text{ MJ}$ 。根据全年最大热负荷对设备进行选型，表 8 给出了各方案的年运行费用及费用年值。

表 8 各取暖方案经济性对比

对比项目	蓄热式电暖器	空气源热泵热风机	空气源热泵热水机	燃气壁挂炉	太阳能+燃气壁挂炉	生物质采暖炉	型煤采暖	散煤采暖炉
年运行费 (元/ m^2)	37.11	14.98	14.73	24.67	20.25	17.85	20.21	34.08
费用年值 (元/ m^2)	44.3	25.6	33.9	41.2	60.2	33.9	24.7	37.8

由表中数据可以看出：

在达到相同室温条件下，各种采暖方案（蓄热式电采暖除外）的运行费用均低于散煤采暖（实际使用中，型煤和散煤可以在白天进行封火，实际费用会降低），空气源热泵热水机和热泵热风机年运行费用最低，且二者相当，空气源热泵热风机可根据采暖空间和时间的需求灵活

调节，还有进一步的行为节能空间。生物质颗粒采暖略高于空气源热泵采暖。

若不考虑燃气管网、电力增容等基础设施投资，而只考虑设备初始投资、寿命周期和运行费用的费用年值，则在清洁取暖方案（不含型煤采暖）中，空气源热泵热风机最低。



6 农村建筑节能与清洁取暖可持续发展模式启示

农村生活能源消费主要用作采暖，农村住宅的建筑围护结构保温性能差造成了能耗高。解决农村能源问题，应从建筑节能入手，开展农村新建和既有房屋的建筑节能改造，减少热量损失，降低建筑能耗。北京市在农村地区抗震节能改造技术的推广应用为北方农村地区提供了成功的经验。

北京市散煤替换技术实施走在全国的前面，没有现成经验和模式可供参考。在技术路径选择上出现了基础设施建设、设备和运行费用较高的情况。

北京市的清洁取暖工作为北方农村清洁取暖提供了成功的经验与有益借鉴。

基础设施：2013-2020 年北京市农村“煤改电”和“煤改气”工程累计投入 462.5 亿元，每户约 3 万元左右；

设备费用：每户取暖设备费用约 1~7 万元不等，其中仅市、区两级政府对设备的补贴共约 220 亿元左右，平均每户 2 万元左右；

运行费用：蓄热式电采暖、空气源热泵热水机、燃气壁挂炉等采暖方案存在采暖能耗高等问题，蓄热式电采暖能耗约 $100\text{--}120 \text{ kWh/m}^2$ ，空气源热泵热水机能耗约 $45\text{--}85 \text{ kWh/m}^2$ ，燃气壁挂炉采暖天然气消耗量为 $10\text{--}20 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ，均超出了农民对运行费用实际可接受程度——20 元/ m^2 以内。

运行补贴：每年政府为农村采暖运行补贴超 10 亿元：2019-2020 年采暖季，“煤改电”用户获得市区两级财政资金电费补贴约 6.6 亿元、“煤改气”用户获得市级财政气费补贴约 2.6 亿元；2020-2021 年采暖季“煤改电”用户获得市区两级财政资金电费补贴约 7.3 亿元。

运维服务：自 2020 年起，各区政府开始为清洁取暖设备的运维购买服务，年服务费约 50-250 元/户，若按照此标准中位水平计算，整个农村地区每年预计需要 2 亿元左右。

6.1 低碳可持续发展模式

◆政策导向

推进清洁取暖的内在动力是政策引导下取暖领域的供给侧结构性改革，财政补贴本应是填补缺口的关键角色，不该变成承担大头的主力军。

基础设施建设应考虑功能专用性或多用性。以电网为例，实施计划没有考虑电网接纳能力，致使电网被动改造且投资巨大，难以实现综合成本最低、减排效果最好；另外对于燃气管网，建设动力仅为了满足农村当前的采暖需求，需要财政付出巨额的基础设施建设费用。

少数富裕的居民，根据自身经济条件，可以超前选择适宜的、舒适度更高的清洁取暖技术。但财政补贴政策应发挥导向作用，从长期可持续的角度出发，考虑综合性效益，建立良性循环的市场环境。

◆经济合理

煤改清洁能源取暖，最理想的状态是冬季取暖费用能与改造前基本持平，这种改造模式可以不依靠政府的运行补贴而持续良性运行下去。在设计补贴政策时，应该考虑避免对运行费用的补贴。运行费用补贴能解“燃煤之急”，却容易引发“长久之痛”。选择适宜的技术路线，不需要政府对运行费用进行补贴，从而大大减轻从中央到地方的财政压力，用合理的经济代价获取最大的节能减排效果。

