北方农村煤改清洁能源不同技术的经济性和排放性能对比

单明[1]，刘彦青[1]，马荣江[1]，邓梦思[1]，丁星利[1]，杨旭东[1]，章永洁[2]，叶建东[2]
（1. 清华大学建筑学院，北京　100084；2. 北京市可持续发展促进会，北京　100084）

【摘要】近几年北方农村煤改清洁能源工作取得了显著进展，但不同地区所采用的技术种类繁多，效果也有很大不同。及时总结并合理评估不同技术方案的实施效果对各地区科学合理地选择后续清洁取暖技术路径，确保清洁取暖工作的顺利开展并取得长期实效都至关重要。本文采用调研、实测和模拟相结合的方式，深入分析了燃气热水锅炉、生物质颗粒取暖炉、蓄热式电暖气、低温空气源热泵热水机、低温空气源热泵热风机、太阳能集热器+低温空气源热泵热水机耦合系统共计 6 种典型方案的经济性和排放性能，同时结合当地资源禀赋和用户使用特性等总结出不同技术方案的适用性。综合来看，生物质颗粒取暖炉及低温空气源热泵热风机在经济性上具有显著优势，且更加适用于农村的生活方式。农村清洁取暖技术路径的制定、节能技术的开发及室内热环境的改善还需要在充分考虑地区发展水平、空气质量要求、群众取暖需求、能源供应条件和潜力等基础上走出一条符合我国农村实际的可持续发展之路。

【关键词】农宅；清洁取暖；煤改清洁能源；经济性；污染排放
中图分类号：X21　文献标识码：A　文章编号：1673-288X(2020)03-0043-07　DOI：10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202003043

2016 年 12 月 21 日习近平总书记在原中央财经领导小组第十四次会议上提出，“推进北方地区冬季清洁取暖，关系北方地区广大群众温暖过冬，关系雾霾天能不能减少，是能源生产和消费革命、农村生活方式革命的重要内容；要按照企业为主、政府推动、居民可承受的方针，尽可能利用清洁能源，加快提高清洁取暖比重”[1]。北方农村既有取暖方式主要以低效高污染的散煤燃烧为主，在浪费大量化石能源的同时，还造成严重的室内外空气污染，故在北方农村推进清洁取暖对于降低取暖能耗、提高能源利用效率、打赢蓝天保卫战意义重大。

2017 年 5 月，财政部、住房和城乡建设部、原环境保护部和国家能源局 4 部委联合发布《关于开展中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点工作的通知》（财建〔2017〕238 号）[2]，北方地区冬季清洁取暖国家试点工作正式开始。2017 年 12 月，国家 10 部委又印发了《北方地区冬季清洁取暖规划（2017—2021 年）》[3]，其中对清洁取暖所涉及的能源种类、技术方案，以及未来 4 年内的整体实施目标等都做了一定的指导。但这些文件所给出的多为总体性建议原则，有关省区市农村地区在能源禀赋、气候特点、建筑形式、使用模式等都存在很大的差异性，还应结合本地资金投入潜力和农民意愿等因素的实际情况开展工作。因此，各地基本都是采取边摸索、边推进的工作模式。

不同地区的农宅采用不同清洁取暖技术时的实际运行效果、经济性和对环境的影响也各不相同。目前，北方农村地区清洁取暖工作仍在大规模进行中，针对不同技术开展科学、有效的评估，对各地区科学合理地选择后续清洁取暖技术路径，确保清洁取暖工作的顺利开展和取得长期实效都至关重要。本文结合过去几年所开展的深入研究和实地工作，对其进行详细分析。

1　北方农村煤改清洁能源主要技术

根据公开资料[4]，截至 2018 年底，京津冀及周边地区、汾渭平原共完成清洁取暖改造 1372.65 万户，各试点省（市）清洁取暖改造完成情况如表 1 所示。从所采用的技术方案看，试点城市采用的清洁热源替代方式以“煤改气”“煤改电”为主，其他形式如“煤改热”“煤改生物质”等仅有少量试点。

本文将北方农村地区目前所涉及的主流清洁取暖技术方案分为燃烧型、电驱动型和多系统耦合型三种类型，其中燃烧型取暖系统包括燃气热水锅炉（俗称天然气壁挂炉）、生物质颗粒燃料取暖炉；电驱动型取暖系统包括蓄热式电暖气、低温空气源热泵热水机和低温空气源热泵热风机；多系统耦合型包括太阳能集热器+低温空气源热泵热水机。下面分别对这几种系统的工作原理做一简单介绍。

