

山西省典型地区农村可再生能源发展策略及中部城市群散煤清零技术方案研究
Research on the development strategy of rural renewable energy in typical areas of Shanxi Province and the technical plan of loose coal zeroing in central urban agglomeration

清华大学

2023.09.01

Tsinghua University

关于作者

杨旭东，清华大学建筑学院副院长、教授 xyang@tsinghua.edu.cn

荣 杏，清华大学建筑学院科研助理 rongxing27@tsinghua.edu.cn

何 馨，清华大学硕士研究生 hxin2327@163.com

ABOUT THE AUTHORS

Xudong Yang, Professor, Tsinghua University, xyang@tsinghua.edu.cn

Xing Rong, Assistant researcher, Tsinghua University, rongxing27@tsinghua.edu.cn

Xin He, Graduate Student, Tsinghua University, hxin2327@163.com

致谢

本研究由清华大学统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

本研究是能源基金环境管理项目组下的课题。

在本项目研究过程中，研究团队得到了山西省生态环境厅、临汾市住房和城乡建设局、临汾市生态环境局、临汾市发展与改革委员会、临汾市能源局的大力支持，在此向他们表示诚挚感谢。

研究团队同时感谢以下专家在项目研究过程中作出的贡献：

段洁仪 北京北控能源投资有限公司

李景明 农业农村部农业生态与资源保护总站/中国沼气协会

刘 荣 中国城镇供热协会

宋 波 中国建筑科学研究院有限公司

宋玲玲 生态环境部环境规划院

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Tsinghua University and is funded by Energy Foundation China.

This report is part of the research project under Energy Foundation China's Environment Management Program

The team is grateful for the generous support it received throughout this research from Shanxi Ecological Environment Department, Linfen Housing and Urban-Rural Construction Bureau, Linfen Ecological Environment Bureau, Linfen Development and Reform Commission, Linfen Energy Bureau.

The team would like to thank the following experts for their contribution to this research:

| | |
|---------------|---|
| Jieyi Duan | Beijing Beikong Energy Investment Co., Ltd. |
| Jinming Li | Rural Energy Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ China Biogas Society |
| Rong Liu | China District Heating Association |
| Bo Song | China Academy of Building Research |
| Lingling Song | Chinese Academy of Environmental Planning |

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

目录

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1 项目背景 | 1 |
| 1.1 项目研究背景及目标 | 1 |
| 1.2 研究方法及技术路径 | 2 |
| 1.2.1 文献与实地调研 | 2 |
| 1.2.2 实测与情景模拟研究 | 2 |
| 1.2.3 研究技术路径 | 2 |
| 2 中部城市群散煤清零实施进展 | 3 |
| 2.1 中部城市群散煤清零所选用的技术路径 | 3 |
| 2.2 中部城市群散煤清零推进情况 | 4 |
| 3 典型地区散煤清零方案评估 | 5 |
| 3.1 平遥县典型散煤清零方案 | 5 |
| 3.1.1 平遥县农村地区清洁取暖现状 | 5 |
| 3.1.2 平遥县典型农宅现状 | 6 |
| 3.2 2022 年平遥县散煤清零实施进展 | 7 |
| 3.2.1 散煤清零计划总体目标 | 7 |
| 3.2.2 散煤清零实施情况 | 8 |
| 3.3 散煤清零典型项目评估 | 8 |
| 3.3.1 平遥煤化集团余热集中供热项目 | 8 |
| 3.3.2 平遥双志能源科技股份有限公司空气源热力站供热项目 | 11 |
| 3.3.3 典型散煤清零技术方案对比 | 12 |
| 4 中部城市群散煤清零方案遴选 | 13 |
| 4.1 农房围护结构节能改造技术遴选 | 13 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 4.1.1 农房围护结构热性能改善的重要性 | 13 |
| 4.1.2 农房围护结构节能改造技术 | 14 |
| 4.1.3 农房围护结构节能改造综合方案对比 | 18 |
| 4.2 散煤治理技术遴选 | 21 |
| 4.2.1 农村地区散煤治理技术方案遴选边界确定 | 21 |
| 4.2.2 农房散煤治理评价分项指标 | 22 |
| 4.2.3 农村地区散煤治理技术简介 | 31 |
| 4.3 散煤治理技术综合方案对比结果 | 38 |
| 4.3.1 情景分析 | 38 |
| 4.3.2 计算条件 | 39 |
| 4.3.3 实施条件要求与满足方法 | 41 |
| 4.3.4 结果分析 | 42 |
| 4.3.5 小结 | 48 |
| 4.4 中部城市群农村散煤清零可持续发展模式 | 49 |
| 4.4.1 中部城市群散煤清零实施存在的问题 | 49 |
| 4.4.2 分散式替代散煤清零模式 | 51 |
| 4.4.3 可再生能源替代下的散煤治理模式 | 52 |
| 5 临汾市社会经济与能源资源现状 | 53 |
| 5.1 临汾市社会经济发展现状 | 54 |
| 5.2 临汾市能源生产消费现状 | 55 |
| 5.2.1 临汾市能源生产现状 | 55 |
| 5.2.2 临汾市能源消费现状 | 56 |
| 5.3 临汾市可再生能源开发利用现状 | 56 |

| | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 5.3.1 可再生能源资源现状 | 57 |
| 5.3.2 可再生能源开发利用现状 | 61 |
| 5.4 临汾市清洁取暖现状 | 63 |
| 5.4.1 临汾市清洁取暖实施现状 | Error! Bookmark not defined. |
| 5.4.2 临汾市清洁取暖改造技术路径建议 | Error! Bookmark not defined. |
| 6 临汾市能源转型可持续发展路径 | 65 |
| 6.1 临汾市能源转型面临的挑战 | 65 |
| 6.2 临汾市能源转型基础依据 | 66 |
| 6.3 临汾市能源转型的发展路径 | 68 |
| 6.3.1 临汾市能源转型发展对策 | 68 |
| 6.3.2 临汾市能源转型的路径选择 | 70 |
| 6.4 可再生能源对临汾市低碳目标贡献预测 | 77 |
| 6.5 临汾市能源转型重点工程 | 78 |
| 6.5.1 建设智能充电桩网络，实现汽车全面电气化 | 78 |
| 6.5.2 开发城乡屋顶光伏，部分建筑推动“光储直柔”技术..... | 80 |
| 6.5.3 全面开发生物质资源，构建一体化可再生能源系统 | 80 |
| 6.5.4 农村住宅光伏电力清洁取暖 | 82 |
| 6.5.5 农机具电气化 | 82 |
| 6.5.6 促进煤焦产业链精细化，推动工业生产的全面电气化 | 83 |
| 7 总结与建议 | 83 |
| 7.1 总结 | 83 |
| 7.1.1 中部城市群散煤清零 | 83 |

| | |
|------------------------|----|
| 7.1.2 临汾市可再生能源发展 | 84 |
| 7.2 建议 | 85 |
| 7.2.1 中部城市群散煤清零 | 85 |
| 7.2.2 临汾市可再生能源发展 | 86 |

1 项目背景

1.1 项目研究背景及目标

农村能源革命是中国碳达峰碳中和战略的必要组成部分，也是全面推进乡村振兴战略的必然要求。实施清洁取暖工程、加速散煤淘汰是农村能源生产和消费、农村生产生活方式革命的重要内容，是推进减污降碳提升空气质量的重点突破口。

在国家清洁取暖行动的整体布局下，我国民用散煤治理工作正在快速推进。2017-2021 年期间，京津冀大气污染通道重点区域及其他区域共有 63 个城市经过竞争进入中央财政支持的冬季清洁取暖行动计划。截止 2021 年底，清洁取暖城市累计完成散煤治理约 3500 万户左右，理论减少散煤约 6200 万吨。其中京津冀及周边地区、汾渭平原清洁取暖率达 80%以上，北京和天津平原地区基本实现了无煤化。上述工作对京津冀地区大气环境改善起到了明显的效果。

山西省 11 个地级市全部入选北方地区清洁取暖改造试点城市，经过 5 年的努力，山西省为持续改善空气质量提供了有力支撑。山西省清洁取暖领导小组办公室指出：2022 年全省清洁取暖工作的总体思路是“夯实前期工作基础、巩固提升改造成果、优化补齐短板弱项、完成既定目标任务、努力逐步实现平原地区冬季取暖散煤基本清零和可持续稳定运营”。农村地区是清洁取暖改造工程的“短板”和“弱项”。农村清洁取暖技术路径以“煤改气”为主，部分地区采用“煤改电”、“煤改型煤”替代方式。农宅建筑节能改造未同步开展，农村丰富的生物质、太阳能等可再生能源的开发利用极少，仅有少量示范项目。

2022 年 4 月 8 日，山西省生态环境厅发布《关于组织申报山西中部城市群清洁取暖散煤清零项目的通知》，在前述工作基础上，重点针对一些尚未推进散煤替代及清洁取暖改造的村庄实现散煤清零，改善区域环境空气质量，助力区域全方位高质量发展。2022 年拟在太原、晋中、吕梁 3 市实施约 50 万户清洁取暖改造。目前绝大多数城市实施了以集中供热为主的技术方案，该方案与分散式方案相比存在哪些优缺点，急需进行方案对比和论证分析。

临汾市是全国重要的老工业基地之一、山西省能源原材料大省的缩影以及中西部资源型城市的典型代表，能源的生产和消费均是“一煤独大”的局面，造成了严重的环境污染和生态问题。“十三五”期间，临汾市在推动能源改革方面已

经取得了一定成果，新能源产业发展正在进入新的阶段，面对国家“碳达峰、碳中和”的战略目标，持续改善能源供给和消费结构、实施能源消费总量和强度“双控行动”是临汾市能源转型的重点和难点。因此亟需探索一条可持续发展的能源转型之路，助力临汾市能源产供用体系转型和产业升级，推动城乡协同发展，逐步满足临汾市人民对美好生活的向往和追求。

针对上述背景，本项目的研究目标分为两个方面：一是以“四一”模式为导向，对中部城市群典型技术方案进行对比和科学的论证，给出结果和建议；二是结合临汾市可再生能源的资源现状，探索以可再生能源开发为主体农村低碳清洁能源体系。

1.2 研究方法及技术路径

1.2.1 文献与实地调研

本项目采用文献调研、实地调研、模拟相结合的方法进行。首先通过对政府部门、企业及行业、媒体、民众等不同主导或参与方的发布相关政策、技术文件、意见建议等进行收集和整理，获取山西省典型地区和中部城市群散煤治理的政策、能源转型政策、技术方案等。其次通过政府座谈了解中部城市群散煤清零和典型地区能源转型工作总体进展、实施的效果和推进过程中的问题。同时选取典型村落进行入户调研，了解农村建筑特性、用能特性、资源状况、相关技术应用效果与问题等基层现状。

1.2.2 实测与情景模拟研究

根据调研数据，总结和梳理了临汾市能源生产和消费现状以及可再生能源资源量分布。通过入户调研和文献搜集，提炼了中部城市群典型户型，对不同类型的典型户进行室温、取暖能耗实测和模拟分析；分析不同供热方式下农房围护结构节能技术实际效果、存在的问题等；探索农房围护结构合理的保温方式、清洁供热方式、能源消耗、室内热舒适度、经济性等之间的关系；对未来不同农房维护结构技术推广下的经济、环境、能源等影响进行情景模拟分析；总结出符合典型农村地区的菜单式散煤治理技术综合方案。

1.2.3 研究技术路径

本课题研究技术路线如图 1-1 所示。首先，通过广泛深入的调研研究中部城市群农村住宅特性和实际供热需求特征，以农房基本特点和用户使用需求为出发点，结合用户侧能效提升和热源侧清洁供能两方面，对典型散煤治理技术方案进行综合评价分析。在上述基础上，提出不同使用模式下的农房围护结构保温基本原则和清洁供热设备选用原则，形成山西省中部城市群农村地区“菜单式”散煤治理综合技术方案，并提出建议。其次，梳理目前临汾市经济发展、能源生产消费农村地区清洁取暖现状、可再生能源开发和利用现状，并对相关工作实施效果、存在的主要问题进行分析，提出临汾市能源转型可持续发展建议。

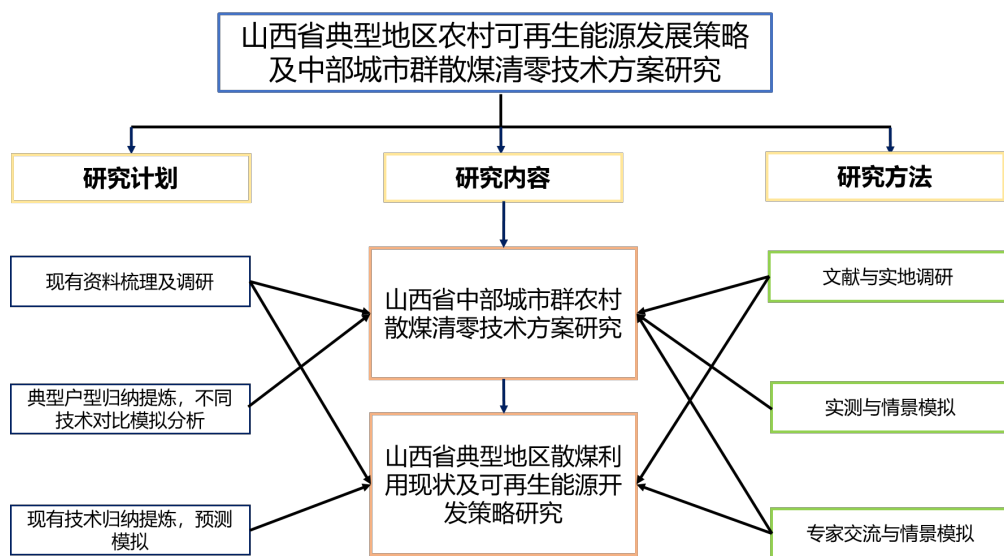


图 1-1 研究技术路线

2 中部城市群散煤清零项目实施进展

2022 年山西省整合省级生态环境专项资金 10 亿元，作为散煤问题突出的重点县（市、区）散煤清零项目的启动资金，推动实施山西中部城市群清洁取暖散煤清零项目，主要聚焦太原、晋中、吕梁三市散煤污染问题突出的重点县（市、区）海拔 900 米以下区域，并通过竞争性评审方式通过太原市尖草坪区、阳曲县、清徐县，晋中市榆次区、太谷区、祁县、平遥县、介休市、灵石县、寿阳县，吕梁市交城县、文水县、汾阳市、孝义市 14 区县散煤清零实施方案。

2.1 中部城市群散煤清零所选用的技术路径

通过前期调研和相关资料的整理，中部城市群散煤清零项目以集中供热为主，

分散式供热为辅，如图 2-1 所示，热电联产、工业余热集中供热、分布式锅炉供热等集中供热改造方式占比约 82%，对于集中供热管网覆盖不到的区域，采用分散式“煤改电”形式，占比约 18%，技术路径采用分散式热风型热泵、分散式热水型热泵供热形式。生物质、太阳能等可再生能源利用未纳入实施范围。

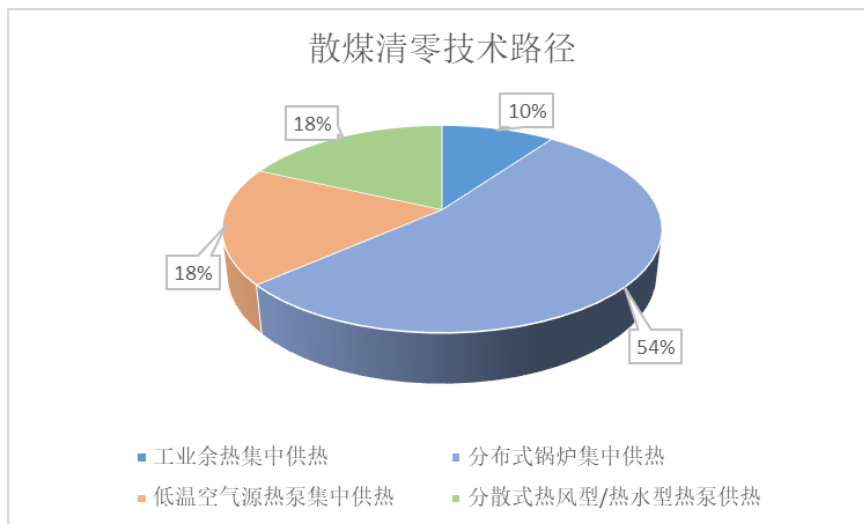


图 2-1 中部城市群散煤清零技术路径



图 2-2 中部城市群散煤清零工程施工现场图

2.2 中部城市群散煤清零推进情况

基于前期清洁取暖推行的基础，截止到 2022 年底，中部城市群行政区域内海拔 900 米以下总户数约 146 万户，已经实现清洁取暖户数约 118 万户，占比约 81%。2022 年散煤清零工程计划改造约 53 万户，累计完成改造户数约 12 万户，完成率仅 22.37%。

表 2-1 中部城市群散煤清零实施情况

| 序号 | 地市 | 目标 | 完成情况 |
|----|----|----|------|
| | | | |

| | | 县 (市、 区) | 总投资 (万元) | 改造总 户数 | 截至 2022 年底已完 成投资 | 完成投资 率 | 截至 2022 年 底已完成 户数 | 完成户 数率 |
|----|-----|----------------|-------------|-----------|------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| 1 | 吕梁市 | 汾阳市 | 195600 | 89552 | 78728 | 40.25% | 9728 | 10.86% |
| 2 | 吕梁市 | 交城县 | 136370.8 | 45086 | 32738 | 24.01% | 11026 | 24.46% |
| 3 | 吕梁市 | 文水县 | 109906.9 | 39389 | 0 | 0.00% | 5439 | 13.81% |
| 4 | 吕梁市 | 孝义市 | 119545.9 | 37964 | 24398.91 | 20.41% | 6881 | 18.13% |
| 5 | 晋中市 | 介休市 | 127900 | 50096 | 83600 | 65.36% | 31662 | 63.20% |
| 6 | 晋中市 | 灵石县 | 96140 | 26540 | 27794.19 | 28.91% | 9886 | 37.25% |
| 7 | 晋中市 | 平遥县 | 247717.9 | 87522 | 74100.95 | 29.91% | 14582 | 16.66% |
| 8 | 晋中市 | 祁县 | 103461.1 | 40600 | 2750 | 2.66% | 10328 | 25.44% |
| 9 | 晋中市 | 寿阳县 | 13.238 | 37011 | 0.27 | 2.04% | 1064 | 2.87% |
| 10 | 晋中市 | 太谷区 | 239352.7 | 55259 | 59501.24 | 24.86% | 11733 | 21.23% |
| 11 | 晋中市 | 榆次区 | 91000 | 27496 | 18400 | 20.22% | 7694 | 27.98% |
| 合计 | | | 1467009 | 536515 | 402011.56 | 27.40% | 120023 | 22.37% |

3 中部城市群典型地区散煤清零方案评估

中部城市群各区县农村经济差异较大，经济条件对生活方式有很大的影响。本项目调查研究范围关注山西省农村地区平均经济水平、人口相对集中地区为主。根据上述原则，项目组选取了平遥县 4 个典型村落进行了详细调研，获取每户的建筑围护结构、用能负荷特性、经济水平、用户用能习惯、建筑空间利用率等信息。

3.1 平遥县典型散煤清零方案

截止到 2021 年 12 月，平遥县清洁取暖率为 61.2%，县城区基本全部实现清洁取暖，农村地区清洁取暖率为仅为 43.5%。未清洁取暖的建筑面积为 1042.70 万 m²，户数为 87522 户，绝大部分在农村地区。本次散煤清零项目主要针对农村地区，因此本节重点分析平遥县农村地区的散煤清零方案。

3.1.1 平遥县农村地区清洁取暖现状

平遥县农村地区总建筑面积为 1820.09 万 m²，总户数为 149364 户。已实施清洁取暖的建筑面积为 792.43 万 m²，户数为 63908 户，清洁取暖率为 43.54%。未清洁取暖的建筑面积为 1027.65 万 m²，户数为 85456 户。清洁取暖改造主要采

用集中供热、“煤改电”、“煤改气”的形式，部分采用生物质锅炉、甲醇锅炉的技术方案。其中，采用集中供热的建筑面积为 616.85 万 m²，户数为 50093 户；采用“煤改电”取暖的建筑面积为 64.59 万 m²，户数为 4299 户；采用“煤改气”取暖的建筑面积为 93.22 万 m²，户数为 8370 户；采用生物质锅炉取暖的建筑面积为 5.5 万 m²，户数为 1812 户；采用甲醇锅炉取暖的建筑面积为 12.27 万 m²，户数为 1128 户。

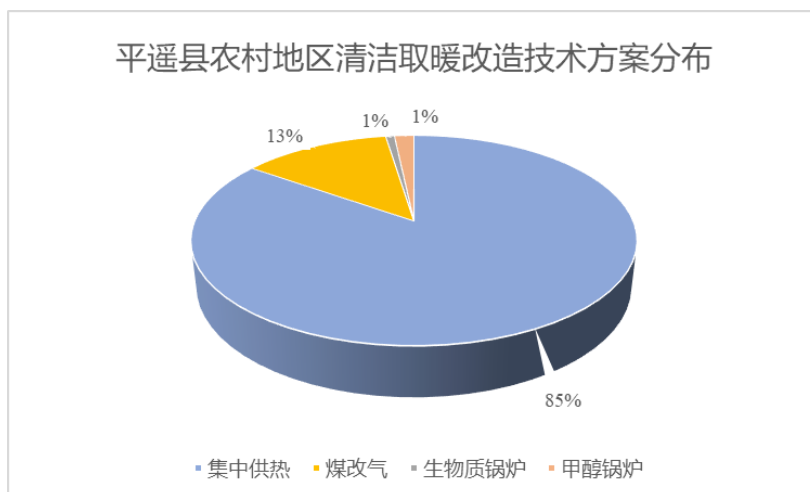


图 3-1 平遥县农村地区清洁取暖改造技术方案

3.1.2 平遥县典型农宅现状

项目组选取了工业余热和空气源热泵集中供热为主的平遥县北羌村、落邑村、马壁村、西达蒲村 4 个典型村落进行了详细调研。总结了这 4 个村农房特点、采暖习惯等。

平遥县农房主要以砖混结构的平顶平房为主，大部分房屋为 2018 年以后翻新或新建，极个别上世纪老房子，房屋建筑面积 80~240 平方米，3~8 间房。房屋结构绝大部分均为砖混结构，如图 3-2 所示。90%以上墙体材料为 37cm 实心砖，少量为 50cm 土坯墙。65%以上门、窗户为断桥铝或铝合金单玻，不到 2%的房屋设有阳光房，层高较高在 3.5~3.8m 之间，部分做了吊顶，农房外墙无保温，保温性能差。

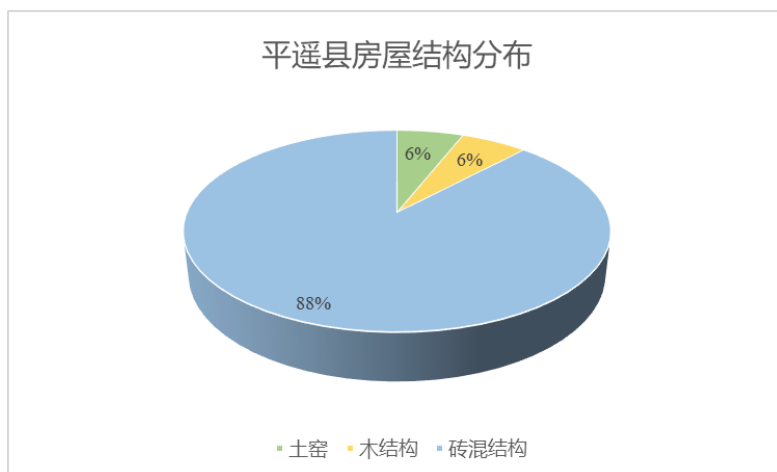


图 3-2 平遥县房屋结构分布

冬季常住人口较多为 3~4 人，约 70% 的农房采暖房间数为 1~3 间，采暖面积 30 m²~60 m²，如图 3-3 所示。未改造前均以传统燃煤炉取暖，采暖季煤耗约 3~4 吨，采暖成本较高。

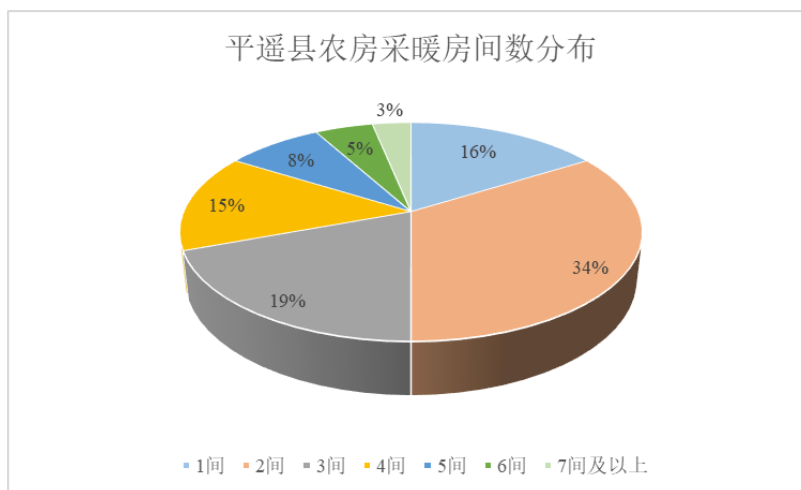


图 3-3 平遥县农房采暖房间数比例分布

3.2 2022 年平遥县散煤清零实施进展

3.2.1 散煤清零计划总体目标

2022 年采暖季前完成清洁取暖改造，实现行政区域内散煤全部清零。2022 年拟完成清洁取暖改造总户数 87522 户，拟完成取暖总面积 1042.70 万 m²。其中，集中供热改造户数 35209 户，取暖面积 399.99 万 m²；“煤改电”改造户数 52313 户，取暖面积 642.71 万 m²。

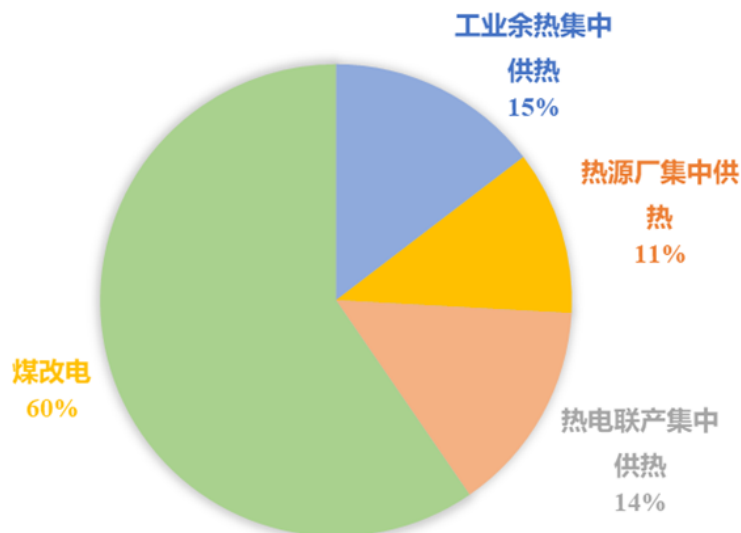


图 3-4 2022 年平遥县散煤清零实施路径分布

3.2.2 散煤清零实施情况

平遥县 2022 年散煤清零技术基本为集中供热，主要有三种热源：平遥煤化集团工业余热、区域燃煤锅炉房、空气源热泵机组。改造共完成 14582 户、167.49 万 m^2 ，其中工业余热集中供热完成户 5110 户，共计 55.5 万 m^2 ；区域锅炉房集中供热 7664 户，83.3 万 m^2 ；集中型空气源热力站完成 1808 户，28.67 万 m^2 。完成目标任务的约 16%。

