



北方典型地区农村 居民冬季取暖研究

摘要报告

北京化工大学

中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会

亚洲清洁空气中心

北方典型地区农村 居民冬季取暖研究

摘要报告

北京化工大学

中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会

亚洲清洁空气中心

关于报告团队

北京化工大学

北京化工大学是教育部直属的全国重点大学，国家“211工程”和“‘985’优势学科创新平台”重点建设院校，国家“一流学科”建设高校。北京化工大学在农村清洁供暖领域先后主持完成了多个项目课题并积累了丰富的研究成果，是中国清洁炉灶联盟秘书处单位，建设有国际区域清洁炉具测试与知识中心，是中国户用炉具行业标准主要起草单位之一，获得中国清洁炉具行业突出贡献奖；受科技部委托，牵头举办了第四轮中美战略经济对话配套活动“清洁炉具成果展”、第七轮中美人文交流高层磋商配套活动“中美+清洁炉灶国际发展战略论坛”等重要外事活动；作为项目负责人单位承担了国家大气重点专项居民高效清洁燃煤采暖炉具研发及其应用项目、科技部国际合作“中美清洁炉具技术研发”、世界银行“中国清洁炉具发展策略”等重要项目与课题。

中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会

中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会由从事采暖炉具研发、制造、检测等相关单位组成，旨在提高炉具（锅炉）能效、降低大气污染物排放、改善空气质量。

专委会的工作重点包括推动农村清洁采暖的技术进步、规范市场、制定标准，开展国际交流与合作，组织新产品、新技术推广应用、技术培训和专题研讨等。专委会近年来积极与科研机构 and 地方政府合作，开展农村地区的清洁取暖实地调研，连续牵头组织13届中国清洁采暖论坛及博览会。

亚洲清洁空气中心

亚洲清洁空气中心（Clean Air Asia，简称CAA）是一家国际非营利性组织，致力于改善亚洲区域空气质量，打造健康宜居的城市。CAA成立于2001年，是联合国认可的合作伙伴机构。

CAA总部位于菲律宾马尼拉，在中国北京和印度德里设有办公室。CAA拥有来自全球的261个合作伙伴，并建立了六个国家网络——印度尼西亚、马来西亚、尼泊尔、菲律宾、斯里兰卡和越南。

CAA自2002年起在中国开展工作，专注于空气质量管理 and 绿色交通两个领域。2018年3月12日，CAA获得北京市公安局颁发的《境外非政府组织代表机构登记证书》，在北京设立亚洲清洁空气中心（菲律宾）北京代表处。CAA接受公安部及业务主管单位生态环境部的指导，在全国范围内开展大气治理领域的能力建设、研究和宣传教育工作。

关于本报告

北方典型地区农村居民冬季取暖研究项目由北京化工大学牵头，联合中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会等单位完成，项目得到了亚洲清洁空气中心的支持。本报告为《北方典型地区农村居民冬季取暖研究报告》的摘要报告，由北京化工大学与亚洲清洁空气中心团队基于项目成果共同完成。

报告作者

刘广青	教授	北京化工大学
薛春瑜	副教授	北京化工大学
任彦波	秘书长	中国农村能源行业协会民用清洁炉具专委会
万薇	中国区项目经理	亚洲清洁空气中心
张伟豪	高级环境研究员	亚洲清洁空气中心
武亭	项目主任	中国炉具网
徐银鸿	硕士研究生	北京化工大学
李闯	硕士研究生	北京化工大学
叶堃	硕士研究生	北京化工大学
张文廷	硕士研究生	北京化工大学
李洁	硕士研究生	北京化工大学

致谢

项目研究得到了农业农村部农业生态与资源保护总站、山西省、陕西省以及黑龙江省相关调研区域的市、县、乡、村各级政府部门的全力配合与支持。项目调研与测试工作由北京化工大学团队主要负责和实施，同时感谢北京大学环境与政策研究小组同学志愿参与入户访谈。

项目组感谢国务院参事室特约研究员吴吟先生、中国建筑科学研究院路宾教授、中国可再生能源学会秘书长李宝山先生、中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会主任郝芳洲先生、河北省农村能源行业协会会长边志敏先生与秘书长孙振锋先生为项目研究工作提供的专业建议与指导意见。

免责声明

本报告为《北方典型地区农村居民冬季取暖研究报告》的摘要报告，未经允许不得将报告内容用于营利或其他用途。

目录

CONTENTS

1. 背景	5
1.1 农村地区清洁取暖关乎蓝天与健康	5
1.2 清洁取暖是重点也是难点	5
2. 目标与方法	7
3. 典型研究地区的选取	8
4. 农村散煤取暖现状及其污染影响	9
4.1 取暖方式及习惯	9
4.2 燃煤消费情况及排放特征	10
4.3 排放水平及污染贡献	14
4.4 室内空气污染	17
5. 清洁取暖政策要求与实施情况	19
5.1 清洁取暖政策	19
5.2 资源禀赋基础	21
5.3 补贴政策情况	22
6. 清洁取暖技术路径分析	26
6.1 当前技术路径选择	26
6.2 清洁取暖技术试点技术路径对比分析	27
7. 清洁取暖改造意愿	35
8. 结论与建议	37
附件 1 项目团队构成	41
附件 2 各地参加座谈会的单位列表	42
附件 3 山西省附表	43
附件 4 陕西省附表	48
附件 5 黑龙江省附表	51
参考文献	53

背景



1.1 农村地区清洁取暖关乎蓝天与健康

燃煤是农村地区取暖的重要燃料

全球大约有 30 多亿人仍在会使用会产生污染的固体燃料 (如煤炭、薪柴、粪便、煤油和农作物废料) 和落后炉具来做饭、取暖和照明^[1]。中国北方农村地区取暖使用能源以燃煤为主, 燃煤取暖面积约占总取暖面积的 83%。大量农村地区使用散煤与传统炉灶取暖的情况仍普遍存在, 每年取暖散烧煤消耗 2 亿吨, 占总取暖用煤 4 亿吨的一半^[2]。

散煤燃烧的污染排放和健康影响

基于中国北方城市公开发布的 PM_{2.5} 源解析结果, 燃煤污染是 PM_{2.5} 的重要的来源, 贡献结果在 17% 到 36% 之间, 其中高度依赖燃煤取暖的北方城市, 在冬季该比例可高达 50%^[3]。因而削减散煤使用对空气质量改善意义重大。据估算, 2017 年全国散煤消费量减少约 6500 万吨, 散煤清洁化替代对 2017 年京津冀地区 PM_{2.5} 平均浓度下降贡献了 21%^[4]。其中, 北京市冬季 PM_{2.5} 浓度大幅降低, 散煤治理贡献率达 40% 左右^[5]。

此外, 固体燃料不完全燃烧时所排放的污染物对室内空气质量有不容忽视的影响。常见的室内污染物主要包括颗粒物 (PM)、一氧化碳 (CO)、多环芳烃 (PAH) 和甲烷, 其中, 不完全燃烧产生的黑碳 (BC) 是颗粒物的重要组份, 被国际癌症研究机构 (IARC) 归类为 2B 类致癌物。通风不良会加剧所有室内污染物带来的

健康风险, 特别是暴露于高浓度的一氧化碳可能是致命的。

使用固体燃料进行炊事和取暖可导致心血管疾病, 急性呼吸道感染, 慢性阻塞性肺疾病, 癌症, 和白内障等疾病的发病率增加。其中, 妇女儿童长期暴露的室内污染浓度是室外浓度的 5~6 倍^[6]。对于儿童, 空气污染造成过早死亡的最大风险因素是肺炎。在固体燃料使用最多的国家和地区, 肺炎的相关发病率和死亡率通常最高^[7]。许多研究已经量化了暴露于家庭固体燃料烟雾的儿童急性下呼吸道感染 (ALRIs) 的相对风险, 其中大多数来自发展中国家^[8]。

2005 年, 农村地区的室内空气污染暴露量是城市地区的 7 倍, 占全国平均综合加权人口暴露的 69%, 这一情况在十年间得到了很大改善。由于经济发展和收入水平的提升, 更多的家庭开始使用清洁能源代替固体燃料, 室内污染在近些年有了显著下降 (由 1990 年的 84% 降低到 2017 年 32%), 而室内空气污染造成的死亡人数也由 79 万人/年降低到 27 万人/年——但这仍然意味着每 10 万人中就有 16 人死于室内空气污染^[9]。

1.2 清洁取暖是重点也是难点

清洁取暖规划政策任务严峻

《北方地区冬季清洁取暖规划 (2017-2021 年)》(简称《规划》) 中指出当前中国北方地区清洁取暖面积不足 20%, 《规划》提出到 2021 年 “2+26” 城市

以及其他地区的农村地区清洁取暖率分别达到 60% 与 40% 以上，清洁取暖改造任务量巨大。

“双替代”是主要的清洁采暖路径，但已进入瓶颈区

各地为实现清洁取暖率的目标，纷纷积极推进天然气代替煤炭与电代替煤炭（简称“双替代”）的取暖工程，使用天然气与电的清洁取暖农户的数量及占比不断提高，然而由于部分地区存在天然气气源不足与电网负荷无法满足需求、成本较高等问题，导致“双替代”继续扩大推广进入瓶颈区。

“宜”是清洁取暖政策的升级补丁

京津冀及其周边地区是清洁取暖研究和初期试点推进的重点区域，在试点实施过程中由于过于仓促，大面积推广煤改气后暴露出“气荒”等问题。《规划》提出清洁取暖应因地制宜选择切实可行、居民欢迎的清洁取暖技术路线。

但在清洁取暖试点实施以来，许多地方“一刀切”去煤化的政策仍然风行，缺乏因地制宜的差异化政策和技术路径，导致当地能源与资源不能充分利用，因地制宜的清洁取暖方案顺利落地难度大。

非重点区域将是政策“深水区”

非重点区域尚且不具备京津冀地区的财政支持力度和农村经济水平，将面临更大的清洁取暖实施障碍，是政策实施的深水区。在已经实施清洁取暖试点的初期暴露了一系列问题，如当地对能源禀赋与发展规划统筹谋划不足，缺少统一的管理部门，导致协调联动、支持政策与补贴政策不到位。在实施过程中，也存在产品采购流程、产品技术质量及评估机制不完善，规

划目标与现实情况不匹配的情况。最终使得农户方面取暖效果不理想，政府方面补贴也难以长期维持。

非重点区域缺乏支撑技术路径选择和决策的研究

目前大部分清洁取暖相关的研究更多的关注了城市及城乡结合部的清洁取暖，重点集中在京津冀地区。对于京津冀之外广大北方农村地区，如陕西、山西、黑龙江等冬季取暖需求较大的典型北方农村地区与汾渭平原地区清洁取暖的深入研究不足，尤其是深入农村一线开展大规模的实地调查与研究甚少。并且更为缺乏各类清洁取暖技术在农村地区居民家实地使用情况的长时间监测数据，为政府制定清洁取暖规划及技术解决方案提供的支撑数据不足。

基于以上情况，本研究针对中国北方典型农村地区特别是京津冀以外即将深入推广农村清洁取暖的典型地区开展深入的大规模实地调研，深入了解清洁取暖现状及存在的问题，为北方农村地区清洁取暖提出可持续发展的建议，是一项意义重大的工作。





目标与方法

研究团队旨在通过赴北方农村地区开展大规模政府访谈、入户调研、实地测试，获得一手数据与信息，分析当前典型地区散煤取暖的排放特征及减排潜力，不同取暖技术路径的效果、经济性和适用性，清洁取暖改造的用户意愿，摸清当地清洁取暖现状及存在的问题，为相关方提供了解清洁取暖问题的丰富视角，为政府决策者制定清洁取暖规划与解决方案提供数据支撑与依据。研究团队共开展了：

- ◆ 地方各级政府和协会访谈 12 次
- ◆ 问卷调研 3000 户，其中入户调研 574 户
- ◆ 厨房性能测试 120 户
- ◆ 污染排放测试 100 户
- ◆ 室内空气质量测试 130 户
- ◆ 取暖效果测试 47 户

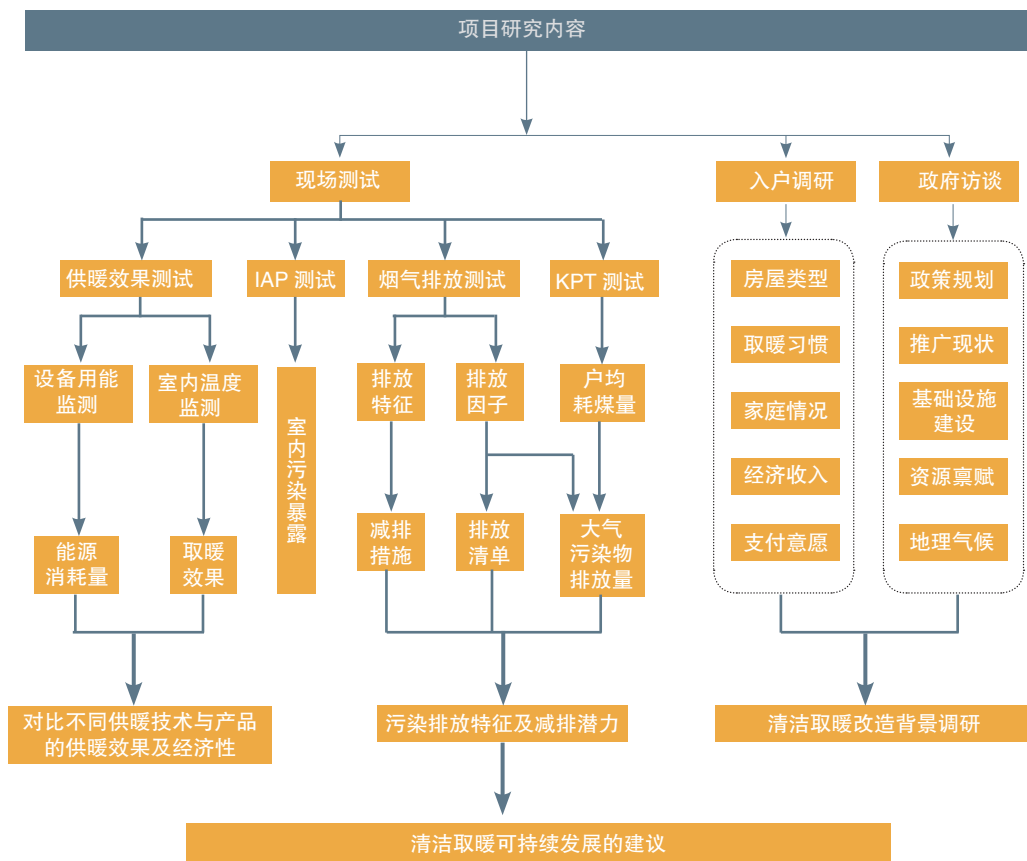


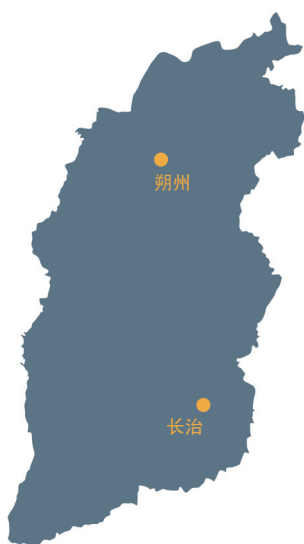
图 1 项目研究方法框架

典型研究地区的选取

本研究选择北方山西、陕西和黑龙江 3 个省份为研究范围，是京津冀以外的典型北方地区代表，同时农村冬季取暖散煤使用量均排全国前十。山西、陕西包含“2+26”城市和汾渭平原城市，是蓝天保卫战的主战场之一；黑龙江作为东北三省的典型代表，是生物质综合利用的代表性地区。

为了保证研究具有一定的典型性与代表性，分别根据三省的地理及气候特征、资源禀赋情况、经济条件和政策情况选择 6 个代表性城市开展实地调研：

山西省



长治

“2+26”城市代表

朔州

山西北部严寒地区及非重点管控城市的代表

陕西省



铜川

汾渭平原城市代表

榆林

陕北高原山区城市代表

黑龙江省



绥化

粮食产地，具有丰富的生物质秸秆资源的代表性城市

牡丹江

煤炭资源和林木资源丰富的东北山区城市

农村散煤取暖现状及其污染影响

4.1 取暖方式及习惯

传统的燃煤取暖方式仍是主流，经济是决定性因素

北方农村地区居民冬季典型的取暖方式包括烤火炉、水暖炉、炕、烤火炉 + 炕、水暖炉 + 炕，如下图所示。本次调研的山西、陕西使用前四种较多，而在高寒的黑龙江地区，水暖炉 + 炕则基本是标配。2015-2016年中国农村能源行业协会组织的中国采暖炉具行业发展调研结果明，山西省农户取暖大约有30%的水暖炉，70%的烤火炉。



图2 居民冬季取暖方式

烤火炉由于购置和使用成本都非常低，是农村家庭“入门级”取暖设备，但由于密封性、燃烧效率差，往往伴随高浓度的污染排放。水暖炉具备暖和舒适、操作方便，室内空气污染较轻的诸多优点，但是运行成本高，是经济条件好的家庭会选择的“进阶级”取暖设备。而经济条件一般且属于极寒地区，居民倾向于选择烤火炉 + 炕取暖。选择哪种方式取暖，经济收入是决定性因素。

以山西为例，我们在调研中发现同属于长治市的长子县和武乡县，由于长子县的居民经济条件较好，所以该地区的居民大部分选择水暖炉取暖，占比达74%；而武乡县属于山区贫困县，使用烤火炉的用户比较多，占比为55.71%；朔州市位于山西北部，经济条件一般且属于极寒地区，居民倾向于选择烤火炉 + 炕取暖，占比高达75.22%。

北方地区的常见燃料包括散煤（又包括块煤、蜂窝煤和粉煤）、薪柴和玉米芯、秸秆等。其中水暖炉和烤火炉主要依靠烧块煤和蜂窝煤，而炕内大多燃烧玉米芯、秸秆和薪柴。散煤价格根据其品质和来源不同，价格在400-1200元/吨不等，优质散煤的价格都接近千元。

此外，经济水平也是取暖时长的决定性因素，甚至超过当地气温的影响。调研发现，山西南部的温暖地区平均取暖时长为 4.61 ± 0.54 个月，山西北部的寒冷地区平均取暖时长为 4.24 ± 1.11 个月，可见并不是天气越寒冷，平均取暖时长越长。