基金项目：国家“十三五”重点研发计划课题“村镇级微型分布式供能技术研究”（2018YFD1100702）；清华大学山西清洁能源研究院种子基金资金
作者简介：单明，博士，助理研究员，主要研究方向为村镇建筑能源与环境
通讯作者：杨旭东，博士，教授，主要研究方向为村镇建筑节能与室内空气品质

(1)技术方案一：天然气壁挂炉

该系统利用商品化天然气壁挂炉设备通过燃烧外网供应的天然气来加热循环介质(一般是水)并将其输送至散热末端进行取暖。天然气壁挂炉多安装在厨房，烟囱连通室外以排放燃烧所产生的烟气，如图 1 所示；散热末端一般采用农宅既有的或改造后的散热器或辐射地板。通常农村地区没有既有的天然气输送管网，需要重新铺设室外天然气干管和引至农户室内的支管，气源有管道天然气和撬装式液化天然气(LNG)两类。

表 1　北方 7 省(市)完成清洁取暖改造情况(截至 2018 年底)

地区	计划任务/万户	完成情况/万户		
		煤改气	煤改电热或煤改热泵	总计
北京	72	17.5	68.4	85.9
天津	120	40.5	19.7	60.2
河北	1133	448.3	56.2	504.5
山西	611	76.6	15.5	92.1
山东	594	92.8	88.4	181.2
河南	503	15.1	287.1	302.2
陕西	362	133.32	13.23	146.55
合计	3395	824.12	548.53	1372.65

注：北京和天津于 2017 年之前已有清洁取暖的试点探索，上表数据已包含。

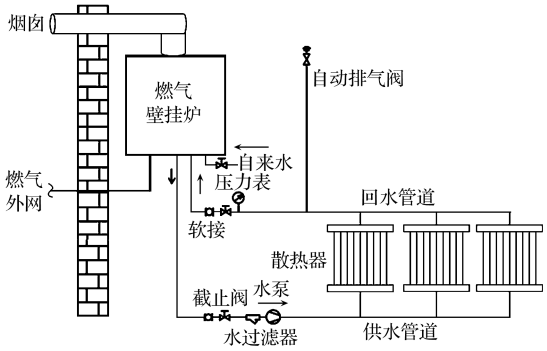

图 1　燃气壁挂炉取暖系统原理图

(2)技术方案二：生物质颗粒燃料取暖炉

该系统采用燃烧生物质颗粒燃料(是指把不规则的农林剩余物经过处理加工成密实且尺寸较为一致的颗粒状成型燃料，见图 2)的炉具加热循环热水并将其输送至散热末端进行取暖。生物质颗粒燃料取暖炉需安装在厨房或其他无人员长期逗留的单独房间内，配置单独与室外相连的烟囱以排放燃烧所产生的烟气；散热末端可采用农宅既有的或改造后的散热器或辐射地板；生物质颗粒燃料可于每年取暖季开始前一次性购买后存储在农户室内，炉具使用时需要做到每天及时加料和清灰。系统原理如图 3 所示。

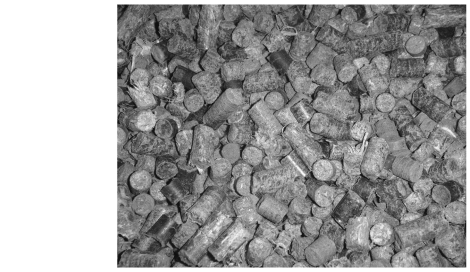

图 2　生物质颗粒燃料

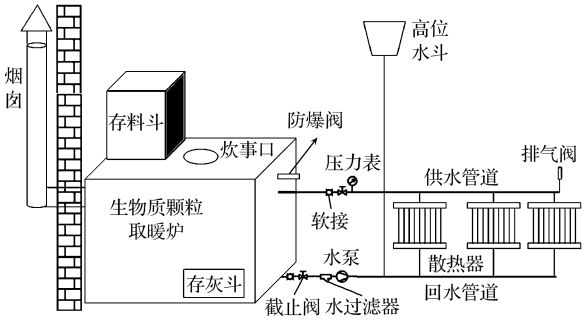

图 3　生物质颗粒燃料取暖炉取暖系统原理图

(3)技术方案三：蓄热式电暖气

该系统利用电阻元件直接将电能转化成热能进行取暖，其中配有一定量的耐火砖、铁块等重质材料蓄存夜间谷电所产生的热量，待到白天进行放热，如图 4 所示。如果所配置的重质材料量不足，将导致设备蓄热能力受限。由于其将建筑物全天的取暖需热量压缩到夜间时段获取，因而所需的电加热功率基本会翻倍，对配电容量的要求更高。