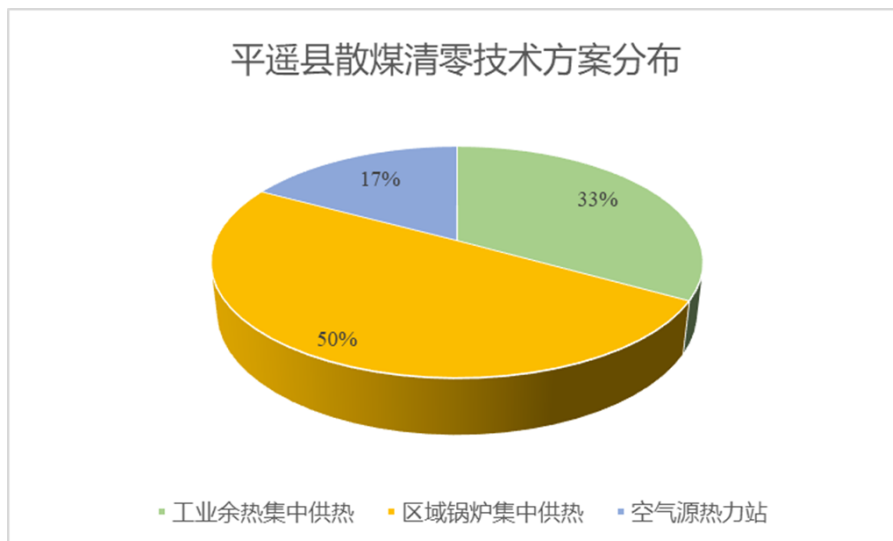


图 3-5 平遥县散煤清零实施方案分布

3.3 散煤清零典型项目评估

3.3.1 平遥县余热集中供热项目

3.3.1.1 项目基本情况

该项目总投资 6700 万元，政府补贴 3479 万元，户均初投资 3.5 万元，供周边 14 个村，20 万 m^2 采暖面积，热源距离村镇的距离如图 3-6 所示。建设初期对农户收取初装费每户 4000~5000 元（农户承担二网建设费 50 元/ m^2 ）。供暖期初寒末期热源为炼焦副产品——焦炉煤气锅炉 4×3MW，抽凝机组，发电余热。严寒期投入使用 100t 循环流化床燃煤锅炉。施工过程图如图 3-7 所示。

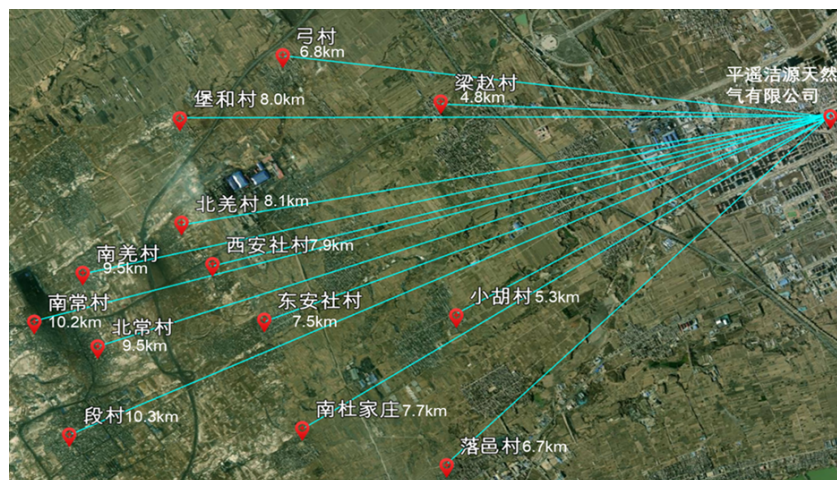


图 3-6 热源离村落的距离

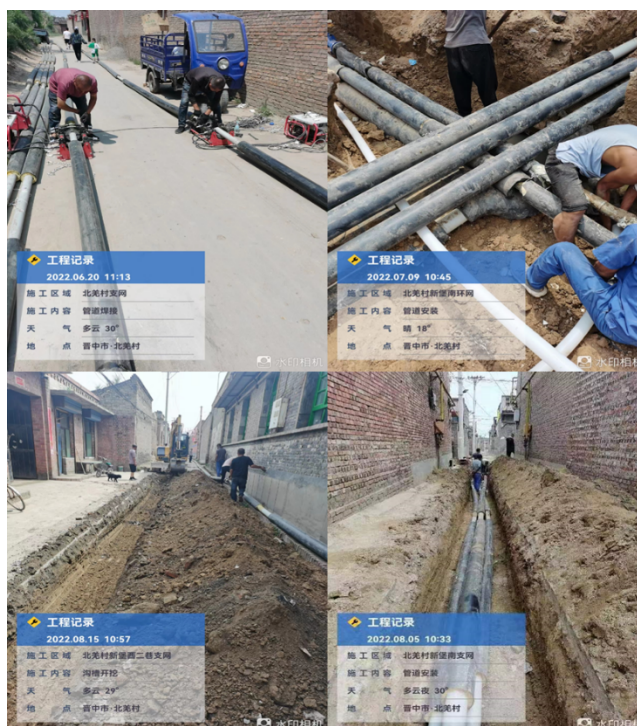


图 3-7 煤化集团部分施工图

项目 2022 年-2023 年采暖期收费率 85%，供暖成本 36 元/ m^2 ，供暖期 5 个月，收取农户 21 元/ m^2 ，实行先缴费后供暖的收费制度。

3.3.1.2 项目效果评估

(1) 典型村落基本情况

项目选取了平遥县北羌村进行了入户调研。北羌村位于晋中市平遥县段村镇，总人口数 1030 人，总户数 343 户，常住人口 862 人，常住户 287 户。居住建筑较为集中，与周边村落距离均在 1~2 公里。常住人口以老人和小孩为主，户均常住人口 3~4 人，经济收入以养殖、劳务收入为主。全村有耕地 962 亩，采暖期 5 个月。

(2) 典型村落农宅基本情况

北羌村农房主要以二层楼房为主，户均建筑面积约 80-230m²，60%以上农房为 2018 年后翻建，室内环境整洁。农房结构形式主要为砖混和砖木结构。墙体大部分为实心砖墙，厚度约 37cm，石头墙、土坯墙等其他材料的墙体很少，房屋的墙体无保温措施。85%以上的窗户为单层断桥铝窗，窗墙比较大，如图 3-8 (b) 所示)。窗户形式以推拉窗为主，密闭性较差。

冬季常用卧室间数平均为 2~3 间，其他房间作为储藏室或者客人偶尔居住，实际采暖面积约 80 m²。



(a) 农房全景

(b) 断桥铝门窗

图 3-8 北羌村典型农房

(3) 实施效果

1) 农户反馈:

①采暖费相较于烧煤降低，户均采暖费 2000 元左右（本地煤价 1600 元/吨，未改造前，户均煤耗 2~3 吨）；

②室内温度高：室内平均温度 22~26℃；

③室内环境得到了较大的改造，室内无异味，且舒适度高。

2) 实施企业:

①初投资较高，政府建设补贴拖欠严重；

- ② 供热成本高，收费率无法得到保证，政府运行补贴拖欠，完全无法回收成本。

3.3.2 平遥县空气源热力站供热项目

3.3.2.1 项目基本情况

该项目总投资 21000 万元，政府补贴 6845 万元，户均初投资 4 万元，供周边 10 个村，80~90 万 m^2 采暖面积，两村或一村建设一个热力站，为避免噪音和辐射问题，热泵机组位置建设靠近学校或村委会等公建。每个基站配备多台热泵机组+小型变电站，如图 3-9 所示。建设初期对农户收取初装费每户 4000~5000 元（农户承担二网建设费 50 元/ m^2 ）。



图 3-9 热力站

项目 2022 年-2023 年采暖期收费率 65%，供暖成本 65 元/ m^2 ，供暖期 5 个月，收取农户 21 元/ m^2 ，实行先缴费后供暖的收费制度。

3.3.2.2 项目效果评估

(1) 典型村落基本情况

项目选取了平遥县西达蒲村进行了入户调研。西达蒲村位于晋中市平遥县中都乡，总人口数 1562 人，总户数 513 户，常住人口 948 人，常住户 312 户。居住建筑较为集中，与周边村落距离均在 1~2 公里，距离平遥古镇约 3 公里。户均常住人口 3~4 人，经济收入以种植、劳务收入为主。全村有耕地 2876 亩，采暖期 5 个月。

(2) 典型村落农宅基本情况

西达蒲村农房主要以一层平房为主，户均建筑面积约 60-150 m^2 。农房结构形式主要为砖混和砖木结构。墙体大部分为实心砖墙，厚度约 37cm，石头墙、

土坯墙等其他材料的墙体很少，房屋的墙体无保温措施。65%以上的窗户为单层铝合金窗，窗墙比较大，如图 3-10 所示。窗户形式以推拉窗为主，密闭性较差。

冬季常用卧室间数平均为 2~3 间，其他房间作为储藏室或者客人偶尔居住，实际采暖面积约 40~80 m²。



图 3-10 西达蒲村典型农房

(3) 实施效果

1) 农户反馈:

①采暖费相较于烧煤降低，户均采暖费 2000 元左右（本地煤价 1600 元/吨，未改造前，户均煤耗 2~3 吨）；

②室内温度较低：室内平均温度 16~18℃；

③室内环境得到了较大的改造，室内无异味。

2) 实施企业:

①初投资较高，政府建设补贴拖欠严重；

②供热成本高，收费率较低，政府运行补贴拖欠，完全无法回收成本。

3.3.3 典型散煤清零技术方案对比

以前述北羌村典型户型为基础，基于项目组前期对平遥县清洁取暖改造效果调研，同时结合平遥县散煤清零典型项目，对比了平遥县典型集中供热技术和分散式热泵技术，如表 3-1 所示。

表 3-1 平遥县典型技术路径分析

| | 焦化厂工业余热 | 集中空气源热站 | 分散式空气源热泵热风机 | 分散式空气源热泵热水机 |
|-----------|---------|---------|-------------|-------------|
| 户均初投资（万元） | 3.5 | 4 | 1.8~2.8 | 1.5~2.5 |

| | | | | |
|-----------------|---------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| 农户承担初投资 (万元) | 0.5 | 0.5 | 1.8~2.8 | 1.5~2.5 |
| 年运行费(元/ 户) | 3600 | 6500 | 4000 | 4500 |
| 条件要求 | 热源直线距离不 超过 12km, 且 热源价格较低 | 有热力站建设场 地 | 电网容量改造至 5kW 以上 | 电网容量改造至 5kW 以上 |

由表可见, 在热源距离较近的情况下, 集中供热降低取暖费, 提高舒适度、室内温度、室内环境质量, 集中供热有利于农户; 但是对于企业来说, 集中供热投资高, 若无政府补贴, 无回收期, 不利于企业。

4 中部城市群散煤清零方案遴选

农村在历史传统、土地资源、生产方式、生活方式、自然条件等诸多方面都与城镇住宅有显著差异。而农村的建筑形式、人口构成, 以及固有的生活模式、人员活动类型、资源特性、人员经济行为决定了农村人口与集中的城市人口不同的建筑使用模式、行为模式和室内热环境需求。因此农村建筑节能策略的制定和散煤清零技术的开发不能沿袭“城镇路线”, 需要另辟蹊径, 走出一条符合中部城市群农村特点实际的可持续发展之路。

4.1 农房围护结构节能改造技术遴选

山西省中部城市群农房绝大多数采用自建的方式, 建房时大多沿袭传统的粗放型模式, 农房的围护结构保温手段欠缺, 门窗多采用单玻铝合金、单玻塑钢推拉窗, 少数用了单玻断桥铝门窗, 围护结构保温隔热性能很差, 室内温度不高, 供热效果不佳。要做好农房的清洁供热工作, 应先做好农房围护结构节能改造。

4.1.1 农房围护结构热性能改善的重要性

在山西农村地区, 冬季供热能耗过大是农房面临的最主要问题, 而农房围护结构热性能以及布局直接影响农村住宅热环境及能耗。农房围护结构的散热途径主要包括墙体、屋顶、地面、门窗的传热损失, 以及通过门窗的冷风渗透造成的热量损失。

对于单体农房建筑来说，外墙的面积一般是最大的，而一般无保温的农房外墙采用 37 cm 或 24 cm 砖墙，传热系数大。通过测试发现，寒冷地区某典型农房各围护结构的冬季散热量，东、西、南、北外墙的总散热量达到围护结构总散热量的 1/3 左右，其中由于北墙背向阳光，是墙体散热的主要部分，约占墙体散热总量的 1/2。

屋顶也是一个薄弱环节，一方面是因为它的面积大，另一方面，在冬季，室内热气上浮，屋顶处温差比其他地方大，导致散热量较大。

门窗由于厚度比墙体和屋顶薄很多，传热系数更大，所以散热更强，而且当门窗的缝隙较大时，渗透风量也会很大，造成室内热量的浪费。但南向、东向、西向窗户还能透射进阳光，白天会补偿部分散失的热量。

此外，热量还会从地面与墙壁相交处传到室外，尤其对于农村来说，人们通常只注重地面的装饰性，忽视了地面也是冬季散热的一个很重要的环节。从这些方面可以看出，要做好房子的节能，就要把墙、屋顶、门窗、地面的传热损失和渗透风带来的负荷降下来。具体来说，就是做好墙面、屋顶的保温，提高门窗的热工性能和密闭性，减少地面传热，切断地角传热的途径。

4.1.2 农房围护结构节能改造技术

农村地区不同农户的供热需求在时间和空间分布上具有多样性，对于不同供热特征和经济状况的农户，应制定不同的围护结构保温改造方案。目前主要的农房保温改造方案如下。

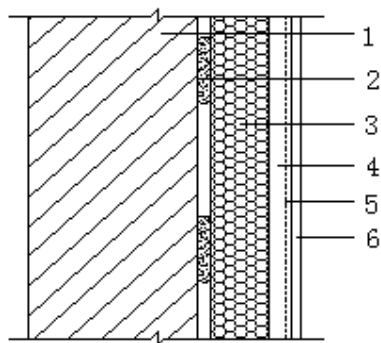
4.1.2.1 整体保温改造方案

对于新建建筑且供热房间多、有连续供热需求的农户，适合采用围护结构整体保温改造方案，即对整个墙体、门窗和屋顶进行保温改造。这种整体改造方案节能效果最好，多采用对外墙敷设保温苯板，更换铝合金或塑钢门窗等形式，但改造成本最高，以北京市为例，一户总投资约 20000 元。整体保温改造的具体技术简介如下。

(1) 外墙外保温改造

对外墙主要采取外保温的形式。外墙外保温是指在墙体外侧增加保温层，如图 4-1 所示。外墙外保温所用材料主要有膨胀聚苯板(EPS)和挤塑聚苯板(XPS)，厚度根据所在地区的气候特点，以经济性和节能效果为目标进行优化。其技术的

优点：①无须设置隔气层，不易形成冷桥，保温效果稳定。②提高墙体的防水和气密性，降低含湿量。③保护住宅主体结构，增强结构的耐久性，延长使用寿命。④适用范围广。缺点：①施工时间受到限制。②对材料和施工的质量要求较为严格。③造价相对较高。



1-墙体；2-粘接砂浆；3-聚苯板；
4-抗裂砂浆；5-网格布；6-装饰面层

图 4-1 聚苯板外墙外保温

(2) 门窗保温改造方案

门窗型材特性和断面形式是影响门窗保温性能的重要因素之一。框是门窗的支撑体系，可由金属型材、非金属型材或复合型材加工而成。金属与非金属的热工特性差别很大，表 4-1 给出了五种窗框材料的导热系数，木、塑材料的导热系数远低于金属材料，保温隔热性能优良。塑料具有良好的保温、隔热、隔声、耐腐蚀、美观等综合性能，PVC 塑料型材有推广价值。

表 4-1 几种材料的导热系数

| 材料 | 木材 | 塑料 | 玻璃钢 | 钢材 | 铝合金 |
|-----------------------------|-----------|-----------|---------|------|-------|
| 导热系数 ($W/(m \cdot k)$) | 0.14-0.29 | 0.10-0.25 | 0.4-0.5 | 58.2 | 203.5 |

整体保温改造主要采用的门窗技术方案为双层或三层中空塑钢窗、断桥铝窗、铝合金窗，一般情况铝合金造价较低，而断桥铝合金造价最高。

(3) 屋顶保温改造方案

坡屋顶、平屋顶是北方农房常见的屋顶形式。针对平屋顶，常见的屋顶保温方式铺设保温板或建房时在房顶添加珍珠岩与混凝土混合即保温砂浆。针对坡屋顶，在屋顶最上层梁上的短柱上架设中等粗细的檩子，在檩间架设更细的椽子，然后在椽子上依次铺设保温板。目前屋顶保温最多的是轻钢保温顶板。内置 2 根轻钢龙骨，增加顶板强度，如 (1) 保温板条 (2) 轻质保温屋

顶

图 4-2 所示。



(1) 保温板条

(2) 轻质保温屋顶

图 4-2 采用不同屋面材料的坡屋顶

4.1.2.2 经济型保温改造方案

由于北方农村地区很大一部分农户的活动空间集中在一到两个房间，因此这些常用房间有供热需求。相比于整体保温改造方案，仅对常用房间进行围护结构节能改造，能大幅度降低改造成本，兼顾保温效果和经济性。北墙、门窗和屋顶是围护结构的薄弱环节，加强这些部分保温性能可在节约成本的同时达到较好的保温效果。

(1) 吊顶保温技术

农房主要以坡屋顶为主，层高较高，因此可以通过增加吊顶，降低层高，减少上部无效热量损失。对于已有龙骨吊顶的农房，可以利用农户原有吊顶龙骨，裁剪与原有吊顶板相同尺寸的保温材料，拆卸原有吊顶进行更换（图 4-3）。对已有吊顶，也可使用保温隔热包保温，其具体做法与上述整体保温改造方案中相同。



图 4-3 已有吊顶更换保温材料流程

对于没有吊顶的农房，需要新增吊顶。在屋顶内侧直接新增吊顶，可采用木龙骨支撑，覆盖合适尺寸的保温板，并采用铝合金条固定（图 4-4）。保温板可采

用带饰面 3cm 厚的高分子树脂保温板或 2cm 厚带反射膜的橡塑保温层。高分子树脂保温板的导热系数约为 $0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，防火性能 B1 级。材料价格约 35 元 $/\text{m}^2$ ，改造费用低。



图 4-4 新增自保温吊顶施工流程

(2) 外墙内保温技术

由于经济型保温方案是针对某个常用房间进行围护结构保温改造，因此外墙改造适合采用内保温方式。

外墙内保温是在外墙内壁面粘贴保温材料，保温房间的选择和施工比较灵活。由于北墙背向阳光，且面积最大，是墙体散热的主要部分，约占墙体散热量的二分之一。因此，在实施墙体内保温技术时，北外墙最为优先，东西向外墙兼顾。内保温可采用高分子树脂保温板和壁纸自保温贴。采用高分子树脂保温板时，墙体内侧可用木龙骨做支撑，覆盖高分子树脂保温板，做法与采用高分子树脂板进行吊顶保温类似（图 4-5）。采用壁纸自保温贴时，对于不掉粉墙面，表面清理浮尘油污即可直接粘贴；对于掉粉墙面，应先清理墙面，然后刷底漆或腻子，晾至大于 12h 后可粘贴。内保温施工简单，改造面积小，费用较低，约 45 元 $/\text{m}^2$ 。



图 4-5 外墙内保温技术施工

(3) 门窗保温帘

除了整体保温改造方案中更换门窗材料的改造技术外，通过在门窗内侧设置

保温帘也可达到一定的保温效果。外窗内保温帘是在外窗内侧增加一层带有边框的 EVA 透光材质的内保温帘，边框固定在窗洞内表面的四周（图 4-6），可通过上部卷轴做伸缩调整。保温帘与边框紧密连接，可显著增加外窗密闭性，降低冷风渗透热损失，同时保温帘与原有窗户之间形成约 3~10cm 的空气层，有效减少夜间长波辐射和温差传热损失，可提高 10%左右的节能率。该技术施工简单，成本约 60 元/m²，远低于双层塑钢窗或铝合金窗改造技术，且用户可以根据个人喜好选用不同颜色。



窗框清理 → 上卷膜框固定 → 边框固定 → 膜帘卷拉调整

图 4-6 外窗内保温帘施工流程

外门保温帘采用磁性 PVC 自吸门帘（或布制棉帘等），将其悬挂在外门内侧或外侧（图 4-7），人员进出及时闭合与门窗缝隙覆盖，可以极大降低冷风入侵与渗透，减少外门频繁敞开的热量损失，提高室内热舒适。



图 4-7 外门保温帘

以上各项经济型保温技术可根据供热房间实际情况、供热需求和经济情况进行组合，达到“大用大保，小用小保，不用不保”的针对性高效保温效果。

4.1.3 农房围护结构节能改造综合方案对比

4.1.3.1 建筑模型

以平遥县某典型农宅为例进行方案的对比分析。农宅外观图和平面图如图

4-8 所示。该农宅为一层半砖木结构，其中一层住人，多出的半层用于储物；外墙为 370mm 厚无保温实心砖墙，外窗为单层塑钢窗，建筑信息如所示。农户的原始取暖方式为燃煤炉+火炕，取暖房间为卧室和客厅共三个房间，取暖面积 68m²，一个采暖季耗煤量在 3 吨左右，费用为 4000~5000 元。

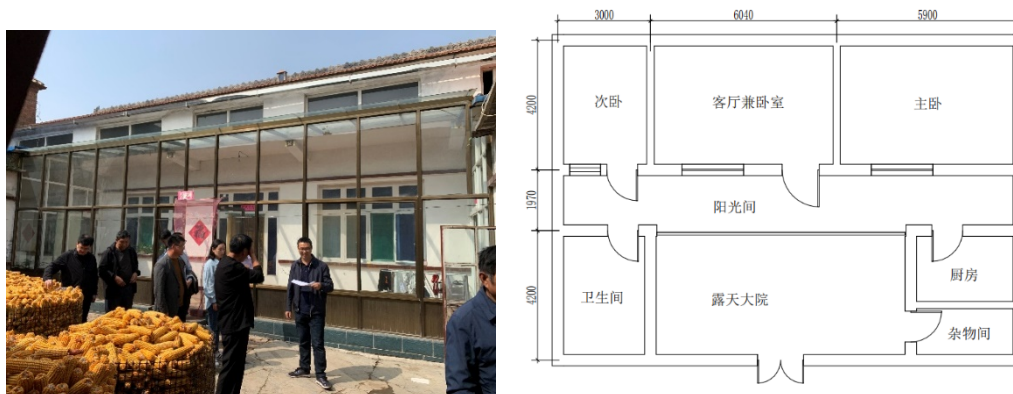


图 4-8 典型农宅

表 4-2 典型农宅基本信息

| 项目 | 材料及结构 | 参数 |
|------------------------|------------------------|--|
| 外墙 | 370mm 实心砖墙 | 1.54W/(m ² ·K) ^[26] |
| 内墙 | 240mm 实心砖墙 | 2.04W/(m ² ·K) ^[27] |
| 外窗 | 单层玻璃塑钢窗 | 5.7W/(m ² ·K) ^[28] |
| 小二层屋顶 | 水泥瓦+木檩条承重+ 50mm 稻草板 | 1.02W/(m ² ·K) ^[29,30] |
| 一层屋顶 | 钢筋混凝土楼板 | 3.1 W/(m ² ·K) |
| 地板 | 水泥地面 | - |
| 换气次数(h ⁻¹) | | 0.5 |
| 采暖面积 | | 68 m ² |
| 采暖季 | 11 月 1 日 – 次年 3 月 31 日 | |
| 采暖模式 | | 部分空间连续采暖 |
| 采暖季室内设计温度 | | 18°C |
| 采暖季煤耗 | | 3t |

通过 DeST 软件对上述典型农宅的正房部分进行模拟，得该农宅在原始工况下的采暖季总能耗为 8573 kW·h，能耗指标为 126.1 kWh/m²；当煤炉效率取 40%，散煤热值取 24.88 GJ/t 时，计算得采暖季耗煤量为 3.1 吨，与实际耗煤量的误差是 3.4%，可以认为该能耗模型较为准确。

4.1.3.2 菜单式方案优选方法

菜单式建筑节能改造方法是基于“经济型靶向”保温改造的理念提出的一种新型保温改造方案优选方法。其过程如图 4-9 所示。首先根据农房建筑的基本

信息及用户习惯建立建筑模型进行改造前的基础能耗计算；然后在农户的经济承担能力范围内，通过数据库对围护结构的不同节能改造方案进行寻优计算，得到不同预算下的“推荐菜品”；如果推荐方案在实际情况下由于材料短缺、用户偏好等其他原因无法实施，可由用户自由选择方案，得到“自选菜品”。

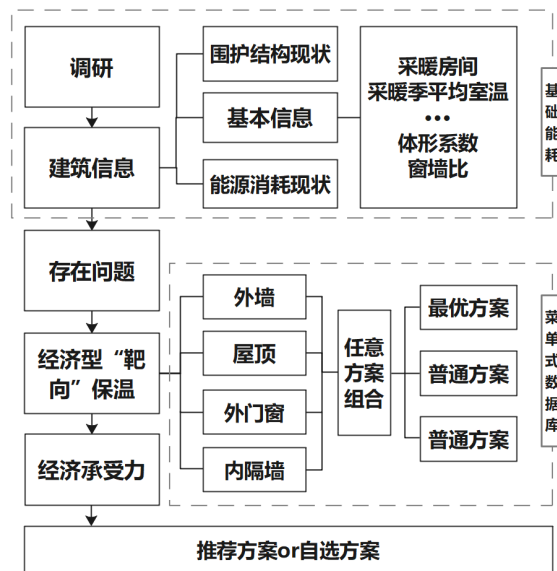


图 4-9 菜单式围护结构节能改造流程图

利用菜单式方法之前，首先对农宅进行节能诊断。可知该农宅设置了阳光间，其对南向外墙和外窗具有一定的保温和蓄热作用，而一层半的结构形式使得采暖房间的上部与外界环境之间多了隔热层，所以该农宅的改造空间只在于北向和东西向外墙。因该户型北向正房与东西厢房为一体式连接，东西外墙保温若只做北向房间，会影响整体的美观性；若整体都做，则必要性低且造价高。因此，方案只考虑北外墙的内外保温和东西外墙的内保温。考虑防雨要求，外墙在增加外保温层后不宜超过屋檐深度，因此外保温层厚度限制在 3cm；内保温考虑不过多占用室内空间，保温层厚度限制在 5cm。

经菜单式优化计算，确定节能率在 10~50%之间的 5 种经济性较高的保温改造方案，如表 4-3 所示。

表 4-3 典型农宅节能改造方案

| 保温措施 | 节能率 (%) | 初投资 (元) | 能耗指标 (kWh/m ²) | 寿命周期内年均成本 (元/年) |
|---------|---------|---------|----------------------------|-----------------|
| 方案一 不保温 | 0 | 0 | 126.1 | 0 |

| | | | | | |
|-----|----------------------------------|------|------|-------|-------|
| 方案二 | 东外墙聚氨酯板内保温 5cm | 9.6 | 1448 | 114.0 | 72.4 |
| 方案三 | 东西外墙酚醛内保温 5cm | 18.0 | 2478 | 103.4 | 123.9 |
| 方案四 | 北外墙岩棉板内保温 3cm | 25.3 | 2817 | 94.2 | 93.9 |
| 方案五 | 北外墙酚醛内保温 4cm | 36.8 | 3600 | 79.7 | 180.0 |
| 方案六 | 北外墙酚醛内保温 5cm+东 外墙 保温壁纸 5mm | 41.8 | 4888 | 73.4 | 296.6 |

注：相关材料价格来源于市场调研，施工费来源于当地实际工程调研；聚氨酯板、酚醛树脂板寿命 20 年，岩棉板寿命 30 年，保温壁纸 5 年。

4.2 散煤治理技术遴选

自 2017 年实施北方清洁取暖改造以来，北方农村地区因地制宜的推进了各项散煤治理技术，各类技术能源种类多样，能源多样性导致系统评价条件多样性，因此需要确定遴选的统一评价边界，并构建科学的综合评价体系，为合理的选择散煤治理技术提供科学依据。

4.2.1 农村地区散煤治理技术方案遴选边界确定

农村地区常用供热系统的多样性导致了能源种类的多样性，如各种类型的煤炭（散煤、清洁煤、蜂窝煤等）、天然气、生物质、电等。能源种类多样性又导致评价边界的多变性，使得这些供热系统的性能很难进行统一比较。现有 ISO 12655 标准中对整个能源利用链进行分析，确定了四种边界，对于供热系统来说，分别为传递到房间的热量（ E_B ）、传递到建筑侧供热设备的能量（ E_T ）、输入到集中供热系统的能量（ E_D ）和建筑侧可再生能源产生的能量（ E_R ）（图 4-10）。