表 1 不同燃煤取暖方式的对比（山西省结果示例）

取暖方式	年耗煤量 / 吨	购置成本 / 元	取暖面积 / m ²	优缺点
烤火炉	1-2	100-500	10-25	运行成本低；操作不方便，室内空气污染严重
烤火炉 + 炕 *	1-2	100-500	10-30	运行成本低、暖和舒适；室内空气污染严重
水暖炉	3-4	2000-3000	50-120	暖和舒适、操作方便，室内空气污染较轻；运行成本高

* 注：取暖使用的炕多为农户多年前自制，购置成本忽略不计。

传统的取暖方式可以兼顾炊事

冬季取暖期间大部分居民（78% 以上）使用取暖炉具进行取暖的同时进行炊事，这表明农户习惯于采用具有炊事功能的取暖设备，受访者认为在取暖的同时进行炊事既节约能源也方便。而类似电采暖设备这样不具备兼顾炊事优势的技术路径，在推广中可能因用户习惯问题而受到抵触。

4.2 燃煤消费情况及排放特征

农村生活煤炭消耗的实际情况被严重低估

研究团队在山西省农村地区进行的厨房性能测试（KPT）表明，使用烤火炉一个采暖季的户均用煤量 2.02 吨，而水暖炉则为 4.16 吨，补充问卷调研得出的结果也非常相近。基于炉具使用比例数据，加权平均得出山西省冬季取暖户均散煤消费量为 2.66 吨。进而基于第三次全国农业普查结果数据，可估算山西省农村居民取暖年散煤消费量为 1656.12 万吨。

2018 年山西统计年鉴表明，山西省 2017 年生活煤炭消费量为 614.81 万吨，这一数值与实地调研和测试结果有较大差距。谢卧龙等^[10]、霍沫霖等^[11]根据调研结果估算了山西省农村取暖用燃煤消耗量分别为 1297.8 万吨和 1878.8 万吨，与本研究结果接近。中国北方地区居民生活散煤消费量被严重低估。

陕西省和黑龙江省的估算结果也具有类似的趋势。陕北关中地区（包括铜川）户均用煤量为 1.18 吨 / 采暖季，陕北地区户均用煤量为 1.56 吨 / 采暖季，陕西省农村居民取暖年散煤消费量为 439.24 万吨。而陕西统计年鉴则显示 2017 年农村地区生活煤炭消费量为 211.66 万吨。

黑龙江省农村地区冬季使用水暖炉取暖的耗煤量平均值为 2.45 吨 / 采暖季。基于此估算黑龙江省农村居民取暖年散煤消费量为 1282.58 万吨，这一数值更是远高于统计年鉴上显示的农村生活煤炭消费量（86.25 万吨）。清华大学建筑节能中心组织全国大

表 2 采暖散煤消费量的对比

省份	农村采暖散煤消费量 / 万吨 * 本研究	农村生活煤炭消费量 *2018 统计年鉴数据
山西	1656.12	614.81
陕西	439.24	211.66
黑龙江	1282.58	86.25

规模农村家庭能源消费调研，估算黑龙江省农村地区采暖散煤消费量为 1454.5 万^[12]，也与本研究的估算结果接近（表 2）。

燃煤品质良莠不齐，普遍较难达到民用散煤质量标准

研究团队对现场采集的煤样进行热值、工业分析和元

素分析，结果显示各地的燃煤品质参差不齐，分别对比民用散煤质量标准（GB34169-2017）、民用型煤质量标准（GB 34170—2017）、和陕西省工业及民用燃煤标准（DB61 1099—2017）要求的热值、灰分、挥发分、含硫量，很难全面达标，如下表（√表示达标，×表示不达标）（表 3）。

表 3 散煤品质情况

	热值	灰分	挥发分	含硫量
山西武乡 散煤	√	√	×	×
山西长子 散煤	√	√	×	√
山西朔州 散煤	√	√	×	√
陕西榆林 散煤	√	√	×	√
陕西铜川 散煤	√	√	×	×
陕西榆林 兰炭 I	×	×	×	√
陕西榆林 兰炭 II	√	√	√	√
陕西铜川 型煤 I	√	√	√	√
陕西铜川 型煤 II	×	×	√	√
黑龙江 散煤	√	√	×	√

测试散煤普遍在挥发分上高于标准，是烟煤或质量更差的褐煤特征，表明居民所用散煤品质不高。此外，政府推广的型煤也存在品控问题，发现有型煤产品有灰分过大，热值非常低的问题，与用户反映在使用过程中点火较难，且不耐烧的情况符合。被作为清洁煤推广的兰炭也存在类似问题。

燃煤取暖排放因子远高于其他燃煤利用方式

以山西为例，对民用炉具的污染物排放因子的测试结果显示，采暖民用燃煤单位排放强度远高于其他更为清洁的燃煤利用方式。以开展调研测试的山西省农村地区为例，民用烤火炉的SO₂、NO_x、PM_{2.5}排放因子约为电力行业排放的8.1倍、2.8倍、17.9倍；为工业锅炉排放的1.7倍、1.2倍、10.1倍。民用水暖炉分别为电力行业排放的5.7倍、2.0倍、13.7倍；为工业锅炉排放的1.2倍、0.8倍、7.8倍（如图3）。

将实测结果与《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南》（以下简称《指南》）的推荐值进行比较，发现CO与NO_x的排放因子与《指南》推荐值相近，而PM_{2.5}和SO₂排放因子低于《指南》中烟煤的推荐值。研究团队关于影响排放因子测试结果的分析如下：

PM_{2.5}与煤炭类型、炉具类型、燃烧方式和使用习惯等相关，不同测试条件下测定的排放因子之间差异较大；而SO₂排放与煤的含硫量呈正相关。本次测试散煤品质有低硫、低灰的特点，测试结果与Chen等^[13]、陈国伟等^[14]研究发现接近。

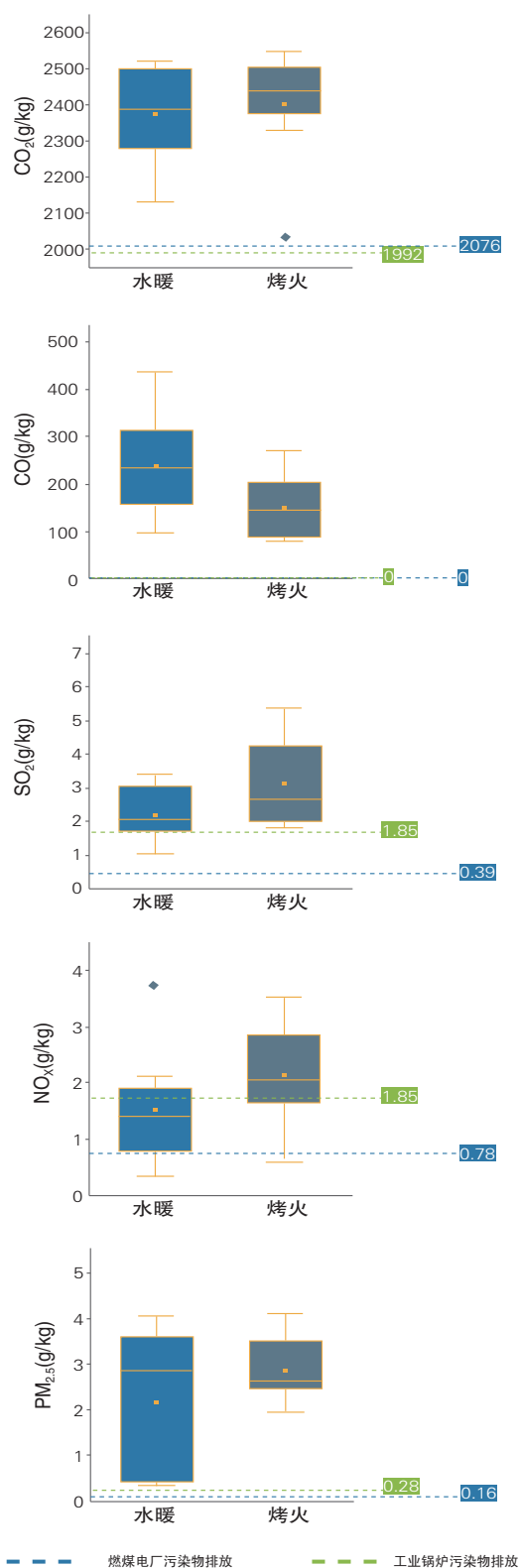


图3 山西省农村地区水暖炉和烤火炉污染物排放因子及对比

另一点需要关注的是，本研究使用的测试方法参考即将公布的标准《ISO 19869:2018 Clean cookstoves and clean cooking solutions — Field testing methods for cookstoves》进行全过程测试。由于不同燃烧阶段的PM_{2.5}排放差异较大，大部分文献仅对排放大量PM_{2.5}的点火与大火燃烧阶段进行了测试，而《指南》中因子采用的是不同文献的平均值，故其结果高估了燃烧散煤的全天排放。

CO排放的产生主要是由于燃烧不充分导致的。根据2015–2016年中国农村能源行业协会组织的中国采暖炉具行业发展调研报告表明，农村地区居民取暖方式多以烤火炉为主，部分地区使用水暖炉。烤火炉质量

较为简陋，燃烧效率较差。山西农村居民夜间取暖多使用封火焖烧的方式，水暖炉相比烤火炉封火时间更长，导致CO排放比烤火炉高。调研结果显示，农户每天封火时长达10–18小时，散煤长时间在缺乏氧气的环境下燃烧产生大量的CO。

烤火炉PM_{2.5}排放因子相较于水暖炉的较高，其原因为大部分测试用户所使用的为传统老旧烤火炉，燃煤燃烧不充分所导致。

由于水暖炉的质量差异性较大，其排放水平也存在差异。水暖炉的SO₂排放相较于烤火炉较低，其原因为测试的水暖炉用户使用的燃煤含硫量较低。

表4 山西省农村地区民用炉具污染物排放因子

项目	排放因子 (g/kg)				
	CO	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	NO _x
烤火炉	161.06 ± 61.67	2409.23 ± 154.37	3.14 ± 1.60	2.86 ± 0.85	2.15 ± 1.07
水暖炉	248.81 ± 104.53	2373.18 ± 134.33	2.24 ± 0.81	2.19 ± 1.52	1.53 ± 1.01
《指南》推荐值	140.1	—	11.32	10.8	1.6
燃煤电厂 ^[15]	0	1992	0.39	0.16*	0.78
工业锅炉 ^[14]	0	2076	1.85	0.28*	1.85

*注：燃煤电厂和工业锅炉的颗粒物排放因子包含所有颗粒物，不仅限于PM_{2.5}。

点火和加煤操作期间，有害污染物排放峰值越多

在点火的初期，炉膛温度较低，燃料主要处于加热和部分热解阶段，会产生较高的CO和PM_{2.5}排放；随

着燃料燃烧进入稳定阶段，炉膛温度升高，CO排放处于稳定且较低的水平，SO₂、NO_x和CO₂排放增加。测试结果印证了这一特征：烤火炉农户在一天中的取暖时间有两个时间段，一般在晚间睡前（18:00–

23:00) 和上午 (8:00–12:00), 烟气排放集中在两个时间点。而水暖炉全天都处于燃烧状态, 用户仅会在早晨进行加煤操作而产生排放峰值, 相对烤火炉的

有害污染物排放量较小, 下图为烤火炉烟气排放典型特征的示例。

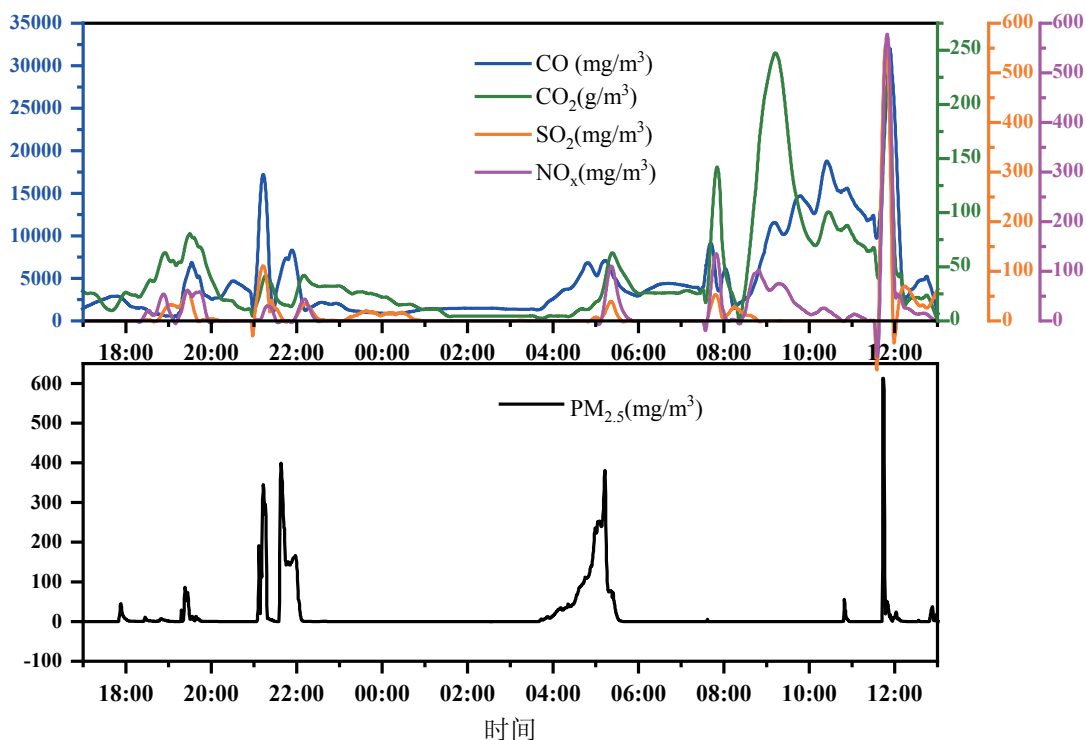


图4 烤火炉烟气排放特征 – 封火示例

总体来看, 降低颗粒物排放的关键是控制挥发份的析出速度, 减少加煤等人为操作模式的影响, 同时提高炉具燃烧技术; SO_2 的排放与煤的含硫量密切相关; CO 的排放主要取决于炉具燃烧效果以及封火阶段。 NO_x 主要来自燃料型氮, 取决于炉具燃烧强度。

4.3 排放水平及污染贡献

散煤排放贡献较大的污染物分别为 CO 、 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$

基于农村居民取暖年均燃煤消费总量, 研究团队应用实地测试获得的污染物排放因子估算了农村居民燃烧散煤的污染物排放量及其对各省排放总量的贡献

比例, 并比照《指南》推荐排放因子做出了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 排放对比测算。三省污染物排放总量的数据来源于清华大学开发的中国多尺度排放清单模型 MEIC, 本文引用了 2016 年最新数据用于分析。其中, 排放贡献只考虑农村居民使用散煤分散取暖的情况, 城镇集中供暖与农村居民生物质燃烧的排放未包括在内。

山西省结果表明, 根据《指南》推荐值计算, 冬季农村居民取暖燃烧散煤造成的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 排放对山西省年排放总量的贡献分别为: 31.87% ($\text{PM}_{2.5}$) 与 12.48% (SO_2), 而根据实测值计算二者贡献分别为: 7.85% ($\text{PM}_{2.5}$) 与 3.16% (SO_2), 其他污染物的排放贡献分别为: 42.44% (CO)、2.84% (NO_x)、7.84% (CO_2), 如表 5 所示。

表 5 山西省农村居民取暖排放总量及排放贡献

污染物	排放因子 (g/kg)	农村居民取暖 排放总量 (万吨)	年排放总量 (万吨)	排放贡献 (%)
CO	185.89	307.86	725.34	42.44%
NO _x	1.96	3.25	114.49	2.84%
SO ₂	11.32 ^[16] (2.87)*	18.75 (4.75)	150.19	12.48% (3.16%)
PM _{2.5}	10.80 ^[15] (2.66)	17.89 (4.41)	56.13	31.87% (7.85%)
CO ₂	2398.42	3972.07	50649.67	7.84%

*注：括号内数字为 SO₂ 和 PM_{2.5} 的实测值及其计算结果

陕西省结果表明，根据《指南》推荐值计算，冬季农村居民取暖燃烧散煤造成的 PM_{2.5} 和 SO₂ 排放对陕西省年排放总量的贡献分别为：17.93% (PM_{2.5}) 与 15.60% (SO₂)，

而根据实测值计算二者贡献分别为：7.85% (PM_{2.5}) 与 5.77% (SO₂)，其他污染物的排放贡献分别为：20.99% (CO)、1.90% (NO_x)、3.44% (CO₂)，如表 6 所示。

表 6 关中和陕北地区农村居民散煤取暖排放总量及排放贡献

污染物	排放因子 (g/kg)	农村居民取暖 排放总量 (万吨)	年排放总量 (万吨)	排放贡献 (%)
CO	182.14	80.00	381.05	20.99%
NO _x	2.46	1.08	56.75	1.90%
SO ₂	16.06 (5.94)	7.05 (2.61)	45.20	15.60% (5.77%)
PM _{2.5}	10.80 (4.30)	4.74 (1.89)	24.05	19.73% (7.85%)
CO ₂	2416.09	1061.24	30819.11	3.44%

*注：括号内数字为 SO₂ 和 PM_{2.5} 的实测值及其计算结果

黑龙江省结果表明，根据《指南》推荐值计算，冬季农村居民取暖燃烧散煤造成的 PM_{2.5} 和 SO₂ 排放对黑龙江省年排放总量的贡献为：43.19% (PM_{2.5}) 与 12.67% (SO₂)，而根据实测值计算二者贡献分别为：

15.56% (PM_{2.5}) 与 4.97% (SO₂)，其他污染物的排放贡献分别为：27.63% (CO)、2.87% (NO_x)、7.43% (CO₂)，如表 7 所示。