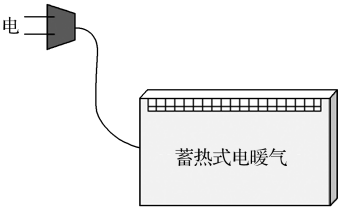

图 4　蓄热式电暖气取暖原理图

(4)技术方案四：低温空气源热泵热水机

该系统采用电能驱动，利用逆卡诺循环原理吸取室外空气中的热量连同电能转化的热量，通过冷媒循环不断加热热水输送至室内散热末端进行循环取暖，末端可采用散热器或地板辐射管等。低温空气源热泵与家用空调器的基本原理相同，但它是以冬季取暖为主要目的进行设计的，可以实现较低室外气温下的良好制热并有效解决了普通空调器冬季结霜严重的问题。低温空气源热泵整个取暖季的平均能效可达 2 以上，但对电力稳定性有一定要求。系统包括室内机和室外机，两者通过冷媒铜管相连，室内机与取暖末端通过水管相连，如图 5 所

示。另外，低温空气源热泵在低出水温度下能效较高，其作为低温热源(一般出水温度最高可达 50℃以上，经济性运行温度约 40℃，运行温差约 5℃)直接匹配既有的地板辐射管或落地式风盘可取得较好的取暖效果。对于既有的老式散热器，需要进行增加散热末端、输送管道以及水泵等的技术改造。

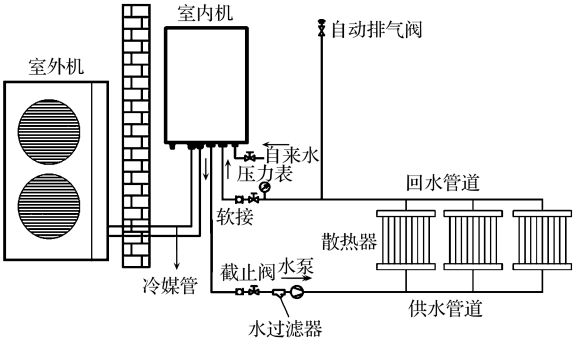

图 5　空气源热泵热水机组取暖系统原理图

(5)技术方案五：低温空气源热泵热风机

该系统采用电能驱动，利用逆卡诺循环原理吸取室外空气中的热量连同电转化的热量通过冷媒循环直接加热室内空气循环取暖。空气源热泵热风机室外机需安装在通风良好的室外，室内机落地安装在散热良好的取暖房间，如图 6 所示。空气源热泵热风机在华北地区冬季气候条件下的能效比可达 2.5 以上，且启停方便、升温快，可实现夏季供冷，不需要额外末端，具有按需灵活配置的特点，就像安装单体壁挂空调器那样简单，不需要穿墙打洞敷设循环水系统。

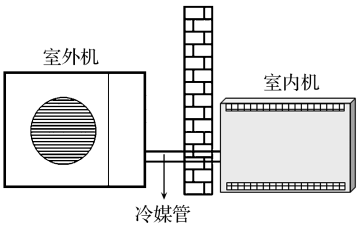

图 6　空气源热泵热风机取暖系统原理图

(6)技术方案六：太阳能集热器+低温空气源热泵热水机耦合系统

采用太阳能真空管加热热水输送至室内循环取暖，不足部分由低温空气源热泵热水机补充，末端可采用散热器或地板辐射供暖，系统工作原理如图 7 所示。由于太阳能的不稳定性且夜间无法使用，空气源热泵热水机需满负荷匹配。

2　研究方法

2.1　调研与实测

本文采用实地调研、现场示范和测试、数值模拟相结合的研究方法，通过将各种技术方案在实际农宅中进行示范和测试，获取真实的农宅基础参数、初始投资和运行数据等，所要对比分析的 6 种技术方案实际示范户的基本情况如下：

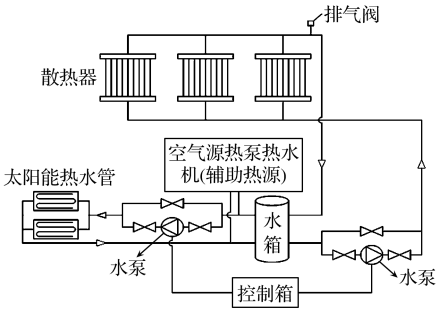

图 7　太阳能热水采暖系统运行原理图

方案 1 示范户位于北京市大兴区农村，北向墙体采用 50mm 挤塑聚苯板保温，外窗采用双层玻璃塑钢窗，取暖热源为 1 台 22kW 燃气壁挂炉，以低温辐射地板作为供暖末端，整个取暖季天然气消耗总量约为 1391m^3(不含炊事与生活热水的燃气消耗)。