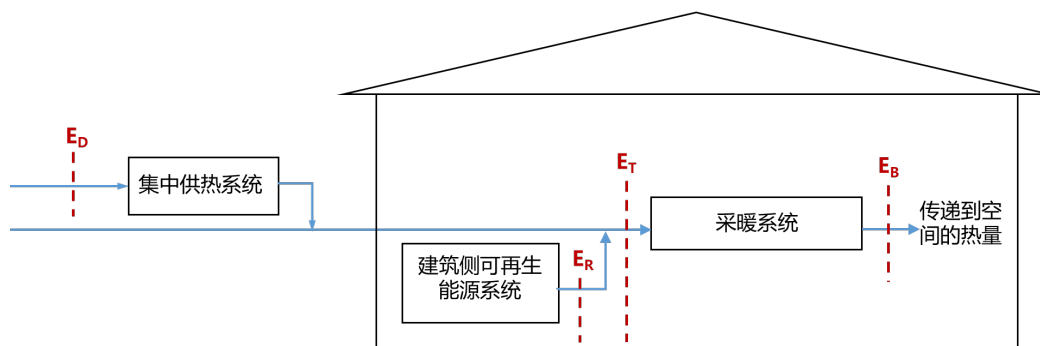


图 4-10 ISO 12655 对于能源利用边界的确定

对于燃气壁挂炉和生物质供热炉这类燃烧型供热系统，现有研究和评价主要将其能源利用边界确定为 E_T 。对于空气源热泵系统，有的研究将评价的边界设

定在用户侧，也就是 E_T ，用于评价供热设备在用户侧的耗电量或设备效率，有的研究却将边界设定在电厂侧，接近于 E_D ，用于评价供热系统的一次能源消耗量。若按照标准中边界的划分方法为多种农村供热系统确定一个统一的边界，如 E_T ，则对于已经基本淘汰的电直热型供热设备来说，其效率可以接近 100%，大幅度高于多数燃煤供热炉和生物质供热炉（一般情况下热效率 $< 90\%$ ）。火电厂发电效率在 40% 左右，然而考虑发电成本问题，电直热供热设备因其过高的电耗和供热费用在大部分农村地区已禁止大规模推广。由此可见，对于具备能源种类多样性特点的农村供热系统来说，若将评价边界固定在能源利用链中某一个节点，可能导致与现实情况不符的评价结果。

考虑到供热系统输入侧能源种类均可溯源到一次能源，因此本项目将一次能源输入侧确定为能源利用边界，将农村用户侧的多种输入能源形式都统一转换到一次能源。对于燃煤供热炉、燃气壁挂炉和生物质供热炉供热系统，农房内热源设备输入能源则为一次能源，边界为用户侧能源输入端。对于热泵等用电供热设备而言，一次能源入口为电厂发电设备输入端。这种界定方法避免了整个能源利用链中固定位置截断导致的截断误差，同时将所有能源折算到一次能源，增强了结果的可比较性。

4.2.2 农房散煤治理评价分项指标

合理的指标体系能对评价对象的性能进行综合客观的评价。农房各种用能系统的目的是提供更好的人居环境，需要考虑舒适、环保、低碳、能耗、经济等多方面的因素。考虑到现阶段农村的实际情况，提出图 4-11 所示的指标体系，在对多类指标进行打分或者考核计算后，将多方面指标根据一定权重综合成一个综合指标值，通过这一个综合值的大小来对比农房绿色低碳改造技术的效果优劣。需要指出的是，该指标体系适用的前提条件为：从改造完成之日算起，连续使用 12 个月之后的农房。

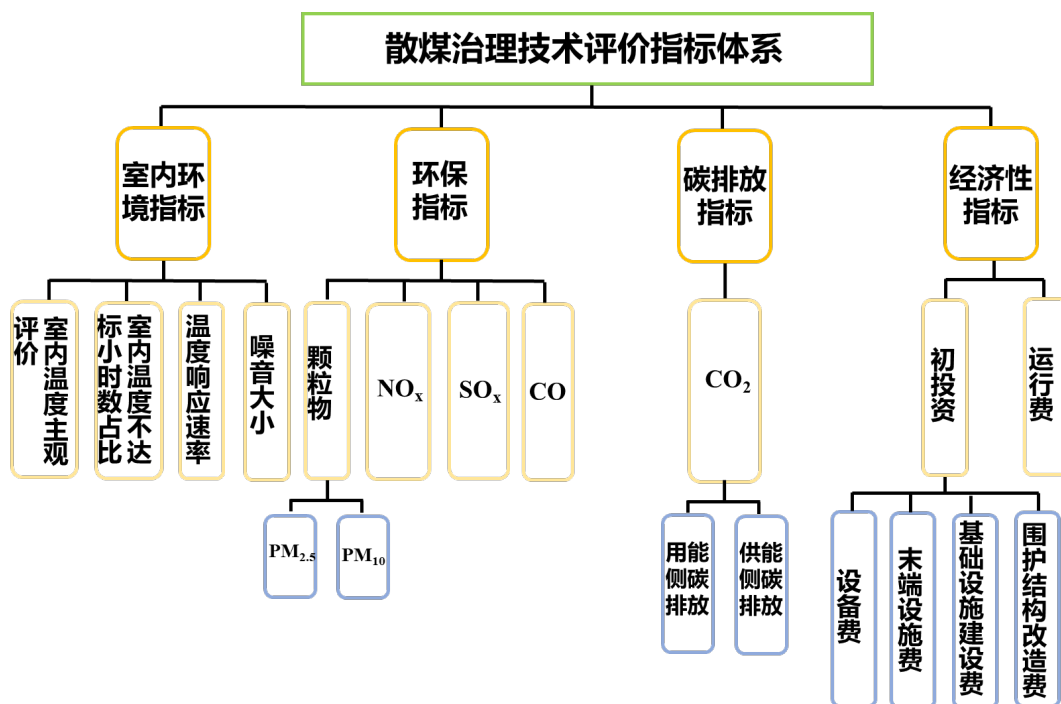


图 4-11 单体农房散煤治理技术评价指标体系

4.2.2.1 室内环境指标

室内环境指标主要衡量室内热环境的舒适性，其次是声环境。

室内热环境最终是服务于用户个人，不同的用户对热环境的需求会存在一定差别。因此，室内温度主观评价应该作为室内热环境舒适性指标的一部分，可通过入户询问获取用户对于绿色低碳改造后室内温度的主观感受。主观温度评价设置 4 个等级：非常不满意、不满意、满意、非常满意。

在主观评价基础上结合客观数据更能定量评价室内热环境舒适程度。一般来说，城市居民室内舒适的温度范围是 18-22℃（冬季）和 26-28℃（夏季），因人群年龄、性别等差异，最舒适值会略有差异。由于着装、生活习惯等不同，农村居民的室内舒适温度于城市有较大的不同，目前国家标准《农村居住建筑节能设计标准》(GB/T 50824-2013)将农村冬季室内设计温度定为 14℃。因此在进行室内舒适性评价时，应结合个体主观感受与客观测量确定温度值。该项评价指标适用于对常用房间的热环境评价，用室内温度不达标小时数占比来衡量，如式（5-1）所示：

$$\alpha_{dis} = \frac{\sum hour_{temp_dis}}{\sum hour_{stay}} \quad (5-1)$$

上式中， α_{dis} 是室内温度不达标小时数，无量纲； $\sum hour_{temp_dis}$ 是人员在常用房

间时感到温度不满意的小时数，单位是 h； $\sum hour_{stay}$ 是人员在常用房间停留的时间，单位是 h。

由于每个人对室内温度的需求不同，不同功能房间（卧室和客厅）的温度需求也不同，这就要求供能系统需要具备一定的可调性。一般来说，大部分取暖系统的取暖量可通过调节能源输入量或热媒介质的流量来达到调节散热量的目的，但这些调节方式的响应速率通常是比较缓慢的。该项指标代表着取暖或者空调系统对室内温度调节的调节能力，计算方式如（5-2）所示：

$$\beta_{temp} = \frac{|T_1 - T_0|}{t_1 - t_0} \quad (5-2)$$

式中， β_{temp} 是室内温度响应速率，单位是 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ； T_1 是既定的温度值，单位是 $^{\circ}\text{C}$ ； T_0 是测量开始时的温度值，单位是 $^{\circ}\text{C}$ ； t_1 是温度达到 T_1 的时刻，单位是 min； t_0 是温度达到 T_0 的时刻，单位是 min。温度测量点应设置为最常用房间地面几何中心且距离地面 1.5 米。

噪音污染早已成为城市环境的一大公害。国外早就有“噪音病”一词。科学研究表明，噪声会损害健康，人长时间工作、生活在噪声大的环境中，对中枢神经系统的刺激大，严重者会导致中枢神经系统功能紊乱。一些用能系统室外机或室内机在运行过程中会产生较大的噪音，影响到人体的舒适度。因此要求取暖系统噪音较小，白天不能超过 50 分贝，夜间应该低于 45 分贝。

综合以上信息，室内环境指标由温度主观评价、室内温度不达标小时数占比、温度响应速率、噪音大小来体现。

4.2.2.2 环保指标

污染物排放情况能较好的反应清洁供能系统的环保性能。传统散煤在散煤取暖炉中燃烧将排放大量的颗粒物、 NO_x 、 SO_2 、挥发性有机物等。这些污染物对室内外空气质量和人体健康都有较大影响，因此对于北方农房供能系统而言，这些污染物的排放情况应予以高度重视。

2021 年世界卫生组织基于 500 余篇学术论文提供的科学证据，修订并发布了《全球空气质量指导值（2021）》，指导值文件涵盖了 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、CO 等空气污染物的指导值水平。收紧了 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的长期暴露指标年均目标值， $\text{PM}_{2.5}$ 年均目标值由 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下调到 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， PM_{10} 年均目标值由 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下

调到 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。调整了 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的 24 小时浓度水平， $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 小时浓度水平由 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下调到 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， PM_{10} 的 24 小时浓度水平值由 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下调到 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。传统固体燃料燃烧排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 的数量能超过颗粒物总数量的 90%，并且 $\text{PM}_{2.5}$ 由于表面积大，在环境中滞留的时间更长，吸附的多环芳烃 PAHs 和重金属等有害物质更多，并且能进入人体肺泡，对人体健康危害远高于粗颗粒。因此 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 排放是北方农房供能系统环保性能评价中不可缺少的指标。

NO_x 和 SO_2 主要对室外空气质量影响较大。 NO_x 在大气中可形成硝酸和硝酸盐细颗粒物，同硫酸和硫酸盐细颗粒物一起，发生远距离传输，加速了区域性酸雨的恶化和雾霾天气的产生。此外， NO_x 在紫外光照射下，会与大气中的碳氧化合物作用，生成光化学烟雾和臭氧。与 NO_x 类似， SO_2 会加速酸雨和雾霾的形成，对整个生态系统具有严重危害。 NO_x 和 SO_2 这两种污染物也是各种排放标准中的目标污染物。近年来，北方地区因用能系统运行过程中 CO 中毒事件频发。因此， NO_x 、 SO_2 和 CO 是北方农房用能系统环保性能评价中的重要指标。

对于燃烧各种燃料的取暖炉，污染物排放因子是常用的排放指标。排放因子指的是单位质量燃料燃烧或者传递单位有效热量排放的污染物的量，其公式如式 (4-1) 和 (4-2)。

$$EF_i = \frac{m_{P,i}}{M_f} \quad (4-1)$$

$$EF_{d,i} = \frac{m_{P,i}}{Q_{e,d}} \quad (4-2)$$

式中， EF 是基于单位质量燃料的排放因子，单位为 g/kg ； EF_d 是基于单位质量燃料的排放因子，单位为 g/MJ ； i 表示不同种类的污染物； m_P 为相应污染物的质量，单位为 g ； M_f 为消耗的燃料量，单位为 kg ； $Q_{e,d}$ 为传递的有效热量，单位为 MJ 。 EF 与 EF_d 的比值即为燃烧设备热量率与燃料热值的乘积。

不同燃料之间由于成分和热值差异，其排放因子不具备可比性。为了统一对比各取暖方式的排放情况，在此采用常用房间全年污染物的排放量作为评价污染物排放的指标，计算公式如式 (4-3)。

$$EA_i = \frac{\sum m_P}{A_H} \quad (4-3)$$

其中, EA_i 是单位取暖面积污染物的排放量, 单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; A_H 为取暖面积, 单位为 m^2 ; 污染物质量 $\sum m_p$ 可通过排放因子和消耗的燃料量计算获得, 单位是 $\text{kg} \cdot \text{a}$ 。

对于农户侧燃烧型供能系统(燃煤炉取暖系统、燃气壁挂炉、生物质取暖炉系统等), 单位供能面积污染物的排放量直接通过农房内供能设备的排放因子与相关燃料消耗量即可获得。对于耗电型取暖设备(如空气源热泵), 则需要将电折换到电厂的煤炭消耗量, 再结合电厂污染物排放因子、发电效率和耗电量来计算单位取暖面积污染物的排放量。

农村地区家庭空气污染物来源于炊事和取暖, 主要是散煤和生物质粗效直燃。特别是散煤, 在我国北方农村地区广泛使用。因此环保指标要加强对清洁技术的引导, 推荐将散煤的污染物的排放因子的 10% 设置为清洁技术的环保目标值, 相当于污染物减排 90%。

4.2.2.3 碳排放指标

近几年的气候异常现象日益严重, 温室效应进一步加剧。人为源温室气体排放是造成全球气候变暖的重要因素。 CO_2 作为最主要的人为源温室气体, 减少其排放对于减缓温室效应具有重要意义, 因此需要采用 CO_2 排放量来衡量供能系统的减碳效果, 同时还可以体现农房的能耗情况。

本项目主要研究既有农房, 因此仅考虑农房运行阶段净碳排总量, 从用能侧化石能源消耗产生的 CO_2 排放量和供能侧可再生能源的绿色电力输出减少的 CO_2 排放量两方面考虑。用能侧主要包括暖通空调系统、生活热水、炊事、照明的碳排放量。供能侧主要指光伏发电系统、小型风力发电系统。农房运行阶段净碳排放总量应为用能侧碳排放总量减去供能侧输出碳排放总量。

(1) 用能侧碳排放量计算

对于燃烧化石能源的供能系统(燃煤炉供热系统、燃气壁挂炉、液化气灶等), 单位供热面积 CO_2 排放量直接通过农房内供能设备的排放因子与相关燃料消耗量即可获得, 对于完全使用可再生能源的供能系统(如生物质取暖炉、太阳能热水器、传统炉灶等), 其 CO_2 排放量为零。对于耗电型供能设备(如空气源热泵、蓄热式电暖气、照明设施、电炊事用具等), 则需要将电折算到火电厂的煤炭消耗量, 再结合电厂 CO_2 排放因子、发电效率和耗电量来计算单位供能面积 CO_2

排放量,若供热设备的耗电量来自可再生能源发电部分的 CO₂ 排放量以零计算。

(2) 供能侧减少的碳排放量计算

农村小型光伏发电系统和小型风电系统除了能供给农房生活所需电能外,多余的电能还能并入电网。上网部分电能可以减少部分化石能源消耗量,从而降低 CO₂ 排放量,这一降低值即为供能侧减少的 CO₂ 排放量。

根据《GBT 2589 综合能耗计算通则》和《GBT 51366 建筑碳排放计算标准》,农村地区使用 1 千克煤炭排放约 1.98 千克二氧化碳,使用 1 千克液化气排放约 3.11 千克二氧化碳,使用 1 度电排放约 0.56 千克二氧化碳,使用 1 立方米天然气排放约 1.94 千克二氧化碳。北方农村主要涵盖寒冷和严寒两个气候区,两个气候区目前的用能水平有较大差别。《GBT 51161 民用建筑能耗标准》约束我国寒冷地区居民建筑非供暖综合电耗 2700 kW·h/(hh·a),严寒地区居民建筑非供暖综合电耗 2200 kW·h/(hh·a)。未来我国乡村的电气化率进一步提高,寒冷和严寒气候的农户的非取暖用电量差别不大,主要能耗差别来自于取暖。如果取暖使用生物质、光伏电等零碳能源满足取暖需求,则这一部分的碳排放可以基本降低为零。碳排放指标要体现出引导性,因此寒冷地区农房的二氧化碳排放强度应控制在 2000kg/(hh·a)以内,严寒地区农房的二氧化碳排放强度应控制在 3000 kg/(hh·a)以内。

4.2.2.4 经济性指标

由于农村地区经济水平远低于城市,因此,经济性是农户在选择供能系统时考虑的主要因素之一。根据国家统计局的数据(图 4-12),我国农村居民人均支出从 2014 年的 8383 元提高至 2020 年的 13713 元,最近 3 年增长速度正在降低。从支出用途上看,食品烟酒相关支出占到 33%,居住相关支出占 22%。在 2020 年,农村地区有 20%的家庭人均可支配收入低于 4681.5 元,有 60%的家庭人均可支配收入高于 14711.7 元。

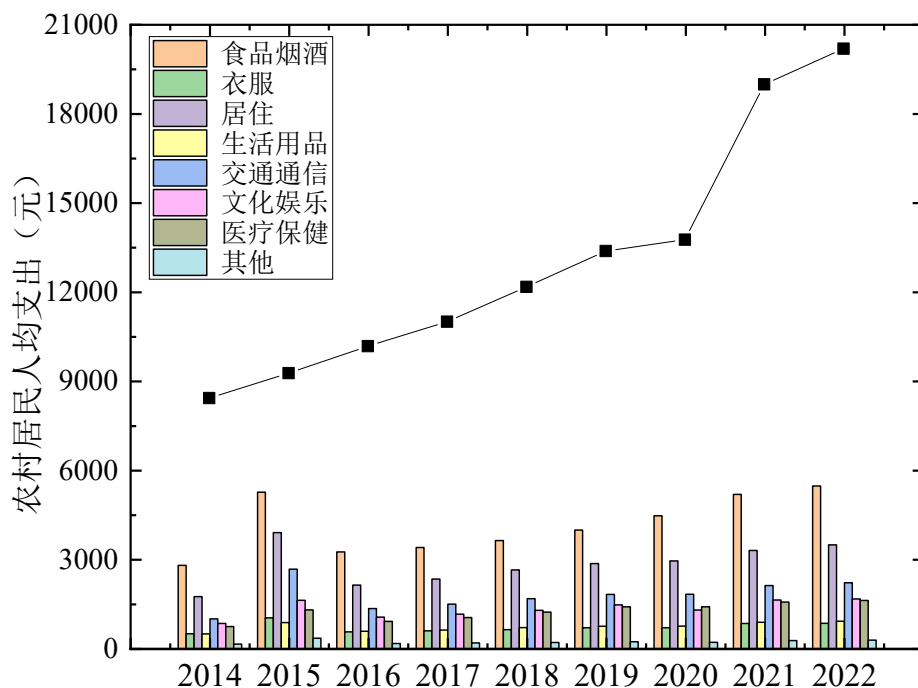


图 4-12 我国农村居民人均支出及分项构成 (2014 年-2022 年)

通过前期大规模走访调研，北方农村地区的地方政府普遍反映整体财力压力大，很难进行大规模配套，每个农户改造初投资不超过 1 万元左右时基本可以承受。1 万元初投资应包含供能设备投资、房屋节能改造、基础设施投资。我国北方各省农村居民人均支出大都在 9000-12000 元之间，只有北京、天津的农村居民人均支出超过了 15000 元（图 4-13）。除去家庭其他支出外，绝大多数农村居民可以接受的运行费用为每个取暖季 1 千元左右。因此，要实现农村地区清洁取暖系统可持续推广应用，初投资应不超过 1 万元，年运行费不超过 1 千元。

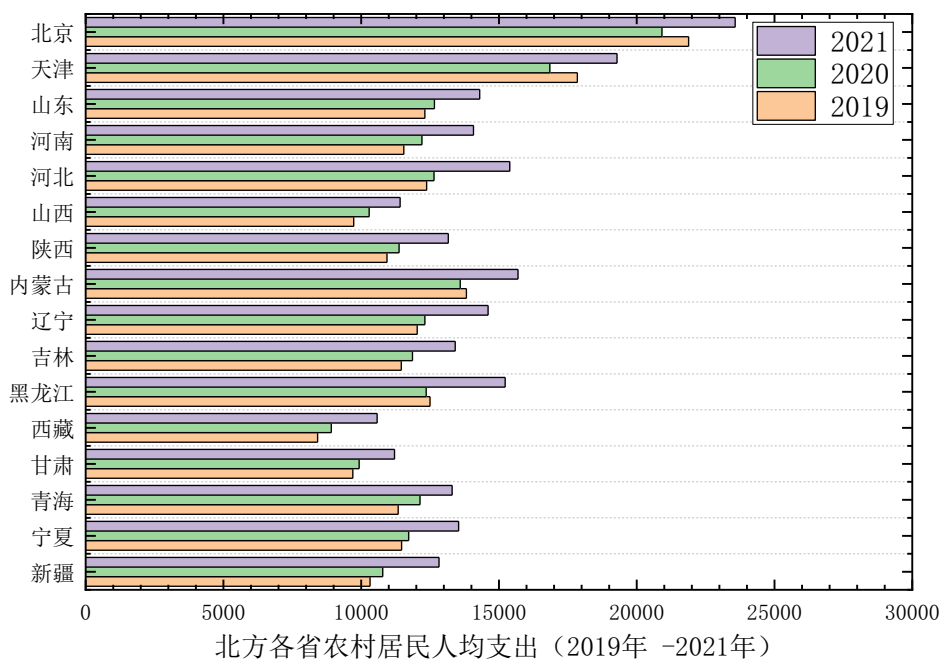


图 4-13 我国北方各省农村居民人均支出 (2019 年-2021 年)

经济性指标使用取暖季单位取暖量取暖系统的运行费用进行评价, 根据不同类型的设备、末端初投资以及基础设施建设费用, 将初投资按照使用年限折算到运行费中, 对单位取暖量的运行费进行计算。

不同类型的设备和末端的取暖方式在时间和空间上呈现不同的特征, 并且不同设备在不同需求下, 其设备特性、调控方法和用户使用行为会相互影响, 从而产生某种实际运行状态, 例如传统的燃煤锅炉以及空气源热泵热水机(以热水为加热媒介, 如图 4-14)、燃气壁挂炉都是连续开启, 并且无法便捷地实现分房间的控制, 尤其是末端采用地暖的形式, 而空气源热泵热风机(以热风为加热媒介, 如图 4-15)由于其温度响应迅速、启停方便的特性, 通常都是根据用户实际需求间歇运行。

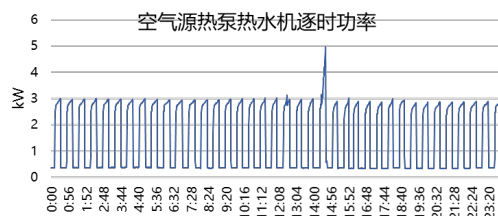


图 4-14 空气源热泵热水机典型日逐时功率

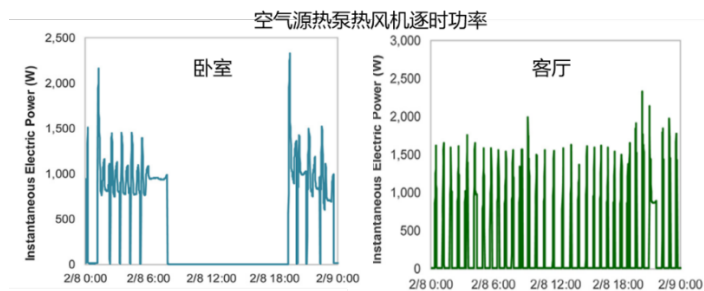


图 4-15 空气源热泵热风机典型日逐时功率

用户使用不同的设备形式会呈现不同的启停模式，例如便于调节的设备比不易调节的设备更匹配间歇的使用习惯，在不需要取暖时段的设备取暖和能源消耗较少；而不利于调节的设备的取暖量与用户实际需求量的关系更容易出现“ \geq ”的状态，例如在用户不在室、在某一空间短暂停留的情况下依旧持续取暖，在这些情况下取暖设备的过量取暖往往不仅不会引起用户满意度的变化，还会引起过量的能源消耗从而导致更多的运行费用，增加用户的经济负担。

因此，在计算过程中如果采用同样的取暖量或者全天相同的室温状态为基础来计算不同类型设备的初投资和运行成本，就会忽略掉灵活可调节设备发挥用户行为节能的优势，有悖于针对前述实际取暖需求特征来遴选出节能环保的取暖方式的初衷。针对这一问题，可以通过定义用户需要取暖时段的取暖量为“有效取暖量” H_e 来解决，从而不需要取暖时段的取暖量为“无效取暖量” H_{ue} ，则“供需匹配系数” $P_{n,s}$ 为“有效取暖量”占总取暖量（“有效取暖量”与“无效取暖量”之和）的比例。“供需匹配系数”不仅与设备类型相关，还与实际取暖需求相关，例如，对于需要某一房间连续取暖的情况，任何设备的“供需匹配系数”都是 100%，因为只要设备连续开启，其取暖量都是“有效取暖量”；而对于某一房间一天只需要 12 小时连续或者间歇取暖的情况，连续运行的设备的“供需匹配系数”约为 50%，而可以随时灵活启停的设备的“供需匹配系数”约为 100%。因此，在计算初投资和运行费用时，用“单位有效取暖量”作为基础来进行计算：

$$P_{n,s} = \frac{H_e}{H_e + H_{ue}} \quad (4-4)$$

$$H_{s,a} = H_{s,f} P_{n,s} P_{c,ts} \quad (4-5)$$

其中：

$P_{n,s}$ 为供需匹配系数，为无量纲参数；

H_e 为有效取暖量，单位为 J；

H_{uc} 为无效取暖量，单位为 J；

$H_{s,a}$ 为实际取暖的取暖量，单位为 J；

$H_{s,f}$ 为全时间、全空间取暖所需取暖量，单位为 J；

$P_{c,ts}$ 为建筑时空利用系数百分比，为无量纲参数。

根据调研不同设备用户的使用模式结果和最常见的大三间式农房建筑形式，表 4-4 为在三种典型取暖需求模式下不同取暖设备的匹配系数：

表 4-4 不同设备的供需匹配系数

| 类型 | | 全时间全空间 | 全时间部分空间 ($P_{c,ts}=50\%$) | 部分时间部分空间 ($P_{c,ts}=30\%$) |
|-----|--------|--------|--------------------------------|---------------------------------|
| 型煤 | 型煤炉 | 100% | 50% | 30% |
| 天然气 | 燃气壁挂炉 | 100% | 50% | 30% |
| 电直热 | 直热式 | 100% | 80% | 85% |
| | 蓄热式 | 100% | 50% | 30% |
| | 热泵热水机 | 100% | 50% | 30% |
| 热泵 | 热泵热风机 | 100% | 100% | 95% |
| | 地源热泵 | 100% | 60% | 40% |
| 生物质 | 生物质热水炉 | 100% | 70% | 50% |

注：全时间全空间：三个房间取暖季 24h 取暖，室内设计温度为 14℃；

全时间部分空间：客厅兼具卧室的功能，24h 取暖，卧室夜间使用时段取暖，室内设计温度同上；

部分时间部分空间：卧室和客厅均在室使用时段开启，并在中午自然室温升高后客厅存在间歇关机的情况。室内设计温度同上。

4.2.3 农村地区散煤治理技术简介

北方农村地区因地制宜的推进了各项散煤治理技术，主要分为两类：燃烧型和非燃烧型，燃烧型主要包括燃气壁挂炉供热系统、户用生物质成型燃料供热炉系统、生物质成型燃料集中供热系统、生物质打捆直燃集中供热系统；非燃烧型主要包括电直热/电蓄热、低温空气源热泵热水机、低温空气源热泵热风机和分布式太阳能供热系统和户用地源热泵供热系统等形式，如图 4-16 所示。

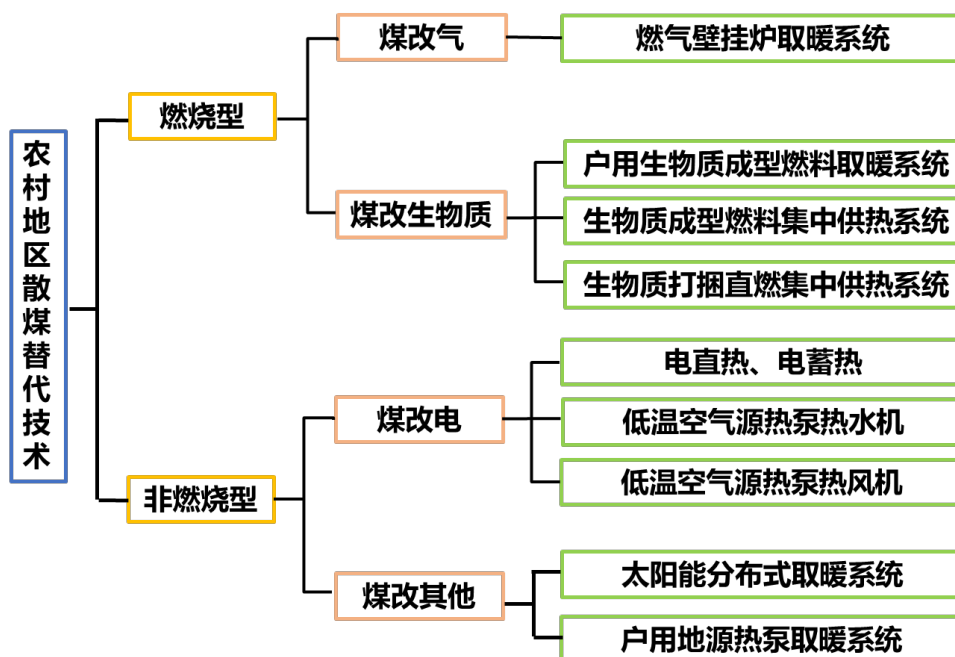


图 4-16 农村地区散煤治理典型技术分类

4.2.3.1 户用生物质成型燃料供热系统

近几年在国家节能减排和治理雾霾的大背景下，多地逐渐开始探索利用生物质成型燃料对农村散煤供热进行有效压减和替代，目前主要有热水型生物质炊暖两用炉和热风型生物质成型燃料采暖炉。