表 7 黑龙江地区农户散煤取暖污染物排放总量及排放贡献

污染物	排放因子 (g/kg)	农村居民取暖 排放总量 (万吨)	年排放总量 (万吨)	排放贡献 (%)
PM _{2.5}	10.8 (3.89)	13.85 (4.99)	32.07	43.19% (15.56%)
CO	123.71	158.67	574.23	27.63%
NO _x	1.73	2.22	77.40	2.87%
SO ₂	3.03 (1.19)	3.89 (1.53)	30.71	12.67% (4.97%)
CO ₂	1855.93	2380.37	32028.77	7.43%

转向清洁煤的使用可大幅度降低排放贡献

从贡献比例来看，散煤排放应该重点控制 CO、SO₂ 和 PM_{2.5} 的排放。若农户转向使用低硫、低灰份的散煤，则可大幅度降低 SO₂ 和 PM_{2.5} 的排放。以山西为例，低硫和低灰分的燃煤可使得 SO₂ 和 PM_{2.5} 的排放分别下降 9.32%、24.02%。同时，通过燃烧技术的改进可以进一步降低 CO 和 PM_{2.5} 的排放。

陕西省神木市推行兰炭代替散煤进行冬季取暖。研

究团队在实地测试了兰炭燃烧的各项污染物排放情况，并基于等热值法对陕西省完全使用兰炭代替散煤进行冬季取暖的用量进行估算。结果显示，若关中和陕北地区农户冬季取暖均使用兰炭，则 PM_{2.5}、CO、NO_x、SO₂、CO₂ 的排放贡献分别为 2.15%、14.01%、0.60%、1.87%、2.56%（如表 8），其排放比燃烧质量较好的低硫低灰煤进一步降低。因此，燃料质量是影响污染物排放的重要因素。高质量的燃料可有效降低关键污染物 PM_{2.5} 和 SO₂ 的排放。

表 8 关中和陕北地区农村居民兰炭取暖排放总量及排放贡献

污染物	排放因子 (g/kg)	农村居民取暖排放总量 (万吨)	年排放总量 (万吨)	排放贡献 (%)
CO	163.05	53.71	381.05	14.10%
NO _x	1.04	0.34	56.75	0.60%
SO ₂	2.57	0.84	45.20	1.87%
PM _{2.5}	1.57	0.52	24.05	2.15%
CO ₂	2390.97	787.66	30819.11	2.56%

生物质炉具实际使用效果较差，操作不当是重要原因

研究团队在实地测试了生物质成型颗粒在配套炉具中燃烧的各项污染物排放情况，并基于等热值法对黑龙江省完全使用生物质成型颗粒代替散煤进行冬季取暖的用量进行估算。生物质成型颗粒燃烧的排放因子、排放总量以及排放贡献如表 9 所示，其中，排放因子实地值为研究团队在实地测试结果，排放因子理论值为《生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南》中户用生物质炉具燃烧生物质成型燃料排放系数推荐值。

不同于散煤，生物质成型燃料的排放实测值高于《指南》推荐值，一方面是由于燃料品质的差异，秸秆成型燃

料灰分大、容易结渣影响一二次进风；另外一方面主要是由于农户的使用习惯造成的。农户过去长期使用散煤，点火与加煤操作简单随意。改用生物质炉具之后，延续了过去简单点火与添加燃料的做法，而通常不会按照生物质炉具的使用流程进行操作，使得生物质炉具没有产生很好的燃烧效果。这也是很多文献中炉具性能实地测试结果没有实验室测试结果优良的主要原因。

若黑龙江地区农户使用生物质成型颗粒替代散煤取暖，则 PM_{2.5}、CO、NO_x、SO₂ 的排放贡献分别为 9.53%、17.07%、3.50%、4.32%。若生物质成型颗粒燃烧效果达到较佳水平，排放因子为理论推荐值的情况下，则 PM_{2.5}、CO、NO_x、SO₂ 的排放贡献分别为 4.02%、

2.76%、2.66%、2.50%。与实地测试结果相比，减排效果更为显著。由于生物质燃料为“碳中和”，CO₂ 的排放记为零。

因此，利用生物质成型燃料替代散煤取暖，可有效降低关键污染物 PM_{2.5}、CO、SO₂ 的排放。

表 9 黑龙江地区农村居民生物质成型颗粒取暖排放总量及排放贡献

污染物	排放因子 (g/kg)		排放因子 (g/MJ)		农村居民取暖排放总量 (万吨)		年排放总量 (万吨)	排放贡献	
	实地值	理论值	实地值	理论值	实地值	理论值		实地值	理论值
PM _{2.5}	1.59	0.67	0.11	0.04	3.06	1.29	32.07	9.53%	4.02%
CO	50.99	8.25	3.42	0.55	98.00	15.86	574.23	17.07%	2.76%
NO _x	1.41	1.07	0.09	0.07	2.71	2.06	77.40	3.50%	2.66%
SO ₂	0.69	0.4	0.05	0.03	1.33	0.77	30.71	4.32%	2.50%

4.4 室内空气污染

室内 PM_{2.5} 浓度远高于 WHO 指导值，部分家庭有 CO 超标情况

研究团队在山西省 26 户农户家中进行了 PM_{2.5} 和 CO 的室内空气污染测试，结果显示 (如图 5) 燃煤取暖室内 PM_{2.5} 和 CO 日均污染物浓度分别为 250.77 μg/m³ 和 6.44 mg/m³。室内的高浓度污染物主要来自于炉具密闭

性不好产生的泄露排放。室内空气 PM_{2.5} 日均浓度高达世界卫生组织 (WHO) 提出的日均浓度指导值 25 μg/m³ 的十倍，全部的用户家中都出现了超高值。平均室内空气 CO 日均浓度整体略低于 WHO 提出的室内日均浓度指导值 7 mg/m³，但仍然有 50% 的家庭 CO 室内日均浓度超过了指导值，CO 超标主要由于晚上封火过程中造成大量的 CO 排放，并且房间未及时通风。需要强调的是，加煤操作也会造成室内 CO 浓度急速升高。

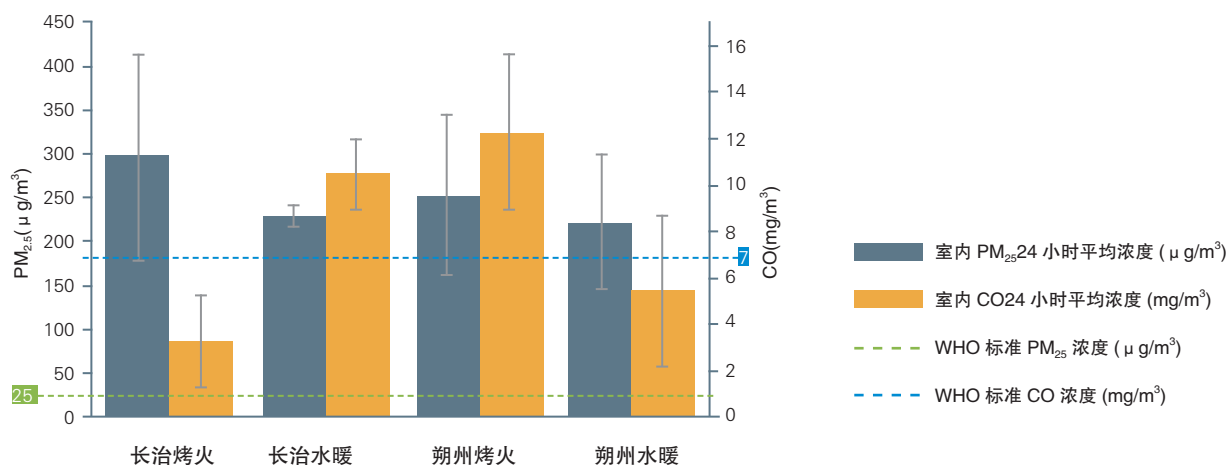


图 5 日均 PM_{2.5} 和 CO 室内浓度与 WHO 标准对比

清洁煤的使用可有效降低室内 PM_{2.5} 浓度

研究团队在陕西省 40 户农户和黑龙江省 18 户农户家中进行了 PM_{2.5} 和 CO 的室内空气污染测试，两省结果较为相近，测试农户家中的 PM_{2.5} 日平均浓度分别为 261 μg/m³ 和 259 μg/m³，分别有 10% 和 22%

的农户家中 CO 室内日均浓度超过了 WHO。值得提出的是，使用散煤用户的 PM_{2.5} 室内空气污染浓度高于使用兰炭和型煤的用户家中浓度。兰炭燃烧对室内空气质量的影响受炉具影响不高，燃烧兰炭的烤火炉和水暖炉的污染物排放浓度相当。

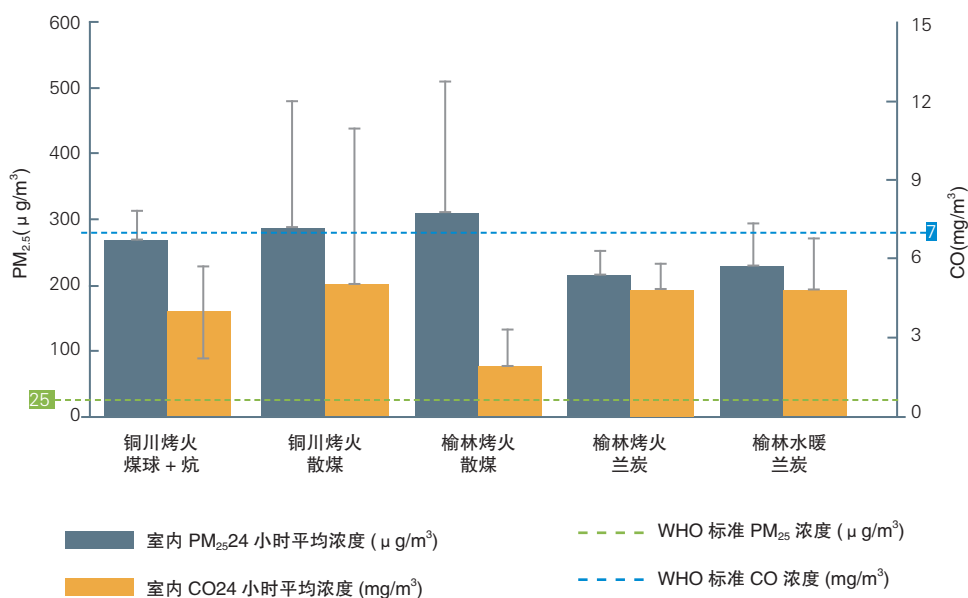


图 6 日均 PM_{2.5} 和 CO 室内浓度与 WHO 标准对比



清洁取暖政策要求与实施情况

5.1 清洁取暖政策

国家层面政策目标时间紧、任务重

财政部、原环境保护部等十部委发布的《北方地区冬季清洁取暖规划(2017-2021年)》和国务院发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，对北方地区清洁能源取暖工作进行了整体部署，提出2021年“2+26”城市以及其他地区的农村地区清洁取暖率分别达到60%与40%以上的目标。

“禁煤区”是减少燃煤使用的重要措施，但也可能降低了灵活性

2018年，山西省设区市均将城市建成区与近郊区划定为“禁煤区”，“禁煤区”范围内除煤电、集中供热和原料用煤企业外，禁止储存、销售、燃用煤炭。“禁煤区”面积除太原市、晋中市外，都在100平方公里以内。相比于京津冀地区，山西省各城市的建成区相对较小，其禁煤区范围也相对较小。这样对非“禁煤区”未来选择多种技术路径提供了空间，但是非“禁煤区”中是否可以推广洁净煤以及如何推广洁净煤的问题，各级政府没有明确的态度与思路。

陕西省于2014年发布了《陕西省“治污降霾·保卫蓝天”五年行动计划》，其中要求西安市、咸阳市、西咸新区城市建成区除集中供热外，实行全面禁煤，其他设区城市和杨凌示范区禁煤区面积要达到城市建成区面积的80%以上。

黑龙江省内各市也设置了高污染燃料“禁燃区”，规定面积不低于城市建成区面积的85%。在禁燃区内，禁止销售、燃用高污染燃料，禁止新建、扩建燃用高污染燃料的设施，禁燃区面积不低于城市建成区面积的85%。

“禁煤区”的划定是在城市核心区减少污染物排放的有效措施，但同时也限制了技术路径的选择灵活性。在长治市调研中就发现存在这样的例子，某城乡结合部因划为禁煤区而实施了“煤改气”，但实际上该地附近有新建的热电厂，存在更经济稳定的供热来源而无法接入。

“2+26”及汾渭平原城市需完成双替代硬性指标

《京津冀及周边地区2017-2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》、《京津冀及周边地区2018-2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》以及《汾渭平原2018-2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》分别对山西省、陕西省相关城市规定了明确的清洁取暖指标要求和技术路径：山西省“2+26”在列城市2017-2018年采暖季完成“双替代”改造39万户，2018-2019年完成替代26万户。汾渭平原地区，2018年10月底前，山西所涉城市要完成散煤替代38.3万户；河南省替代8.8万户；陕西省替代70.7万户。上述双替代指标均为硬性任务，纳入考核范围，因此地方政府在选择清洁取暖替代路径会优先考虑燃气和电取暖，这也一定程度上约束了其它技术路径的选择。

地方政策“层层加码”与书面达标的怪象并存

《山西省冬季清洁取暖实施方案》基于国家要求目标，明确了清洁取暖各种技术路径的具体目标。取暖方式以清洁燃煤集中供暖（55%）、电供暖和天然气供暖（16%）为主，生物质等可再生能源供暖比例很小，只占3.38%。《陕西省冬季清洁取暖实施方案（2017-2021年）》明确提出了陕西省清洁取暖所要达到的目标，区分关中与陕北地区，城镇、城乡结合部和农村目标的也各不相同。

但特别需要指出的是，山西和陕西都存在政策要求层层加码的情况。2017年，山西省的4个“2+26”城市从国家指标（39万户）—省级指标（39.86万户）—市级指标（42万户）的任务不断加码。非“2+26”城市在山西省的大气污染防治中同样被委以重任，被额外要求再完成5-10万户的指标。2017年山西省各市下达任务共105万户，实际完成了近113万户，超额完成任务。2018年，山西省内4个“2+26”城市和4个汾渭平原城市规定的任务指标与国家的任务指标非常接近，其他三个城市则额外要求完成5-6万户的指标。

2018年，陕西省汾渭平原城市从国家指标（70.7万户^[17]）—省级指标（78.55万户）—市级指标（103万户）不断加码。这主要是由西安市、宝鸡市、咸阳市单独制定了更为严格的市级指标，比如西安市的市级指标（65.8423万户）相比国家下达的指标（36.62万户^[17]）和省下达的指标（44.47万户^[18]）分别增加了约44%和32%。截至2018年11月底，西安市实际完成城乡居民清洁取暖改造46.83万户^[18]，顺利完成了省里下达的目标任务。然而，从实地调研来看，陕西省任务完成的实际情况并不理想，部分地区煤改气以通气入户算作任务完成，煤改电以

补贴空调或发放电热毯等直热式电取暖设备算作任务完成，但实际在农村地区，这些农户仍然在烧煤取暖。

黑龙江省清洁取暖目标，与国家总体目标保持一致，政策主要实施区域为城镇和城乡结合部。

黑龙江省秸秆资源十分丰富，为解决农村清洁取暖问题，加快推动秸秆资源化利用，政府下发了《黑龙江省秸秆综合利用实施方案》和《黑龙江省加强农村秸秆压块燃料化利用工作实施方案》，明确提出在全省选定60个村进行试点，建设60个村级秸秆成型燃料厂，每个村投放生物质民用小型炉具300台，试点炉具共1.8万台。

管理架构导致政策制定与实施可能脱节

清洁取暖的政策制定和实施涉及到多部门、多层级，协调存在很大难度。以山西省为例，清洁取暖工作由省统筹编制全省工作方案，建立由省发展改革委、省住房城乡建设厅、省经信委、省财政厅、省环保厅、省农业厅等相关部门为成员的工作协调机制，共同推进清洁取暖工作。清洁取暖工作协调机制办公室设在省发改委。具体分工如表10所示。

省级部门主要负责清洁取暖规划编制，不同技术路径的归口主管部门不同。各个市的规划基本照搬省级规划或简单加码。县级政府并不参与制定清洁取暖规划，对于省市下达的文件任务只能被动实施。乡镇政府是具体落实推广的最基层一线部门，对于当地农户取暖需求、资源禀赋比较了解。这样的管理架构导致制定的政策措施与地方发展实际情况可能有偏差，技术路径规定过于死板，产品质量监控无法保障，没有科学的考核评估办法等一系列问题。

表 10 清洁取暖工作省级管理架构及部门分工情况

牵头部门	部门职责	主要负责供暖方式	参与单位
省发改委	负责牵头制定全省清洁取暖实施方案，根据国家规划调整和省实施方案推进情况，会同相关部门对方案总目标、分类目标、及有关重点任务适时进行调整。	余热供暖	省经信委、省住建厅
		煤改气工程	省住建厅
		地热供暖	省国土厅
省经信委	负责协调指导各市做好“煤改电”等电供暖等相关工作。	煤改电工程	省发改委、省农业厅、电力公司
		生物质能供暖	省发改委、省农业厅
省环保厅	负责各类清洁供暖排放标准制定及环境监管工作。		
省住建厅	负责指导推进城镇清洁供暖和建筑能效提升工作。		
省农业厅	负责协调推进农村清洁取暖工作。	太阳能供暖	省住建厅
省财政厅	负责清洁供暖财政支持政策研究制定工作。		

后续危机重重的“热市场”

在清洁取暖市场目前以“政府主导、企业配合”，依靠政府强补贴推动清洁取暖。清洁取暖市场迅速发展，产业规模化迅速提升。但清洁取暖政府项目在短期内大规模实施也附带了一系列问题，由于只重数量的考核机制，产品评价标准的缺失以及供货时间紧，普遍存在压低产品价格与质量进行恶性竞标现象。

企业以满足政府需求为导向，在政府项目中追逐利润，以竞标政府项目为第一要务。大量企业进入市场，产品质量良莠不齐，很多厂家缺乏在北方农村地区进行产品维护的经验，一旦补贴退出，很可能未来企业无法给农村市场提供良好的售后服务。地方政府项目补贴资金不到位，企业大量垫资造成资金压力，加大经营风险，企业进退两难，面临较大问题。

尽管清洁供暖产品还有不少关键技术需要进一步突破，包括空气源热泵低温下的能效、除霜、噪

音和舒适度问题；生物质炉具质量稳定性、燃料品控以及结焦和反烟等问题；洁净煤质量、炉具性能提升等。但在“热市场”和短期逐利的情境下，企业缺乏积极性，不愿意投入资金、时间和精力进行技术研发与创新，导致产品技术无法进一步提升。