与城市住宅全空间全时间的采暖要求不同，农村住宅采暖的特点是部分空间部分时间。农村居民因为频繁进出房间，衣着普遍较厚，对室温的要求较城市居民略低3~5℃，因此取暖能耗其实可以适当降低。在确定清洁取暖改造方案时，应考虑农村居民的收入水平情况，调研其长期的取暖习惯和取暖费用支出意愿，将这些结果纳入参考意见中。

◆技术可行

由于农宅具有房间数量多、使用时段不规律、间歇性在室等特点，采暖设备或系统宜具备分室调节功能，充分利用农户的行为节能以达到最大化的有效采暖。调研发现，农宅既有的散热器等采暖系统，不论是夜间使用的卧室、白天使用的客厅或仅做饭时使用的厨房，常常无任何阀门调节，多房间连续性取暖，甚至出现某间房或某一层常年不用仍然一直供暖的现象。因此，改造后的清洁取暖设备需做到可以分室调节，随用随开，启停方便，满足间歇式取暖需求。不同时段还要具备温度可设置功能，以满足不同时段不同功能房间的需求。

农村常住人口的构成，以老人和儿童为主，安全意识不高，容易发生误操作。有些采暖系统或设备开关程序繁杂，有些水系统要求整个采暖季不能断电防止结冰危害，有些采暖系统在安装环节频频出错，有些采暖系统因设备部件较多容易损坏，有些采暖系统则存在较大的安全隐患。误操作一般会降低用户舒适感，甚至对用户的身心健康产生严重威胁。农村地区清洁取暖应避免使用复杂系统，尽量使用成套设备，减少现场组装环节，简单易操作，最好是实现智能化一键式操作。

◆统筹规划

清洁取暖不等于一刀切地发展煤改气、煤改电，应当立足本地资源禀赋、经济实力、基础设施等条件，结合大气污染防治和安全节能的全面要求，利用市场的优势，争取农村居民的支持和认可，充分发挥地方政府高效的作用，提出因地制宜的顶层规划，从选择技术路线、细化推广方式、制定补贴政策、建立长效机制等方面切入。

6.2 技术路径选择建议

资源禀赋：农村分散式的村落分布，不宜远距离进行引入或运输外来资源，避免增加外网铺设投资、运输费用，以及由此带来的能源保障、能源使用安全等问题。宜利用当地所具备的资源，就地消纳。合理测算当地的电力容量，配适当体量的热泵等电设备。就近利用生物质资源，采用生物质原料加工颗粒供户式生物质炉具采暖或炊事。农村有闲置的屋顶资源，可利用太阳能进行被动式或主动式进行采暖。村落附近是否有工业余热可利用，深度回收余热进行供热。

气候、地质以及农宅状况：综合考虑冬季温湿度状况，选择适合的热源设备，如空气源热泵考虑冬季制热效果、制热保证以及化霜等问题；农宅的围护结构与布局，适合多大功率的热源设备，适合什么样的末端系统，是否满足设备的放置与安装等。

能源需求：综合考虑农户的用能需求，除冬季取暖需求外，综合考虑夏季制冷、炊事、生活热水等，可选择同时满足多种需求的方案；综合考虑村落及其附近的非农村住宅的其他需求，如蔬菜大棚的采暖需求、养殖对生物质料的需求、附近学校、村镇办公或工厂等的集中热需求等。

经济水平：综合考虑政府财政实力与用户经济能力，同时调动外来市场与金融机构资本，进行合理利用与资金配置，形成可持续的清洁取暖金融方案。

实施模式与长效保障机制：综合考虑竞标企业的资质和服务能力，严把质量关。进入农村市场的设备质量必须得到保障，不仅在安装和调试过程要合规合理，在若干年的运行时间里也应做到安全稳定，对应的设备厂商应提供可靠的长期维修保障服务。

综上，从前期初投资、农户使用要求、采暖运行费和区域整体实施等多个维度来综合考虑，形成可持续化发展模式。

在“双碳”目标下，考虑到降碳需求，清洁取暖改造有了新要求、新目标，技术路线应坚持减污降碳，优先发展可再生能源供暖。

◆ 围护结构保温是农村建筑节能降碳的基础

针对农户经济水平参差不齐、空心村等现象，实施农宅抗震节能改造工程时，应根据农户实际情况，充分考虑农民的消费水平和居住习惯，选择效果较好、价格合理，具有较高经济效益的方式和模式，避免在农宅改造中增加居民负担，一村一策、一户一策。