(1) 户用热水型生物质成型燃料炊暖两用炉

生物质成型燃料的结构特征决定了其燃烧炉具的特殊性，这类炉具一般利用生物质燃料的半气化燃烧原理，一次风从炉排底部进入，与生物质燃料在炉膛里发生化学反应，使炉膛内的生物质燃料从下往上依次形成氧化层、还原层和热解层，下层的燃料边燃烧边释放出一些可燃物质，为了增加燃烧效率，在炉具上部火焰出口处需要增加二次风喷口，将固体生物质燃料和空气的气固两相燃烧转化为单相气体燃烧，这种半气化的燃烧方法使燃料得到充分的燃烧，可以做到不冒黑烟，把焦油、生物质炭渣等完全燃烧殆尽，明显地降低颗粒物和一氧化碳等污染物的排放。燃烧木质颗粒的 $PM_{2.5}$ 排放因子可低至 0.3 g/kg 干燃料，燃烧秸秆颗粒的 $PM_{2.5}$ 排放因子约为 0.8 g/kg 干燃料，远低于散煤和清洁煤，燃烧木质颗粒的 $PM_{2.5}$ 排放水平甚至接近燃煤电厂采用除尘设备后的水平，因此户用生物质成型燃料供热炉污染物排放低，能达到明显的减排效果。现有的户用生物质成型燃料供热炉热效率较高，能达到 80% 以上，远高于散煤炉热效率，具有较好的节能潜力。

考虑到农村的炊事需求，一些生物质成型燃料供热炉加入了炊事功能，在供热同时解决农户的炊事问题。目前针对供热炉长时间连续运行以及白天夜间的火力需求不同问题，智能型户用生物质成型燃料供热炉逐步得到发展（图 4-17）。智能型户用生物质成型燃料供热炉能实现生物质颗粒自动控制入炉、分阶段燃烧、火焰温度控制。通过智能控制系统协同控制，可保证作物秸秆、木质成型燃料清洁高效燃烧。这类炉具还能通过程序设置，实现超温报警、超压保护以及自主防冻等多种安全保护措施。



图 4-17 智能型生物质清洁供热炉

户用生物质成型燃料供热炉能很好地消纳当地秸秆、林木剩余物及家具加工边角料等生物质资源，有效减少资源浪费与污染物排放，燃尽后的灰尘可作为肥料还田，形成良好的生物质资源的循环利用链。该供热炉还可有效利用用户原有散热器或地板辐射供热末端，同时解决生活用热水问题，提高了农村生活质量，而且每户自成系统，不涉及外网改造，不增加电网负担，每户独立控制运行，能很好调动用户行为节能积极性。

户用生物质成型燃料供热炉系统的末端除采用传统散热器外，还能与农村地区居民广泛使用的火炕相结合，可保留农户的生活习惯（图 4-18）。

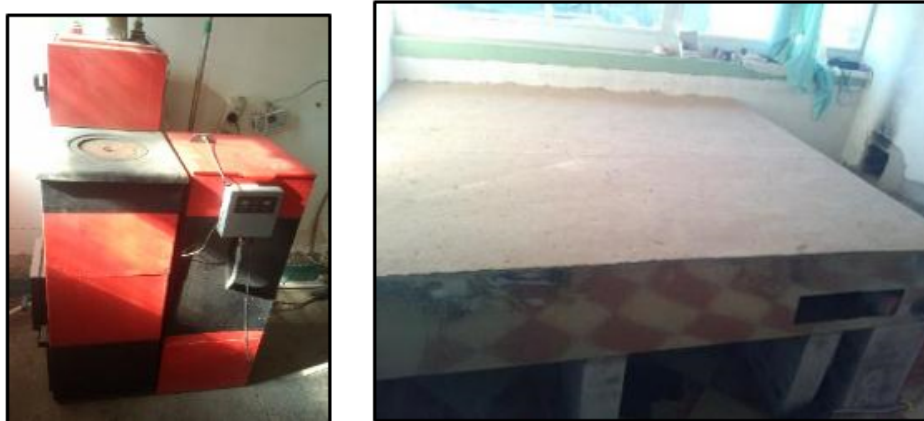


图 4-18 生物质供热炉-对流炕系统

(2) 户用热风型生物质成型燃料采暖炉

此类炉具与热水型炉具原理一致，但热风型生物质炉具以木质生物质颗粒为燃料，供暖面积较小，可供 20 到 40 平米的单间热风采暖。用户可以根据自己的采暖需求，房屋保温，采暖面积选择采暖档位进行调节。采暖炉一键开机，自动点火，点火时间大约 5 分钟。设备每小时可以高效地燃烧 0.5 到 1 公斤木质颗粒。但设备安装简单，占用面积小，不需要暖气片。



图 4-19 生物质成型燃料热风炉

4.2.3.2 电直热和电蓄热取暖

电直热和电蓄热技术是将电能转化成热能直接放热，或者通过热媒介质在供热管道中循环来满足供热需求的供热方式或设备。电直热和电蓄热技术将高品位的电能转换为热，且转换效率最高不超过 100%，采用这类技术容易导致电耗过高，供热费用高。电直热和电蓄热技术的大范围利用会显著增加区域电力需求，需要对电网进行增容改造，基础设施改造初投资高，目前在部分农村地区已经禁止推广。

(1) 电直热技术

电直热技术主要包括碳晶板、发热电缆和电热膜等，这类产品主要通过发热体将电能转换为热能，通过辐射和对流的形式向外传递，其电—热转换率最高不超过 100%。该产品结构简单，即开即用，但热损较大，耗电量极高，运行费农户难以承受，安全隐患风险较大，可能需要配电增容改造（图 4-20）。



(a) 碳晶板

(b) 发热电缆

(c) 电热膜

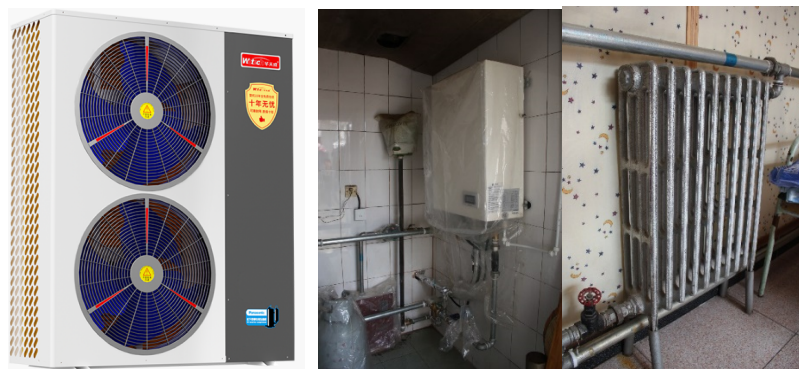
图 4-20 电直热供热

(2) 电蓄热技术

电蓄热技术是在夜间谷电时段，利用电加热设备产生热量，然后将热量蓄积在蓄热装置中(热水蓄热、镁砂固体、蓄热砖、无机熔融盐以及相变材料)，在白天用电高峰时段，电加热设备停止运行，利用蓄热装置向外供热，具有用、蓄分离的特点。电蓄热技术可以利用低谷电价，大幅度减少用电成本，但是蓄热装置体积较大。这类设备的运行费用对电价较敏感，且大功率电蓄热供热设备需要配套线路和变电改造。

4.2.3.3 低温空气源热泵热水机

空气源热泵通过电能驱动，吸收室外空气中的低品位热能，将其转化为较高温度热能，并以直接加热室内空气的形式，向建筑供热。低温空气源热泵热水机可以在 -20°C 的环境温度下正常工作，提供 $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的供热热水，与地板辐射盘管或散热器组成供热系统给整户农房供热，提供稳定的供热室温（图 4-21）。



(a) 室外机

(b) 室内机

(c) 散热片

图 4-21 低温空气源热泵热水机系统

传统空气源热泵采用单级压缩循环（图 4-22 左），在中国北方地区较低的室

外环境温度下，制热量急剧下降，还会因为压缩机排气温度过高等问题而停止运行。低温空气源热泵热水机采用准双级压缩循环（图 4-22 右），系统主要由带辅助进气口的涡旋压缩机、蒸发器、冷凝器、膨胀阀以及经济器等部件构成。主回路制冷剂经过经济器过冷，进入压缩机经过一段封闭压缩后，与来自辅助回路的制冷剂蒸汽混合，继续进行一段封闭压缩。与相同工况下的单级压缩相比，压缩机排气温度降低，压缩比减小，可以在更低的环境温度下运行，提高系统的制热量。

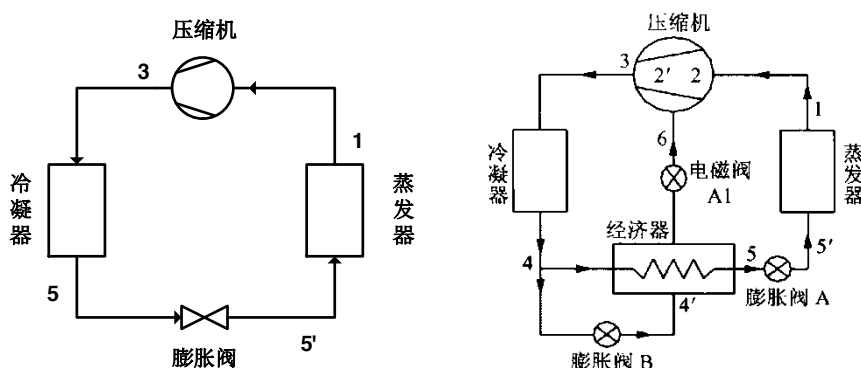


图 4-22 低温空气源热泵系统循环原理图

低温空气源热泵热水机使用电能供热，农房在当地不会产生 $\text{PM}_{2.5}$ 排放。传统空气源热泵运行的环境温度极限为 -7°C ，无法用于北方寒冷地区农房的冬季供热。低温空气源热泵热水机采用准双级压缩热泵循环，可以在 -20°C 的环境温度下运行。

低温空气源热泵热水机与暖气片或地暖等水系统连接，需要全天开启，防止冻管风险。由于 COP 较高，耗电量比电直热和电蓄热小，对电网增容需求比电直热和电蓄热小，可减少电网升级投资。

4.2.3.4 低温空气源热泵热风机

近年来中国在低温空气源热泵热风机方面的技术进步迅速，目前处于国际领先地位。通过新的压缩机技术、变频技术和新的系统形式，已经把低温空气源热泵热气机的适用范围扩展到 -30°C 的低温环境。

外温在 0°C 左右是传统上的热泵应用范围；外温在 -10°C 左右，螺杆机、涡旋机的补气增焓和转子压缩机双级压缩等技术可以将 COP 提高至大于 2。与单级压缩系统相比，双级压缩系统具有压缩比小、排气温度低、运行效率高等特点（图 4-23），可克服在寒冷地区空气源热泵系统效率低、可靠性差等缺点，实现低环境温度下正常制热，使热泵的使用范围延伸到更广的区域。

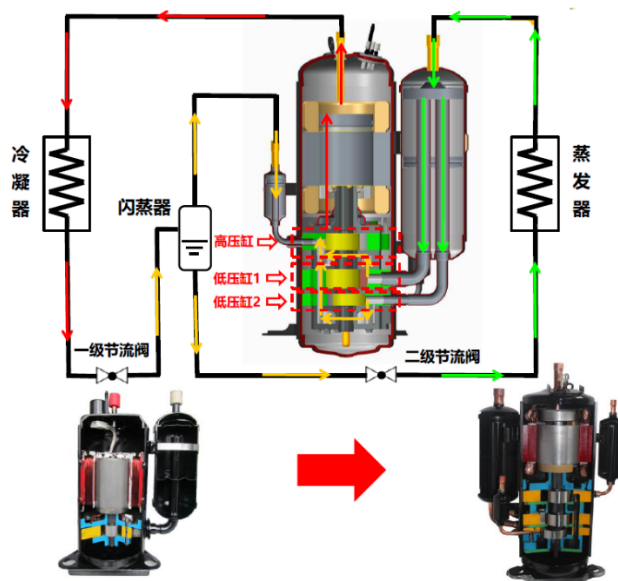


图 4-23 三缸双级变容积比压缩机示意图

实际测试结果表明，低温空气源热泵热风机在实际测试中运行稳定、可靠，在低温环境下制热性能良好，可实现在额定制热（室外 7°C ）工况下 COP 能达到 3.1，与普通空气源热泵相比能效提高 5%~10%；室外环境 -20°C 时 COP 可达 1.95，制热量提高 50%~100%，能效提高 20% 左右。低温空气源热泵热风机使用电能供热，农房在当地不会产生 $\text{PM}_{2.5}$ 排放。与其他供热系统不同的是，低温空气源热泵热风机直接加热房间空气，可以迅速提高房间气温。如图 4-24 所示，热风机启动后，房间气温从 9°C 加热到 15°C 用时仅 20 分钟。因此，在客厅等没有人员长期逗留的房间，热风机可以间歇运行，没有供热需求时停机，需要供热时再启动，同样可以保证供热效果。

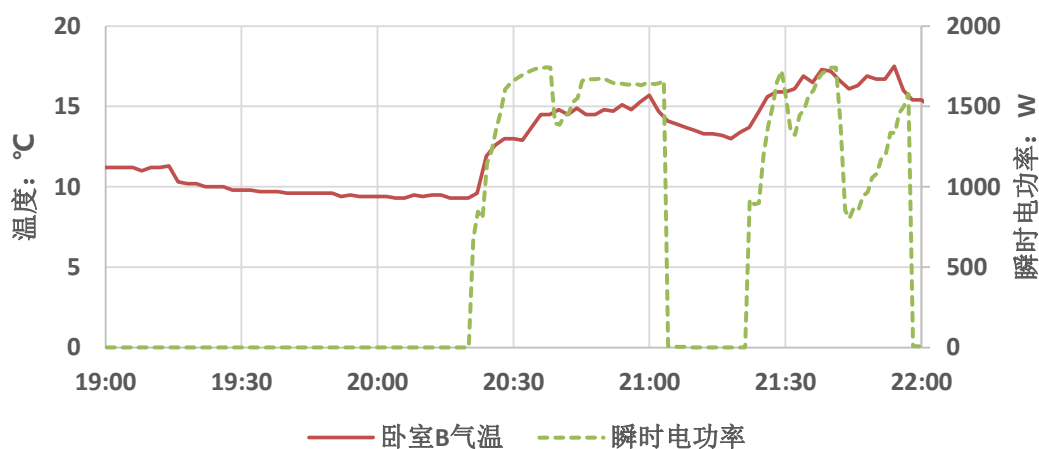


图 4-24 低温空气源热泵热风机加热房间的逐时室温变化

此外，低温空气源热泵热风机可按供热房间分室安装，独立调节，实现间歇运行。同时，温度设定操作简易，用户可以灵活调控室温，最大限度发挥行为节能潜力。此外，由于热泵热风机无需加装暖气片、地暖等末端，夏季还能空调整冷，一个设备两个功能，非常适合于广大农村的实际情况和需求。



a.室内机

b.室外机

图 4-25 低温空气源热泵热风机

4.3 散煤治理技术综合方案对比结果

基于上述农宅围护结构节能改造方案及散煤治理的适宜技术，本节将对各类散煤治理综合方案分不同情景进行对比分析并给出适宜的方案。其中，集中供热选择已调研的焦化厂工业余热和集中空气源热泵技术；分散式供热选择生物质炊暖炉、低温空气源热泵热风机、低温空气源热泵热水机、蓄热式电暖器、反射镜太阳能集热供热等技术，因各种电直热技术具有相似性，以碳晶电采暖板作为典型进行分析。

4.3.1 情景分析

4.3.1.1 农网改造

农村地区实施散煤治理技术需要满足相应的条件。比如煤改电技术需要待改造地区具备充足的电网接入能力。现阶段，山西省基本实现了电力供应的全面覆盖，部分地区的电网接入能力较高，但也有很多地区存在电网设施老旧，线路老化的问题，此时便需要进行农网改造。根据不同地区的差异，在方案对比时应分为需要农网改造和不需要农网改造两种情景。

4.3.1.2 用户采暖模式

考虑部分分散式供热技术，如低温空气源热泵热风机和电直热技术，具有及时开关、灵活调节的优点，用户可能存在一定的行为节能；而集中供热、生物质炊暖炉、空气源热泵热水机等热水供热技术为避免冻管问题，需 24h 连续运行。因此，基于前期对农户生活习惯和采暖习惯的调研，本报告将用户的采暖模式分为如表 4-5 所示的四种。经过 DeST 模拟计算得到相应的采暖季能耗，并计算行为节能率分别为 0、17%、43%、55%。

表 4-5 用户采暖模式

| 模式 | 建筑能耗(kWh) | 行为节能率 |
|------------------------------------|-----------|-------|
| 24h 连续 | 8573 | 0 |
| 卧室 22pm-6am (9h) +客厅 7am-20pm(14h) | 7121 | 17% |
| 卧室 20pm-22pm(2h)+客厅 7am-20pm(14h) | 4873 | 43% |
| 卧室 20pm-22pm(2h)+客厅 17pm-20pm(4h) | 3825 | 55% |

4.3.1.3 室温

采暖房间设计室温是影响采暖能耗的因素之一。集中供热系统在实际运行中为了确保在极寒条件下仍能为系统最末端用户提供足够的热量，往往采取加大供热量的方式，由此导致很多用户室内温度过高。经过对北美村、落邑村、马壁村等焦化厂工业余热供热村落的入户调研，发现用户室内温度在 21~24℃ 之间，而采取集中空气源热力站供热方式的西达蒲村用户室内温度为 17~20℃；对于分散式供热技术，由于其灵活性高，供热面积小，农户可以根据自身需求实现较为精准的控制，室内温度基本维持在 18℃ 左右。因此，本报告在计算用户采暖能耗时，对于工业余热技术路径，计算室温取 22℃，集中空气源热力站与各分散式供热技术取 18℃。

4.3.2 计算条件

基于上述情景分析，在 4.1.3 中的六种围护结构节能改造方案的基础下，本节将从有无农网改造、四种用户取暖模式、设计室温相同和不同三个维度展开散煤治理技术综合方案的经济性对比分析。选择年均成本作为经济性指标，计算公式如下：

$$C_a = \frac{C_m}{n_m} + \frac{C_r}{n_r} + C_o \quad (4-6)$$

式中 C_a 是某项技术路径的年均成本，元/年； C_m 是保温改造费用，元； n_m 是保温材料的寿命周期，年； C_r 是用户侧与热源侧的总投资，包括末端取暖设备费、热源建设费、管网敷设费、农网改造费等，元； n_r 是对应技术路径的服务年限； C_o 是对应某种保温方案及技术路径的年运行费，元/年。

各技术路径的初投资 C_r 如表 4-6 所示。其中，对于需要农网改造的地区，农户电网容量取 3kW，农网改造费用单价取 2000 元/kVA。工业余热与集中空气源热力站的基础设施投资均包括换热站和一二级管网的建设。

表 4-6 供热技术初投资

| 技术 | 设备费 (元) | 采暖末端 费(元) | 基础设施投资 (元) | 寿命周期 (年) |
|------------|------------|--------------|---------------|-------------|
| 工业余热 | 0 | 1760 | 35000 | 30 |
| 集中空气源热力站 | 0 | 1760 | 40000 | 30 |
| 生物质炊暖炉 | 4500 | 1760 | 0 | 10 |
| 空气源热泵热风机 | 4500×2 | 0 | 7500 | 10 |
| 空气源热泵热水机 | 13000 | 1760 | 7500 | 10 |
| 碳晶电采暖 | 1580×3 | 0 | 12500 | 10 |
| 蓄热式电采暖 | 1800×3 | 0 | 15000 | 10 |
| 反射镜太阳能集热供热 | 15000 | 1760 | 0 | 10 |

各供热技术运行费的计算条件如表 4-7 所示。

表 4-7 供热技术运行费计算条件

| 技术路径 | 运行费计算条件 |
|------|--------------|
| 工业余热 | 供热成本 38 元/GJ |

| | |
|--------------|---|
| 集中空气源热力站 | 供热成本 65 元/m ² |
| 生物质炊暖炉 | 炉具效率 84%；生物质颗粒 1000 元/吨 |
| 空气源热泵热风机/热水机 | COP=2.6 / 2.2；阶梯电价 |
| 碳晶电采暖 | 阶梯电价（0.477/ 0.527/ 0.777）；效率 98% |
| 蓄热式电采暖 | 峰谷电（谷电 22pm-8am 0.31 元；峰电按阶梯电价；蓄电 10h 放电 9h）；效率 98% |
| 反射镜太阳能集热供热 | 电辅热占比 30%；水泵功率 100w；阶梯电价 |

4.3.3 实施条件要求与满足方法

4.3.3.1 煤改生物质

煤改生物质技术路径需要具备丰富的生物质资源的可获得性或者购买渠道的稳定性。对于前者，农村地区需要拥有充足的生物质资源，如农作物秸秆、林木废弃物等，以便将其转化为可替代的燃料供给。对于后者，需要建立稳定可靠的生物质燃料采购渠道，以确保燃料供应的连续性和可持续性。该方式需要与生物质燃料供应商进行合作，或者建设能够满足需求的生物质燃料生产基地，以确保可靠的燃料供应链。

在实施煤改生物质技术时，农村地区还需考虑生物质资源的可持续性。确保资源的可持续供应是实现长期的散煤治理目标的关键因素。要实现这一点，农村地区需要制定合理的生物质资源管理策略，包括合理的收获和利用方法，以避免对生态系统造成不可逆转的损害。

4.3.3.2 煤改电

空气源热泵热风机、空气源热泵热水机、蓄热式电取暖等煤改电技术需要可靠稳定的电网条件。首先是电网容量，因为电取暖设备需要消耗大量的电力来提供供暖服务，因此，如果电网容量无法满足电取暖设备的高功率需求，就会导致局部电网过载、电压下降或电力供应不稳定等问题。其次是电力调度和管理，在电取暖设备大规模接入时，需要进行合理的负荷管理和电力调度，以确保电力系统的稳定运行。可以使用先进的智能电网技术、能量储存系统和负荷管理技术，以根据实时的电力供需情况灵活调整电力分配和调度。

山西省农村地区的电网覆盖率相对较高，绝大部分农村地区已经实现了电力

供应，但仍存在以下问题。

(1) **供电覆盖率**：一些偏远地区或深山区仍存在供电不足或供电不稳定的情况；

(2) **电网设施**：主要由中低压配电线路组成，输电线路和变电站的建设相对较少，限制了电力输送和分配的能力。

(3) **电力质量和稳定性**：某些地区存在电网设施老化和供电设备的限制问题，电压波动、频率不稳定和电力中断等情况可能较为常见。

(4) **电力调度和管理能力**：缺乏先进的智能电网技术和能量储存系统，电力调度和供应的灵活性较低。

因此，在实施煤改电技术时，应首先对待改造地区的电网条件进行综合评估，确保电力输电和配电能力达标以及电力系统的质量性和稳定性满足要求。各煤改电技术所需的电网容量如表 4-8 煤改电实施条件所示。

表 4-8 煤改电实施条件

| 技术路径 | 实施条件 |
|--------------|---------------------------|
| 空气源热泵热风机/热水机 | 单户电网容量 $\geq 5\text{kW}$ |
| 碳晶电采暖 | 单户电网容量 $\geq 8\text{kW}$ |
| 蓄热式电采暖 | 单户电网容量 $\geq 10\text{kW}$ |

4.3.3.3 煤改太阳能

反射镜太阳能集热供热技术的实施条件是所在地区太阳能资源丰富，每户可提供 20 m^2 左右的设备安装面积。

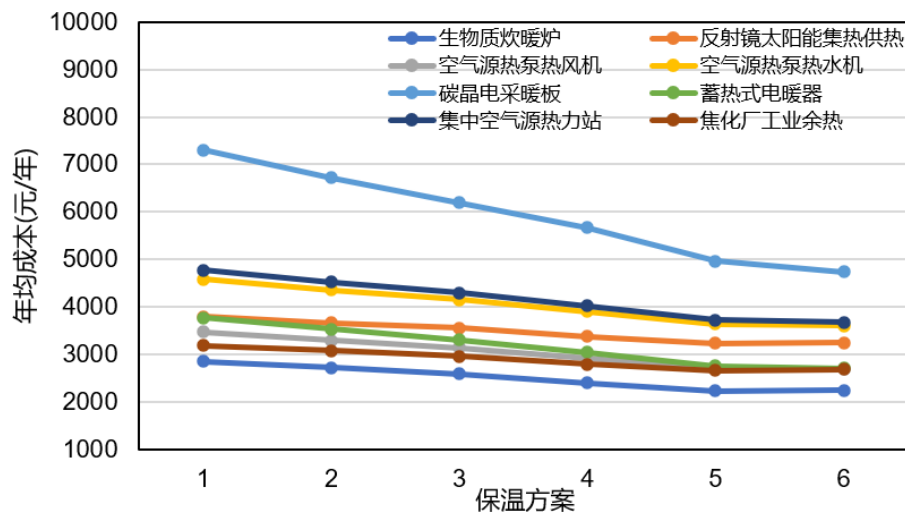
4.3.4 结果分析

4.3.4.1 农网改造

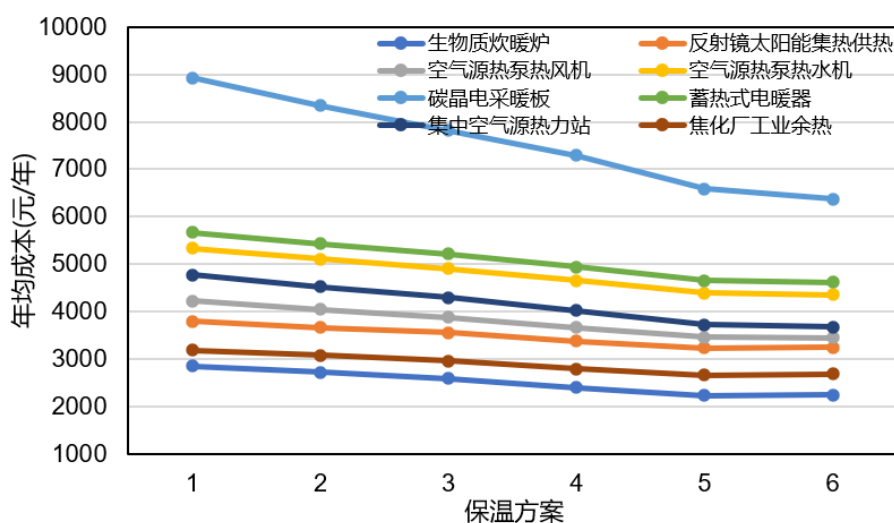
根据实际调研数据和当地的能源价格，不计政府补贴，计算各技术路径的年均成本，并绘制相应的年均成本对比图。其中，横坐标的 1~6 为数字分别对应前述六种围护结构保温改造方案，1 代表无方案；纵坐标表示各技术路径的年均成本；不同颜色的曲线分别代表不同的技术路径。

图 4-26 (a) (b) 分别是无农网改造费用和有农网改造费用的各技术路径的年均成本对比图，用户采暖模式均为 24h 连续采暖。从图中可以直观看出，保温成本付出越多，建筑的保温性能越好，各技术的年均成本就越低；其中户用生物

质炊暖炉（燃料购买）技术经济性最优，年均成本不超过 3000 元；碳晶电采暖技术的经济性相对最差，必须通过建筑保温改造的方式来降低成本；当不需要农网改造，且保温改造投入较大时，空气源热泵热风机技术显露出一定的优势。