5.2 资源禀赋基础

煤炭大省“禁煤”难，具备推广清洁煤的良好基础

山西省煤炭储量巨大（2709.01亿吨，占全国1/4），80%以上的县城都有易获得的煤炭资源，禁煤措施在实施过程中难度很大。其中，无烟煤产量占全国产量的29%，具有推广洁净煤的优势。

陕西省同样是煤炭储量丰富的地区（1722.2亿吨），调研城市榆林、铜川均是重要的煤炭产地。其中榆林更是全国最大的兰炭生产基地，年产能达7000万吨^[19]，具有推广洁净煤的资源优势。

富煤省份不缺电，但农村电网负荷无法满足大规模的煤改电需求

山西发电量较大（2017年发电量为2823.94亿千瓦时）并可输出约30%至外省，2018年刚完成的农网户均配变容量达到2.28千伏安；陕西省2017年发电量为1781.39亿千瓦时，外调的电量占22%，农村电网改造工程正在落实户均2.2千伏安的目标。但需要进一步升级改造户均用电容量达到6.25-8.75千伏安，才能满足煤改电的要求^[20]，差距仍然较大。

即使产量大，天然气也仍可能是稀缺资源

山西的天然气资源整体无法满足本身需求需要从外省调入，但其丰富的煤层气资源排在全国第一，可以为煤改气提供资源条件。项目调研城市长治市的“煤改气”重要气源就来自当地的煤层气。

陕西天然气产量每年高达419.4亿立方米，全国排名第一，但是承担西气东输的重任，输出74%的产量。到冬季需求高峰，各地储气调峰能力不足，导致陕西省冬季气源紧张。2017年开始，西安市为了保障冬

季燃气供应，让双燃料出租车停止烧气改为烧油。

秸秆资源丰富的黑龙江具备生物质取暖的有利条件

黑龙江省生物质资源十分丰富，每年农业和林业生物质可收集利用量分别约为9000万吨和960万吨^[21]，折合标煤约5000万吨。特别是地处松嫩平原黑土核心区的绥化等地，秸秆产量集中，占全省秸秆可收集总量的1/3以上^[22]。与山西省和陕西省相比，黑龙江省的秸秆收储运体系也相对完善，使得在黑龙江省推行生物质取暖十分有利。

5.3 补贴政策情况

地方经济收入水平较低，清洁取暖的推动依赖补贴。相比于京津冀地区，山西、陕西和黑龙江的地方财政收入、公共预算和农户可支配收入更低，意味着清洁取暖的农户可负担成本较少，资金缺口和补贴压力均较大。山西省农户2017年农村居民平均人均可支配收入10788元^[23]，陕西省关中和陕北地区分别为11529元和12665元^[24]，黑龙江省居民可支配收入平均为12665元，均为北京市（24240元^[25]）的1/2左右，与河北省（11919.35元^[26]）相当（城市情况详见表11）。

表 11 地区经济收入情况

	地区生产总值 / 亿元	地方一般公共预算收入 / 亿元	农村居民人均可支配收入 / 元
长治市 ²⁷	1477.5	132.3	12705
朔州市 ²⁸	980.2	73.22	12305
铜川市 ²³	348.43	20.1	10346
榆林市 ²³	3361.29	312.9	11534
绥化市 ²⁹	1336.8	—	12831
牡丹江市 ²⁸	1344.7	—	16896

在调研走访的农户中，家庭年收入普遍偏低且贫富差距较大。在调研的三个省份，家庭年收入在3万元以下的受访者均在50%以上，其中山西省走访用户有40%的家庭年收入甚至不足1万。冬季取暖费用是农村家庭的重要开支项目，特别是对低收入家庭来说更是一笔不小的费用。在山西入户调研结果显示，即便使用价格最低的散煤（每吨约合500元左右）取暖，一个采暖季的燃煤使用花费约为1000元，占当地低收入家庭年可支配收入的10%。

山西高额补贴比肩京津冀，地方财政压力巨大

山西省清洁取暖补贴政策分为初装费补贴和运行补贴，初装费补贴包括入户管网费用、取暖设备费用，对于煤改气的初装费补贴各个城市从3000元到10000元不

等，气价大多是按照1元/立方米进行补贴（除太原市分段补贴、阳泉市0.5元/立方米），单个采暖季最高不超过2400元；对于煤改电的初装费补贴各个城市从2000元到27000元不等，补贴范围大的原因主要是煤改电的产品种类多样化。电价大多是按照0.2元/千瓦时进行补贴，单个采暖季最高不超过2400元，如图7所示。

对于煤改气与煤改电取暖设备的补贴，政府大都是对产品进行招标后，给老百姓免费提供，但由于财政压力及资金到位滞后的原因，政府大量亏欠竞标成功的供货企业，很多供货企业由于不能及时得到货款而陷入财务艰难状况。对于电与天然气的补贴，目前政府只承诺补贴三年，三年后如何持续还未明确，老百姓存在无法负担高额运行费用的担忧。补贴大都采用事后补贴的模式，部分地区由于财政紧张，还未完全给居民兑现补贴。

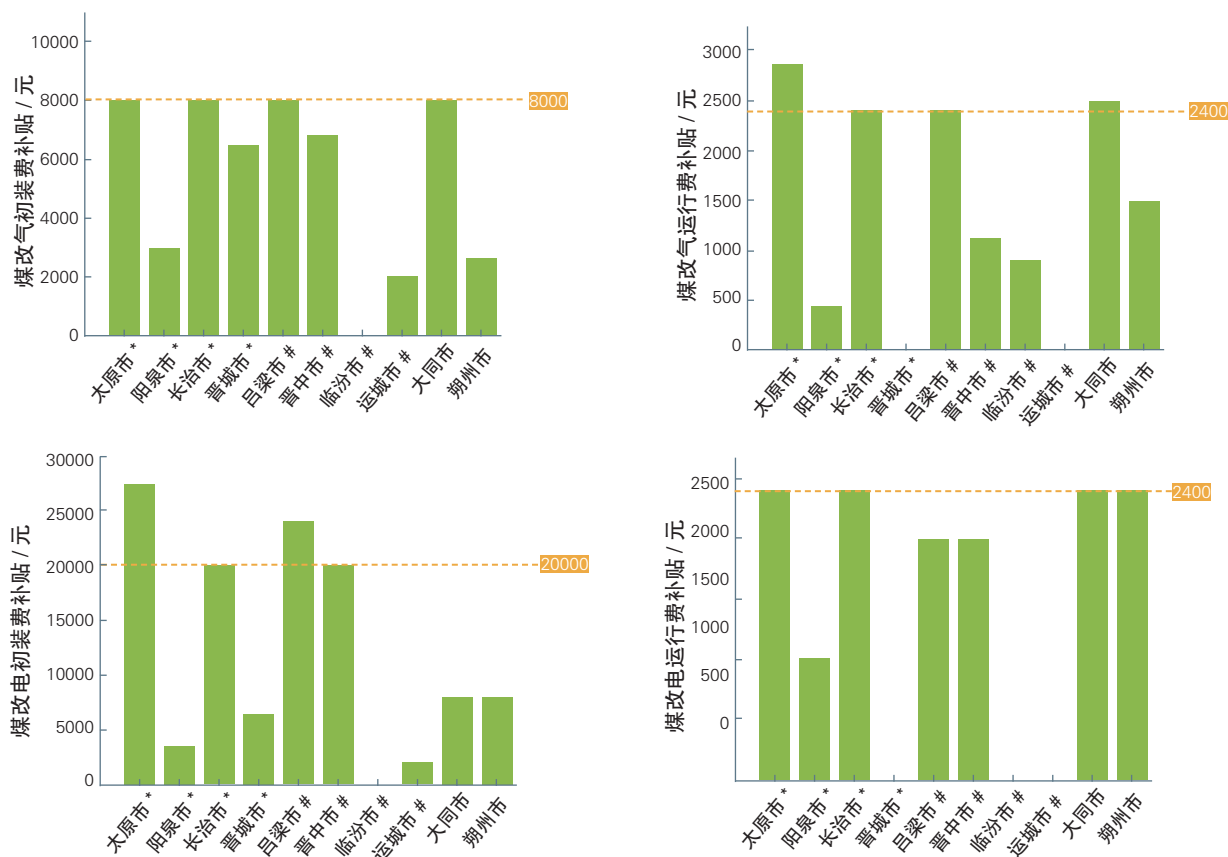


图7 山西省煤改电、煤改气补贴政策

(黄色虚线为省级标准，*是“2+26”城市，#是汾渭平原城市)

对比山西省、河北省与北京市的补贴政策，山西省的补贴力度与北京市接近，甚至略高于河北省。然而，山西省的经济条件和财政收入远不如这两个地区。清洁取暖推广任务高度依赖政府补贴的模式使得原本政府财政能力有限的山西省备受重压，推广难度更大，也存在不可持续的风险。

此外，山西部分地区政府也在推行“清洁集中供热”工程，市政府对供热企业的配套管网工程按照 1000 元/户的标准给予补贴。生物质取暖补贴一般是生物质炉具补贴 4500 元，生物质颗粒燃料补贴 400 元左右/吨，大都是从 2018 年冬季才开始启动，推广数量还比较少。从图中可以看出，除了太原以外，部分市的补贴标准远低于省级标准，主要是受限于地方财政。

表 12 山西省、河北省、北京市清洁取暖补贴情况对比

	山西省	河北省	北京市
清洁取暖设备购置	<p>煤改电：对安装高效节能采暖设备的居民，最高补贴不超过 20000 元/户（省市 1:1）。</p> <p>煤改气：居民壁挂炉购置费用补贴 0.5 万/户；居民燃气工程费每户 0.3 万元。</p>	<p>煤改电：对户内采暖设备购置安装费用补贴，对采用蓄热式电暖气、蓄热式电锅炉、空气源热泵和地源热泵用户，均给予 90% 投资补贴，最高分别不超过 9000 元、13500 元、20000 元，由省和县各承担 1/2，其余由用户承担。</p> <p>煤改气：按燃气采暖设备购置安装的 70% 给予补贴，每户最高补贴金额不超过 2700 元。</p>	<p>煤改电：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。</p> <p>煤改气：按燃气采暖设备购置安装的 90% 给予补贴，每户最高补贴金额不超过 7200 元。</p>
运行费用	<p>电：每个采暖期对每户补贴谷期电价最高不超过 2400 元；对煤改电居民用户和执行居民电价的非居民用户，采暖用电试行峰谷时段计价、用电量计价、平段电价计价等多种用电价格政策。</p> <p>天然气：每个采暖期对每户补贴燃气费用 2400 元；居民清洁供暖用气执行居民用气价格，不执行阶梯气价</p>	<p>电：采暖季期间，补贴 0.12 元/度，每户最高补贴 1 万千瓦时，最高补助 1200 元。或实行峰谷电价，用户自由选择电价计费方式。</p> <p>天然气：采暖季用户用气补贴 0.8 元/立方米，每户最高补贴金额不超过 960 元。</p>	<p>电：采暖季期间，采取峰谷电价，20:00 至次日 8:00 享受 0.3 元/度的低谷电价，同时再补贴 0.2 元/度，补贴用电量限额为每个取暖季每户 1 万度。</p>

陕西省补贴力度较小，政策力度“保守”

陕西省清洁取暖补贴政策除西安市含运行补贴，其余城市只含初装费补贴，补贴包括管网费用、取暖设备费用，具体初装费补贴如图 8 所示。对于煤改气，除西安市是 3000 元/户，其余地区都是 1000 元/户；对于煤改电，除西安市是 3000 元/户、咸阳市是 5000 元/户，其余地区都是 1000 元/户。在运行补贴方面，西安市气价补贴 1 元/立方米，最高不超过 1000 元；西安市电价补贴 0.25 元/度，最高不超过 1000 元。

同时，对于不具备煤改气、煤改电条件的地区，使用高效清洁水暖炉具的农村居民，省级文件规定给予一次性补助 300 元/户；对于其他使用洁净煤替代劣质散煤取暖的贫困农户，规定对每户每年补助 300 元。但是调研中发现各市实际补贴要大很多，例如榆林神木市政府对每吨兰炭提供补贴 866 元，居民只需付 300 元左右；对每台烤火炉提供补贴 500 元/台，水暖炉补贴 1000–1800 元/台（按用户面积）；延安市政府对每吨洁净煤提供补贴 700 元，用户需自费 600 元。

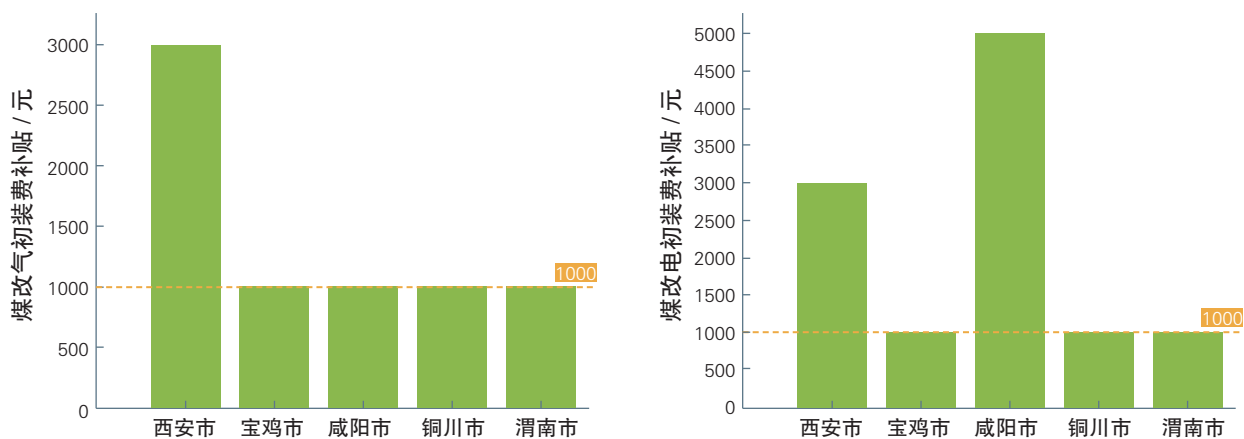


图 8 陕西省汾渭平原城市煤改气、煤改电政策补贴 (黄色虚线为省级补贴标准)

相对于山西省,陕西省的补贴政策力度略小,地方政府财政压力也相对降低,主要是由于关中地区气候相对暖和。但长期来看,由于用户面临运行费用高的问题,如何保证可持续的使用清洁能源,不再返烧煤取暖,需要进一步探索解决。总体上来看,陕西省政策充分考虑了资源禀赋、财政状况和区域特征等因素,在政策上也相对“保守”,并且也在探索洁净煤+环保炉具等技术路径。

黑龙江两市通过补贴推广生物质供暖

哈尔滨市、绥化市和肇州县、肇源县实行生物质供暖补贴政策。对用户用生物质锅炉按照每台 2100 元标准计算,由财政补贴 70%,其中省补贴 35%、市补贴 17.5%、区县(市)补贴 17.5%,农户承担 30%。对农户使用秸秆固化燃料替代散煤的,各市、县可结合本地实际,给予一定的支持。

清洁取暖技术路径分析

6.1 当前技术路径选择

“短平快”的煤改气在山西受到青睐，符合改造条件的区域越来越少

山西省2017年清洁取暖改造除集中供暖(30.2%)以外，主要以煤改气为主，占64.8%，如图9所示。其主要原因是煤改气“短平快”，但绝大多数改造都是在城区与城乡结合部中具备集中供暖条件或者具有主暖气管道通过的区域开展的，农村地区内的改造较少。

2018年主要是以集中供暖为主，占52.7%；煤改气次之，占24.6%，原因是符合煤改气基础条件的区域越来越少。煤改电和其他技术路径比例从5.0%增加至11.5%，可能是由于在2017年经历气荒之后使得煤改电在部分电网基础设施满足的区域成为了重点，并且煤改电技术产品比较丰富，选择性多。

同时，生物质、太阳能等可再生能源的取暖技术也逐步被政府有所认可，在部分县市的2018年与2019年

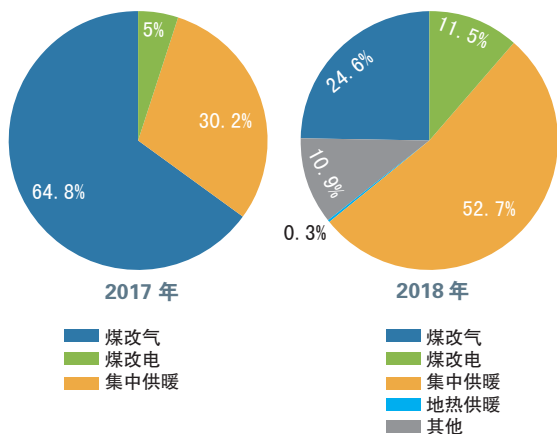


图9 山西省2017年和2018年清洁能源替代任务

清洁取暖规划中，生物质清洁供暖的规划数量逐步上升。部分地区甚至把生物质清洁供暖作为2019-2021年在农村地区推广的最重要的方式，原因主要是在农村地区继续扩大推广煤改电与煤改气的空间受限。洁净煤配套清洁炉具在各级规划中没有体现，当地对洁净煤配套清洁炉具的认识还不充分。

但对于山西省的4个“2+26”城市和4个汾渭平原城市，国家层面对市级政府每年需要完成的清洁取暖指标和技术路径已经做出明确规定，导致各级地方政府只能对清洁取暖指标分解并加码，对技术路径选择缺少主动权。

陕西稳妥选择煤改电

陕西省在2017年西安市和宝鸡市开展清洁取暖试点的基础上，2018年决定选择以煤改电为主的改造方式，占比67.66%，主要包括空调、直热式电取暖和蓄热式电取暖为主，部分地区试行空气源热泵热风机；煤改气占比24.61%，如图10所示。