方案 2 示范户位于山东省济南市农村，无保温，取暖热源为 1 台 15kW 生物质颗粒燃料取暖炉，以暖气片作为供暖末端，整个取暖季消耗花生壳颗粒燃料 2175kg。

方案 3 示范户位于北京市海淀区农村，取暖热源为蓄热式电暖气，设备总功率为 18kW，农宅除南墙以外的其他外墙都做了 50mm 聚氨酯泡沫板外保温，外窗采用双层玻璃塑钢窗。整个取暖季共耗电 4081.2kWh，其中包含平段用电 2267.8kWh 和谷段用电 1813.4kWh。

方案 4 示范户位于北京市密云区农村，取暖热源为低温空气源热泵热水机，以低温辐射地板作为供暖末端。该建筑为节能 65%的新建小高层居民楼，整个取暖季总电耗为 3700kWh。

方案 5 示范户位于北京市房山区农村，无保温，其主卧和客厅各安装 1 台采用准双级压缩机的壁挂式低温空气源热泵热风机，设备运行期间禁用电辅热功能，整个取暖季总电耗为 747kWh。

方案 6 示范户位于北京市平谷区农村，墙体采用 50mm 挤塑聚苯板保温，外窗采用双层玻璃塑钢窗，取暖系统为太阳能热水集热系统+4kW 直流变频低温空气源热泵热水机(辅助)，室内末端采用低温辐射地板，整个取暖季太阳能热水循环泵耗电约 151kWh，低温空气源热泵热水系统耗电 6104kWh。

上述六种不同取暖方案示范户的运行情况如表 2 所示。

2.2　模拟评价

2.2.1　评价方法

由于农宅取暖的热负荷需求受到室外温度、室内温度、围护结构热性能、室内层高、取暖面积、换气次

数、系统运行时长、农户使用模式等多种因素的影响，在实际中很难找到两个或两个以上在这些方面都具有完全相同条件的农宅，所以无法对多种取暖设备的实际能耗情况进行直接对比，故又进一步采用动态模拟的方法将所有设备折算到典型农宅的统一工况下进行对比分析，具体流程如图 8 所示。首先对典型农宅进行能耗模拟得到基础取暖负荷，然后根据不同类型取暖设备的热效率计算得到运行能耗，由此得到所对应的运行费和污染物排放量；再结合取暖系统的初始投资，可以计算得到系统的费用年值。

表 2　六种技术方案示范户的取暖费用

方案	取暖面积 /m^2	平均室温 /℃	取暖设备能效	运行费用 /(元/a)	单位面积运行费 /(元/m^2·a)
方案 1	118	20	85.2%	4006	34.0
方案 2	119	16.9	81.6%	1196	10.1
方案 3	100	20	99%	1290	12.9
方案 4	90	16	0℃时 COP=2.5；−10℃时 COP=2.0	1806	20.1
方案 5	42	19	−5℃时 COP=3.2；−20℃时 COP=2.0	365.8	8.7
方案 6	228	21	太阳能光热系统热效率约 40%，辅热系统空气源热泵的 COP 与方案 4 类似	3065	13.4

注：1. 运行费不包含循环水泵以及相关控制部件等所消耗的电费，且不考虑政府额外补贴；2. 供暖费用按照能耗量与能源种类价格计算，其中燃气价格为 2.88 元/m^3，电费分为有低谷电价 0.1 元/kWh 和无低谷电价 0.4883 元/kWh，试点测试期的低谷电价时段为 21:00 至次日 06:00；生物质颗粒燃料(花生壳材质)价格为 600 元/t。