(a) 无农网改造



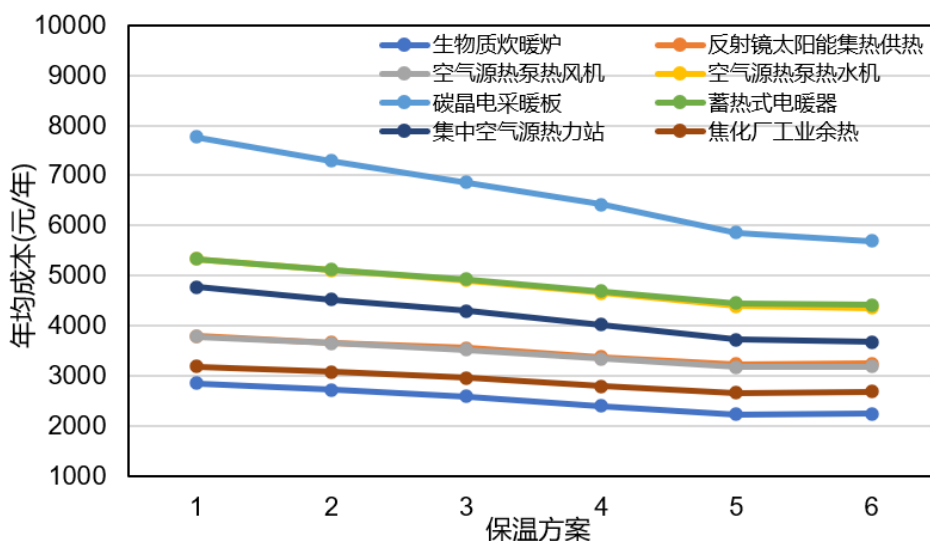
(b) 有农网改造

图 4-26 无行为节能年均成本对比图

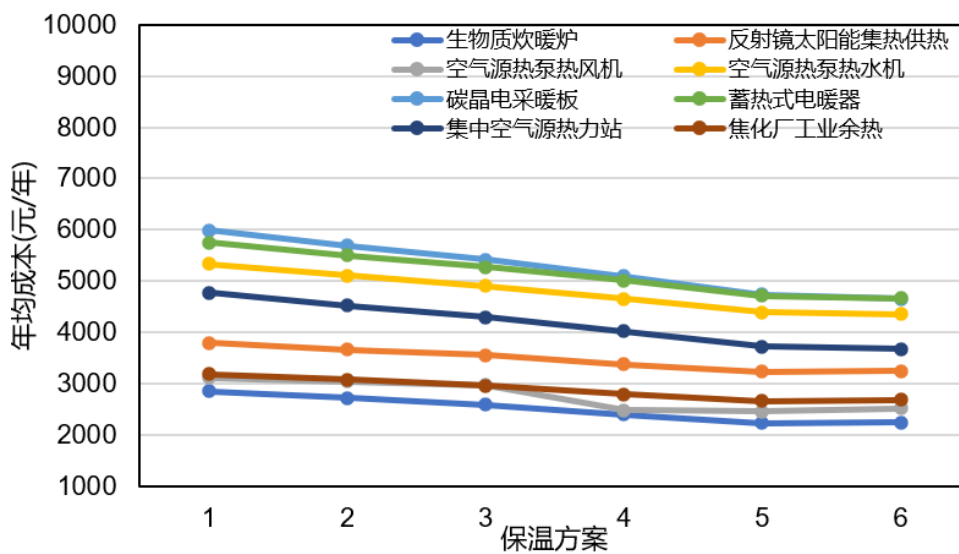
农网改造费用是影响煤改电技术经济性的重要因素。经过测试研究，两台空气源热泵热风机与一台空气源热泵热水机运行所需的电网容量均为 5kW，而碳晶电采暖板与蓄热式电暖器则需要 8~10kW。因此，当农户的电网条件为 3kW，农网改造费取 2000 元/kVA 时，初投资将增加 7500~20000 元，年均成本将增加 750~2000 元。

4.3.4.2 用户采暖模式

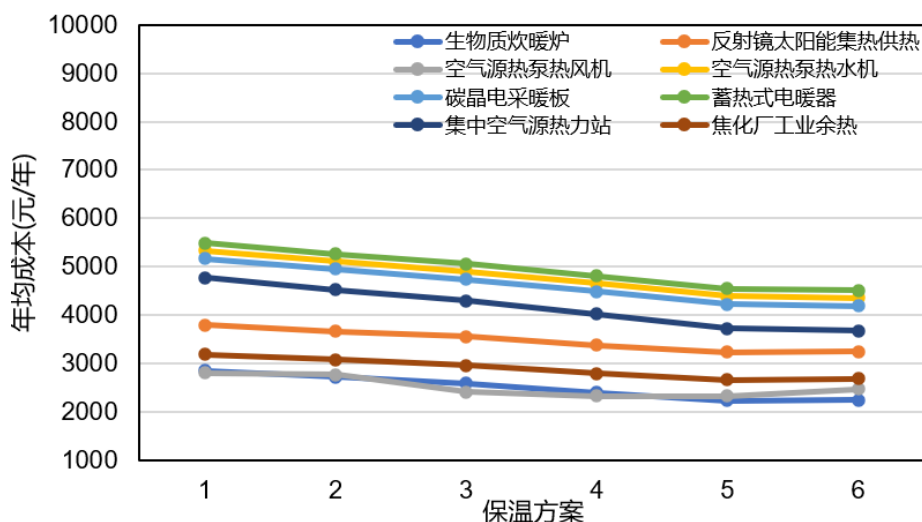
在初投资包含农网改造费用的情况下，空气源热泵热风机、碳晶电采暖和蓄热式电采暖的用户行为节能率分别为 17%、43%、55%时，相应的计算结果如图 4-27 所示。



(a) 行为节能 17%



(b) 行为节能 43%



(c) 行为节能 55%

图 4-27 行为节能年均成本对比图

从图中可以看到,当用户具有行为节能时,碳晶电采暖、空气源热泵热风机、蓄热式电采暖技术的年均成本均有明显的下降。在行为节能 43%,保温方案采取方案四(初投资 2817 元;节能率 25.3)时,空气源热泵热风机技术的年均成本与生物质炊暖炉技术持平。但之后随着保温改造投入加大,空气源热泵热风机的年均成本出现回弹,这是因为在“免费”的用户行为节能的影响下,保温带来的节能效果不足以抵消其投入成本。因此,当农户本身具有较大的行为节能时,应避免做过多的建筑保温投入。蓄热式电暖器在用户行为节能为 43%时年均成本不降反升,这是因为该技术的节能主要依靠谷电蓄热,但在本文设定的行为节能 43%的取暖模式下(卧室 20pm-22pm+客厅 7am-20pm),卧室和客厅都绕过了谷电时间段(22pm-8am),所以运行费基本与电直热技术相似。因此可以看出,蓄热式电采暖虽然可以实现按需供能,随时启停,但使用时间仍受峰谷电政策的限制,灵活性稍低于热泵热风机和电直热技术。

图 4-27 展示的均是在初投资包含农网改造费用的基础上进行的经济性对比分析。从中可以看出空气源热泵热风机、碳晶电采暖等分散式煤改电技术在用户行为节能上的潜力和优势。当初投资不包含农网改造费用且用户行为节能率为 55%时,各技术路径的年均成本对比如图 4-28 所示。

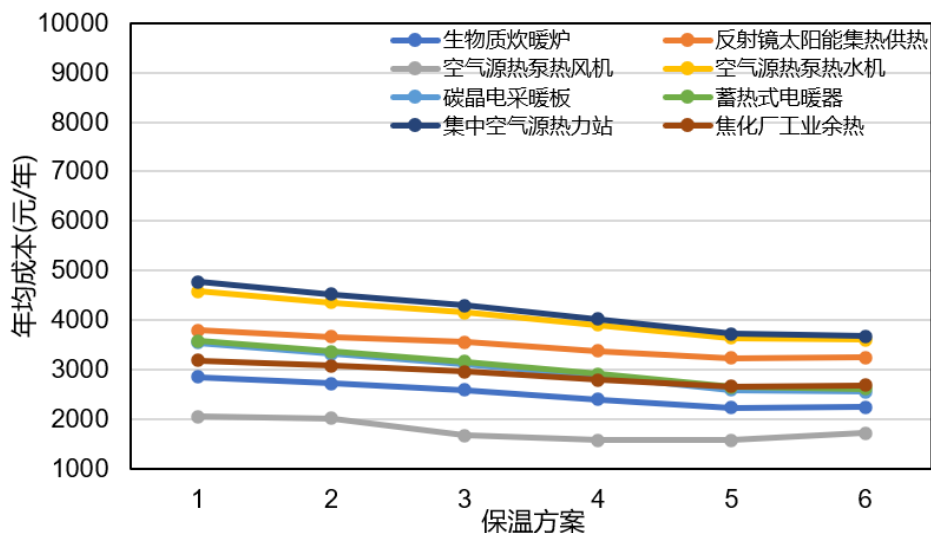
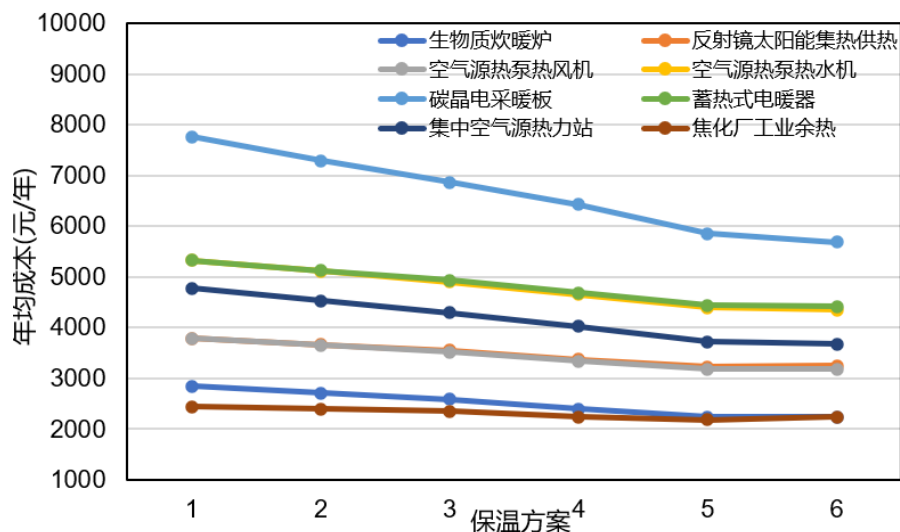


图 4-28 无农网改造且行为节能 55%年均成本对比

可以看出,在该条件下空气源热泵热风机具有明显的经济优势。因此,在电网条件合适的农村地区,应首先考虑推行空气源热泵热风机技术。

4.3.4.3 室温

前述分析都是在工业余热计算室温为 22°C , 其余技术的计算室温为 18°C 的条件下进行的对比分析。理想情况下,采用工业余热供热的用户室温基本维持在 18°C 左右,在此条件下,计算包括农网改造费且用户行为节能为 17% 下各技术路径的年均成本,结果如图 4-29 所示。

图 4-29 室温均为 18°C 年均成本对比

可以看出,当计算室温为 18°C 时,工业余热技术路径的年均成本更低,但该优势在实施围护结构节能改造后有所削弱。因此,若某农村地区采取局部集中供热的方式时,可以不进行围护结构的节能改造。

4.3.4.4 经济效益分析

经前所述，山西省中部城市群待改造散煤用户 53 万户。若分别采用前述节能改造方案，所需花费及带来的节能效益如表 4-9 所示，改造所需总投资预估 7.7 亿~25.9 亿元之间，可节约 4.4~19.0 亿度电。

表 4-9 节能方案总投资及效益估算表

| | 保温措施 | 节能率 (%) | 总投资 (亿元) | 能耗 (亿 kWh) | 节约能耗 (亿 kWh) |
|-----|------------------------------|------------|-------------|---------------|-----------------|
| 方案一 | 不保温 | 0 | 0 | 45.4 | 0 |
| 方案二 | 东外墙聚氨酯板内保温 5cm | 9.6 | 7.7 | 41.1 | 4.4 |
| 方案三 | 东西外墙酚醛内保温 5cm | 18 | 13.1 | 37.3 | 8.2 |
| 方案四 | 北外墙岩棉板内保温 3cm | 25.3 | 14.9 | 33.9 | 11.5 |
| 方案五 | 北外墙酚醛内保温 4cm | 36.8 | 19.1 | 28.7 | 16.7 |
| 方案六 | 北外墙酚醛内保温 5cm+东 外墙保温壁纸 5mm | 41.8 | 25.9 | 26.4 | 19.0 |

分别计算最有利条件和最不利条件下（表 4-10）散煤治理技术综合方案的静态投资回收期，如表 4-11、表 4-12 所示。

表 4-10 条件说明

| | 农网改造 | 用户采暖模式 | 室温 |
|-------|------|----------|---------------------|
| 最有利条件 | 不需要 | 行为节能 55% | 18℃ |
| 最不利条件 | 需要 | 无行为节能 | 工业余热 22℃，其 余 18℃ |

表 4-11 最有利条件下的综合方案投资回收期

| | 保温方案 一 | 保温方案 二 | 保温方案 三 | 保温方案 四 | 保温方案 五 | 保温方案 六 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 生物质炊暖炉-购买 | 2.8 | 3.1 | 3.3 | 3.2 | 3.2 | 3.5 |
| 空气源热泵热风机 | 2.6 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.0 | 3.4 |
| 空气源热泵热水机 | 9.6 | 8.9 | 8.3 | 7.7 | 7.0 | 7.0 |
| 碳晶电采暖板 | 3.0 | 3.3 | 3.4 | 3.2 | 3.1 | 3.4 |

| | | | | | | |
|------------|-------|-----|------|------|------|------|
| 蓄热式电暖器 | 2.8 | 3.2 | 3.3 | 3.0 | 3.1 | 6.4 |
| 反射镜太阳能集热供热 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.2 | 6 | 6.2 |
| 焦化厂工业余热 | 148.3 | 107 | 86.7 | 73.9 | 60.5 | 57.5 |
| 集中空气源热力站 | -22 | -28 | -35 | -43 | -68 | -92 |

表 4-12 最不利条件下的综合方案投资回收期

| | 保温方案 | 保温方案 | 保温方案 | 保温方案 | 保温方案 | 保温方案 |
|------------|------|-------|-------|-------|------|------|
| | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 | 六 |
| 生物质炊暖炉-购买 | 2.8 | 3.1 | 3.3 | 3.2 | 3.2 | 3.5 |
| 空气源热泵热风机 | 7.9 | 7.7 | 7.5 | 7.1 | 6.6 | 6.8 |
| 空气源热泵热水机 | 14.2 | 12.8 | 11.8 | 10.8 | 9.7 | 9.6 |
| 碳晶电采暖板 | -9.7 | -14.8 | -24.8 | -53.3 | 72.8 | 38.1 |
| 蓄热式电暖器 | 17.1 | 14.9 | 13.4 | 12.1 | 10.7 | 10.6 |
| 反射镜太阳能集热供热 | 6.4 | 6.4 | 6.4 | 6.2 | 6 | 6.2 |
| 焦化厂工业余热 | -77 | -128 | -277 | -7038 | 194 | 138 |
| 集中空气源热力站 | -22 | -28 | -35 | -43 | -68 | -92 |

由表 4-12 可以看出,即便是最有利条件下,集中供热项目投资都无回收期。所以农村地区应该坚持分散式供热技术路径。生物质炊暖炉、空气源热泵热风机、反射镜太阳能集热供热的投资回收期较短,可实施性较强。空气源热泵热水机技术方案在建筑保温性能较好时可以在寿命周期内实现回收;碳晶电采暖和蓄热式电采暖等电直热电蓄热技术只有在电网容量足够,无需进行电网改造且农房保温性能较好时具有可实施性;反射镜太阳能集热供热技术不受电网条件影响,投资回收期基本在 6 年左右,受建筑节能性的影响小。

4.3.5 小结

根据以上计算,得出结论如下:

(1) 农村地区的散煤替代宜走分散式供热技术,在热源免费或价格极低的情况下可适宜推广集中供热。

(2) 经济型农宅靶向保温改造能有效降低采暖能耗,投入 2000~3000 元,可实现 30%左右的节能率,从而提高技术方案的经济性。尽管投入成本越多,保

温效果越好，但当农户本身具有较大的行为节能时，应避免做过多的建筑保温投入。

(3) 生物质炊暖炉技术年均成本最低，但适合在生物质资源禀赋、生物质成型燃料购买渠道及质量有保障的地区推广；现在市场上的生物质炉具鱼龙混杂，优劣产品之间燃烧效率和排放差别巨大，政府需建立严格的市场监督管理机制，以保证炉具产品的可靠和稳定性。

(4) 农村电网条件是影响煤改电技术经济性的重要因素，在无需进行电网改造的情况下，空气源热泵热风机的优势明显。

(5) 反射镜太阳能集热供热技术的经济性较优，适合在生物质资源匮乏、无电网改造条件，且太阳能资源较为丰富，设备安装空间 ($\geq 20 \text{ m}^2$) 足够的农村地区推广。

(6) 蓄热式电暖器需靠峰谷电政策支持以降低运行费，用户的使用时间受到限制，行为节能潜力小，且其较为笨重，使用过程中设备表面温度较高，存在安全隐患；碳晶电采暖等电直热技术的运行费用较高，需要靠围护结构节能改造及用户行为节能降低运行费；除非前几种技术均无法采用的情况，不建议采用电直热和电蓄热。

4.4 中部城市群农村散煤清零可持续发展模式

4.4.1 中部城市群散煤清零实施存在的问题

(1) 农村建筑节能尚未推行

山西省农村建筑以砖混结构、砖木结构为主，墙体、屋顶、地面等较少采取保温措施，窗户保温效果也不理想，冬季渗透风较为严重，且空间高、布局大，能耗高，因此首先需要加强建筑围护结构节能保温。但目前散煤清零政策中并未包括建筑节能改造。根据山东省商河县实际试点表明，加装墙体保温、阳光房、房屋有吊顶的农宅室内温度普遍比未采取任何节能措施的农宅高 $4\sim 5^\circ\text{C}$ ，同时，供热季能耗降低 $1/3$ 以上。因此，应该优先对农宅，尤其是农户主要活动场所进行适度的、符合实际的节能保温改造，可以获得最佳的投入产出比，是农村地区散煤清零的基础条件。

根据对典型村落的调研，我们发现 70% 以上农户节能意识较差，并且对农房

围护结构节能改造没有充分正确的认识,甚至部分农户认为改造是一种浪费且有抵触心理。另一方面从政府方面看,受限于财政资金,在无中央财政补贴的情况下,地方政府无足够的资金支持大面积推广农房围护结构节能改造,且地方政府还未探索出适宜的技术方案。

(2) 实施方案趋同、未实行试点先行

在散煤清零改造工程推进过程中,受散煤治理项目“时间紧、任务重、涉及面广”的影响,忽略了技术路径的正确与否是散煤清零项目投融资成功可持续发展的必要前提。在技术路径选择过程中,大多借鉴城市的经验,而未根据本地实际进行深入的研究和科学的论证,建设试点工程。

各区县在制定实施方案时过于任务化,缺少对区域整体的全面认识,以及对基础设施条件、本地资源、经济条件等影响因素的客观剖析,致使各区县清洁供热改造方案和技术路径相似度极高。基本以工业余热集中供热、热泵集中供热形式为主,“煤改电”、“煤改气”为辅,往往忽视广大农村地区丰富的生活垃圾、畜禽粪污、农作物秸秆等生物质资源量以及太阳能资源。截止到2022年底,集中供热工程和“煤改电”实施约占整个散煤清零工程量的85%左右,其中集中供热占比约70%,太阳能、生物质等利用仅有少量示范。

(3) 项目投资回报机制不健全,社会资本积极性不高

根据前期的调研及数据分析,中部城市群散煤清零项目以集中供热项目为主,项目普遍存在初期设备投资费用巨大、投资回收期较长、运行成本偏高等问题,同时农户收费率较低,且难以覆盖成本。项目对政府补贴依赖程度极高,政府补贴是否及时、可靠成为影响企业偿债能力的重要因素,企业风险较高。目前部分项目处于亏损状态,如平遥县西达蒲村空气源热力站项目,户均初投资4万元左右,政府补贴1.3万元/户左右,农户承担0.9万元左右,其余部分企业承担,但项目运行成本为65元/m²,收费价格21元/m²,即使该政府按照运行费补贴,该项目也无回收期。

为解决项目推动过程中遇到的资金缺口大、融资困难等问题,山西省生态环境厅多次组织召开清洁取暖多元化投融资推介研讨会,邀请国开行山西分行、农发行山西分行、兴业银行太原分行、中国银行山西分行、农业银行山西分行等金融机构业务以及相关企业参与,但金融支持清洁取暖的主要力量仍是银行信贷,

支持形式较为单一。且政府并未制定其它如税收优惠、特许经营等方面的政策，因此社会资本积极性依然不高，导致多数项目无法按时完成改造，2022 年项目总投资约 146 亿元，但完成投资仅 40 亿元，散煤清零项目投资完成率仅 27%。

（4）参与企业非头部企业，资金能力有限

目前，散煤清零项目多为各市政府通过招投标形式选择承担企业，且绝大部分企业为本地的民营企业，其中“煤改气”项目多由当地燃气公司承担，“煤改热泵集中供热”项目中标企业多以设备厂商、或平台运营公司为主。“煤改余热集中供热”也以民营供热公司为主承担。散煤清零项目均无行业内头部企业作为主导。很多项目在长期政府补贴不到位的情况下，会面临着停运的风险。

（5）可再生能源开发利用尚未实现规模化应用

农村能源转型主要依靠大力发展农村丰富的可再生能源，主要包括太阳能、生物质能、小水电等，能够有效促进农村碳中和，通过就地利用能够改善居民生活条件，若能采取合适的商业模式，所需投资并不高于“煤改电”、“煤改气”以及集中供热等，是可持续的发展路径。但是目前中部城市群可再生能源应用项目仅有极少量示范，如介休市实施新型太阳能跨季节土壤蓄热系统供热项目，供热面积 1 万平方米，未形成规模化的散煤清零拓展项目，带动社会资本的积极性，并且各项配套政策不完善。

4.4.2 分散式替代散煤清零模式

自 2017 年国家推行北方地区清洁取暖改造以来，尽管北方各地区清洁取暖成果显著，但是农村地区一直是清洁取暖推进过程中的“短板”，也是诸多城市实施清洁取暖的痛点和难点。针对近年来在推进北方清洁取暖工作中存在的主要问题，清华大学从初投资、使用要求、取暖运行费和区域整体规划等多个维度来综合考虑，提出适合我国农村实际情况的“四一模式”，并在河南鹤壁及山东省商河县进行了试点示范。2018 年 7 月和 2019 年 3 月，上述两地分别召开了农村清洁取暖示范项目现场会。“四一模式”总结起来是：初投资每户平均不超过一万元、无补贴的年取暖运行费每户不超过一千元、设备一键式智能化操作，并整体建立在一个合理顶层规划之上（图 4-30）。



图 4-30 农村散煤替代“四一”模式示意图

山西省中部城市群属于温带大陆性季风气候，冬季干冷漫长，冬季采暖期约 150 天，农户习惯间歇性采暖，冬季采暖能耗较高。中部城市群散煤清零行动是清洁取暖项目的延续，应避免重复清洁取暖推行过程中错误和问题。基于 4.3.4 散煤清零技术方案的分析可以发现，农村地区散煤清零应走分散式供热模式，并且农房结构节能改造先行。采用经济型靶向保温技术，改造成本 2000~3000 元，节能率 30%左右，同时选择合理的技术，如在电网条件允许的情况下，选择空气源热泵热风机技术，在太阳能资源丰富的地区选择反射镜太阳能集热供热技术，完全可以实现“四一”模式。

4.4.3 可再生能源替代下的散煤治理模式

2022 年 10 月，山西省发展和改革委员会、山西省能源局印发《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的实施意见》，提出到 2030 年，基本建立能源绿色低碳发展基本制度和政策体系，形成非化石能源基本满足能源需求、能源安全保障能力得到全面增强的能源生产消费格局，要大力发展分布式光伏系统，建设新型建筑电力系统。

目前，中部城市群散煤清零项目主要依靠政府推动，依赖政府补贴。并且散煤清零项目多为公益性较强的项目，盈利水平低，导致融资难，完成率低。基于此，山西省未来农村散煤治理应依托太阳能、生物质资源开发，打破以往“政府为主、企业为辅”的格局，形成“以减污降碳为目标，企业为主、政府推动、农户参与”的良性发展模式，如图 4-31 所示。

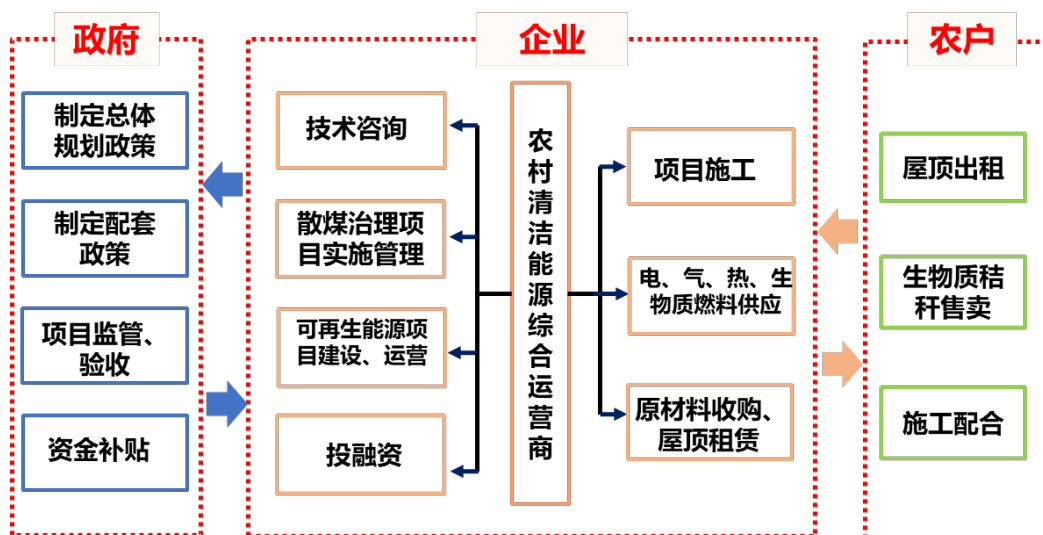


图 4-31 中部城市群未来散煤治理的理想模式

针对社会资本积极性不高、融资难的问题，应将散煤治理项目与可再生能源开发组合、肥瘦搭配，拓宽项目的收益来源，提高企业投资积极性。同时发挥头部企业的作用，以其作为主体，设立农村清洁能源综合运营商，建立以区域、县为单位整体同步实施散煤治理、可再生能源开发。

地方政府以区域、县市为单位，将散煤治理和可再生能源开发打包成散煤治理综合项目，通过招投标形式选择农村清洁能源综合运营商承接。对散煤治理综合项目进行整体把控并给予资金补贴，农户主要参与和配合散煤治理综合项目的实施。

5 临汾市社会经济与能源资源现状

2020年5月12日，习近平总书记在山西考察时强调：在转型发展上，山西既要有紧迫感，更要有长远战略谋划，要久久为功，正确的东西就要坚持下去，不要反复、不要折腾。从共和国能源重化工基地到新时代能源革命排头兵，山西省正在经历一次彻底的能源转型。

临汾作为典型的资源型城市，入选山西省首批能源革命综合改革试点，“十三五”期间临汾市在能源转型方面取得了一定的成果，新能源产业发展正在进入新的阶段。面对国家“碳达峰、碳中和”的战略目标，临汾市应以可再生能源开发为抓手，推动能源产供用体系转型和产业升级，推动城乡协同发展，逐步满足临汾市人民对美好生活的向往和追求。因此，本项目以临汾市作为典型试点，研究临汾市能源转型的可持续发展之路。

5.1 临汾市社会经济发展现状

临汾市为山西省地级市，位于山西省西南部，晋冀豫三省交界。位于山西西南部，东倚太岳，与长治、晋城为邻；西临黄河，与陕西延安、渭南隔河相望，北起韩信岭，与晋中、吕梁毗连；南与运城接壤。总面积 20302 平方千米，辖 1 个市辖区、14 个县，代管 2 个县级市。截止 2022 年 12 月，全市常住人口 390.66 万人，其中城镇常住人口 213.98 万人，占总人口比重 54.78%，乡村常住人口 176.68 万人，占 45.22%。



图 5-1 临汾市行政区划图

根据临汾市统计局年鉴及统计公报数据，2022 年临汾市实现地区生产总值 2227.9 亿元，占山西省生产总值总量的 8.98%，比上年增加 318.4 亿元，增长 16.7%。人均生产总值为 5.69 万元，比上年增加 0.85 万元，增长 17.6%。2022 年临汾市人均生产总值省内排名第 9，低于全国平均水平（8.57 万元），近 5 年生产总值和人均生产总值稳步上升，如图 5-2 所示。