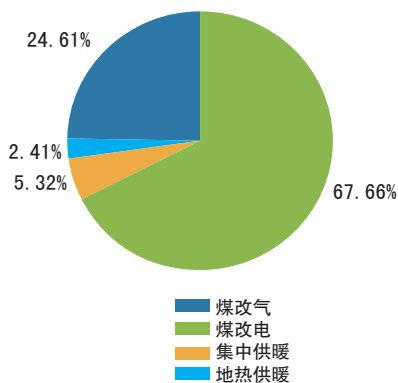


图10 陕西省2018年汾渭平原城市清洁取暖改造任务

经过两年的探索，陕西省于2019年进一步明确了农村地区清洁取暖总体思路：基于地方财政收入量力而行，全面推进农村电网升级改造，高效经济地推进电取暖。通过以气定改，稳妥推进煤改气。对暂不具备清洁能源替代条件的山区和暂不具备煤改电、煤改气的地区（主要是陕北地区）积极推广洁净煤。同时积极探索太阳能+电、生物质+专用炉具的取暖模式。

黑龙江在有条件的地区推动生物质取暖

黑龙江省因为其高寒地区的特征，煤改电、煤改气的适用性与推行力度远不如山西省和陕西省，推行地点集中在市、县建成区和城乡结合部，农村地区并没有推行煤改电、煤改气政策。由于是具有丰富的秸秆资源的省份，黑龙江正在积极探索生物质清洁取暖的技术路径。

6.2 清洁取暖试点的技术路径对比分析

煤改气

农村天然气取暖主要采用天然气壁挂炉，具有方便、干净的特点以及良好的环境效益和健康效益。

优点：

- ☆技术成熟，故障率低。
- ☆可同时兼顾炊事和取暖，改变农户炊事用能习惯。引导农户从使用传统的固体燃料转向清洁能源，可减少因燃烧固体燃料进行炊事而排放的污染物。

缺点：

- ☆基础设施及取暖设备投资较高，户均投资远高于城市，约为1-1.5万元。天然气管道铺设、储气库

建设费用多由燃气公司承担，天然气取暖设备、管网入户费用多由政府承担，增加地方财政负担。

☆运行费用较高，是散煤取暖的2-3倍。用气补贴费用对于政府和燃气企业是一笔不小的支出。如果补贴难以持续，老百姓难以承受其运行费用，存在返烧散煤的风险。且中国居民用气价格与燃气公司购气成本长期倒挂，未来存在价格上调的可能性，运行费用可能更高。

☆中国能源特征是“富煤、缺油、少气”，大规模改气会导致冬季气源供应紧张。同时，中国天然气进口比例已经超过40%，大规模改气存在能源安全的问题。

☆在农村地区，天然气管道无法严格按照城市标准进行铺设，存在较大安全隐患。且农户安全意识薄弱，存在不遵守用气规范而导致爆炸事故的可能性。

适用区域及人群：已落实气源且附近有气源管网的农村，且经济条件较好的农户。

在山西省，燃气管道的铺设、入户和燃气壁挂炉设备等费用主要由燃气公司和地方政府分摊，据已改项目测算，每户需投资1.5万元左右。天然气入户能够更好地满足农户的炊事需求，在保障气源充足和运行费用补贴到位的情况下受到老百姓的欢迎。调研结果显示，取暖面积为100m²的用户，在气价为2.26元/m²的情况下，运行费用为4000-6000元。该地区每户每个采暖季补贴2400元运行费用，补贴后取暖价格与燃煤相当。该地区在冬季采用“压非保民”的策略，即压缩非民用气，确保民用气供给不受影响，因此没有长时间供气不足的现象出现。与2017年相比，该地区2018年的煤改气任务更重，工程时间有限，导致工程存在一定的安全隐患。室外架空燃气管道大多无安全警示标志且缺乏安全防护措施，一旦遭受外力破坏，发生管道断裂泄漏，可能引发火灾、爆炸事故。

陕西地区燃气公司执行特许经营权，农村地区的天然气管道铺设进展缓慢，选择天然气取暖的用户也很少。煤改气用户在用气花费超过补贴金额以后，通常会选择开始返烧散煤取暖。

煤改电

电取暖主要的技术路径主要分为三类：直热式电取暖、蓄热式电取暖和空气源热泵。主要电采暖设备包括电壁挂炉、直热式电暖器、空气源热风型热泵、空气源热水型热泵等。使用电采暖设备取暖干净、方便、省事，可以大大改善农村地区冬季取暖造成的环境污染问题。

优点：

- ☆使用电取暖设备取暖干净、快捷，可大大改善农村地区因冬季取暖造成的环境污染问题，降低健康风险。
- ☆在非严寒地区，空气源热泵能效较高，运行费用较低，运行费用为散煤的 1-2 倍。

缺点：

- ☆电网改造投资费用较高，且周期较长。电网改造费用为 2-3 万 / 户，施工周期长达 15 个月左右。电网改造费用由电力公司和地方政府共同承担，使得地方财政负担较大。
- ☆直 / 蓄热式电取暖设备价格较低，但能效低，运行费用高，一般是散煤的 3-4 倍。直 / 蓄热式电取暖设备价格为 1000-2400 元 / 台，用户根据自家房屋面积及数量购置 2-5 台取暖设备，安装在不同房间。直 / 蓄热式电取暖设备一次能源利用率较低，不超过 30%，因此取暖能耗量大，运行费用高，用电补贴的政府财政负担也较重，且大面积推广使用将导致碳排放强度大幅增加。
- ☆空气源热泵能效高，但取暖设备昂贵。热水型

热泵设备 2-3 万元 / 套，每户一般配置一台热泵主机，配合着水循环系统、循环泵和供暖末端实现供暖；热风型热泵设备 4000-6000 元 / 台，用户根据自家房屋面积及数量购置安装 2-3 台取暖设备。

- ☆“煤改电”无法满足农村居民的炊事要求，需要配套管道天然气或液化石油气作为能源补充。
- ☆部分电取暖设备质量和性能不稳定，农村地区售后服务跟不上，维修存在一定难度。因此造成用户体验差，大大影响了用户对煤改电的满意程度。
- ☆农村大都是留守老人居住，现代化的电采暖设备存在不会操作的问题，培训起来也很困难。

适用区域及人群：适用于非严寒的农村地区，经济条件较好、房屋保温较好、追求生活品质的农户。此外由于电网改造投资成本较高，且工期较长，因此适合已经完成电网规划改造的地区。

据山西省已改项目测算，电网改造每户需投资 2.5 万元左右，至少需要 15 个月完成。另外，当地政府受制于电网公司，电网公司受制于国家电网。由于山西地区比较冷，对取暖温度有较高要求，因此用电消耗量较大。要达到相同的取暖效果，直热式电暖器取暖费用是散煤取暖费用的 3-4 倍，运行价格较高，不宜大规模推广使用。空气源热泵取暖费用是散煤取暖费用的 1-2 倍左右。

山西省调研区域每户每个采暖季最高补贴 2400 元运行费用。空气源热泵运行费用相对较低，但取暖设备价格较高，在政府补贴取暖设备的情况下，大部分居民能够承受其运行费用。空气源热泵同时存在噪音大、设备维护难等问题。空气源热风机适合家庭居住面积较小的用户使用，电壁挂炉和空气源热水机适合家庭居住面积较大的用户使用。

而陕西省调研地“煤改电”主要是鼓励用户使用空调和直热设备。空调用户在煤改电取暖补助申请（承诺）表签字，“承诺申请城乡居民煤改电取暖补助之日起不再使用散煤”，即可凭空调增值税发票领取1000元/户的补贴，也有部分地区发放直热式电采暖设备或电热毯。但是在实际调研过程中发现，由于耗电量较大，运行费用高，舒适度和习惯问题，在强补贴的政策下，条件较好的农户会选择性使用电采暖设备，而家庭经济条件较差的居民，设备基本处于闲置状态或极少使用，大部分时间内仍使用散煤取暖。

煤改洁净煤 + 配套环保炉具

在天然气和电网没有覆盖到的地区，可以推动兰炭和型煤进行取暖。

优点：

- ☆“洁净型煤 + 环保炉具”的一次性投入和运行成本都相对较低。
- ☆能够满足农户的炊事和暖炕要求，符合老百姓的生活习惯。

缺点：

- ☆很多地方并不鼓励洁净煤取暖，导致整体市场环境不利于洁净型煤和配套先进炉具的技术创新和资金投入。
- ☆市场上洁净型煤和专用炉具厂家众多，产品质量良莠不齐，缺少适用于“洁净型煤 + 环保炉具”技术路径的综合评价体系。
- ☆洁净型煤取暖存在监管难的问题，加大了推广应用难度。
- ☆存在室内环境污染和危害人体健康的风险。

适用区域及人群：适用煤炭资源丰富，煤改气、煤改电无法覆盖的偏远农村或山区经济条件一般或较差的农户。

调研发现，陕西省兰炭和型煤取暖运行费用比散煤要贵很多，但由于当地补贴力度大，使得补贴后的运行费用比散煤还要低。

在榆林市，政府依照不同取暖面积所需的燃料量和配套炉具设置了不同的补贴方式。型煤/兰炭市场售价为1166元/吨，政府补贴866元/吨，补贴后用户购买只需300元/吨。取暖面积为60m²以下的用户补贴3吨，60-120m²的用户补贴4-7吨。超出部分农户需按市场售价购买。政府对配套烤火炉补贴500元/台，基于取暖面积对配套水暖炉补贴1000-1800元/台不等。由于补贴后燃料价格较低，农户使用兰炭/型煤取暖意愿较高，积极响应政府清洁取暖的号召。

但调研过程中发现，不同批次的兰炭质量差别较大。存在以次充好、分量不足、点火困难不耐烧、起火时间长的现象，影响炊事体验。如果无法很好地控制燃料品质，将极大影响居民对洁净煤的使用，从而返烧散煤取暖。

铜川市对易地扶贫搬迁的农户，每户免费发放洁净型煤专用炉具和0.3吨洁净型煤。并对市场售价1600元/吨的型煤，补贴1000元/吨，补贴型煤每户限购2吨，用户购买每吨洁净型煤只需付600元/吨，超出2吨的部分农户需按市场价1600元/吨购买。尽管政府实施了补贴政策，但由于经济条件有限，农户不愿意使用洁净型煤取暖。且该地区林业资源丰富，木柴免费易得且质量较高，因此农户多使用木柴进行取暖和炊事。调研过程中同样发现型煤质量存在较大差异，部分批次的型煤热值低、灰分大，容易熄灭，非常影响居民使用洁净煤的积极性。

煤改生物质

生物质资源丰富的区域通过试点推广生物质成型燃料配套专用炉具的方式推行清洁能源改造。

优点：

- ☆ 农业废弃物资源能源化利用，有利于解决农村普遍存在的秸秆露天焚烧问题，对保护农村生态环境具有重要意义。
- ☆ 生物质 CO₂ 零排放，且 SO₂ 排放较少，可以有效应对全球气候变化，保护生态环境。
- ☆ 农村地区普遍存在使用生物质进行炊事活动的习惯，用生物质成型燃料替代散煤能够同时满足农户取暖与炊事需求。不需改变用户的生活习惯。

缺点：

- ☆ 生物质成型燃料产业必须培育整条产业链，涉及从收储运体系到成型燃料的加工，再到终端用户的购买使用等多个环节。
- ☆ 缺失成熟的商业模式、市场化程度低，导致生物质成型燃料价格较高。大部分试点项目运行成本较高，生物质成型燃料取暖费用与天然气相近。
- ☆ 地方环保政策不明确，导致有资源条件、有发展需求的地区，难以发挥应有作用。
- ☆ 生物质燃料缺乏品质把控，燃料质量良莠不齐，生物质燃烧普遍存在易结渣、反烟等问题，减排效果存在一定的争议，存在室内环境污染和危害人体健康的风险。

适用区域及人群：生物质资源非常丰富，附近有成型燃料加工销售厂的农村地区。

山西省“煤改生物质”处于起步探索阶段，民用生物

质炉具推广主要依靠政府推动。政府向用户免费发放生物质清洁炉具和 2 吨生物质成型燃料，超出 2 吨的部分用户以 1200 元 / 吨的市场售价自行购买。根据测算，调研区域的生物质采暖成本与天然气相当。相比燃煤取暖，采用生物质成型燃料取暖更加干净方便。

现阶段生物质炉具质量良莠不齐，在热效率和烟尘排放方面存在明显差异。调研中发现部分用户弃用生物质炉具，继续或重新使用散煤取暖的现象。主要原因是部分产品技术尚不成熟，生物质炉具出现了料仓回烟、回火的现象。且售后服务不到位，缺乏技术人员的指导。

黑龙江省“煤改生物质”相较于山西和陕西省相对发展成熟，但也仍处于推广试点阶段，民用生物质炉具推广主要依靠政府推动。试点村的居民购买民用生物质炉具和生物质成型燃料，政府给予居民相应的补贴。调研地点海伦市的自动进料生物质炉具市场售价为 3800 元 / 台，政府给予补贴 3000 元 / 台，居民仅需支付 800 元 / 台。政府安排专业人员免费安装。另外，市政府引导乡、村两级，在农村建设生物质成型燃料生产厂，对秸秆资源分散经营，就地转化，实现原料半径不出十公里，销售半径不出二十公里以降低秸秆资源收储运的成本。当地居民购买生物质颗粒燃料的价格为 500-700 元 / 吨。

研究团队在走访过程中发现，“民用生物质炉具 + 生物质成型燃料”替代散煤取暖在推行过程中遇到以下问题。第一，使用手动进料生物质炉具的居民认为生物质颗粒不耐烧，频繁加料太过麻烦，操作不方便。第二，生物质颗粒消耗量大，取暖成本高于散煤，大部分居民难以接受。第三，生物质颗粒燃烧之后产生的灰渣太多，居民门前堆积的灰渣不知该如何处理。这些因素导致用户对生物质炉具和生物质成型燃料的评价不高。因此，90% 以上的居民在体验过生物质颗粒燃料的使用效果之后，不愿意继续购买生物质颗粒燃料，仍然在生物质炉具中直接燃烧散煤或者玉米芯取暖。

◆ 清洁取暖技术路径分析 ◆

黑龙江试点调研结果发现，燃烧生物质成型燃料的理论运行费用是实际运行费用的 4 倍左右，一方面是由于核算理论运行费用时日取暖时长被高估，另一方面是由于普遍存在用户在生物质炉具中燃烧散煤、玉米

芯等燃料的现象，降低了生物质成型燃料的消耗量，从而降低了生物质颗粒取暖的实际运行费用。

三省的不同技术路径的经济性分析如表 13-15 所示。

表 13 山西省 - 双替代与煤改生物质技术路径经济性分析

燃料类型	取暖方式	基础设施投资 / 元 / 户	设备投资 / 元 / 户	政府 / 企业 / 用户出资情况	燃料价格 / 元 / 吨	理论运行费用 / 元	实际运行费用 / 元	
							补贴前	补贴后
散煤	烤火炉	0	100-500	无补贴	400-800 元 / 吨	1627-3254	800-1500*	无补贴
	水暖炉	0	3000-5000	无补贴			2000-3200	无补贴
生物质颗粒燃料	水暖炉	0	3000-5000	政府：免费发放生物质取暖炉和 2 吨生物质颗粒燃料	1200 元 / 吨	7853	5400-7200	3000-4800
天然气	燃气壁挂炉	10000 管网建设	3000-8000	政府：入户管网和燃气壁挂炉配套费补贴 5000 元 / 户；燃气取暖设备费用补贴 3000 元 / 户；每户补贴 2400 元运行费用，用户：补贴后按设备实际价格补差价；企业承担主管网建设投资	2.26 元 / m ³	6171	4000-6000	1600-3600
电	电壁挂炉	25000 电网改造	3000-5000	政府：取暖设备最高不超过 2 万元 / 户，每户最高补贴 2400 元运行费用企业承担电网改造投资	0.507 元 / kwh	13844	5000-12000	3000-8000
	直热式电暖器		1000-3000				3000-6000	1500-4500
	空气源热水机		15000-30000			4153-6230	3600-5200	2000-3000
	空气源热风机		5000-15000				1000-2000	500-1200

注：运行费用理论值按照热指标平均为 80W/m²，取暖面积为 100m² 核算。运行费用实际值按照实地测试获得的取暖温度和用能情况，取暖面积为 100m² 核算得出。补贴后运行费用根据实际调研情况核算。

表 14 陕西省 - 洁净煤技术路径经济性分析

取暖方式	设备投资 (元 / 台)	设备补贴 (元 / 台)	燃料类型	燃料价格 (元 / 吨)	理论运行费用 (元)	实际运行费用 / 元	
						补贴前	补贴后
烤火炉	500-800	500	散煤	300-850	-	1102*	无补贴
			兰炭	1100-1200	-	1632*	420
			型煤	1000-1260	-	1770*	471
水暖炉	1000-5000	1000-1800	散煤	300-850	1541	2107	无补贴
			兰炭	1100-1200	3819	4642	1194
			型煤	1000-1260	4500	4467	1149

表 15 黑龙江 - 煤改生物质技术路径经济性分析

燃料类型	取暖方式	设备投资 (元/台)	补贴情况 (元/台)	燃料价格 (元/吨)	理论运行费用 (元)	实际运行费(元)	
						补贴前	补贴后
散煤	水暖炉	1000-3000	无补贴	800-1200	2584-3869	1289-1934	无补贴
生物质颗粒	手动进料生物质炉	1000-2000	按照生物质炉具价格的 70% 补贴, 最高不超过 1470 元。	500-700	2421-3396	909-1272	
	自动进料生物质炉	3000-5000					
生物质压块	手动进料生物质炉	1000-2000		400-500	2290-2863	797-1026	

注: 运行费用理论值按照热指标平均为 55W/m², 取暖面积为 100m² 核算。运行费用实际值按照实地测试获得的取暖温度和用能情况, 取暖面积为 100m² 核算得出。补贴后运行费用根据实际调研情况核算。生物质压块热值按照《生物质固体燃料质量分级》(NY/T2909-2016) 中要求的最低值 12.6MJ/kg 计算。