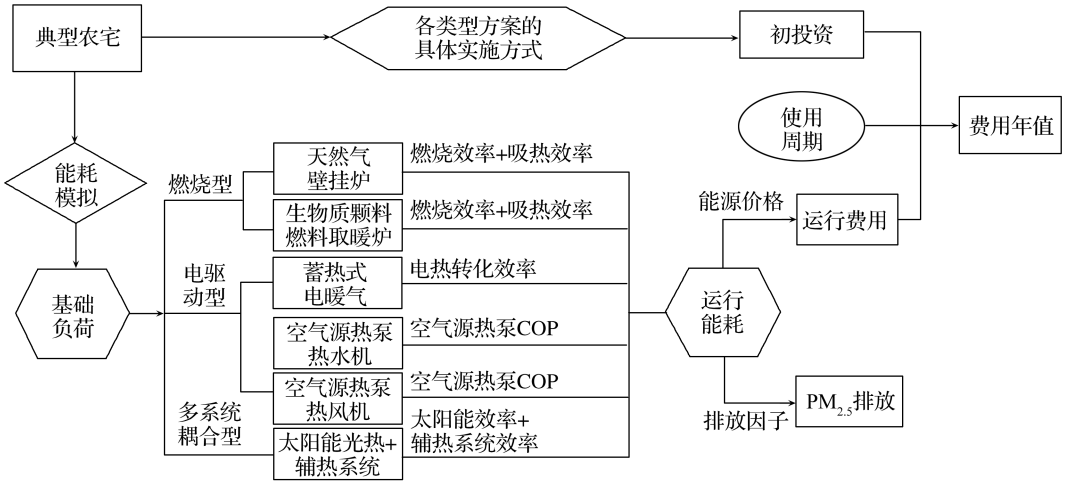

图 8　典型农宅不同取暖方式的评价流程

2.2.2　典型农宅模型

根据笔者团队对京津冀地区所做的大规模调研结果[5]，汇总出的一个典型农宅模型如图 9 所示。由于厨房一般位于配房且不取暖，故未体现在典型农宅平面图中。该典型农宅坐北朝南，每户含 3 间房，客厅位于中间，东、西侧为卧室，取暖总面积为 80m^2，外墙材料为 20mm 水泥砂浆+370mm 实心黏土砖墙，门窗为塑钢材料，屋顶为灰泥坡屋顶。

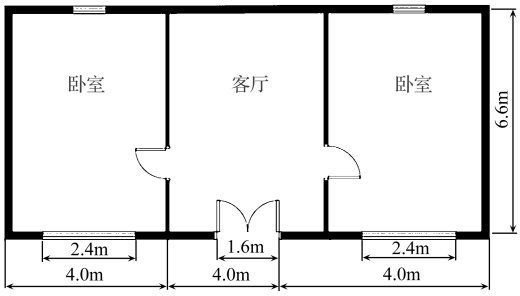

图 9　典型农宅平面图

本文采用 DeST-h 软件进行典型农宅能耗模拟，其基础算法基于清华大学于 20 世纪 80 年代初提出的用于分析建筑热状况的状态空间法[6]。该软件对不同气候区农宅能耗模拟方面的可靠性已在很多研究中得到了验证[7-9]，并于 2019 年 12 月顺利通过了国际权威标准美国暖通空调工程师协会(ASHRAE)140 标准(Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs)的全部案例测试，正式获得国际认证的建筑能耗模拟软件性能标识[10]。基于对多

种农宅围护结构热工性能的现场测试结果，设定围护结构热工模拟参数如表 3 所示。

表 3　典型农宅围护结构热工参数

围护结构	材料及做法	传热系数/(W/(m²·℃))
外墙	20mm 水泥砂浆+370mm 实心黏土砖墙+50mm 聚苯板外保温	0.7
外门	双层玻璃塑钢门	2.5
外窗	双层玻璃塑钢窗	2.7
屋顶	灰泥屋顶+保温层	0.8
换气次数	$0.5\ h^{-1}$	

农宅所处地区为以北京为代表的寒冷地区，取暖时间为 11 月 15 日至来年 3 月 15 日，农宅室内温度设定为全天保持 16℃，最终模拟结果为整个取暖季的平均热负荷为 23.53W/m²，一个取暖季累计耗热量为 6040.4kWh，约合 2.17×10^4MJ。

2.3　费用年值法

在进行不同技术方案的经济性比较时，一般需要考虑设备初始投资和年运行费两部分。初始投资和运行费是两项性质不同的费用，因此不能将两者的费用简单相加来计算技术方案费用。本文采用费用年值法[11] 将参与比较的各个技术方案的初始投资折算成与年运行费相类似的费用，然后再与运行费相加得到费用年值。取暖系统初始投资折算年值(C)为系统中全部取暖(或末端)设备寿命周期内折算年值之和，利用下式计算：

$$C = \sum_{j=1}^{n} \frac{i(1+i)m_j}{(1+i)m_j - 1} K_j + C_0$$

式中，n 为供暖系统中供暖(或末端)设备的数量；i 为基准折现率，$i=(u-f)/(1+f)$，其中 u 为银行 5 年以上利率(对公用设施取投资利息，对住户自购的设备取储蓄利息)，f 为通货膨胀率；m 为供暖(或末端)设备 j 的使用寿命，综合考虑各设备使用寿命情况，本文中 m 取为 10 年；K 为供暖(或末端)设备 j 的初始投资，C 为取暖系统的年运行费。