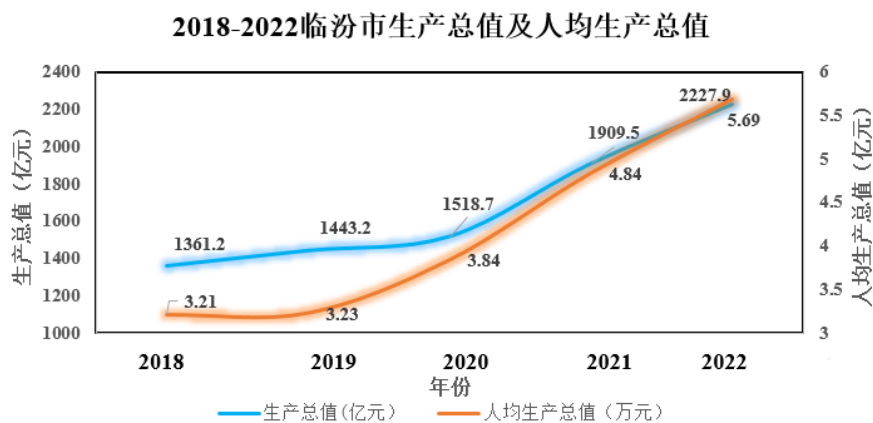


图 5-2 2018-2022 年临汾市生产总值及人均生产总值统计图

临汾市作为资源型城市，第一产业占比长期处于较低水平，近 5 年来第三产业逐步下降。2022 年临汾市第一产业占比为 7.1%，第二产业占比为 55.8%，第三产业占比为 37.1%，第二产业占比超过 50%，工业比较发达，近 5 年内，2019 年第三产业占比最高，为 50%。

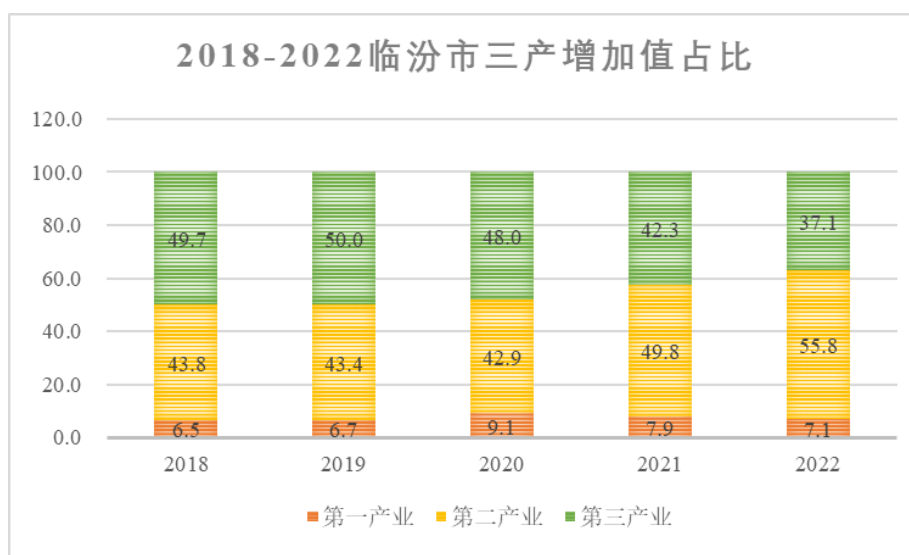


图 5-3 2018-2022 年临汾市三产增加值占比

5.2 临汾市能源生产消费现状

5.2.1 临汾市能源生产现状

2022 年，全市规上工业生产原煤 8782.0 万吨，同比增长 8.5%。全市规上工业生产洗精煤 5105.7 万吨，同比增长 9.5%。全市规上工业发电量 258.0 亿千瓦时，同比增长 3.9%。全市规上工业生产焦炭 1490.6 万吨，同比下降 7.6%。能源生产以煤制品为主，占能源生产总量的 90%以上。一次能源生产总量合 5088.6 万 tce，同比增长 10.6%，二次能源（电力、焦炭、煤气、沼气等）生产折合 6506.3

万 tce，同比增长 21.5%。电力生产以火电为主，占约 76%。

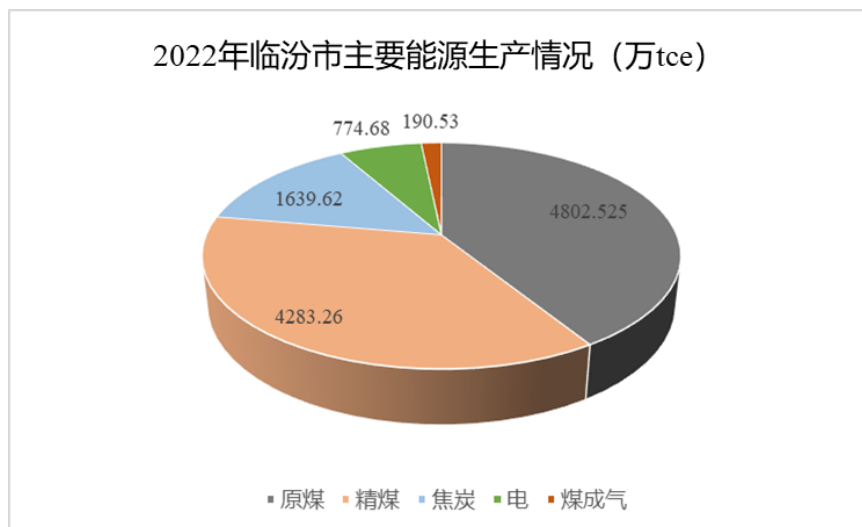


图 5-4 临汾市 2022 年能源生产量情况

5.2.2 临汾市能源消费现状

根据《临汾市统计年鉴 2023》，2022 年，临汾市全社会能源消费总量 3879 万 tce，其中煤碳燃料占比约 70%，天然气占比约 3%，焦炉煤气占比 8%，一次电力消费占比 13%，高炉煤气占比约 5%，其它能源占比 1%。煤炭依然是能源消费的主力军。煤炭消耗工业行业，占全市总能耗的 85%以上，主要为规上企业。能耗排名前 6 位的分别是化工业，建材业，黑色冶炼业，炼焦业，煤炭业，发电业，6 个行业能耗合计占比达 98.9%。

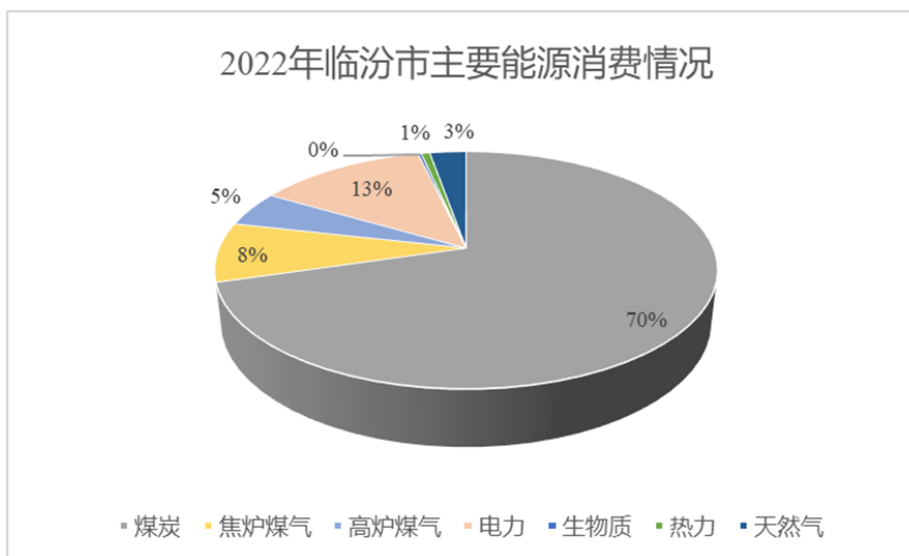


图 5-5 2022 年临汾市能源年消费结构

5.3 临汾市可再生能源开发利用现状

5.3.1 可再生能源资源现状

5.3.1.1 太阳能资源

临汾市太阳总辐射量在 5020~5545MJ/m²·a 之间，根据《太阳能资源评估方法》中关于太阳能资源丰富程度等级评定标准，为资源丰富区。根据临汾市气象站 2018~2022 年统计资料，该地区的平均年日照时数在 2140~2642 小时之间，日平均日照时数在 5.24h~6.29 小时之间。

根据临汾市统计局数据，临汾市农村常住人口 176.68 万人，共有农户 44.17 万户。目前农村屋顶基本处于闲置状态，大量农村屋顶可用于铺设光伏板，既可满足农户自身用能，还可以向城市输出清洁电力。为实现“碳达峰、碳中和”目标，农村屋顶资源已经成为亟待开发的重点对象。项目组以谷歌遥感卫星图像作为数据基础，采用神经网络图像识别的方法，识别农村屋顶面积，进而分析临汾市农村屋顶光伏发电潜力。

根据实地调研总结，临汾市典型农户屋顶示意图如下所示，临汾市农村以人字形屋顶（斜屋顶）和平屋顶为主，各户形成独立院落。



图 5-6 常见农村屋顶类型

不同屋顶类型的光伏板安装方式也有所区别，在农村建筑主要可以分为三类，平屋顶可选择按最优倾角安装光伏阵列，也可直接平铺于屋面，对于南向斜屋顶则平铺安装于南向斜面，东西向斜屋顶则平铺安装于东西斜面。因此，卫星图像识别的目标是将上述三类屋顶识别出来并进行面积统计。

卫星图像识别的结果如图 5-7 所示，不同颜色代表不同的屋顶类型。能够较好地识别出村内各类建筑屋顶轮廓，识别精度在 92%以上。

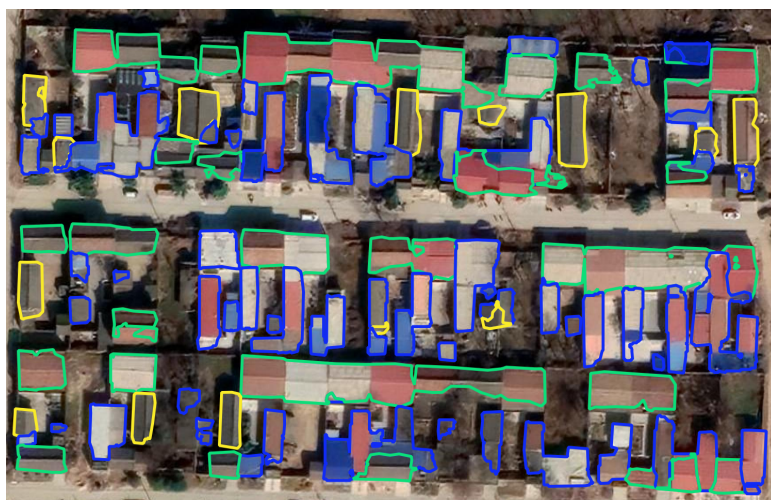


图 5-7 卫星图像识别结果

按此方法应用于临汾市全域的农村区域，最终得到临汾市农村屋顶投影面积约为 1.03 万平方米。农宅以平屋顶和南向斜屋顶为主，面积占比约为：平屋顶 45.2%，东西斜屋顶 11.9%，南向斜屋顶 42.9%，以若干村落为例，其比例如图 5-8 所示：

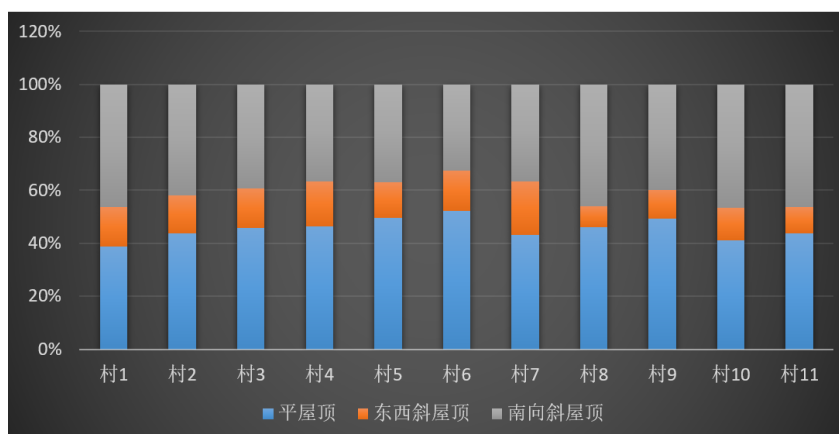


图 5-8 各类型屋顶占比情况

临汾市农村多为单层农宅，考虑维护检修、相邻光伏板遮挡等因素，按照农村建筑屋顶面积的 50%可铺设光伏板计算，临汾市屋顶光伏可安装光伏板面积合计 5150 万 m^2 ，总装机潜力约为 618 万 kW，农村屋顶光伏年发电潜力约为 120 亿 kWh。按照发电折算标煤指标 0.308kgce/kWh 计算，农村屋顶光伏发电潜力折合标准煤 369.6 万 tce。临汾市各区县发电潜力如图 5-9 所示。

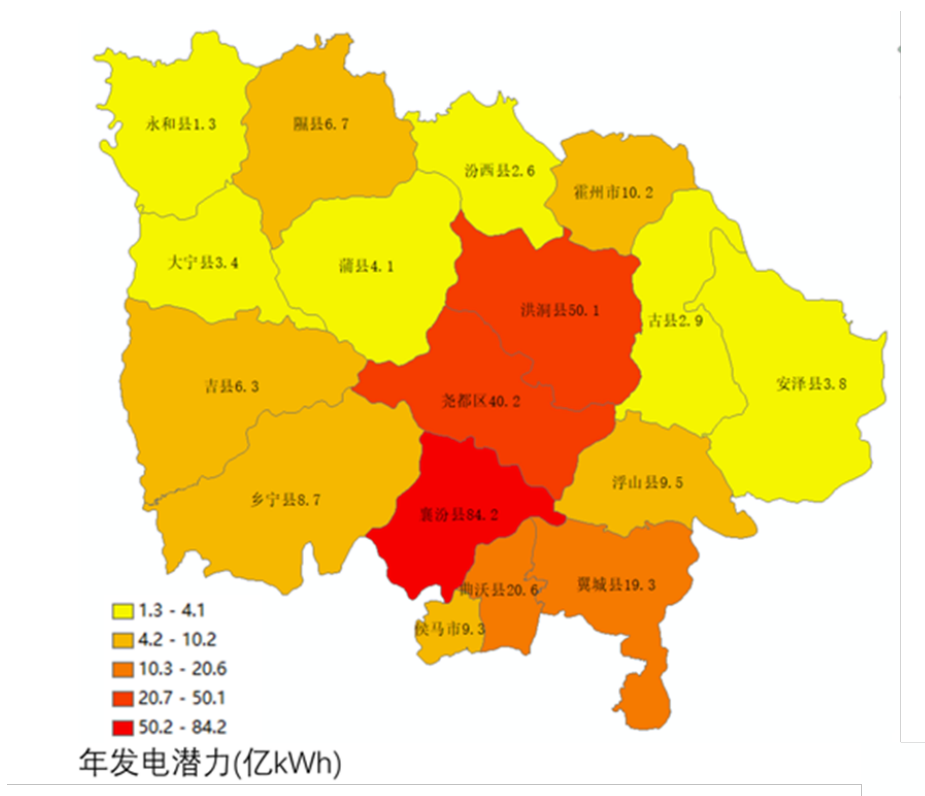


图 5-9 临汾市屋顶光伏发电潜力

5.3.1.2 生物质资源

生物质能源是一种零碳排放的能源，燃烧过程所产生的二氧化碳又会在下一轮的生长过程中被完全吸收。临汾市具有丰富的生物质资源量，主要有农作物秸秆、果树剪枝、禽畜粪便、生活垃圾等。临汾市是全省森林资源大市，森林面积 776.48 万亩，森林覆盖率 25.9%。目前利用量较少，且大多数以直接散烧为主，需要大力开发将其作为重要的清洁低碳燃料。

(1) 临汾市资源总量情况

根据《临汾市 2022 年国民经济和社会发展统计公报》提供的数据，2022 年全市粮食种植面积 504.49 千公顷，粮食总产量达到 218.82 万吨。主要种植的农作物有小麦、玉米、谷子、果树、薯类等。

目前国际上通用的农作物秸秆资源量统计分析方法是根据粮食产量和不同农作物的草谷比，即秸秆和粮食产量的比例关系进行计算，从而得到对应的秸秆产量情况，农作物秸秆资源量可用式（5-1）估算：

$$S_n = \sum_{i=1}^n s_i d_i \quad (5-1)$$

式中： S_n —农作物秸秆资源总量，万 t；

i —农作物秸秆资源种类编号；

S_i —第 i 种农作物秸秆的产量，万 t；

d_i —第 i 种农作物秸秆的草谷比，kg/kg。

进行计算时所采用的各种农作物的草谷比数量关系如表 5-1 所示，其中稻谷、小麦、玉米等作物由于种植面积大，计算时需要重点考虑。

表 5-1 常见农作物的草谷比

| 作物种类 | 草谷比 | 作物种类 | 草谷比 | 作物种类 | 草谷比 |
|------|------|------|------|------|------|
| 稻谷 | 1.1 | 豆类 | 1.98 | 麻类 | 1.0 |
| 小麦 | 1.24 | 薯类 | 0.19 | 糖类 | 0.1 |
| 玉米 | 0.94 | 棉花 | 3.0 | 花生 | 1.26 |
| 其他杂粮 | 1.0 | 油料 | 1.23 | 高粱 | 1.0 |

按照临汾市统计局的数据，2022 年临汾市全年主要粮食产量 213.1 万吨，对应的秸秆理论资源量和可收集资源量分别为 225.5 万 t 和 189.8 万 t，其中主要为玉米、小麦，占到总量的 90% 以上，如表 5-2 所示。

表 5-2 临汾市主要农作物产量、秸秆资源量基本情况

| 作物种类 | 播种面积 (万亩) | 粮食产量 (万 t) | 秸秆理论资源量 (万 t) | 秸秆可收集资源量 (万 t) |
|------|--------------|---------------|------------------|-------------------|
| 玉米 | 383.6 | 117.9 | 110.8 | 102.0 |
| 小麦 | 300.6 | 86.4 | 107.1 | 81.7 |
| 谷子 | 26.3 | 3.5 | 3.9 | 2.9 |
| 豆类 | 14.5 | 1.5 | 3.0 | 2.6 |
| 薯类 | 32.7 | 3.8 | 0.7 | 0.7 |
| 合计 | 757.7 | 213.1 | 225.5 | 189.8 |

临汾市城镇人口按 1.1kg/d 的有机生活垃圾产生量、农村人口按 0.6kg/d 的有机生活垃圾产生量计算。根据临汾市 2022 年 12 月发布的《临汾市 2023 年国民经济和社会发展统计公报》，临汾市城镇常住人口 213.98 万人，农村常住人口 176.68 万人，可以得到全市每年所产生的有机生活垃圾总量约为 124.6 万 t。各区县生物质潜力如图 5-10 所示。

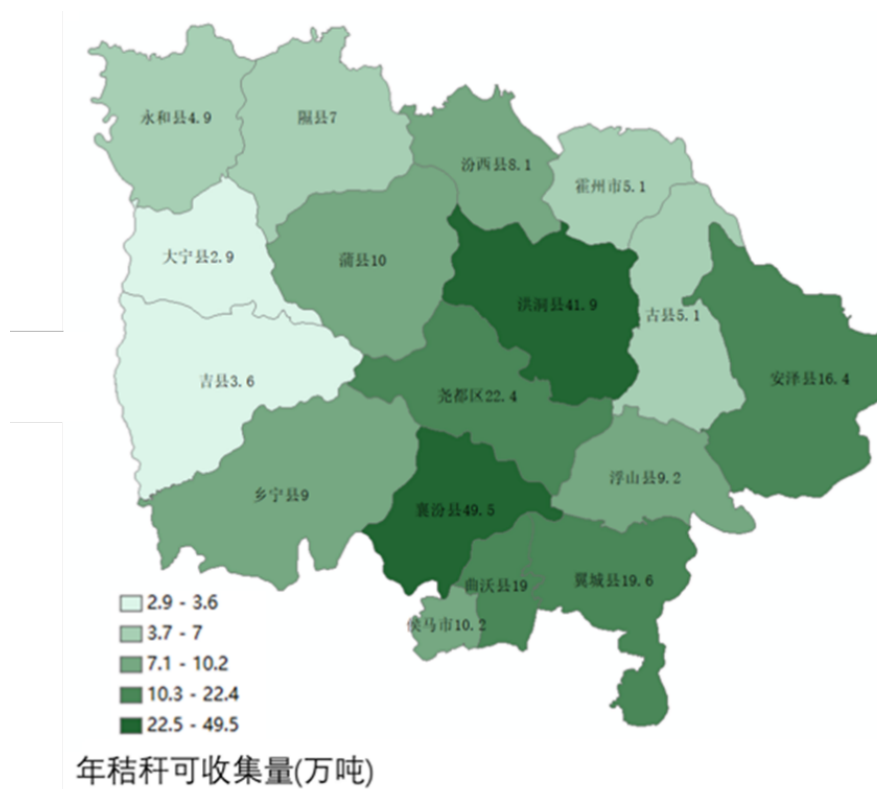


图 5-10 临汾市生物质资源可收集量分布

5.3.2 可再生能源开发利用现状

2022 年，可再生能源装机总量 304 万千瓦，占临汾市发电机组装机容量的 38.64%。可再生能源发电量由 27.07 亿千瓦时增至 65.18 亿千瓦时，年均增长 11.7%。其中风电发电量由 3.06 亿千瓦时增至 11.69 亿千瓦时，年均增长 14.8%；光伏发电量由 5.96 亿千瓦时增至 14.67 亿千瓦时，年均增长 11.9%；余热发电量由 15.27 亿千瓦时增至 33.02 亿千瓦时，年均增长 10.8%；可再生能源发电量占其全部发电量的比例为 23.9%，低于全国平均水平 9.4 个百分点。临汾市近 5 年可再生能源发电量趋势如图 5-11 所示。

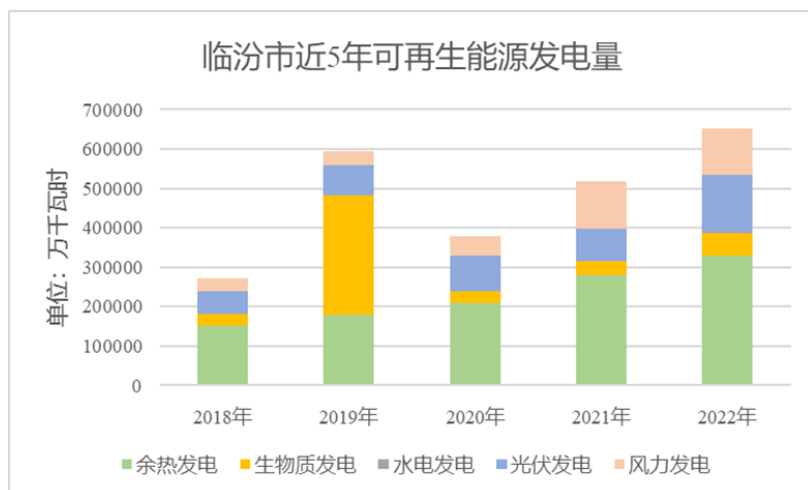


图 5-11 临汾市近 5 年可再生能源发电量

5.3.2.1 太阳能资源

依托扶贫工作，截止到 2022 年底，临汾市共建设 850 座村级光伏电站，装机容量 143.32 万 kW，累计发电 14.67 亿 kWh；2021 年，霍州市、乡宁县入选首批屋顶分布式光伏开发试点县，但尚未全面启动。

5.3.2.2 生物质资源

2022 年，全市农作物秸秆产生量 248.74 万吨，可收集量 205 万吨，综合利用总量 197.76 万吨，综合利用率 92.21%，其中肥料化利用量 165.99 万吨，饲料化利用量 27.77 万吨，燃料化利用仅 3.8 万吨；果树枝条 33.9 万吨，大部分用作农户燃料；畜禽粪污产生量约 1172.77 万吨，利用量约 154.52 万吨，利用率约 89%。临汾市目前有 8 家生物质清洁利用企业。7 个秸秆加工利用厂，年产能力 8.6 万吨，建设秸秆收储运网络，年可消化农作物秸秆 8 万吨。全市建设生物质发电项目 7 项，装机容量 11 万 kW，年发电量 5.79 亿 kWh。

5.3.2.3 风力资源

截止到 2022 年，全市共建风电项目 11 项，风电装机容量 59.2 万 kW，年发电量 11.69 亿 kWh。

5.3.2.4 水资源

截止到 2022 年，全市已建设水电项目 1 项，水电装机容量 0.25 万 kW，年发电量 126.66 万 kWh。

5.3.2.5 余热余压

围绕焦化、钢铁、水泥等支柱产业，临汾市全力发展余热余压发电，共建设余热余压发电项目 23 项，总装机 90.25 万 kW，年发电量 33 亿 kWh。

5.4 临汾市清洁取暖现状

2018 年，临汾市入选第二批北方地区冬季清洁取暖试点城市。截止到 2022 年底，全市共完成清洁取暖改造 7441.29 万 m^2 （未包含 2018 年之前已改造）、58.53 万户，完成率分别为 121%、112%。其中：集中供热完成 2775.3 万 m^2 、19.13 万户；“煤改电”完成 983.11 万 m^2 、8.01 万户；“煤改气”完成 2002 万 m^2 、15.64 万户；超低排放改造完成 1441 万 m^2 、14.41 万户；其他方式（生物质、地热）完成 199 万 m^2 、1.34 万户。整体清洁取暖率 88%，其中城市建成区和县城地区均为 100%，农村地区为 66%。各区县清洁取暖率如图 5-12 所示

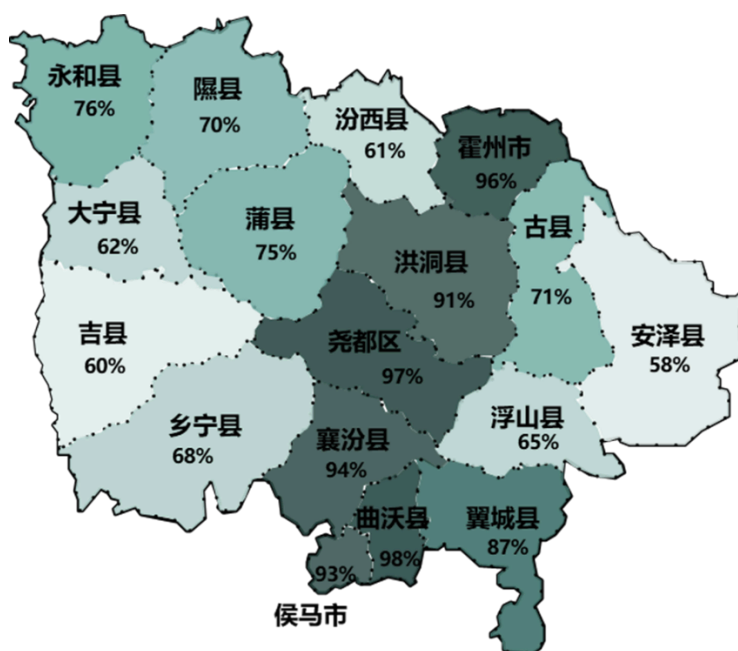


图 5-12 临汾市各区县清洁取暖改造率

城区、城乡结合部及所辖县县城主要以热电联产和燃煤锅炉超低排放改造为主，集中供热无法的城镇区域，以“煤改电”和“煤改气”为主。农村地区以“煤改电”为主，其次为“煤改气”、空气源热泵集中供热、工业余热集中供热。太阳能、生物质等可再生能源利用极少，农村地区农房围护结构节能改造尚未大规模推进，少部分地区进行了围护结构局部改造，如安装保温隔热窗帘以及门窗密封条等方式。全市清洁取暖改造路径分布如图 5-13 所示。

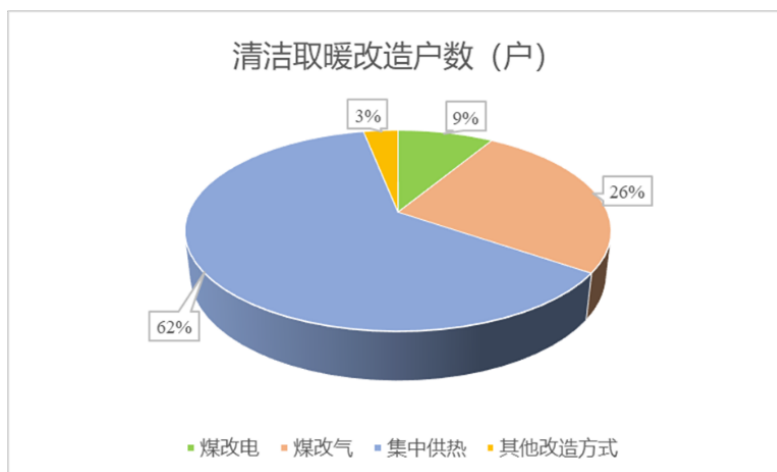


图 5-13 临汾市清洁取暖改造技术路径

对未实施清洁取暖改造地区，临汾市采用洁净煤替代原来的散煤，主要集中在海拔 600 米以上地区，但并未使用洁净煤配套炉具，依然使用传统燃煤炉具，如图 5-14 所示。课题组调研结果显示：户均采暖费约 3000 元以上（洁净煤价格 1600 元/吨），农户有将强的实施分散式煤改电的意愿，但电网设施较差，无法满足整村推进“煤改电”。