不同技术路径的适用性与成本如表 16。

表 16 不同技术路径的适用性分析与成本对比

技术路径	基础设施(万)	取暖设备+末端(万)	运行成本(散煤对比)	优缺点	适用范围
洁净型煤	0	低 0.3-0.5	1-2 倍	初始投资和运行成本相对较低; 兼顾炊事取暖需求, 符合用户生活习惯。洁净型煤与配套炉具质量良莠不齐, 燃煤品质监管困难; 存在环境污染与健康影响的风险。	适用于煤改气、煤改电无法覆盖的偏远农村和山区
生物质成型燃料	0	低 0.3-0.5	1-2.5 倍	初始投资相对较低, 兼顾炊事取暖需求, 符合用户生活习惯, 具有良好的环境综合效益。缺少成熟的商业化运作模式, 运行成本较高, 燃料品质难把控, 存在环境污染和健康影响的风险。	适用于生物质资源丰富、地方政府管理水平高的地区。
天然气	中 1 万	中 0.3-0.8/ 台	2-3 倍	使用方便卫生, 技术成熟, 可兼顾炊事和取暖。初投资、运行费用较高, 存在安全隐患和能源安全风险。	适用于附近有气源管网的农村, 且经济条件较好的农户。
空气源热泵	高 2 万	中/较高 0.4-3.0/ 台	1-2 倍	使用方便卫生, 能效高。初投资高, 运行费相对较低; 不能兼顾取暖和炊事, 后期维护存在难度。	适用于已完成电网改造、非严寒的农村, 经济条件较好、讲究生活品质的农户。
直/蓄热式电取暖	高 2 万	低 0.1-0.24/ 台	3-4 倍	使用方便卫生, 取暖快。初投资高, 运行费用高; 不能兼顾取暖和炊事, 后期维护存在难度。	适用于已完成电网改造的农村, 经济条件较好, 小面积, 分时段取暖的农户。同时有较理想电价政策支持。

不同技术路径减排潜力分析

农村居民燃烧散煤取暖排放的主要污染物为 PM_{2.5}、CO、SO₂，NO_x 与 CO₂ 排放贡献较小，因此，此处只讨论不同技术路径下 PM_{2.5}、CO、SO₂ 的减排效果。

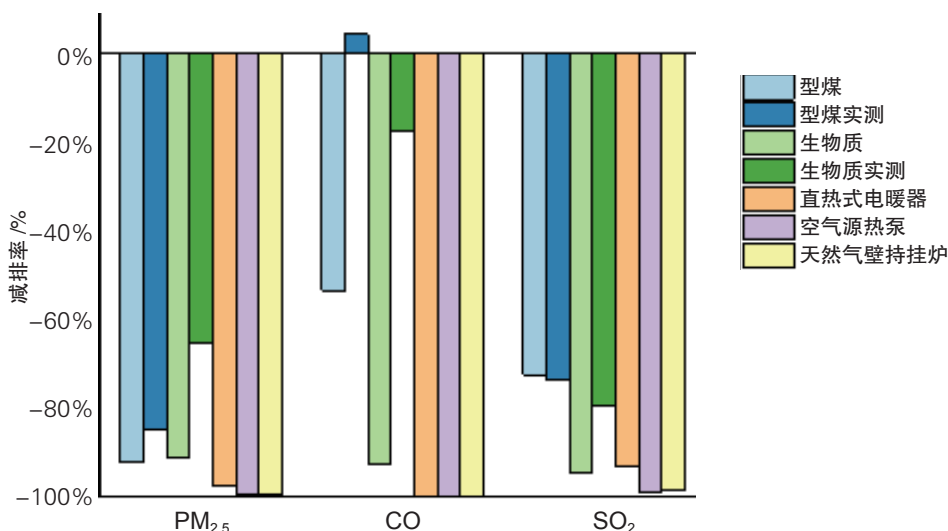
使用天然气壁挂炉、电采暖、生物质和型煤替代散煤燃烧取暖，PM_{2.5}、SO₂ 减排效果均非常显著，天然气壁挂炉、电采暖和型煤的指南推荐值和实测值减排效果基

本相当。生物质由于燃料质量差异，在 PM_{2.5} 和 SO₂ 的减排方面，实测值低于指南推荐值的减排效果，分别为 65.55% 和 79.41%。采用洁净型煤和生物质替代散煤燃烧取暖，指南推荐值和实地测试结果对比表明，存在 CO 排放更高的风险，如表 17 所示。

基于等热值法对不同清洁取暖方式替代散煤燃烧取暖的减排效率进行计算。不同取暖方式的排放因子、单位燃料热值、供暖效率如下表所示，减排效率如图 11 所示。

表 17 不同取暖方式的排放因子、单位燃料热值和取暖效率

燃料	排放因子			热值	效率 /%	
	单位	PM _{2.5}	CO			SO ₂
散煤	g/kg	10.8	163.91	10.14	29MJ/kg	65
型煤	g/kg	0.8 (1.57)	72.8 (163.05)	2.652 (2.565)	24MJ/kg	75
生物质	g/kg	0.67 (2.62)	8.25 (95.45)	0.4 (1.47)	16.9MJ/kg	75
电	g/kwh	0.067	0	0.173	3.6MJ/kwh	90 直热式
						200-300 空气源
天然气	g/m ³	0.302	0	0.630	36 MJ/m ³	90

图 11 不同技术路径 PM_{2.5}、CO 和 SO₂ 减排效果

不同技术路径取暖效果与用能分析

调研农户冬季取暖温度在 9–17℃ 之间，不同技术路径之间无明显差别，但其用能效果有较大差异。电取暖类型分为空气源热泵与直热式电暖器，在取暖温度

接近的情况下，空气源热泵的用能约为直热式电暖器的二分之一。天然气壁挂炉取暖用能量与直热式电暖器接近，取暖温度略低于直热式电暖器。生物质炉与燃煤水暖炉的用能量远高于其他取暖类型。

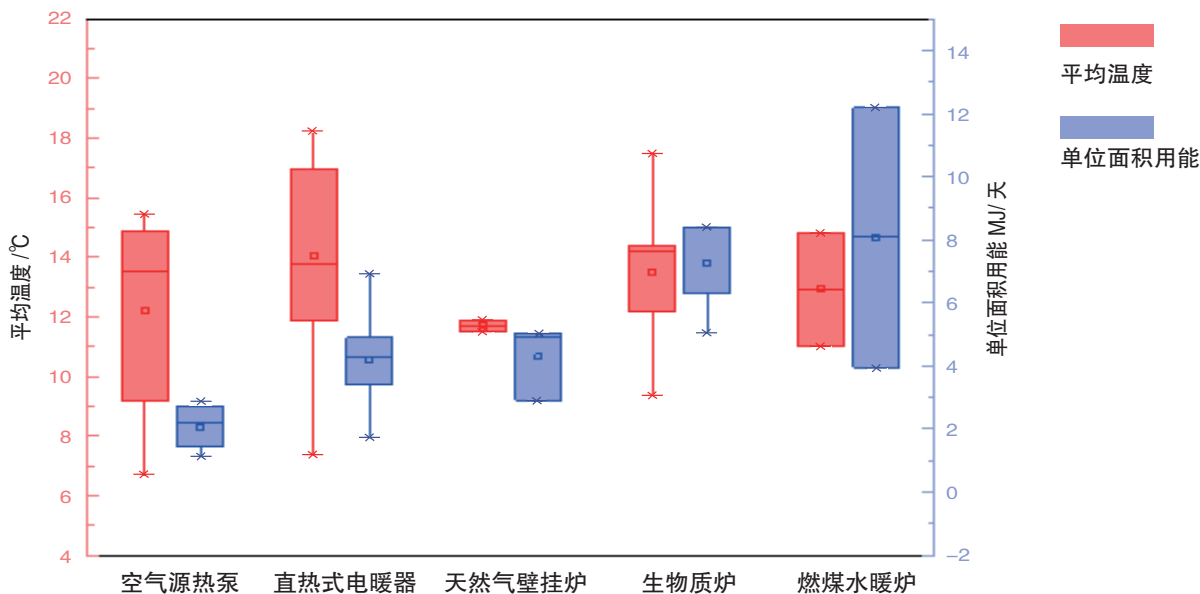


图 12 不同技术路径取暖效果与用能对比

除不同技术路径供暖效率不同外，农村地区建筑保温同样影响取暖效果与用能。除了黑龙江省房屋保温措施较好外，山西与陕西省房屋墙壁厚度以 37cm 和 24cm 为主，普遍没有保温措施。在此基础条件下大面积推行“煤改电”“煤改气”，热量流失严重，增加了燃料消耗与成本，从而加重经济负担。以某村的普通平房农户 A 和采暖较好的窑洞农户 B 为例，平房为 24 cm 砖墙结构，墙体无保温材料；而窑洞墙壁较厚，保温效果好。测试结果显示两户都使用烤火炉取暖，且每年取暖季耗煤量相同，均为 1.5 吨。取暖面积为 10 m² 的平房室温为 13℃，取暖面积为 12 m² 的窑洞室温可达 17.9℃。在此基础条件下大面积推行“煤改电”“煤改气”，热量流失严重，取暖效果不佳，更加重经济负担。

农村地区可通过加强建筑墙体、门窗、屋顶的保温，降低取暖热量损耗，节省燃料消耗量，降低取暖成本。北京市从 2006 年开始进行了房屋保温改造工作，冬季室内温度提高了 4–6 度，节约采暖燃煤 20%–50%。清华大学建筑节能中心的研究表明^[30]，对北墙、门窗外保温改造的户均投资为 1.5 万元，综合节能率在 28% 左右。另外一种方式是通过内保温改造，具有经济实惠的优点；以山东济南商河的案例表明，采用房顶吊顶保温、北墙保温贴、外窗保温帘和外门保温帘改造，投资仅 3350 元，综合能效提升 30%。选择适宜的保温措施，可以较大幅度降低能耗和经济运行成本。



清洁取暖改造意愿

研究团队在三省开展了大规模的入户问卷调查以了解农户进行清洁取暖改造的意愿，调研样本情况如表 18。

表 18 受访者基本情况

省份	受访农户	40 岁以下受访者占比	50 岁以上受访者占比	初中及以上文化程度占比
山西	328 户	6.65%	66.13%	26.28%
陕西	154 户	14.12%	60%	41%
黑龙江	89 户	—	19.1%	21.67%

农村空心化现象普遍

总的来说，受访家庭中的青壮年外出务工为主，留在家里的比例较少，受访者以 50 岁以上老人居多。特别是山西和陕西两地农村的“空心化”现象较为普遍，冬天常住人口占比也低，基本在 62~65% 左右。受访者普遍教育程度不高，甚至未接受教育的比例高达 1/4 左右。

散煤取暖的环境影响认知

值得注意的是，通常被认为环保意识薄弱的人群（老年人和教育水平较低人群）中竟有相当比例的受访者了解散煤取暖不利于环境，这和当地的政策力度和宣传影响关系极大。山西省是调研地清洁取暖改造试点力度最大的，高达 75.64% 的受访者了解散煤燃烧污染环境；而陕西的比例也有 64.37%，但是在黑龙江地区这一比例递减到 1/3 左右。这一比例在整体人群中是偏高的，一个重要原因是受访对象有一部分来自清洁取暖试点地区。

经济实用是老百姓关心的首要问题

调研结果显示，居民清洁取暖改造意愿主要受家庭年收入和清洁取暖实际运行费用的影响。随着家庭年收入的增高，居民使用清洁取暖的意愿逐渐升高，这也十分符合能源阶梯理论，即随着社会经济地位或收入水平的提高，家庭的能源使用会以“阶梯”渐进的形式转换到更加清洁和复杂的能源^[31]。家庭年收入从小于 1 万元/年升高到大于 5 万元/年，愿意使用清洁取暖的用户比例从 33% 增加到 52%。

愿意转向清洁取暖的用户最主要的两大原因是清洁取暖更干净卫生、省时省力。而出于健康考虑的受访者不足 7%，并且主要是考虑 CO 中毒，这与人们对其健康影响认知不足有关，山西省的受访者有高达约 65% 的反馈表示不了解散煤燃烧会对身体健康造成影响。在清洁取暖的环境影响宣传力度最大、认知意识最高的山西省，仅有 2% 的受访者表示转变动机是为了保护环境。

而对清洁取暖持否定态度的居民绝大部分是出于费用的担忧（山西省 86%，陕西山省 51%，黑龙江省 78%），特别是在已经有大量试点投入使用的山西省，人们更了解清洁采暖的真实费用，包括运行费用昂贵、担心补贴不可持续和初始设备投入。与清洁取暖带来的优点相比，经济实用才是首要考虑因素。而小部分受访者从已改用户反馈中得知存在不符合使用习惯、取暖效果不佳、设备质量和售后等问题，这也使得他们缺乏对清洁取暖改造的信任。

清洁取暖支付意愿较低，期望依赖补贴

受访的 86.06% 的居民表示，愿意使用清洁能源取暖的前提是政府提供足额补贴，也即是清洁取暖实际运行费用与散煤取暖费用基本相当的情况下，才有可能主动选择清洁取暖，如图 13 所示。据调研数据统计，山西省农村居民使用散煤取暖，每年每户平均花费 1658 元，愿意为清洁取暖额外支出费用平均为 666 元。

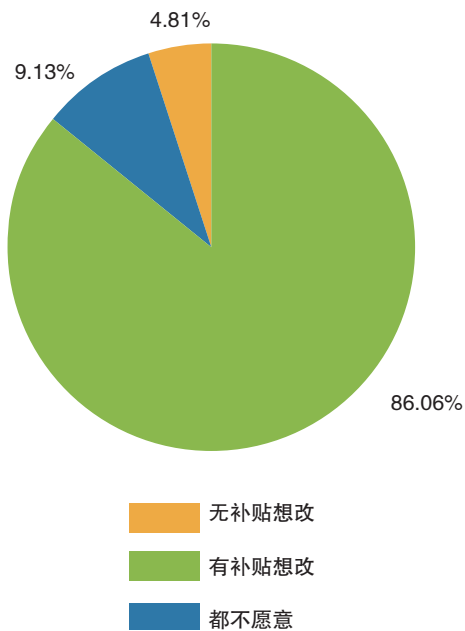


图 13 清洁取暖改造意愿



陕西关中平原调研地区与其他北方地区相比气温较高，距离城镇较近的农户的习惯与思想观念受城镇生活影响较大，家庭年收入也高于山区农户。因此，有部分居民在无政府补贴的情况下，自行选择购买价格为 1200–2000 元/吨的无烟煤或者钢炭，价格为普通散煤的 2–4 倍。另外一些收入更高的农户会通过空调、电暖器等用电取暖设备来部分替代散煤取暖，既能实现清洁取暖的功能，同时兼顾经济性。该地区有 30% 使用散煤取暖的农户有意愿进行清洁能源改造，可承受的清洁取暖费用为 2408 元（该地区农户的平均家庭年收入为 2.73 万元）。而在山区，受经济条件和地理条件因素影响，愿意接受清洁能源改造的受访用户仅为 5.88%。

结论与建议

结论 1

燃煤取暖耗煤量被低估，单位排放强度大

研究基于农户用能监测和调查，发现各地农村生活煤炭消耗的实际情况被现有统计严重低估。通过调研与测试数据估算，山西省、陕西省、黑龙江省农村居民采暖年散煤消费量分别为 1656.12 万吨、439.24 万吨、1282.58 万吨，分别是 2018 年山西省、陕西省、黑龙江省统计年鉴数据的 2.69 倍、2.08 倍、14.87 倍。

基于实地烟气排放测试，表征散煤取暖排放强度的重要指标—— $PM_{2.5}$ 一次排放因子在 2.19–4.30g/kg 之间，远高于普通燃煤电厂（排放因子为 0.16g/kg）和普通工业锅炉（排放因子为 0.28g/kg）的单位排放强度。三省农村居民燃烧散煤排放估算结果显示其占排放总量的比例不容忽视，需要重点关注的污染物是 CO（山西 42.44%，陕西 20.99%，黑龙江 27.63%）、 SO_2 （山西 3.16%，陕西 5.77%，黑龙江 4.97%）和 $PM_{2.5}$ （山西 7.85%，陕西 7.85%，黑龙江 15.56%），从排放量影响来看 NO_x 贡献较低（均在 3% 以下）。

此外，散煤使用造成了严重的室内污染，其中健康风险最大的污染物为 $PM_{2.5}$ 与 CO。农户室内日平均 $PM_{2.5}$ 浓度为 $255 \mu g/m^3$ ，是 WHO 提出的日均浓度指导值 $25 \mu g/m^3$ 的十倍以上。农户室内平均 CO 浓度为 $5.58 mg/m^3$ ，37% 的家庭 CO 室内日均浓度超过了 WHO 提出的室内日均浓度指导值。然而在调研中，大部分受访者均未认知到室内燃煤取暖排放对自身的健康危害。

建议 1

除了室外，散煤取暖对室内空气质量影响也不容忽视

由于农村散煤取暖的排放强度远高于其它能源利用方式，清洁取暖替代工作意义重大。但目前政策在制定和实施过程中均以解决雾霾这一公共问题为主要导向，很多农户在缺乏对自身影响认知的情况下难免主动性不足。清洁取暖工作不仅应考量其对室外空气质量的影响，也应更加着力于室内空气质量的改善，并重视健康影响的宣传，使得农户在经济条件允许的情况下有意识地自主转向清洁取暖。

结论 2

双替代仍然是主流技术路径，政府未来面临眼前与长远的抉择

当前清洁取暖除了集中供暖改造，还是以改气、改电为主。山西省已完成清洁能源改造的用户中，集中供暖占 7.9%，煤改气、电占比 87%。陕西省集中供暖占比 3.8%，煤改气、电占比 94%。

“煤改气”是试点初期应用最广泛的技术路径，一定程度上是因为“煤改气”技术成熟，且短平快适合大规模推广。但是适合改气的区域越来越少，并且在“气荒”迅速扼住这条路径的关卡后，各地开始实施以气定改。2018 年改电和其它技术路径比例上升，例如山西省煤改电的比例从 2017 年的 5.0% 增加至 11.5%，另外增加了生物质、太阳能等其他取暖技术路径，占比 11.1%。

山西与陕西作为煤炭大省和电力输出者并不缺电，拖后腿的其实是电网。农村电网改造后户均变容量仍然不足 2.3 千伏安，需要进一步升级改造户均用电容量达到 6.25-8.75 千伏安才能满足大规模煤改电的要求，差距仍然较大。电网改造投资费用较高，平均为 2-3 万/户，施工周期长达 15 个月左右。同样是改电，地方政府和用户也同时面临着眼前和长远的抉择，空气源热泵一次性投入高，但能效高、长期运行成本低；直热式电采暖，一次性投入低，可以快速完成改造任务指标，但长期运行成本高，不可持续的风险极高。