根据典型农宅的热负荷进行设备选型，设备仅热源部分的初始投资、年运行费用及折算费用年值见表 4。

2.4　主要污染物及碳排放计算

不同取暖方式的污染物及碳排放分本地排放和综合排放，且由于能源输送过程复杂，故本文仅计算取暖运行过程中电能生产间接产生或燃料燃烧直接产生的污染物排放。上述 6 种取暖方式产生的大气污染物 $PM_{2.5}$、SO_2、NOx、CO 和温室气体 CO_2 的排放量通过燃料消耗量和所对应的排放因子进行计算，其中传统散煤炉、天然气壁挂炉和生物质颗粒燃料采暖炉的排放因子以已发表文献中测得的数据为准[12]；电取暖的本地排放为零，其发电排放采用《中国电力行业年度发展报告 2019》[13] 中所提供的电厂侧发电排放因子。表 5 给出了各方案使用不同能源类型时的排放因子。

表 4　六种供暖方案的经济性对比

方案	初始投资/元	系统投资折算年值/(元/m²)	年运行费用/(元/m²)	折算费用年值/(元/m²)
方案 1	17600	17.0	25.3	42.3
方案 2	5500	5.3	12.7	18.0
方案 3	13380	12.9	26.4	39.3
方案 4	16500	15.9	14.9	40.8
方案 5	11000	10.6	12.3	22.9
方案 6	43680	42.1	14.3	56.4

表 5　不同能源所对应的排放因子

取暖方案	平均排放因子				
	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_x	CO	CO_2
传统散煤/(g/kg)	3.73	1.78	2.05	61.05	2497
天然气/(g/m³)	0.30	0.63	1.84	0.01	2184
生物质颗粒燃料/(g/kg)	0.73	0.18	4.01	4.74	0.00
电/(g/kWh)	0.04	0.20	0.19	0.16	841

3　结果对比分析

3.1　经济性

针对上述 80m² 的典型农宅，采用 6 种取暖方案的系统初始投资折算年值、年运行费用与折算费用年值对比如表 4 所示。单纯从经济性分析 6 种方案如下。

(1)天然气壁挂炉除了设备初始投资之外，还需要配套管网及“开口费”(部分地区不收取或部分收取)，且运行费偏高，经济性较差，需要政府长期的运行补贴，故在一般地区不适合大规模推广利用；

(2)生物质颗粒取暖炉的初投资和运行费都较低，折算的费用年值最低，在具有相对丰富的秸秆或树枝等资源的北方地区，可作为农村清洁取暖大规模推广应用的主要技术方案之一；

(3)蓄热式电暖气初始投资较低，运行费用高，年费中等，但需要配备相当高的电容量，即使小规模的推广也需要电力扩容，不宜直接推广，取暖需求较弱地区的用户可根据需求自行购买；

(4)低温空气源热泵热水机初始投资较高，且需要较大的电网容量，但运行费相对较低，可在政府补贴部分初始投资的情况下，在经济条件较好的农户中推广应用；

(5)低温空气源热泵热风机的初始投资和运行费都较低，但需要当地电网有一定的容量，在具有相对丰富电力资源的北方地区，应作为农村清洁取暖大规模推广应用的主要技术方案之一；

(6)太阳能热水系统+热水型低温空气源热泵初投资很高，超出了农户的承受范围，虽然年运行费相对较低，整体费用年值还是最高的。但考虑到太阳能资源的

可再生性及其未来的发展空间，建议作为技术方案储备，在政府补贴下进行试点性应用。

3.2 排放特性

表 6 给出了不同技术方案在一个取暖季的直接和间接排放数据。可以看出，每种热源都会直接或间接地产生一定数量的污染物排放。天然气壁挂炉的排放主要是 NOx 和少量的 $PM_{2.5}$ 和 SO_2；蓄热式电暖器和电驱热泵消耗电能，所耗电能间接产生(发电过程) $PM_{2.5}$、CO_2、SO_2 和 NOx 等排放；生物质颗粒燃料取暖炉直接排放 $PM_{2.5}$、NOx 和微量 SO_2。本研究未测算挥发性有机物(VOCs)的排放。

表 6 不同取暖方案污染物排放情况

取暖方案	能源消耗量	排放量/(kg/年)				
		$PM_{2.5}$	CO	CO_2	SO_2	NO_x
传统散煤土暖气	2892.9kg	9.97	163.11	6671.92	4.76	5.48
方案 1	702.8m^3	0.21	0.01	1534.94	0.44	1.29
方案 2	1847.7kg	1.35	8.76	0.00	0.33	7.41
方案 3	6101.4 kWh	0.24	0.98	5131.28	1.22	1.16
方案 4	3443.6kWh	0.14	0.55	2896.07	0.69	0.65
方案 5	2842.7kWh	0.11	0.45	2390.71	0.57	0.54
方案 6	3317.6kWh	0.13	0.53	2790.10	0.66	0.63