对于经济条件较好地区的新建翻建建筑，政府给予奖励，鼓励采用被动式技术进行建造，达到超低能耗建筑标准。

◆ 煤改电适宜技术——低温空气源热泵热风机

低温空气源热泵热风机在技术成熟度、经济性、可靠性、节能减排、安装和运行便捷程度、实际使用效果等多方面都具有较为明显的优势，是农村地区清洁采暖的适宜技术。

(1) 低温空气源热泵热风机在低环境温度下制热性能良好。低温制热性能系数 COP_{-20°C} 不低于 1.8，制热季节性能系数 HSPF 不低于 2.8。

(2) 低温空气源热泵热风机可以迅速提高房间温度，热风机启动后 20 min 内即可将房间温度从 9°C 升到 15°C，满足采暖需求。

(3) 热风机设备形式与家用分体式空调类似，室内机采用双出风口低壁挂式送风，下出风口热风贴地面流动，自然上升，达到地板采暖的舒适度，上出风口针对人员活动区域，实现快速升温。热风机可按取暖房间安装，独立调节、间歇运行，实现部分房间、部分时间的运行模式，温度设定操作简单、灵活调节，能够最大限度实现行为节能潜力。设备无需采暖末端，故障率低，生命周期内基本免维修。

(4) 根据调研、测试及模拟数据,由于不同建筑保温状况及采暖需求,其单位面积采暖季电耗在20~40 kWh/m²,没有政府运行补贴的运行电费仅为10~20元/m²,低于散煤采暖费用。

(5) 由于建筑的热惯性,对热泵热风机短期启停仅会使温度变化2℃左右,不会显著影响室内舒适度。因此,在热泵热风机上安装简单的控制器,就可由电力调度中心根据电力负荷状况,直接向各村区域控制器发出指令,分时分片控制一定数量的热泵启动、停止或自主控制,从而实现对电网有效的削峰填谷。

◆部分地区可利用生物质颗粒实现采暖零碳排放

山区有丰富的农作物秸秆、树枝等各类农林生物质资源,农林作物在生长过程中吸收二氧化碳,因此农林生物质是一种零碳排放的能源。由于生物质资源质量密度低,经济运输半径有限,最适宜的利用方式是本地化生产、本地化配送及消费,优先满足农村的基本生活用能,最大程度上实现低碳能源的低碳使用。

如能充分发挥山区农村丰富的生物质资源优势,通过生物质颗粒燃料的本土化收集和生产,在部分山区采用生物质专用炉具进行采暖,可减少生物质废弃或野烧带来的污染,且可降低农民的取暖成本。**智能型生物质颗粒采暖炉采用一键式操作,实现燃料自动控制入炉、分阶段燃烧、火焰温度控制等,实现“炊暖两用”,并且操作简便,也可实现间歇性取暖模式。**生物质颗粒采暖炉的炉具热效率为80%~85%,根据《中国建筑节能年度发展研究报告2020》农村建筑节能最佳实践案例——河北饶阳智能型生物质颗粒燃料取暖炉项目,农户实际运行成本为8~12元/m²。

◆充分利用屋顶闲置资源,发展分布式“光伏+”

农村建筑分散、密度低,应充分利用农村建筑屋顶资源条件发展分布式光伏,**满足建筑本身用电,同时可以解决农村生活、生产和交通用能,富裕电力上网,补充电网在用电高峰期的电力不足。**

房屋长期闲置,户内没有电力负荷,或者电力负荷小的农户,安装光伏后所发电量用于邻里调配和村内调配,余电上网;根据不同用电量需求设置合适容量的蓄电池,同时电三轮车、电动汽车、电动自行车的普遍使用,可以根据农户的经济情况,选择利用电动载具来充当储能系统以供应夜间电力负荷。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2012, 2016, 2020 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [2] 章永洁, 蒋建云, 叶建东, 付萌, 张帆. 京津冀农村生活能源消费分析及燃煤减量与替代对策建议 [J]. 中国能源, 2014, 36 (7) : 39-43.
- [3] 叶建东, 章永洁, 蒋建云, 张帆. 农村型煤替代散煤采暖对比分析 [J]. 建筑节能, 2016, 44 (10) : 102-103.
- [4] 蒋建云, 章永洁, 叶建东, 张帆, 马荣江, 熊帝战, 张了, 王鹏苏, 付宇, 杨旭东. 北京农村地区燃煤供暖替代技术方案实效对比 [J]. 暖通空调, 2016, 46 (9) : 51-55.
- [5] 马荣江, 毛春柳, 单明, 杨旭东. 低环境温度空气源热泵热风机在北京农村地区的采暖应用研究 [J]. 区域供热, 2018, (01) : 24-31.
- [6] 李文超, 王梁, 靳立. 北京市农村地区村庄冬季清洁取暖改造方式及成效 [J]. 环境与可持续发展, 2020, 45 (3) : 67-70.
- [7] 乐慧, 李好玥, 江亿. 用空气源热泵实现农村采暖的“煤改电”同时为电力削峰填谷 [J]. 中国能源, 2016, 38 (11) : 9-15.
- [8] 乐慧. 利用空气源热泵实现风电消纳的需求响应策略与政策研究 [D]. 北京: 清华大学, 2020.

本报告由能源基金会资助。报告内容不代表能源基金会观点。