建议 2

清洁取暖替代忌“一刀切”和一味求快，需因地制宜和循序渐进

地方政府应充分发挥《规划》的政策空间，考虑建立农村地区散煤替代的长效机制和阶段性路径，处理好农村地区散煤治理的短期目标和长期愿景。长期来看，逐步用电能、天然气、太阳能和生物质等清洁能源替代散煤取暖是清洁取暖的终极目标。短期来说，在具备条件的地区有序推进基础建设，分阶段在有相应基础设施条件的地区实现改电、在气源充足且具备集中改造条件的地区改气、在秸秆和林木资源丰富的地区推行生物质取暖；而在农村人口密度低、农户居住分散的农村地区，特别是山区，洁净煤配合环保炉具推广取暖可以较低成本解决问题。而控制散煤质量使其符合现行标准就可以大幅降低 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放。

此外，房屋保温性能不好，造成取暖能耗的增加和能源的浪费。事半功倍的建筑节能作为技术路径之一不可忽视。农村地区可通过加强建筑墙体、门窗、屋顶的保温，以降低取暖热量损耗，节省燃料消耗量，降低取暖成本。地方政府对建筑节能的认识已经有所提升，但大部分地方财政资金有限，国家也没有配套相应的专项资金进行建筑节能改造，大部分地方优先考虑完成“双替代”的硬性任务，对建筑节能的重视程度需要进一步提升。

结论 3

农村地区收入低，经济实用是农民关注的首要问题

山西、陕西农村地区的收入较低，且贫富差距较大，仍有 20% 左右农户的家庭年收入不足 1 万元。取暖方式和燃料类型选择主要取决于农户的经济条件。煤改电、煤改气主要集中在 20%–30% 的相对富裕的农户，他们原本就采用水暖炉 + 品质较好的散煤取暖，50%–60% 的经济条件一般的农户依然采用烤火炉 + 散煤取暖，10%–20% 贫穷农户采用烤火炉或炕 + 生物质散料或劣质散煤取暖。

与清洁取暖带来的优点相比，经济实用才是首要考虑因素。尽管 60% 以上的受访者都了解散煤会造成大气污染，但是在无补贴情况下愿意改用清洁能源的比例极低，大部分是在受补贴情况下考虑改用清洁能源取暖。60% 受访者希望清洁取暖费用与燃煤取暖基本持平，20% 受访者能承受多付 1000 元。目前的清洁取暖试点中，即使存在补贴，运行费用仍然是传统散煤取暖运行费用的 2 倍甚至更高。因此，清洁取暖方式目前主要集中在富裕农户家中。

建议 3

需要平衡“农户用得起、政府补的起”，清洁取暖才能可持续

对于燃气与电的补贴，政府只承诺了提供三年，且很多地方政府还未及时兑现。居民考虑到高昂的取暖成本，存在“不敢用”的现象。政府补贴压力初现，当三年以后补贴退出，会造成大量居民因承担不起高额的取暖费用而出现重新返烧散煤的可能，这是农村清洁取暖最大的难题和隐忧。农村清洁取暖改造应审慎基于农户的经济承受能力，综合考虑地方财政和资源禀赋等因素，遵循用户可承受、政府可支撑、运行可持续的原则。

结论 4

政府管理系统和市场运营机制存在双重困境，亟待转型

以发改部门进行总体规划部署，按照能源供给管辖权限进行分工的传统机制，已经无法满足清洁取暖的整体需求，缺乏创新的管理体制机制。中央到地方的财政、能源、住建、环保和发改等政府部门，以及电力、燃气和供暖等企业联动机制尚未建立，缺乏灵活的沟通机制。特别作为具体落实推广的县级政府，对当地农户取暖需求、资源禀赋比较了解，但并不参与清洁取暖规划的制定。

清洁取暖近年来成为“热市场”，政府项目在短期内大规模上马刺激了大量企业的进入，但又因为缺乏准入机制、评估机制使得市场极为混乱，鱼龙混杂。目前亟待完善政府职能转换，健全清洁采暖市场机制。

建议

4

让县级政府能够一定程度“说了算”，使企业要瞻前顾后

农村地区清洁采暖应避免顶层“一刀切”，应依据因地制宜和自下而上的原则，以最了解本地情况且参与政策落地实施的县级政府为主体制定农村地区清洁取暖解决方案。遵循“政府监管、企业为主、市场化运营”原则，充分发挥政府在政策制定、市场监管和标准规范制定等方面的重要作用，引导企业发挥主体地位，充分发挥第三方机构和运营团队的专业作用，使清洁取暖发展回归市场属性。

政府应制定科学的招标采购、补贴与评估机制，保障企业服务质量及用户利益。在招标阶段，建立招标专家组评价指标体系，要从产品的质量、价格以及售后服务等方面综合评价，避免低价恶性竞争。在交付阶段政府应尽量避免拖欠企业款项，避免资金垫付第三方介入扰乱市场，影响企业的技术创新积极性。通过后追踪评估和问责机制，督促与激励企业建设售后服务体系，提高售后服务质量，过程跟踪记录，建立档案，建立问责制度。

附件 1 项目团队构成

本研究项目由北京化工大学牵头，联合中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会、河北省农村能源行业协会等单位完成，本项目得到了亚洲清洁空气中心的支持。项目研究还得到了农业农村部农业生态与资源保护总站、山西省、陕西省以及黑龙江省相关调研区域的市、县、乡、村各级政府部门的大力配合与支持。项目调研与测试工作由北京化工大学团队主要负责和实施，同时感谢北京大学环境经济与政策研究小组同学志愿参与入户访谈。参加本项目的人员见下表：

姓名	单位	职务
刘广青	北京化工大学	教授
薛春瑜	北京化工大学	副教授
任彦波	中国农村能源行业协会民用清洁炉具专委会	秘书长
边志敏	河北省农村能源行业协会	会长
孙振峰	河北省农村能源行业协会	秘书长
王浩	中国炉具网	总编辑
武亭	中国炉具网	项目主任
李大鹏	中国炉具网	项目主任
张有	北京化工大学	研究生
李闯	北京化工大学	研究生
叶堃	北京化工大学	研究生
徐银鸿	北京化工大学	研究生
张文廷	北京化工大学	研究生
许江东	北京化工大学	研究生
李洁	北京化工大学	研究生
焦铭泽	北京化工大学	研究生
林震	北京大学	研究生
胡煜晗	北京大学	研究生

附件 2 各地参加座谈会的单位列表

地区		与会单位名单
山西省	长治市	长治市发改委
		长治市能源局研究院
		长治市农委
		长治市煤管局
		长治市经信局
		长子县发改局
		长子县住建局
		长子县环保局
		长子县国土局
		长子县电力公司
		长子县气象局
		长子县林业局
		长子县煤炭局
		长子县农委
		长子县统计局
		朔州市
	山阴县质监局	
	应县环保局	
	应县质监局	
	陕西省	铜川市
铜川市发改委		
铜川市移民办		
陕西中环机械有限责任公司		
咸阳市		咸阳市某县环保局
西安市		西安节能协会
		中国科学院地球环境研究所
榆林市		榆林市政府大气办
		榆林市发改委
		榆林市能源局
		横山区环保局
		榆阳区环保局
		神木市兰炭产业办
		神木市供热公司
	神木市禁煤办	
	神木市环保局监测站	
	神木镇镇政府	

附件3 山西省附表

附表 3-1 清洁取暖工作任务清单政策

政策	发布时间	完成时间	内容
《山西省2017-2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》	2017年9月28日	2017年10月底前	完成太原 11.2 万户、阳泉 5.76 万户、长治 11.8 万户、晋城 11.1 万户、晋中 10 万户、临汾 19.08 万户、大同 5.3 万户、朔州 5 万户、忻州 5.9 万户、吕梁 10 万户、运城 6.28 万户“煤改气”“煤改电”任务。
		2017年9月底前	太原、阳泉、长治、晋城、临汾、晋中(以下简称“4+2”城市)公布“禁煤区”划定方案,10月底前完成“禁煤区”建设,做到散煤“清零”。
		2017年底	全省城市(含县城)集中供热普及率达到90%以上。20万人口以上县城基本实现集中供热或清洁能源供热全覆盖。
		2017年10月底前	所有县城建成区10蒸吨/小时及以下燃煤锅炉和茶水炉、经营性小煤炉(灶)全面“清零”,11个设区市建成区淘汰20蒸吨/小时以下燃煤锅炉和茶水炉、经营性小煤炉(灶)。
《山西省冬季清洁取暖实施方案》	2018年7月13日	2021年	全省清洁取暖面积11.8亿平方米,清洁取暖率达75%左右,替代散烧煤(含低效小锅炉用煤)600万吨。
		2018年	11个设区市的建成区清洁取暖覆盖率达100%;重点县市建成区清洁取暖率达70%以上,其他县市建成区达50%以上;农村地区清洁取暖覆盖率达30%以上。
		2019年	11个设区市的市辖区清洁取暖覆盖率达90%以上;重点县市建成区及城乡结合部(含中心镇)清洁取暖率达70%以上;农村地区清洁取暖覆盖率达40%以上。
		2021年	11个设区市的市辖区全部实现清洁取暖;县市建成区及城乡结合部(含中心镇)清洁取暖率达80%以上,其中建成区2020年清洁取暖率达100%;农村地区清洁取暖覆盖率达60%以上。
《山西省打赢蓝天保卫战三年行动计划》	2018年7月29日	2018年10月底前	11个设区市城市建成区清洁取暖覆盖率达到100%
		2020年10月底前	县(市)建成区清洁取暖覆盖率达到100%,农村地区清洁取暖覆盖率力争达到60%以上
		2018年10月1日前	11个设区市均要将城市建成区划定为“禁煤区”,并结合空气质量改善要求将城市近郊区纳入“禁煤区”范围,实施联片管控。2020年10月1日前县城建成区均要划定为“禁煤区”。完成以电代煤、以气代煤等清洁能源替代的地区,地方政府应将其划为“禁煤区”
		2020年采暖季前	力争2020年天然气占能源消费总量比重达到10%左右。地方政府、城镇燃气企业和上游供气企业的储备能力达到量化指标要求。建立完善调峰用户清单,采暖季实行“压非保民”。

附表 3-2 山西省各市政策出台情况

城市	时间	政策与规划
太原市		《太原市 2017 年散煤治理暨冬季清洁取暖实施方案》
	2017 年 9 月	《太原市 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚措施（53 条）》
	2018 年 6 月	《太原市大气污染防治 2018 年行动计划》（并政办发〔2018〕34 号）
	2018 年 8 月	《太原市 2018 年散煤治理实施方案》（并政办发〔2018〕40 号）
	2018 年 9 月	《太原市打赢蓝天保卫战攻坚行动工作方案》（并政办发〔2018〕46 号）
大同市	2017 年 8 月	《大同市 2017 年清洁能源替代工作实施方案》（同政办发〔2017〕137 号）
	2018 年 5 月	《大同市大气污染防治 2018 年行动计划》（同政办发〔2018〕85 号）
	2018 年 7 月	《大同市 2018 年冬季清洁采暖“煤改电”工程实施方案》（同政办发〔2018〕111 号）
	2018 年 10 月	《大同市 2018-2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》
阳泉市	2017 年 10 月	《阳泉市 2017 年“禁煤区”建设实施方案》（阳政办发〔2017〕99 号）
	2018 年 11 月	《阳泉市 2018-2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（阳政办发〔2018〕111 号）
运城市	2016 年 5 月	《运城市大气污染防治 2016 年行动计划》
	2017 年 10 月	《运城市 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（运政办发〔2017〕89 号）
	2018 年 6 月	《运城市 2018 年冬季取暖“煤改气”“煤改电”行动方案》（运政办发〔2018〕31 号）
	2018 年 6 月	《运城市大气污染防治 2018 年行动计划》（运政办发〔2018〕33 号）
	2018 年 9 月	《运城市冬季清洁取暖实施方案》（运政办〔2018〕6 号）
	2018 年 10 月	《运城市 2018-2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（运政发〔2018〕28 号）
长治市	2016 年 5 月	《长治市大气污染防治 2016 年行动计划》（长政办发〔2016〕38 号）
	2017 年 5 月	《长治市进一步控制燃煤污染改善空气质量工作方案》（长政办发〔2017〕49 号）
	2017 年 5 月	《长治市 2017 年冬季清洁取暖“以电代煤”“以气代煤”工程实施方案》（长政发〔2017〕50 号）
	2017 年 10 月	《长治市“禁煤区”建设工作方案》（长政办发〔2017〕135 号）
	2017 年 10 月	《长治市 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（长政办发〔2017〕137 号）
	2018 年 07 月	《长治市 2018 年冬季清洁取暖实施方案》（长政发〔2018〕46 号）
	2018 年 09 月	《长治市打赢蓝天保卫战三年行动计划》（长政发〔2018〕57 号）
	2018 年 09 月	《关于进一步加强燃煤管控改善环境质量的通知》（长政办发〔2018〕74 号）
2018 年 11 月	《长治市 2018-2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（长政办发〔2018〕92 号）	

晋城市	2016年3月	《晋城市2016年大气污染防治行动计划》（晋市政办〔2016〕14号）
	2017年3月	《晋城市2017年大气污染防治行动计划》（晋市政办〔2017〕10号）
	2017年6月	《晋城市冬季清洁取暖改造工作实施方案》（晋市政发〔2017〕15号）
	2018年4月	《晋城市2018年大气污染防治行动计划》（晋市政办〔2018〕18号）
	2018年10月	《晋城市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》
临汾市	2016年5月	《临汾市大气污染防治2016年行动计划》（临政办发〔2016〕29号）
	2017年4月	《临汾市大气污染防治2017年行动计划》（临政办发〔2017〕38号）
	2017年3月	临汾市人民政府办公厅关于2017—2019年“一城三区”清洁取暖工程的指导意见（临政办发〔2017〕24号）
	2018年5月	《临汾市2018年冬季清洁取暖实施方案》（临政办发〔2018〕37号）
	2018年6月	《临汾市大气污染防治2018年行动计划》（临政办发〔2018〕51号）
	2018年7月	《临汾市2018年散煤污染专项整治实施方案》（临政办发〔2018〕54号）
	2018年10月	《临汾市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（临政办发〔2018〕74号）
晋中市		《晋中市大气污染防治2017年行动计划》（市气防领办〔2017〕10号）
	2018年7月	《晋中市大气污染防治2018年行动计划》（市政办发〔2018〕50号）
	2018年10月	《晋中市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（市政办发〔2018〕84号）
	2018年10月	《晋中市冬季清洁取暖实施方案（2018—2021年）》（市政发〔2018〕73号）
吕梁市		《吕梁市2017—2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》
	2018年5月	《吕梁市2018年清洁取暖改造工作方案》（吕政办发〔2018〕34号）
		《吕梁市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（吕政办函〔2018〕80号）
忻州市	2016年5月	《山西忻州市大气污染防治2016年行动计划》

附表 3-3 山西省煤改气补贴政策表

城市	初装费补贴	运行补贴
山西省	居民壁挂炉购置费用补贴 0.5 万 / 户；居民燃气工程费每户 0.3 万元	每个采暖期对每户补贴燃气费用 2400 元；居民清洁供暖用气执行居民用气价格，不执行阶梯气价；对达到 50% 建筑节能标准、具备按用热量计价收费条件的城市新建建筑和完成供热计量改造的既有建筑，实行两部制热价。
太原市	8000 元 / 户，居民只需承担燃气工程费每户 0.19 万元和燃气取暖用暖气片及户内水系统改造费用。原则上每户只限补贴一台 24KW 及以下的燃气热水取暖炉或 26KW 及以下的壁挂式燃气热水取暖炉，超出部分居民自行承担。	农户用气量在 2250 方以内，前 150 方按 1.36 元 / 方补贴，采暖季开始前一次性补贴到位；后 750 方按 1.1 元 / 方补贴，采暖季结束后根据实际用气情况补贴到位（市、区 1:1）。最高不超过 2865 元 / 户
阳泉市	燃气配套管网费用补贴 1000 元 / 户；取暖设备费用补贴 2000 元 / 户	气价补贴 0.5 元 / 立方米；900 立方米 / 户 / 年
长治市	燃气管网配套费补贴最高不超过 5000 元 / 户（市、县 1:1）；燃气取暖设备费用补贴最高不超过 3000 元 / 户（市、县 1:1）	每个采暖期 2400 元 / 户（市、县 1:1）
晋城市	管网建设、设备采购、配套设施建设、运行费用共补贴 6500 元 / 户	
吕梁市	0.8 万元 / 户，户内采暖系统的改造费用由居民自行承担。	采暖季燃气价格不执行阶梯气价。气价补贴 1 元 / m ³ ，补贴最高不超 2400 元 / 户
晋中市	6800 元 / 户（取暖设备 4000 元、庭院内管网及初装费 2800 元）。	气价补贴 1 元 / 立方米，每年最高补贴 1120 立方米 / 户（市、县 1:1）
运城市	改造补贴 2000 元 / 户（市）	
临汾市		气价补贴 1 元 / 立方米，每年最高补贴气量 900 立方米 / 户（市、县 1:1）
朔州市	4000 元 / 户（市、区、用户 1:1:1），壁挂炉补贴 1 个 / 户（市、区、用户 1:1:1），总补贴金额不超过 2667 元 / 户。	气价补贴 1 元 / 立方米，每年最高补贴 1500 立方米 / 户，但取暖总用气量小于 600 立方米不予补贴。（市、区 1:1）。
大同市	改造补贴 8000 元 / 户（市、县 1:1）	