图 5-14 洁净煤燃烧炉具

2022 年，全市年洁净煤使用量约 18 万吨，洁净煤使用量分布如图 5-15 所示。

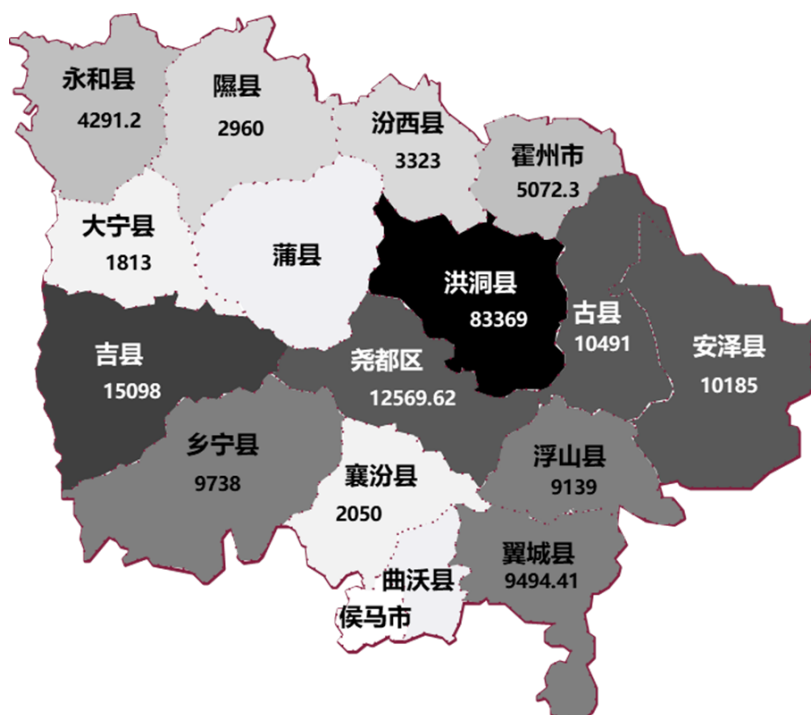


图 5-15 临汾市各区洁净煤用量分布

6 临汾市能源转型可持续发展路径

基于临汾市能源生产消费现状及所存在问题分析，综合临汾市未来发展定位以及山西省对临汾市社会经济发展及生态环境发展要求，考虑到能源转型任务的长期性和艰巨性，本节针对临汾市提出能源结构优化调整及能源转型重点工程。

6.1 临汾市能源转型面临的挑战

传统产业投资占比较高，新兴产业发展基础尚显薄弱。“十三五”以来，临汾市新增投资方向从追求增长向提质增效转变，但仍面临一些问题，突出表现为传统行业投资占比较高，高新技术产业投资拉动有限。特别是工业投资主要集中于资源型产业，第三产业投资大部分集中在房地产开发。未来进一步优化投资结构，加大技术引进、开发和创新方面的投资仍需付出较大努力。

可再生能源占比较低，能源清洁利用规模化不足。能源结构方面，临汾市可再生能源装机占总装机比重 42%，发电小时数占总发电小时数的 35%，发电量占全市发电量 28%。能源清洁利用规模较低，工业、建筑、交通运输、居民生活等领域以电代煤、以电代油进展缓慢，电力占终端用能领域比重低于全国平均水平。城区出租车、公交车已全部更换为电动车，但民用车以及各区县尚未普及，同时

城市电车充电系统并不完善。生物质资源开发利用率较低，仅有示范项目。光伏发电以扶贫光伏为主，且发电全部上网。农村生物质、屋顶光伏资源尚未形成规模化开发利用。

煤炭减量压力较大，能耗双控任务艰巨。尽管近年临汾市煤炭减量取得一定成效，但空气质量排名在全国仍处于较低位置，解决好燃煤污染问题压力仍将持续。临汾市 2011-2020 年能耗增长接近 200 万吨标准煤，能源消耗总量达到目标要求，但是能耗强度下降未达到目标要求。

企业绿色创新发展内生动力不强，节能降耗基础能力仍待进一步提高。近年来临汾市节能减排约束不断趋紧，但资源型经济发展惯性仍延续，加之人才匮乏、融资难融资贵等问题突出，战略性新兴产业规模小，优势并不明显。节能环保、清洁能源等产业普遍存在产业集中度较低、龙头骨干企业少，带动作用不强，多数企业产品技术或服务附加值不高。企业普遍重视节能工作，但缺乏足够的专业知识和高素质人才，节能管理和节能技术还比较落后。

农村清洁取暖改造存在二次改造风险。临汾市农村清洁取暖改造技术路径以集中供热、“煤改电”、“煤改气”为主，其中集中供热占比 60%以上。在调研过程中发现农户弃用情况普遍存在，企业投资无法收回，收费率低，项目难以持续运行，存在二次改造的风险。同时未充分结合广大农村地区丰富的生活垃圾、畜禽粪污、农作物秸秆等生物质资源量等进行针对性设计，生物质成型燃料供热、太阳能供热等利用本地化资源项目只有少量的示范。

6.2 临汾市能源转型基础依据

结合临汾市十四五规划和 2035 远景目标，2022 年临汾市一、二、三产增加值占地区生产总值的比重分别为 7.1%、55.8%和 37.1%。规划到 2025 年全市地区生产总值达到 2600 亿元，至 2035 年，地区生产总值年均增长率 8.5%。随着经济结构进一步优化，第一、第二产业增加值占比逐年降低，第三产业增加值占比逐年上升，一、二、三产占比分别为 3%、25%、72%。

对 2035 年临汾市能源需求与用能结构进行预测与规划。根据清华大学建筑节能中心对我国发达板块（江浙沪地区）的居民用电的监测，80%家庭的人均年用电量低于 1000 kWh，户均年用电量为 2320 kWh，中位数为 1900 kWh。目前城镇居民建筑主要利用集中热电联产和燃气锅炉集中供热。按照规划，2030 年

热电联产热源将逐步转向生物质能源，已有燃气锅炉将逐步退出或转为利用生物燃气。炊事用燃气原则上不再新建管道，结合城市更新、老旧小区改造等行动，逐步淘汰已达服役年限的燃气管道。部分新增建筑将采用电动热泵采暖。据此预计 2035 年临汾市人均用电量将从目前的 624kWh 增长至 1500kWh 左右，则全市城乡居民生活总用电量将增长到 48 亿 kWh 左右。理想情况下，未来 2035 年农村发展分布式光伏发电，同步推动直流微网配电改造，居民采暖、炊事均实现电气化以替代煤炭和天然气，户均用电量为 3000kWh 左右，按农村剩余 35.64 万户居民计算，农村用电量将增长至约 20 亿 kWh。

2022 年临汾市民用车保有量 66.7 万辆，公路运力及客货车车辆总数 6.6 万辆，消耗石油 16.2 万 tce。按 2035 年每千人车辆保有量 300 辆预测，2035 年临汾市车辆数量将增长为 76 万辆左右。考虑电动车对燃油车的逐步替代，至 2035 年实现全县车辆 50% 为电动车的目标，则交通总用电量约为 17 亿 kWh。

工业领域 2022 年用电总量为 15.36 亿 kWh。预计 2035 年工业领域用电量为 1300 亿 kWh。按照中国低碳情景下用能需求的预测与规划，2030 年工业单位增加值电耗为 1040kWh/万元，2060 年工业单位增加值电耗为 606kWh/万元。按临汾市二产增加值 1150 亿元计算，2035 年临汾市工业单位增加值电耗为 1500kWh/万元。目前工业能耗需求约 3700 万 tce，随着工业用能结构的调整，之后燃料需求逐年下降并维持在 4200 万 tce 左右。采用生物质、光伏发电替代煤炭和天然气承担工业燃料需求。

按照以上需求侧用能预测及规划，2035 年临汾市总用电量约为 1400 亿 kWh，生物质用量 66 万吨，煤炭、传统天然气、石油等化石燃料用量减为 0，完全被电力或生物质燃料取代。2025 年、2030 年、2035 年临汾市各领域用能需求预测见表 6-1。

表 6-1 临汾市各领域需求现状与预测对比

| | | 单位 | 2021 年 | 2025 年 | 2030 年 | 2035 年 |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 农村 | 用电量 | 亿 kWh | 16.41 | 19.64 | 20.43 | 20.95 |
| | 煤炭用量 | 万 tce | 12.78 | 3.83 | 1.92 | 0.00 |
| | 天然气用量 | 万 tce | 1.19 | 1.00 | 0.48 | 0.00 |
| 城镇居民 | 用电量 | 亿 kWh | 13.86 | 18.02 | 23.42 | 28.11 |
| | 煤炭用量 | 亿 tce | 0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

| | | | | | | |
|-------|----------|-------|---------|---------|---------|---------|
| | 天然气用量 | 万 tce | 11.61 | 11.00 | 10.00 | 8.00 |
| | 集中采暖热量需求 | 亿 GJ | 1.34 | 1.00 | 2.00 | 21.00 |
| 公共建筑 | 用电量 | 亿 kWh | 7.34 | 8.81 | 5.00 | 8.00 |
| | 天然气用量 | 万 tce | 1.21 | 1 | 0 | 0 |
| | 集中采暖热量需求 | 亿 GJ | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.08 |
| 市政和其他 | 用电量 | 亿 kWh | 14.70 | 16.17 | 17.79 | 21.34 |
| 交通运输 | 用电量 | 亿 kWh | 11.69 | 14.06 | 15.41 | 17.41 |
| | 天然气用量 | 万 tce | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 石油用量 | 万 tce | 16.20 | 10.32 | 6.15 | 0.00 |
| 工业 | 用电量 | 亿 kWh | 15.36 | 704.79 | 1033.34 | 1347.83 |
| | 煤炭用量 | 万 tce | 3639.39 | 2183.63 | 1091.82 | 0 |
| | 天然气用量 | 万 tce | 11.98 | 6 | 0 | 0 |
| | 生物质燃料用量 | 万 tce | 2.97 | 9 | 26 | 66 |

6.3 临汾市能源转型的发展路径

6.3.1 临汾市能源转型发展对策

资源型城市转型涉及能源与产业结构调整等诸多方面，而能源转型与改革相关实践经验是关于城市发展基础与动力的关键所在，能源转型的目标是通过提高能源“独立性”、减少排放来实现经济繁荣。基于临汾市实际情况，提出以下发展对策。

6.3.1.1 降低煤炭消费比重，推进煤炭清洁化利用

首先，应提高临汾市能源结构，尤其是煤炭消费比重的透明化、公开化及相关数据的可获得性。其次，应响应国家及省级控煤要求，制定明确的控煤计划，实现煤炭消费占比绝对下降，一方面可通过提高煤炭利用效率实现节约用煤；另一方面可提高替代能源消费占比。鉴于临汾市煤炭的主体地位在短期内很难改变，在煤炭压减空间不足的情况下，促进煤炭的清洁高效利用，优化主体能源的利用

方式，对于临汾市能源环境经济的可持续发展更为适宜。结合临汾市洁净煤技术发展状况，应着力提高煤炭洗选比例，发展高精度煤炭洗选加工，实现煤炭深度提质和分质分级，推进煤炭清洁供应，还要加快开发适应临汾市的高灰熔点、高灰分、高硫煤质特点的大型、高效、低成本先进煤气化技术，以发挥其煤炭清洁利用技术优势。另外，还应适当推进煤基醇醚燃料、煤制油等清洁化利用方式，大力推广煤基多联产技术，多途径促进煤炭的清洁、高效、循环发展。

6.3.1.2 控制工业能耗水平，提升工业能源资源的综合利用水平

继续保持临汾市循环流化床锅炉技术、煤炭气化技术的国家领先地位，进一步通过搭建能源科研创新平台，从工业、建筑及交通运输等多环节入手，发展高效用能技术，加强生产工艺和机械设备节能技术研发，推动技术规模化应用。进一步挖掘临汾市包括山西焦煤集团有限责任公司、山西煤炭有限公司、山西晋南钢铁集团有限公司、曲沃闽光焦化有限责任公司等在内的以煤炭、电力和冶金等为主的高耗能企业行业的节能潜力，可尝试推行节能承诺制，鼓励重点用能单位在完成能源消费总量控制目标要求基础上，对企业能效水平作出承诺，激发节能提升能效内生动力。同时应加强控制新引入行业企业的能耗水平，逐步优化调整工业结构，淘汰铁合金冶炼、炭黑生产、水泥制造等行业，加快部署信息产业、新能源汽车、节能环保等一批新兴产业项目，以降低高耗能行业能耗占比。同时鼓励煤炭企业与电力、焦化、煤化工企业联合，加大煤炭、煤泥、瓦斯和矿井水、高炉煤气等余气、余热等余能的回收利用，进一步提升产业集中度和资源综合利用水平。

6.3.1.3 推动能源分布式发展，提升可再生能源消费占比

随着技术的快速进步，“十四五”时期以风电、光伏发电为代表的新能源行业有望逐步实现平价，能源“十四五”发展的侧重点也将由速度规模型向质量效益型转变，因此重视关键技术研发攻关，加快培育能源发展新动能，是临汾市的必然发展趋势。首先，应加强与山西省其他地市的合作，如与大同、朔州、忻州等地的风电合作，与长治等地的太阳能光伏统筹互联。其次，临汾市太阳能、地热能、工业余热、生物质能等可再生能源分布广泛，应在临汾市内加强可再生能源的调动使用。其中，曲沃、永和县等区县常年日照充足，可着重发展太阳能光伏发电、光伏多元化应用等；洪洞县、安泽县等区县生物质资源较为丰富，应鼓

励农村发展生物质、沼气、垃圾发电等；同时还应推动可再生能源建筑的应用与推广，因地制宜，加快提升水能、风能、太阳能、生物质能等可再生能源的消费占比。

6.3.1.4 稳步推进散煤治理，保障替代能源供应能力

继续推进临汾市散煤治理工作，严格执行已建成的高污染燃料禁燃区规定，实现散煤高比例替代。综合评估“煤改气”及“煤改电”适用条件，对暂不具备清洁能源替代条件的偏远地区，适当推广“洁净煤 + 环保炉具”的取暖方式。在供应端着力解决天然气供应不足问题，提高储气规模和应急调峰能力，燃气企业要协调上游供气企业，尽早确定增量天然气指标，保障居民取暖用气需求。一方面提高供气能力，加强煤层气勘查抽采和储运利用，推动全市煤层气安全、高效和规模化利用。另一方面，加强气源储备及管道设施建设，加快临汾市应急调峰储气设施建设，做好能源储备工作。实施煤层气、天然气、煤制天然气等多气源建设，加快管网的互联互通。加快“煤改电”电网升级改造，促进智能电网的建设。尝试并探索发展智慧能源技术，推动互联网与分布式能源技术、先进电网技术、储能技术深度融合。另外，可发展谷电蓄热等方式，通过经济政策降低用电费用。通过发展可再生能源发电，提高电能的清洁化水平，进一步降低污染物排放。

6.3.1.5 以市场化为导向，促进能源包容式发展

还原能源商品属性，促进构建商品化能源服务体系，加快形成统一开放、竞争有序的市场体系，充分发挥市场配置资源的决定性作用。以用能权等能源交易市场为突破，确立公平、开放、透明、统一的市场规则，继续发挥临汾市煤炭交易中心等能源电子商务平台的作用，建立更具创新性的多元化能源交易平台，构建有效竞争的能源市场体系，积极稳妥发展混合所有制，实现市场主体多元化。应结合中央关于混合所有制改革的重大部署，通过建立民营新能源与国有传统能源包容发展的协同体系、加强民营新能源企业与国有企业的混合所有制改革、鼓励传统能源企业主动介入新能源领域等方式，积极推动传统能源与新能源包容式发展，如加强临汾市洗储企业行业管理，鼓励现有煤炭企业与社会民营洗

6.3.2 临汾市能源转型的路径选择

农村地区是临汾市能源转型版图上不可或缺的一部分。临汾市能源转型要选

择化石能源基础薄弱的农村入手，代价更小。丰富的可再生能源资源是农村能源资源的特征，在农村立足于可再生能源的基础设施符合能源低碳化大趋势。因此在“双碳”目标与乡村振兴战略的双重历史责任下，临汾市能源转型应走“农村包围城市”道路。本节重点介绍农村能源转型路径及技术。

6.3.2.1 农村能源转型路径选择

农村能源未来的发展路径面临选择问题。如图 6-1 所示，主要有四种路径：第一种是维持现状路径，仍将产生大量的碳排放，严重污染环境并影响农民健康，同时洁净煤价格高，因此这一路径是完全不可行的；第二种是通过“煤改气”替代高污染能源路径，这一路径会产生较高的基础设施投资，气网的改造，而且运行费用较高农户难以承受。此外，天然气并非零碳能源，无法实现低碳；第三种是“煤改电”，采用分户高效的热泵替代，避免电直热、集中空气源热泵机组等方式，未来若全部使用绿电，将有助于实现农村碳中和；第四种是大力发展农村丰富的可再生能源，主要包括太阳能、生物质能、小水电等，但该路径目前投资高，产业链较长，农户不熟悉，但能够有效促进农村碳中和，也是可持续发展。

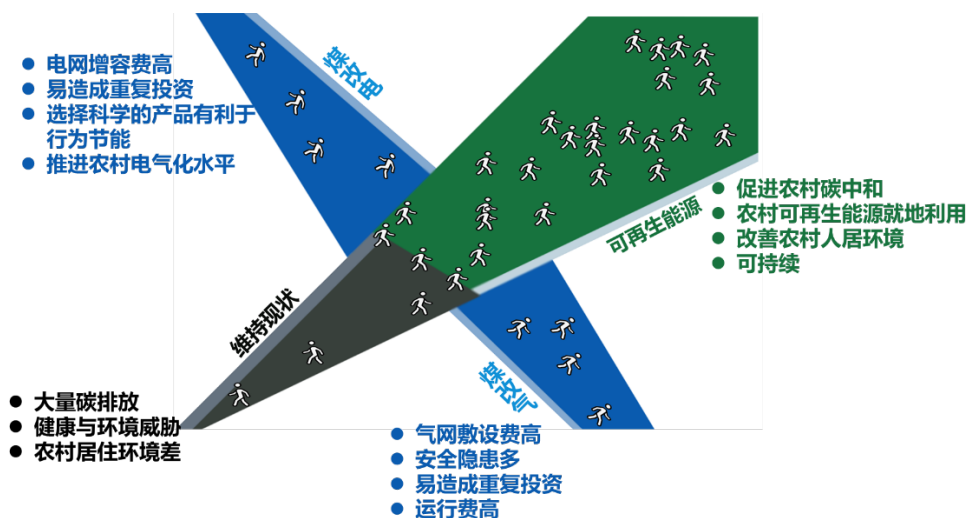


图 6-1 农村能源面临发展路径的选择

6.3.2.2 农村可再生能源替代路径需解决的关键问题

上述提出的可再生能源替代发展路径，与当前农村能源系统有本质的区别。从 2021 年 6 月能源局发布《关于整县屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》后，至 2022 年 3 月期间，各部委密集发文推进农村可再生能源发展，助力乡村振兴。

随着太阳能光伏组件效率的显著提升和成本的持续下降，分布式光伏发电已

具备良好的应用场景，同时太阳能光伏发电系统简单高效，运行维护要求较低，是农村可再生能源开发利用的主要技术选择之一。从单个用户来看，户均光伏装机容量至少为 10kW/户，投资 3~4 万元/户，年发电量 8000~12000kWh/户，这在技术和经济性上都具有可行性。而户均生活用电量仅 1500~2000kWh/户，光伏发电除覆盖日常用电、采暖用电等在内的居民生活用电，仍有很大余量。余电目前绝大部分上网，部分地区试点储电，但电能储存价格昂贵，传输与转化过程中存在损耗。因此难以消纳与并网是乡村分布式光伏发展的主要障碍。

生物质能作为唯一的“零碳”能源，便于储存，便于运输，即可就近消纳，也可作为商品化燃料向外输出。但目前生物质能的应用主要以发电利用为主，非电利用为辅。受传统生物质能（土灶台燃烧薪柴）“脏乱差”影响，整个社会，特别是各级政府对发展生物质能重要性认识不足，甚至个别地方把生物质燃料当作仅次于散煤的高污染燃料，采取限制发展政策。一线城市均把生物质成型燃料认定为高污染燃料，在所属行政区域内禁止使用。生物质清洁供热至今不能享受与“煤改电”、“煤改气”相同支持力度的政策。亟需探索生物质能新的发展模式和关键技术。

6.3.2.3 可再生能源开发关键技术

(1) 太阳能空气集热取暖系统

太阳能空气集热取暖系统是一种利用太阳能集热器吸收太阳辐射加热空气，送入房间进行热风取暖的系统。系统主要由太阳能空气集热器、风机、风管、风口、温度控制器等构成。图 6-2 和图 6-3 为典型的太阳能空气集热取暖系统示意图和实物图。集热器朝南安装在屋顶或南墙上，通过风管将集热器和进出风口连接，风机软接在集热器入口管段，温度控制器通过检测集热器出口监测点的温度控制风机启停，实现系统的自动运行。当白天太阳辐照较好时，空气集热器吸热板温度不断升高，其内部的空气通过自然对流加热并在浮升力驱动下流至集热器出口，当出口监测点监测到的空气温度超过 30~35℃（监测点控制温度根据实际工况确定）时，温控器控制风机开启，室内空气由风机送入集热器，被加热后再送入室内，进行热风取暖。当太阳辐照不足时，若监测温度低于 25~30℃（可根据实际工况调整），温控器控制风机停止工作，系统循环停止。

考虑到太阳能的时间限制性，太阳能空气集热取暖系统需要增加辅助热源，

如燃气壁挂炉、低温空气源热泵热风机等，这会显著增加取暖系统初投资。由于系统复杂，运行维护工作较为繁琐，对维护人员的技术要求高。因此，太阳能空气集热取暖系统还需要技术上的突破，降低系统初投资，增强系统运行可靠性和稳定性。

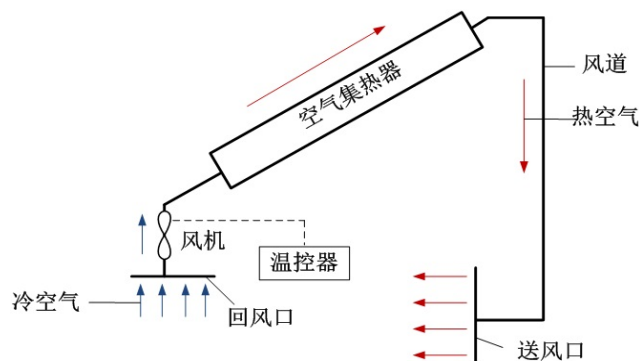


图 6-2 太阳能空气集热系统示意图



图 6-3 集热系统相关实物图

(2) 带反射镜的太阳能热水集热系统

太阳能热水系统已在住宅建筑中投入使用多年，为建筑取暖和日常使用提取暖水。在所有类型的太阳能集热器中，全玻璃真空管太阳能集热器通常被更多地选用。然而，中国北方采用的全玻璃真空管太阳能取暖系统存在如下问题：冬季时，需求和供给不匹配；在夏季容易过热，形成了高温高压环境，导致真空管炸管、整体系统性能变差、甚至系统损坏。

近年来出现的太阳能集热器和反射镜耦合的方式，能一定程度上解决真空管太阳能集热器的以上问题。如图 6-4 所示，反射镜太阳能集热装置由两部分组成，一是水平型全玻璃真空管太阳能集热器阵列，二是在太阳能集热器底部以一定倾斜角度摆放的镜面反射器。选用全玻璃真空管太阳能集热器可以减少集热原件的散热；选用反射镜一是因为其相对于传统的放置在真空管背部的内嵌式漫反射器更加便宜并且易于维护，二是采用反射镜可以进一步聚集太阳光、有效提高真空管太阳能集热器的辐照度。整个太阳能集热装置面朝正南，这样摆放可确保该太

太阳能集热器接收到最多的太阳辐射,尤其是在太阳正午时,太阳辐射达到最大值。并且,太阳能集热器阵列采用向下倾斜的方式,且倾角大于 90° ,这点不同于传统的太阳能集热器向上倾斜的设计,能有效解决全玻璃真空管太阳能集热器夏季容易过热的问题。

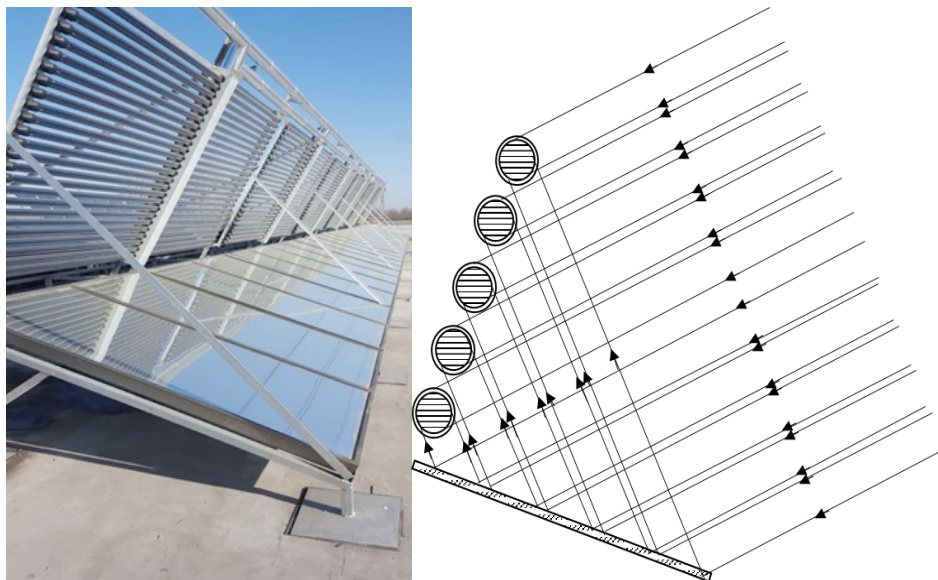


图 6-4 带反射镜的太阳能热水集热系统图

经测试,太阳能集热器和反射镜耦合系统在寒冷的天气条件下运行正常,室外干球温度最低达 -20.6°C ,无系统结冻现象出现。室内平均温度可达 13°C ,满足农村地区室内温度的要求。

但是,太阳能热水取暖系统与反射镜耦合系统也需要增加辅助热源,保证取暖稳定性,系统的初投资高,经济型欠佳。太阳能热水取暖系统较为复杂,因此需要的维护工作也较多,需要的维护水平较高,例如更换破损的真空管、更换热水系统中的水处理装置、检修管路、维护控制箱等。因此,此类系统在农村地区的应用还应实现技术突破,在保证取暖效果的同时降低初投资,并对后期运行维护进行科学合理规划。

(3) 季节自适应性集热器供热系统

季节自适应性集热器供热系统如图 6-5 所示,由真空管与非对称复合抛物面聚光器的组合构成。非对称复合抛物面聚光器以百叶的形式嵌入横向排列真空管的缝隙之间。通过调整管间距和安装倾角调整上下两排真空管的相对位置,在夏季,上排真空管所对应的 ACPC 反射板能对下排真空管能实现与建筑外遮阳类似的效果。即在太阳高度角低时让辐照照射至真空管上,在太阳高度角高于一

定角度时为下真空管遮挡部分太阳辐照。

因此，对于上下两排真空管，中间的反射板能根据太阳高度角变化实现双重功能：在冬季太阳投影高度角低于临界接受角时，非对称复合抛物面反射板作为聚光器，将入射至反射板上的辐射全部聚焦在上排吸热管上，最大程度提升光学性能；而在夏季投影太阳高度角高于临界接受角时，ACPC 反射板不再具备聚光功能，同时对于下排吸热管，反射板遮挡了本应照射至其上部分太阳辐射，从而起到了遮阳板的作用。