注：方案 4、5、6 为间接排放。

对于大部分地区，可根据当地的总体排放特征和环境容量等特点，综合考虑直接排放和间接排放情况进行对比分析。例如，对于环境质量管理要求较高的重点区域，可适当以本地排放作为衡量和限定标准。

3.3 适宜性分析

3.3.1 农村与城市取暖的差异性

我国农村地区的建筑形式、人口构成以及固有的生活方式、人员活动类型、资源特性、人员经济行为等都决定了农村人口与集中的城市人口不同的建筑使用模式、行为模式、室内热环境和技术适宜性需求。目前北方城市住宅的冬季供暖设计温度是 18 ℃，但大多数居民期望的舒适室温都在 20℃甚至更高，这种温度要求和城镇居民每天进出室内次数少、进出房间的同时需要更换服装是一致的。而农村居民由于生产与生活习惯等原因，人们连续长时间待在同一个房间的概率较低，会频繁进出房间，若每次出入房间都更换衣服将会给农户的生活带来极大的不便。所以，农户的衣着水平应以室外短期活动不会感到冷作为标准。大量调研结果显示[14]，多数北方农民认为冬季室内外温差不能过大，农村居民冬季在室内的衣装量大于城市居民冬季在室内的衣装量，起居室和卧室平均温度比城市的低 4℃ ~ 6℃，而且允许昼夜的室内温度有较大波动：夜间睡眠时维持在约 10℃即可，日间静坐时约 16℃。农村用户在建筑物的使用上也并非所有房间均有取暖需求，体现出与取暖方式相匹配的较为节俭的功能空间使用模式。例如冬季将活动空间集中在一到两个房间来合并房间功能，使客厅兼具餐厅功能、卧室兼具客厅功能等，以便更加有利于节能。因此，农村清洁取暖技术能否在保证效率高、经济性好、污染排放低等性能的基本前提下，更好地满足上述“部分空间、部分时间”的使用需求，将是决定其能否在农村地区实现大规模应用的关键。

3.3.2 不同技术方案适宜性分析

低温空气源热泵热风机设备自身即是取暖系统，可以迅速提高房间气温，直接加热房间空气，不需要加装散热器、地暖等末端设施而使室温升高，不会出现热水热泵取暖工程中的跑冒滴漏等问题，且户内多台热泵热风机均可按单间独立控制、独立运行，更加适用于非连续取暖场合；即时启停的特性更容易匹配农户部分空间和部分时间的使用需求，可凸显行为节能的优势，在节能和减排方面具有很大潜力；而且通过室内末端落地化和上下出热口的气流组织优化设计，可以为农户提供类似地板采暖的舒适性和风机盘管的快速升温性。

生物质颗粒取暖炉在将生物质尤其是秸秆、树枝等作为燃料消纳的同时，一方面可以取代散煤，另一方面可以进一步减少秸秆、树枝野外堆存占地、焚烧所带来的大量污染，而且生物质能还可以解决取暖之外的炊事与生活热水需求，符合农户的传统使用习惯，适合农林生物质资源丰富的大部分地区规模化应用。

燃气壁挂炉可满足取暖、炊事以及生活用热水需求且操作简单，但由于大部分农村区域用户分散、距离气源远且用量有限，同时存在较多的安全隐患，其适用于气源充足、用户相对集中的城市近郊地区整村推进。

蓄热式电暖气适合于电力特别充裕、有明显峰谷电价且实际取暖时间偏短的用户。

空气源热泵热水机组适用于当地电力资源充裕稳定且经济实力雄厚的地区，如北京市由于财政补贴力度大，且进行了整体的电网升级和农宅围护结构保温改造，因此主要以空气源热泵热水机组为主且取暖效果良好。

太阳能光热+空气源热泵辅助系统适合在太阳能资

源丰富、太阳能取暖保证率较高的地区应用。

4 结论及建议

利用现场实测和数值模拟等方法，对北方地区常见的6种农村清洁取暖技术方案的经济性、减排性和适宜性等进行了深入分析，得出如下结论：

(1)不同清洁取暖方案在经济性方面差别较大。综合考量初始投资和运行费用的费用年值法评估结果，生物质颗粒取暖炉及低温空气源热泵热风机在经济性上具有明显优势；再综合考虑两者在农村地区的适宜性，在北方农村地区有较为广泛的适用性和可持续性。

(2)低温空气源热泵热水机初始投资较高，且需要较大的电网容量，但运行费相对较低。在政府补贴部分初始投资的情况下，适合在经济条件较好的农户中推广应用。

(3)天然气壁挂炉除了设备初始投资之外，还需要配套管网及“开口费”，且运行费用偏高，经济性较差，需要政府长期的运行补贴，适用于气源充足且经济条件好的相对集中居住的城市近郊地区。