附表 3-4 山西省煤改电补贴政策表

城市	初装费补贴	运行补贴
山西省	对安装高效节能取暖设备的居民，最高补贴不超过 20000 元/户（省市 1:1）	每个采暖期财政对每户补贴谷期电价最高不超过 2400 元；对煤改电居民用户和执行居民电价的非居民用户，取暖用电试行峰谷时段计价、用电量计价、平段电价计价等多种用电价格政策。
太原市	空气源热泵设备购置费用补贴 93%（市、区 1:1），补贴不超过 2.74 万元/户。蓄热式电暖气设备购置费用补贴 88%（市、区 1:1），补贴不超过 1.44 万元/户。	执行居民用电峰谷分时电价政策；每个采暖期，市、区两级政府对完成“煤改电”的农户不分峰谷每度电补贴 0.2 元，最高不超过 2400 元。
阳泉市	配套电网补贴 1000 元/户；取暖设备补贴 2500 元/户	运行补贴按照每个采暖季每户 1 万度用电量；采暖季夜间谷期电价补贴 0.1 元/度。
长治市	最高不超过 2 万元/户（市、县 1:1）	执行居民用电峰谷分时电价政策；电费不超过 2400 元/户（市、县 1:1）
晋城市	管网建设、设备采购、配套设施建设、运行费用共补贴 6500 元/户	试行多种计价方式，由用户自己选择：（1）峰谷时段计价方式，谷电时段延长至 12 个小时，谷电价按 0.2862 元/千瓦时，峰电按 0.507 元/千瓦时；（2）用电量计价方式，月用电量 2600 千瓦时以内按 0.2862 元/千瓦时，超过的按 0.507 元/千瓦时；（3）平段电价计划方式，电采暖用量不受限制，用电价格按 0.4770 元/千瓦时。
吕梁市	补贴不超过 2.4 万元/户	执行居民用电峰谷分时电价政策，每个采暖期每户补贴电费最高不超过 2000 元
晋中市	最高不超过 20000 元/户（市、县 1:1）	每个采暖期每户补贴电费最高不超过 2000 元
运城市	对完成“煤改电”采暖改造的用户，市级资金给予一次性改造补贴 2000 元	取暖季执行居民用户电采暖用电峰谷分时电价（峰段：8:00-20:00，电价 0.497 元；谷段：20:00-次日 8:00，电价 0.2802 元）
临汾市	给予一次性改造建设补贴，市、县（区）各承担 50%。	采暖期补贴电价的三分之二，最高补贴电量 1 万千瓦时/户（市、县 1:1）
朔州市	设备购置、安装费用补贴 8000 元/户（市、区、用户 1:1:1）	电价补贴 0.2 元/千瓦时（市、区 1:1），最高补贴电量 1.2 万千瓦时/户；“煤改电”采暖期可选择执行峰谷电价，非采暖期可不选择执行峰谷电价；“煤改电”用户采暖季用电不执行阶梯电价，其他月份执行居民阶梯电价。
大同市	改造补贴户均 8000 元，由市、县（区）两级政府各承担 50%，每户居民只承担 2000 元改造费用。	采暖期补贴 0.2 元/千瓦时，每年最高补贴 1.2 万千瓦时/户（市、县 1:1）。“煤改电”用户采暖期用电不执行阶梯电价。

附件 4 陕西省附表

附表 4-1 陕西省清洁取暖工作任务清单政策

政策	发布时间	完成时间	内容
《陕西省冬季清洁取暖实施方案（2017—2021）》	2018年6月12日	2019年	全省（关中和陕北地区）清洁取暖率达到63%；到2021年，全省清洁取暖率达到70%以上。
		2019年	关中地区城市城区清洁取暖率达到90%以上，县城和城乡结合部（含中心镇、下同）达到70%以上，农村地区达到40%以上，35蒸吨/时以下燃煤锅炉全部拆除；陕北地区城市城区、县城和城乡结合部清洁取暖率达到60%以上，农村地区达到20%以上。
		2021年	关中地区城市城区全部实现清洁取暖，县城和城乡结合部清洁取暖率达到80%以上，农村地区达到60%以上；陕北地区城市城区清洁取暖率达到80%以上，20蒸吨/时及以下燃煤锅炉全部拆除；县城和城乡结合部清洁取暖率达到70%以上，10蒸吨/时及以下燃煤锅炉全部拆除；农村地区清洁取暖率达到40%以上。
《陕西省铁腕治霾打赢蓝天保卫战三年行动方案（2018—2020年）（修订版）》	2018年9月22日	2019年底前	关中地区所有每小时35蒸吨以下燃煤锅炉（每小时20蒸吨及以上已完成超低排放改造的除外）全部拆除或实行清洁能源改造，其中，2018年不少于60%。
		2020年采暖季前	地方各级政府、城镇燃气企业和上游供气企业的储备能力达到量化指标要求。建立完善调峰用户清单，采暖季实行“压非保民”。
《陕西省关中地区散煤治理行动方案（2019—2020年）》	2019年4月11日	2019年12月底	关中平原地区基本实现应改尽改，山区力争整存连片改造完成60%，其余区域在2020年底前完成改造。
		2020年采暖季前	在保障能源供应的前提下，关中平原地区基本完成生活和取暖散煤替代，暂不具备替代条件的山区积极推广洁净煤。

附表 4-2 陕西省各市政策出台情况

城市	时间	政策与规划
西安市	2017年8月	《西安市2017年煤炭削减替代工作实施细则的通知》(市政办发〔2017〕78号)
	2017年8月	《西安市全面强化网格化管理扎实推进散煤治理工作实施方案》(市政办发〔2017〕81号)
	2017年11月	《西安市铁腕治霾财政补贴奖补办法》(市政办发〔2017〕103号)
	2017年11月	《西安市城乡居民煤改清洁能源财政补贴发放实施细则》(市财发〔2017〕234号)
	2018年5月	《加快推进西安市城乡居民煤改洁工作》(市发改发〔2018〕152号)
	2018年8月	《西安市“铁腕治霾.保卫蓝天”三年行动方案(2018—2020年)》(市政发〔2018〕33号)
	2018年9月	《关于加快推进煤炭削减工作有关问题》(市发改发〔2018〕314号)
	2018年9月	《西安市2018年农村居民煤改洁工作推进方案》(市发改发〔2018〕315号)
宝鸡市	2017年10月	《宝鸡市2017年可吸入颗粒物(PM10)重点整治暨冬季大气污染防治全面攻坚行动方案》(宝政发〔2017〕37号)
	2018年4月	《宝鸡市铁腕治霾打赢蓝天保卫战三年行动方案(2018—2020年)》(宝政发〔2018〕11号)
咸阳市		《咸阳市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》
	2018年11月	《咸阳市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》
	2018年11月	《咸阳市冬季清洁取暖试点城市实施方案》(咸政发〔2018〕26号)
铜川市	2018年4月	《铜川市铁腕治霾打赢蓝天保卫战三年行动方案(2018—2020年)》(铜铁治办发〔2018〕4号)
	2018年11月	《铜川市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》(《铜川市2018—2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》)
渭南市	2017年11月	《渭南市2017年铁腕治霾冬防攻坚行动方案》(渭政发〔2017〕42号)
延安市	2017年4月	《延安市“铁腕治霾 保卫蓝天”2017年工作方案》(延政发〔2017〕12号)
	2018年6月	《延安市打赢蓝天保卫战三年行动方案(2018—2020年)》(延政发〔2018〕9号)
榆林市	2018年12月	《榆林市铁腕治霾打赢蓝天保卫战三年行动方案(2018—2020年)(修订版)》

附表 4-3 陕西省煤改气补贴政策表

城市	初装费补贴	运行补贴
陕西省	1000 元 / 户	/
西安市	费用总额的 60%，每户最高补贴 3000 元，省级负担 400 元、市级负担 2000 元、县（区）级负担 600 元	气价补贴 1 元 / 立方米，每户最高补贴 1000 元，用气量不足 1000 立方米的根据实际使用量补贴。
宝鸡市	对实施“煤改气”的给予每户一次性补助入口工程工料费 1000 元，省级负担 400 元，市县（区）各负担 300 元	/
咸阳市	1000 元（城区），农户 5000 元（市县 5:5）	不补
铜川市	天然气入户工程工料费 1000 元	/
渭南市	1000 元	/
延安市	/	/
榆林市	/	/

附表 4-4 陕西省煤改电补贴政策表

城市	初装费补贴	运行补贴
陕西省	1000 元 / 户	/
西安市	费用总额的 60%，每户最高补贴 3000 元。单个采暖产品购置价低于 100 元的不予补贴。	电价补贴 0.25 元 / 度，补贴金额最高不超过 1000 元。安装了峰谷分时计量表的居民同时享受峰谷电价补贴。
宝鸡市	每户一次性补助采暖设备费 1000 元，仍由省市区（区）三级按相同比例负担。	/
咸阳市	1000 元（城区），农户 5000 元（市县 5:5）	不补
铜川市	采暖设备费一千元（采暖设备购买费用低于一千元，据实给予补助）	/
渭南市	1000 元	峰段电费增加 0.05 元 / 度，谷段电费降低 0.2 元 / 度。
延安市	/	/
榆林市	/	/

附件 5 黑龙江省附表

附表 5-1 黑龙江省清洁取暖工作任务清单政策

政策	发布时间	完成时间	内容
《黑龙江省大气污染防治专项行动方案（2016—2018年）》	2016年3月14日	2017年底	除保留必要的应急、调峰供热锅炉外，全部淘汰市级以上城市建成区内10蒸吨/小时及以下燃煤锅炉。
		2018年底	全省市级以上城市建成区集中供热普及率达到80%。
		2017年底	哈尔滨市全部淘汰建成区内607台10蒸吨/小时及以下燃煤供热锅炉；拆除具备供热并网条件的20蒸吨/小时以下燃煤供热锅炉和9个工业园区内分散供热锅炉及生产锅炉；搬迁建成区内5家企业，拆除14台燃煤锅炉；禁止新建35蒸吨/小时以下燃煤蒸汽锅炉和29兆瓦以下燃煤热水锅炉。
		2017年底	哈尔滨市建成区内商业、服务业和工业企业445台10蒸吨/小时及以下燃煤生产锅炉改用清洁能源或并入集中供热热网。
		2018年底	完成哈药集团、物业供热集团、哈投集团等企业燃煤统一配送；完成铁路煤炭市场建设，实现煤炭周转1500万吨/年，应急储备100万吨。
		2018年底	哈尔滨市要完成玉米和水稻秸秆还田200万亩，推广民用生物质锅炉5000台，建设青黄贮窖50万立方米，建设秸秆收储中心40处，秸秆综合利用率达到80%以上，综合利用量达到1360万吨。
《关于推进全省城镇清洁供暖的实施意见》	2018年1月10日	2019年	城市城区清洁取暖率达到60%以上；县城和城乡结合部清洁取暖率达到50%以上。
		2021年	城市城区清洁取暖率达到80%以上；县城和城乡结合部清洁取暖率达到70%以上。
《黑龙江省打赢蓝天保卫战三年行动计划》	2018年11月17日	2020年	天然气占能源消费总量比重达到8%。新增天然气量优先用于城镇居民和大气污染严重地区的生活和冬季取暖散煤替代，实现“增气减煤”。
		2020年采暖季前	地方政府、城镇燃气企业的储备能力达到量化指标要求。
		2020年底前	县级及以上城市建成区基本淘汰每小时10蒸吨及以下燃煤锅炉及茶水炉、经营性炉灶、储粮燃煤烘干设备等燃煤设施，原则上不再新建每小时35蒸吨以下的燃煤锅炉，其他地区原则上不再新建每小时10蒸吨以下的燃煤锅炉。
		2020年底前	哈尔滨市城市建成区基本淘汰每小时35蒸吨以下燃煤锅炉，具备条件的每小时65蒸吨及以上燃煤锅炉全部实现节能和超低排放，燃气锅炉基本完成低氮改造。
		2020年	两市两县计划新建32个农林生物质热电联产项目，其中：哈尔滨市新建16个，绥化市新建14个，肇州县、肇源县各新建1个，可新增农林生物质处理能力800万吨，占秸秆可收集量的20%。两市两县计划新建秸秆固化成型燃料站1282个，其中：0.25万吨小型站876个，1万吨中型站232个，2万吨大型站174个，可新增秸秆处理能力986万吨（其中绥化市360万吨固化压块能力用于热电联产），能源化利用（不含农户直燃）占秸秆可收集量的24.6%。
		2020年	两市两县玉米秸秆还田达到986万吨，占秸秆可收集量的24.6%。两市两县利用秸秆沤肥能力达到263万吨，占秸秆可收集量的6.5%。

《哈尔滨市、绥化市和肇州县、肇源县秸秆综合利用三年行动计划》	2018年7月7日	2020年	两市两县畜牧饲料化处理秸秆量可达603万吨，占秸秆可收集量的15.1%。
		2020年	两市两县新建75个有潜力、有市场前景、有一定经济和社会效益的原料化产业型加工项目，可消耗秸秆能力494.92万吨，占秸秆可收集量的12.3%。
		2020年	两市两县基料化利用秸秆55万吨，占秸秆可收集量的1.4%。
		2020年	两市两县打包离田秸秆能力达到1560万吨（农户直燃、粗饲料直喂、草编、基料化等用途不需机械打包离田），占秸秆可收集量的38.9%。
		2—3年内	两市两县基本实现无野外露天焚烧现象。

附表 5-2 黑龙江省各市政策出台情况

城市	时间	政策与规划
哈尔滨市	2018年5月	《哈尔滨市2018年“治霾卫蓝”工作实施方案》（哈政办规〔2018〕18号）
	2019年2月	《哈尔滨市打赢蓝天保卫战三年行动计划实施方案》（哈政规〔2019〕3号）
齐齐哈尔市	2016年6月	《齐齐哈尔市大气污染防治专项行动方案（2016—2018年）》（齐政发〔2016〕18号）
鸡西市	2018年6月	《鸡西市大气污染防治百日攻坚行动实施方案》
鹤岗市	2017年10月	《鹤岗市2017年度大气污染防治实施方案》（鹤政规〔2017〕14号）
	2019年4月	《鹤岗市打赢蓝天保卫战行动计划》（鹤政规〔2019〕5号）
双鸭山市	2018年10月	《双鸭山市2018年度大气污染防治实施方案》
	2018年12月	《双鸭山市打赢蓝天保卫战三年行动计划》（双政规〔2018〕12号）
大庆市	2019年3月	《大庆市打赢蓝天保卫战三年行动计划》（庆政规〔2019〕5号）
伊春市	2016年7月	《伊春市大气污染防治专项行动工作方案（2016—2018年）》
佳木斯市	2016年5月	《佳木斯市2017年度大气污染防治实施方案》（佳政发〔2016〕号）
七台河市	2019年5月	《七台河市打赢蓝天保卫战三年行动计划》（七政规〔2019〕4号）
牡丹江市	2016年7月	《牡丹江市大气污染防治专项行动工作方案（2016—2018年）》
	2018年	《牡丹江市打赢蓝天保卫战三年行动计划》（牡政规〔2018〕16号）
黑河市	2016年6月	《黑河市大气污染防治专项行动实施方案（2016—2018年）》（黑市政办规〔2016〕3号）
	2019年3月	《黑河市打赢蓝天保卫战三年行动计划》（黑市政规〔2019〕2号）
绥化市		《绥化市打赢蓝天保卫战三年行动计划》
大兴安岭地区	2019年1月	《大兴安岭地区打赢蓝天保卫战三年行动计划》

参考文献

1. 《北方地区冬季清洁取暖规划（2017-2021年）》，十部委印发，发改能源[2017]2100号文件，2017.12.
2. 《汾渭平原2018-2019年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》，环大气[2018]132号文件，2018.10.
3. 《哈尔滨市、绥化市和肇州县、肇源县秸秆综合利用三年行动计划》.黑政办规〔2018〕39号文件，2018.7
4. 《黑龙江省能源发展“十三五”规划》.黑发改煤炭〔2017〕568号文件 2017.12.
5. 北京市统计局.北京市2018年统计年鉴[J],北京:中国统计出版社,2019
6. 陈国伟等.北京农村地区燃煤污染物的排放测试.环境工程学报,2018,597-603
7. 国家电网公司.国家电网公司配电网“煤改电”建设改造技术原则.2018.
8. 国家煤炭工业网.陕西榆林兰炭进入河北省.http://www.coalchina.org.cn/detail/14/10/08/00000010/content.html.
9. 河北省统计局.河北省2017年经济年鉴[J],北京:中国统计出版社,2018
10. 黑龙江省统计局.黑龙江省2018年统计年鉴[J],北京:中国统计出版社,2019.
11. 霍沫霖等.中国散烧煤消费地图及影响因素研究.中国电力,2018,51,139-146.
12. 巨健等.陕西省“煤改电”市场潜力及环境效益研究.能源与节能2019,(03),95-98
13. 蓝天保卫战五年回顾与三年展望,贺克斌,2018年西安及汾渭平原煤炭消费总量控制高峰论坛,2018.08.03.
14. 山西省统计局.山西省2018年国民经济和社会发展统计公报,2019.
15. 陕西省人民政府.陕西省2018年鉴,陕西:陕西年鉴编辑部,2019.
16. 生态环境部.《民用煤大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》.2016
17. 世界银行,中国:加快居民清洁炊事和采暖的普及 2013
18. 朔州市统计局.朔州市2018年国民经济和社会发展统计公报,2019
19. 西安:推进清洁取暖确保群众温暖过冬.西安节能信息,2018,12.

20. 谢卧龙等. 山西农村地区燃煤采暖情况入户调查及排污量估算. 环境科学研究, 2018, 31, 642–647.
21. 亚洲清洁空气中心. 《大气中国 2018》, 2018.10
22. 张双奇等. 基于秸秆露天焚烧量的北方农村地区秸秆成型燃料替代采暖散煤节能减排研究, 农业环境科学报, 2017, 36 (12) : 2506–2514.
23. 长治市统计局. 长治市 2018 年国民经济和社会发展统计公报, 2019.
24. 专家解读《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 生态环境部网站, 2018.07.06.
25. Chen, Y. et al. 2015. Measurements of emission factors of PM_{2.5}, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China. Atmos. Environ. 33,190–196.
26. HEI, GBD 2017 Risk Factor Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. Lancet. 2018; 392: 1923–1994
27. HEI, State of Global Air, 2018
28. Nair, H., Simões, E.A., Rudan, I., Gessner, B.D., Azziz-Baumgartner, E., Zhang, J.S.F. et al. Global and regional burden of hospital admissions for severe acute lower respiratory infections in young children in 2010: a systematic analysis. Lancet. 2013; 381: 1380–1390
29. Zhao Bin, Zheng Haotian, Wang Shuxiao, Smith Kirk R, Lu Xi, Anan Kristin, Gu Yu, Wang Yuan, Ding Dian, Xing Jia, Fu Xiao, Yang Xudong, Liou Kuo-Nan, Hao Jiming. Change in household fuels dominates the decrease in PM_{2.5} exposure and premature mortality in China in 2005–2015. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018.



微信公众号



空气知库