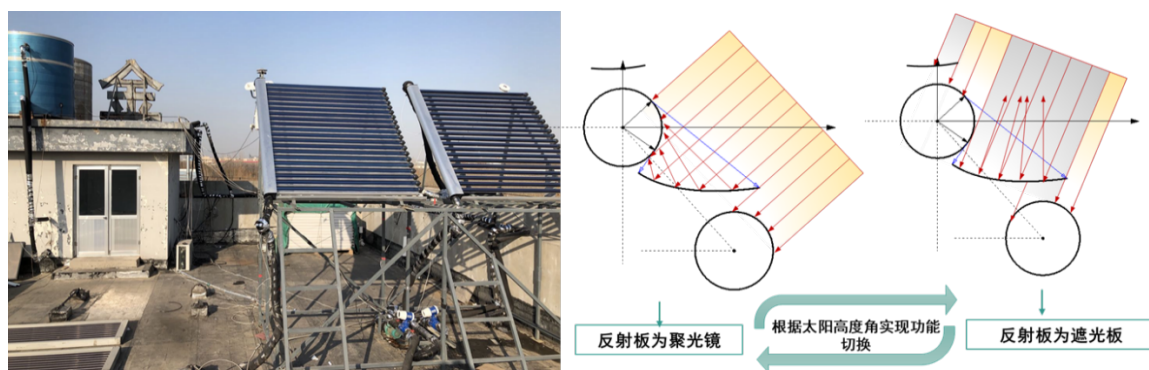


图 6-5 季节自适应性集热器供热系统图

该系统在冬季发挥较高的集热性能。而在夏季，通过反射板遮挡作用将集热器的热效率有目的降低，从而有效降低夏季由于集热过剩产生的系统过热的风险。但此类系统的初投资成本较高，系统维护成本较高。因此，此类系统在农村地区的应用还应在保证供热效果的同时降低初投资，并对后期运行维护进行科学合理规划。

(4) 太阳能光伏直流驱动供热系统

以光电为主要能源的直流微网系统能够很好地满足未来农房对电力的需求，充分利用农房闲置的屋顶资源，安装光伏板，按照农户屋顶的面积大小设计光伏装机容量。屋顶光伏由电直热光伏和电器用光伏两部分组成，系统设计如图 6-6 所示。电直热光伏主要保障电热膜冬季采暖所需的电力，在初末寒期热负荷较低时或非采暖季可采用手动开关由供热模式切换为输电模式；电器用光伏只负责农房内电器的电力负荷，电动汽车和电动三轮车具有大容量储能电池，可与户内蓄电池并联，共同承担电力保障和需求响应功能。

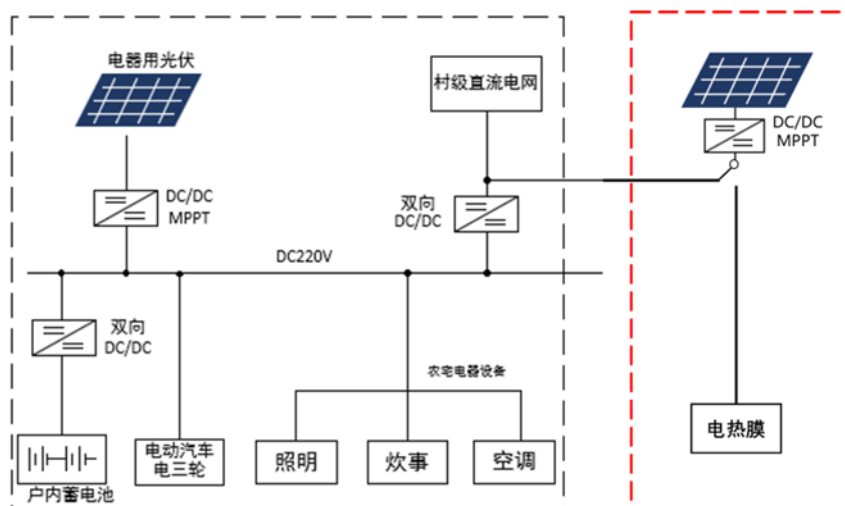


图 6-6 光储直柔配电系统示意图

对于室内侧，首先对外墙进行保温改造，然后铺设电热膜，之后砌一定厚度的蓄热墙体，最后装饰用水泥砂浆和漆面完成改造，如图 6-7 所示。取暖铺设的光伏板白天所产生的电力直接驱动电热膜发热，经蓄热墙体向室内供暖，电热膜温度可达 70℃以上，可将蓄热墙体加热至 30~40℃，所蓄存的热量在夜晚释放满足取暖需求。

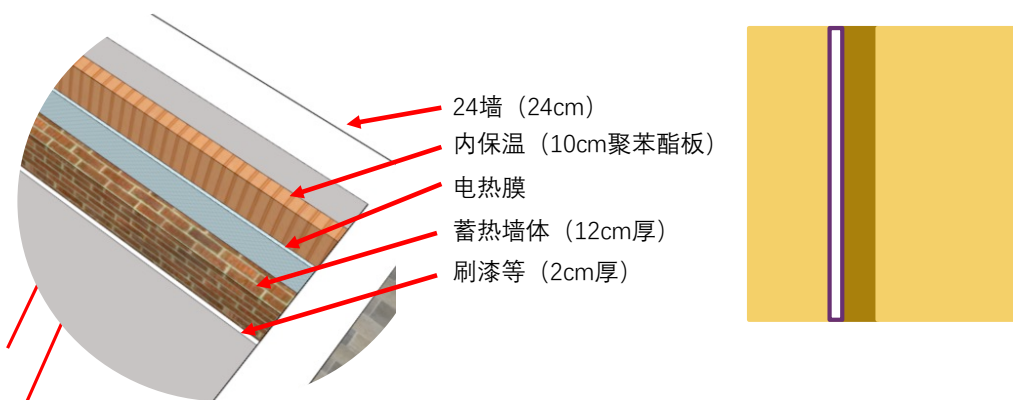


图 6-7 室内侧改造示意图

相较于传统的太阳能光热系统，系统操作简单、采暖末端成本较低。该系统在实现了闲置屋顶资源化的同时，既解决了取暖问题，还能帮农户增收，同时助力我国实现碳中和目标。此类技术的主要缺点是需要配合屋顶光伏适用，系统初投资高，并且需要解决非取暖季的光伏上网问题。

（5）生物质成型燃料集中供热系统

秸秆成型燃料清洁供暖是把秸秆压缩成块状、棒状、颗粒状等成型燃料，具有点火方便、燃烧快、灰渣少、烟气清洁等特点，热效率可达 80%以上。对于距离供热管网较远的县城、农村集中楼房区域以及医院、养老院等公建设施，鼓励

通过集中生物质成型燃料锅炉作为清洁热源，进行散煤取暖替代。对于容积率较高，人员密度较大的住区，生物质成型集中供热锅炉效率显著高于分散式取暖设备，经济效益和环境效益也较为明显。

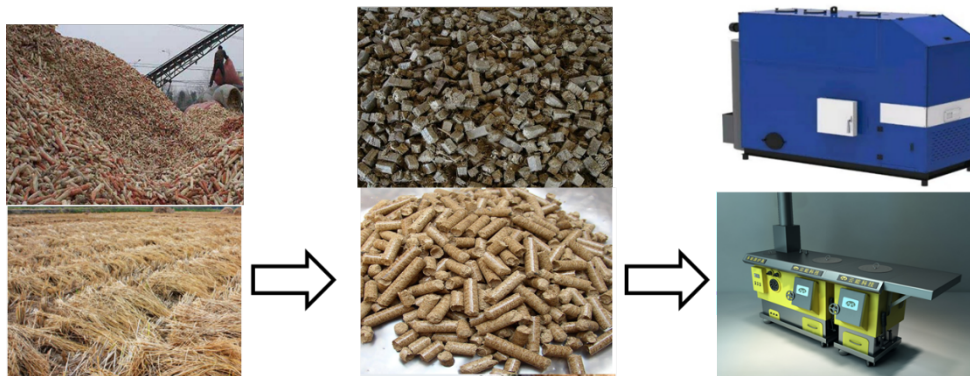


图 6-8 生物质集中供热技术

(6) 生物质打捆直燃集中供热系统

秸秆打捆直燃集中供暖是将打成捆的秸秆在专用锅炉内直接燃烧替代燃煤进行供热，具有原料适应性强、处理量大，秸秆收获期与采暖期吻合、利用效果好、替代燃煤锅炉经济效益好等优点。生物质锅炉集中供热模式主要适用于区域集中供暖，从几千平方米到数十万平方米均可，乡镇政府、医院、学校、养老院等村镇公共设施供暖也可使用。



图 6-9 生物质打捆直燃供热系统

6.4 可再生能源对临汾市低碳目标贡献预测

基于 5.3 节中临汾市可再生能源的资源量统计，分理想情景和保守情景预测可再生能源开发利用趋势。

理想情景下，到 2030 年，供给侧，生物质和农村屋顶光伏均开发至 30%左右，30%的供热农房进行了围护结构改造，农村屋顶光伏发电优先自用，农村生

物质开发量和屋顶光伏发电量合计折算标煤量约为 139 万 tce。需求侧，农村生活能耗约为 69.8 万 tce。碳排放方面，2030 年净输出能源可减少碳排放 112 万吨。到 2050 年，生物质和农村屋顶光伏均开发至 90%左右，且 90%的供热农房进行了围护结构改造，农村此时已无直接燃烧产生的碳排放，输出能源可用于替代化石能源碳排放约 524 万吨。投资需求方面，2030 年用户侧改造总投资约 10.6 亿元，生物质和农村屋顶光伏投资约 107 亿元。2050 年，用户侧总投资增加约 8.8 亿元，生物质和农村屋顶光伏总投资增加约 214 亿元。

保守情景下，到 2030 年，供给侧，生物质和农村屋顶光伏均开发至 15%左右，15%的供热农房进行了围护结构改造，农村屋顶光伏发电优先自用，农村生物质开发量和屋顶光伏发电量合计折算标煤量约为 70 万 tce。需求侧，农村生活能耗约为 74.5 万 tce。碳排放方面由于能耗大于可再生能源产生量，所以仍产生碳排放，与现状现状可净减少 118 万吨。到 2050 年，生物质和农村屋顶光伏均开发至 50%左右，且 50%的供热农房进行了围护结构改造，农村此时已无直接燃烧产生的碳排放，输出能源可用于替代化石能源碳排放约 209 万吨。投资需求方面，2030 年用户侧改造总投资约 5.2 亿元，生物质和农村屋顶光伏投资约 53.4 亿元。2050 年，用户侧总投资增加约 6.2 亿元，生物质和农村屋顶光伏总投资增加约 125 亿元。

目前，临汾市散煤消耗量为 144.84 万 tce，未来，如果将所有屋顶光伏和生物质都有效开发，并且所有供热农房均进行围护结构节能改造，则临汾市散煤和散烧生物质将完全清零，农村此时已无直接燃烧产生的碳排放，向城市输出能源可用于替代化石能源碳排放约 373 万吨，总共相当于减少碳排放 735 万吨。

6.5 临汾市能源转型重点工程

能源转型已呈现出能源结构清洁低碳化、能效及电气化提高、新一代能源技术进步持续推进的特征，除了简单的能源替代手段外，更多能源转型手段关注的是能源生产与消费方式的变革，大体表现为能源效率的提升或可再生能源的推广等，结合临汾市丰富的可再生能源资源情况和国家低碳战略，提出以下重点工程建设。

6.5.1 建设智能充电桩网络，实现汽车全面电气化

目前临汾市市区内公共交通全部电动化,但个人交通工具仍主要依靠化石能源。在临汾市内大力推广汽车电气化,不仅通过“油改电”来减少燃油造成的直接碳排放,推动临汾市能源系统碳中和的实现。其更大的意义在于电动车的蓄电池可以形成巨大而宝贵的蓄电资源。若通过“光储直柔”配电系统充分开发利用电动汽车的电池资源,利用停车空闲时段使电动汽车参与电力系统的需求侧响应,根据用电负荷的高低通过充电填谷、放电削峰,将可以解决风电光电日内和2~3天内发电与用电的供需平衡问题。

实现这一工程的前提是全面建成充电桩网络。但是,按照目前的充电桩充电方式,大量新建充电桩将导致电网峰值负荷增加、配电网面临超载风险等问题,甚至导致电网瘫痪。因此,必须发展智能充电桩模式,由充电桩根据电网状况决定充电与否、怎样充,取缔目前的“即插即充”模式。从而在电网电力充足时,通过充电增加电力负荷,而当电网电力不足时,停止充电,甚至有汽车放电,为相连建筑供电。

近年来,储能技术突飞猛进,电动汽车储能电池的安全性、效率和使用寿命均有显著提升,单位成本同步下降。目前新版电动汽车的蓄电池容量普遍在60kWh以上,续航里程在500公里以上,相比于城市居民的日常用车需求,除非偶尔远行,续航里程远远超出一天的出行需求,大多数用车强度不高的用户可能两周一充。多余的蓄电池容量如果能够接入电网,参与电力系统的调峰、调频服务,将成为保障电网安全、消纳可再生能源的宝贵资源。此外,磷酸铁锂电池的循环次数已经超过3000次,电池的使用寿命已经远远超过汽车的使用寿命(出租车、公交车除外),因此可以考虑利用过剩的蓄电池循环次数、充分发挥电动汽车灵活、可移动的储能特性,实现电动汽车与电力系统的双向友好交互,在电力供应紧张的时段或者局部区域对建筑乃至城市电网放电,对于电力系统安全和低碳发展也有重要意义。

事实上,电动汽车绝大多数时间停靠在住宅、办公、商业等建筑的周边的车位上,因此可以利用停车空闲时段使电动汽车参与电力系统的需求侧响应,根据建筑用电负荷的高低通过充电填谷、放电削峰,从而提高建筑用电负荷的灵活性,形成由灵活的建筑用电负荷和智能的电动车充放电共同构成的未来城市电力系统的终端节点。

因此要加紧发展和试验有序充电和双向充放电（BVB）等电动汽车新型充电技术，充分考虑用户的用车需求和电网负荷状态等因素，智能控制电动车的充电功率和时间，既能保障配电网安全，又能降低用户充电成本；另一方面要通过理念宣传和技术经济创新手段，形成电动车主积极主动将电动车接入电力系统并参与互动的充电文化，而非传统燃油汽车没油了去加油站加油的文化。

6.5.2 开发城乡屋顶光伏，部分建筑推动“光储直柔”技术

未来高比例可再生电力结构下，建筑配用电应具备 4 项新的技术特征，即——“光、储、直、柔”。其中“光”和“储”分别指能源生产侧的分布式光伏和与之配套的分布式储能技术；“直”指建筑配用电网的形式发生改变，从传统的交流配电网改为采用低压直流配电网；“柔”则是指建筑用电设备应具备可中断、可调节的能力，使建筑用电需求从刚性转变为柔性。“光储直柔”技术的重点在于通过在建筑内部改用直流配电网，取消了直流设备与配电网之间的交直变换环节，同时放开配用电系统对电压和频率的限制，从而展现出能效提升、可靠性提高、变换器成本降低、设备并离网和电力平衡控制更加简单等诸多优势。同时，“光储直柔”型建筑充分利用建筑内部的负荷灵活性资源，如建筑围护结构的蓄热特性、人对温度波动的适应性、建筑内设备的延时启动、错峰工作的特性等，来进行短期负荷功率调节，为电力系统提供一定程度的灵活性，寻找建筑用户体验和电网灵活性需求二者之间的平衡，从而大幅度降低了对电网增容的需求。

通过推广“光储直柔”型建筑配用电系统，未来的建筑配用电系统将不再是单纯的消费者，它将会与城市电网深度融合为电网提供支持和辅助服务，使能源系统直接受益；会与电动汽车、分布式发电等互相协同，灵活整合多种能源；并且促进城市建设和新能源技术发展。

当前，临汾市已有的户用光伏项目仅仅是发电上网，并没有建成“自发自用”的微网模式，更没有推进革命性的“光储直柔建筑”。因此，临汾市要在已有工作基础上，充分利用城乡建筑屋顶空间发展分布式光伏发电，不仅要“完善光伏全产业链”和“安装光伏发电板”，更要争取在推动“光伏+直流建筑”、“光伏+智能微网”等革命性技术落地方面走在全国前列。

6.5.3 全面开发生物质资源，构建一体化可再生能源系统

生物质作为唯一的零碳能源，是实现“碳中和、碳达峰”的有效途径，通过推广生物质能源站，建立成生物质产供用销体系，不仅可以减少环境污染，同时还能使农户土地增产增收，带来新的就业机会。因此，临汾市不仅要“建设美丽乡村”，更要争取培育“生物质全方面利用”的一整套技术体系，为改善大气环境、增加就业机会、促进当地经济发展等方面贡献力量，总结成为“临汾模式”，为中国的“乡村振兴”战略提供“临汾智慧”。

对于农村屋顶光伏资源，采用“光储直柔”系统进行了充分的消纳，而对于生物质能的利用，应充分和“光储直柔”系统相结合，构建一体化的可再生能源系统，系统内将生物质能和屋顶光伏相结合主要通过以下措施实现：

1) 生物质成型燃料加工厂

将生物质原料加工为成型燃料目前由于加工能耗和成本较高，限制了生物质成型燃料的推广应用。而未来农村屋顶光伏发电量将远远高于自身用电量，多余电力可以用于制造生物质成型燃料，而且光伏电具有强烈的日间变化特性，即白天多发电，夜晚不发电，为系统调节带来困难，而采用高峰期的光伏电用于生产加工生物质颗粒，能够充分发挥生物质易存储的特性，配合光伏电发电的特点来进行消纳，有效缓解光储直柔系统的调节压力，同时降低了成型燃料的加工成本。

2) 生物质电厂

未来农村大规模推进屋顶光伏的安装，使得光伏电冬夏不平衡的特性日趋凸显。并且随着碳中和事业不断推进，传统燃煤燃气火电厂逐渐退出，可再生能源电力不断介入，电力系统也面临着冬夏季节调峰问题。因此生物质能可充分发挥零碳优势，建立调峰电厂，平抑光伏电等季节不平衡性，同时作为电网的应急和备用电源。

3) 生物质运输载具和电动农机具

生物质由于能量密度低，较为分散，其收集和运输能耗和成本一直以来也是限制其应用的主要因素，使得收集半径较低，无法大规模推广。未来农村屋顶光伏电力不断发展，富裕电力也可以用于给生物质运输载具和电动农机具充电，能够大幅降低收集和运输成本，利于生物质能的推广应用。并且生物质运输载具和电动农机具的电池也可以参与到农村光储直柔系统中，参与系统调节，能够降低系统储能成本，提高调节的灵活性。

6.5.4 继续稳妥推进农村地区清洁取暖

基于中部城市群综合方案，临汾市农户清洁取暖后续改造本着建筑节能改造先行的原则，根据当地农村建筑用能特点，结合农村经济状况，采用了经济型的靶向保温技术体系，对有限的资金进行合理分配，重点提升常用房间围护结构的保温性能，以达到最佳的投入产出比。当地以墙体内保温为主，采用保温贴纸阻断房间与室外空气间的热桥。对于承重能力较好的吊顶，在吊顶上铺设膨胀珍珠岩、蛭石等颗粒保温材料；窗户则采用加装保温窗帘或更换为中空玻璃窗的方式，每户的改造成本在 3000-4000 元，节能改造后能效可提升约 30%。

同时基于前期清洁取暖的基础，对于 600 米以上未实施清洁取暖改造的农户因地制宜推广低温空气源热泵热风机和空气源热泵热水机等高效的热泵采暖设备。此外，部分地区也可推广电暖气、电采暖炉等电直热采暖设备。在生物质资源丰富的地区，开展了生物质锅炉集中供热、秸秆生物质气碳联产集中供热、大型沼气集中供热以及小型生物质锅炉和生物质颗粒燃料清洁炉具供热等多种模式。并以建设低碳村为抓手，同步推进散煤替代+低碳发展+乡村振兴的“三合一”技术路径，力争在 2028 年前实现散煤清零。

6.5.5 加快推动农机具电气化转型

在“碳达峰”和“碳中和”的背景下，农业机械的电气化转型势在必行。

一方面，由于化石燃料的供应有限和对环境的不利影响，减少农业生产过程中对化石燃料的依赖的趋势日益明显。在农业生产的各个环节，高使用率的农业机械所造成的污染十分严重，对空气质量和人的身体健康产生了不良影响。开发、推广和应用更安全、更清洁和更高效的电气化农业机械将有助于降低污染物的排放，促进农业可持续发展。

另一方面，农业机械的电气化转型是构建以屋顶光伏为核心的农村新型电力系统的重要推动力。农村新型电力系统需要大量的储电能力来克服可再生能源发电与建筑负荷的不匹配性，但是目前电池的成本较高，阻碍了新型电力系统的发展。农业机械的电气化转型将为农村电力系统带来丰富的电池资源。电动农业机械与新型电力系统的充分互动将极大的满足居民在“不匹配”时的用电需求，从而更好地促进用户侧家庭能源系统的“需求侧响应”，进一步推动“只出不进”

的农村新型电力系统的实现。

此外，山西省农业农村部在 2016 年便率先积极实施小型电动农业机械的研发与推广，为临汾市农村地区全面实现农业机械电气化转型打下了基础。农村地区农业机械的电气化转型是实现农村全面电气化的基础和保障。这一举措不仅会推动农业生产的现代化、智能化和可持续发展，还将为农村发展提供了新的动力和可能性，进一步推动乡村振兴战略的实施。

6.5.6 促进煤焦产业链精细化，推动工业生产的全面电气化

焦化、钢铁产业是临汾市的传统支柱产业，但同时也是污染排放量较大的产业，是为临汾市环境污染做出“特别贡献”的产业。临汾市的污染形势与钢铁、焦炭等产业分布高度相关。因此，要加快煤焦产业链精细化发展。对现有的焦化、钢铁产业进行升级改造，科学制定临汾市焦化、钢铁产业布局方案，加强顶层设计、加快布局调整，切实提高临汾市焦化、钢铁行业污染防治水平。治理需加强，要继续在环保提标改造上下功夫，对标国内国际一流，进一步加大环保投入力度，确保实现清洁生产，将污染排放降低到最小程度。引进煤焦工业烟气多污染物协同深度治理技术，减污降碳，碳与污染协同控制。

同时引导工业生产全面电气化，采用电动热泵以及生物质燃料锅炉替代燃煤、燃气锅炉。对于 70°C 以下的热量需求，采用电热泵替代，对于高温热水过蒸汽需求，采用生物质燃料锅炉替代，同时解决烟气排放的问题。实行可中断方式生产，有效消纳光电。规划未来全年工业用电完全来自周边农村和城市建筑屋顶光伏以及集中的风电光电基地，不足者可以通过厂房屋顶光伏补充。

7 总结与建议

7.1 总结

7.1.1 中部城市群散煤清零

项目通过调研摸清了中部城市群散煤清零实施现状及存在的问题，同时通过技术方案的对比明确了中部城市群散煤清零的路径及模式，主要形成了如下结论：

(1) 中部城市群农房形式多样，建筑面积较大但实际采暖面积小，建筑材

料老旧，围护结构保温性能差。90%以上的农房墙体、门窗、屋顶、地面未采取保温措施。极少数地区结合危房改造等项目实施了外墙围护结构节能改造，但仅为示范项目。总体来看，中部城市群农房围护结构保温性能差，采暖能耗较高。农房围护结构节能改造是实施散煤治理的基础，应同步实施。

(2) 中部城市群散煤清零技术方案目前均以集中供热为主，占比 70%以上。该方案尽管对用户友好(室内舒适度提升、用户年供暖成本较烧煤时有所降低)，但由于初投资大(户均 3.5~4 万元)，企业投资无法回收，或者必须长期依赖政府运行补贴才能维持将来的正常运转，并且未来运行管理存在较大的用户不缴费或基础设施投资浪费的风险。

(3) 项目利用 DeST 能耗动态模拟软件，基于典型户型，模拟计算了不同围护结构改造材料和散煤治理设备的节能率，形成了中部城市群农村“菜单式”散煤治理综合技术方案。基于技术经济优化及本地可再生能源分布特点，指出不同散煤技术的使用条件即在电网条件允许的情况下，应大力推广空气源热泵热风机，在生物质资源丰富地区，应在保证炉具质量的情况下，推广生物质炊暖两用炉，在太阳能资源丰富的地区，可推广反射镜太阳能集热供热技术。

(4) 项目系统梳理和分析了农村散煤治理适宜技术和发展模式，结合中部城市群农村实际，明确中部城市群农村散煤清零应走的“四一”模式，即“初投资每户不超过 1 万元，无补贴的年采暖费 1 千元左右，设备一键式智能化操作，并整体建立在一个顶层规划”。项目研究证明该模式在中部城市群农村地区完全可以实现，应大力推广。同时，结合国家“碳中和碳达峰”战略目标和散煤清零实施过程中存在的问题，提出未来中部城市群散煤清零应与可再生能源开发组合、肥瘦搭配，拓宽项目的收益，提高企业投资的积极性。

7.1.2 临汾市可再生能源发展

项目组通过调研和文献资料的整理，梳理了临汾市社会经济发展现状、能源生产消费现状，结合卫星图像和神经网络算法，统计了临汾市农村可再生能源资源量。同时梳理了临汾市清洁取暖现状，总结了其存在的问题并给出了相关建议。

(1) 全面分析了临汾市能源生产消费现状。2022 年，临汾市全社会能源消费总量为 3879 万 tce，其中煤品燃料占比 70%。全市规上工业生产原煤 8782 万吨，洗精煤 5105.7 万吨，发电量 258 亿 kWh，电力以火电为主。煤炭依然是能

源生产和消费的主要来源。

(2) 全面梳理了临汾市清洁取暖现状。截止到 2022 年底，全市完成清洁取暖改造 7441.29 万 m²，清洁取暖率为 88%，其中城市建成区和县城区清洁取暖率均为 100%，农村地区清洁取暖率为 66%。但农村地区清洁改造技术路径以集中供热为主占比 60%以上，煤改电也未使用高效的热泵技术，存在返煤的风险。

(3) 通过卫星图像和 U-net 神经网络相结合的方法，统计了临汾市农村屋顶光伏和生物质资源现状：农村屋顶光伏总装机潜力为 618 万 kW，年发电潜力为 120 亿 kWh。年生物质资源潜力约为 314.4 万吨。但目前开发利用量较少，需要大力开发作为重要的清洁低碳能源。

(4) 临汾市散煤消耗量为 144.84 万 tce。基于对临汾市可再生能源资源现状的统计和分析，未来，如果屋顶光伏和生物质都有效开发，并且供热农房均进行围护结构节能改造，自治区散煤和散烧生物质可完全清零，同时向城市输出能源可用于替代化石能源碳排放约 373 万吨，总共相当于减少碳排放 735 万吨。

7.2 建议

7.2.1 中部城市群散煤清零

(1) 群散煤清零技术路径应以分散式供热为主，集中供热为辅，在生物质、太阳能等可再生能源较为丰富的地区应推广该类资源的开发利用，力争减污降碳+农户增收同步发展。

(2) 只在免费或低成本热源（低品位热电厂余热、工业余热、焦化厂余热等），且热量输送距离短（小于 10km），用户相对集中且对供热有时间和空间上的稳定需求的地区，且项目运营公司运行管理到位，农户缴费率高的情况下，可实施农村集中供热的方案。

(3) 应尽快叫停集中空气源热力站为热源的农村集中供热方式，改为分散式高效热泵为主要方向的农村单户或单个房间供热方式，既能节约初投资，还可以充分实现行为节能，避免企业亏损或政府长期运行补贴。

(4) 应安排一定资金，用于农宅节能改造，达到更好的节能效果，达到或接近实现“四一”模式。

7.2.2 临汾市可再生能源发展

(1) 临汾市能源生产与消费均以煤炭为主，占比均超过 70%，能源转型任务艰巨，应首先实现民用散煤及工业散煤清零。

(2) 临汾市海拔 600 米以下地区全部完成清洁取暖改造，海拔 600 米以上地区应改尽改。未改地区以洁净煤替代，但洁净煤并不清洁，存在二次改造的问题，应参照“四一”模式，推广空气源热泵热风机、生物质炊暖炉等高效的设备尽快实现散煤替代。

(3) 临汾市农村屋顶光伏装机潜力为 618 万 kW，年发电潜力为 120 亿 kWh，生物质秸秆年可收集量为 189 万吨，可再生能源开发利用潜力较大。应加快推动农村可再生能源开发利用，在农村率先实现零碳甚至负碳，从而实现农村反哺城市。

(4) 农村地区应以低碳发展为目标，以建设低碳村为抓手，同步推进散煤替代+低碳发展+乡村振兴的“三合一”技术路径，并在 2028 年前实现散煤清零。探索建设太阳能及生物质能开发利用及电气化为主要标志的零碳乡村。

(5) 以屋顶光伏为基础的“优先自发自用，余电有序上网”、充分挖掘农村的储能资源的分布式光储直柔电力系统，推进农村炊事、采暖、生产、交通等全面电气化。

(6) 充分发挥生物质“零碳”能源的作用，加工作为商品燃料就近消纳或向外输出，助力乡村振兴和低碳。