(4)蓄电式电暖气对电力要求高，运行经济性差，且储热调节能力弱，在局部电力充足且价格较低的地区，或少量非长期取暖的用户可以使用，不宜大面积使用。

(5)太阳能热水系统+热水型低温空气源热泵初期投资很高，超出了农户的承受范围，虽然年运行费相对较低，整体费用年均额还是最高的，但考虑到太阳能资源的可再生性以及其未来的发展空间，现阶段建议作为技术方案储备，在政府补贴下进行试点性应用。

综上所述，农村清洁取暖技术路径的制定、节能技术的开发及室内热环境的改善不能沿袭“城镇路线”，需要另辟蹊径，在充分考虑地区发展水平、空气质量要求、群众取暖需求、能源供应条件和潜力等基础上走出一条符合我国农村实际的可持续发展之路。

参考文献：

[1] 中国政府网. 中央财经领导小组第十四次会议召开［EB/OL］(2016-12-21)［2018-01-22］. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/21/content_5151201.htm.

[2] 财政部. 关于开展中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点工作的通知(财建〔2017〕238号)［EB/OL］(2017-05-20). http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/20/content_5195490.htm.

[3] 国家发改委. 关于印发北方地区冬季清洁取暖规划的通知发改能源〔2017〕2100号［EB/OL］(2017-20-21). http://www.nea.gov.cn/2017-12/27/c_136854721.htm.

[4] 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(2020)［M］. 北京：中国建筑工业出版社，2020.

[5] 章永洁，蒋建云，叶建东，等. 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，2014，35(7)：39-43.

[6] YAN D，XIA J，TANG W，et al. DeST-An Integrated building simulation Toolkit Part I：Fundamentals. Building Simulation，2008(1)：95-110.

[7] 黄莺，王昭俊. 基于DeST对夏热冬冷地区农宅能耗的分析［J］. 建筑技术开发，2016，43(6)：85-87.

[8] 王建华，黄跃昊. 甘肃平凉地区农宅能耗及基础室温［J］. 建筑技术，2016，47(7)：619-622.

[9] 明星. 基于DeST-h的北方寒冷地区农宅节能改造设计与研究［J］. 节能，2019(12)：10-12.

[10] 清华大学建筑节能研究中心. 我国完全自主知识产权的建筑性能模拟分析平台DeST顺利通过国际权威标准ASHRAE 140认证［EB/OL］(2019-12-26). http://www.chinahvac.com.cn/Article/Index/5884.

[11] 张治江，陶进，石久胜，等. 几种能源供暖方式的技术经济比较［J］. 暖通空调，2004(1)：8-10，18.

[12] 陈国伟，单明，李佳蓉，等. 北京农村地区燃煤污染物的排放测试［J］. 环境工程学报，2018，12(2)：597-603.

[13] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2019［M］. 北京：中国建材工业出版社，2019.

[14] 黄莉，朱颖心，欧阳沁，等. 北京地区农宅供暖季室内热舒适研究［J］. 暖通空调，2011，41(6)：83-85，115.

Comparison of economic and emission performances of different technologies from coal to clean energy in northern rural China

SHAN Ming[1]，LIU Yanqing[1]，MA Rongjiang[1]，DENG Mengsi[1]，DING Xingli[1]，YANG Xudong[1]，ZHANG Yongjie[2]，YE Jiandong[2]

(1. School of Architecture，Tsinghua University，Beijing 100084，China；
2. Beijing Association of Sustainable Development，Beijing 100084，China)

Abstract：In recent years，the work of coal to clean energy in northern rural China has made significant progress，but there are many different kinds of technology adopted by different regions，and the effects also differ largely. It is significant to summary and to evaluate different technical solutions timely for choosing the scientific and reasonable clean heating path and ensuring the coal to clean energy work smoothly in different regions. This paper combined the ways of field survey，measurement and simulation to deeply analyze the economy efficiency and emission performance of six typical rural heating systems，including the wall-mounted gas furnace，biomass pellet heating stove，low temperature air-to-water heat pump，low temperature air-to-air heat pump，and the coupled system of solar collector+low temperature air-to-water heat pump. In general，biomass pellet heating stove and low temperature air-to-air heat pump have obvious advantages in economy and are more suitable for rural living mode. The development of energy-saving technology and the improvement of indoor thermal environment in rural areas also need to comprehensively consider the basis of region's development level，the air quality requirements，the residents' demands for heating，and the energy supply conditions and potential towards a sustainable roadmap in line with China's rural reality.

Keywords：rural residential building；clean heating；coal to clean energy；economic performance；pollutant emission