

# 热泵助力碳中和 白皮书 (2021)

**指导单位**

国家发改委环资司

**主编单位**

中国节能协会热泵专业委员会

2021年10月

### **参编单位**

寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室

哈尔滨工业大学热能应用省级工程研究中心

清华大学建筑节能中心

天津大学热能研究所

德国国际合作机构

国际铜业协会

青岛海尔空调电子有限公司

浙江中广电器股份有限公司

上海海立电器有限公司

### **指导专家组**

江亿 蒋靖浩 房庆 宋忠奎 刘幼农 马一太

孙澄 高屹峰 胡润青 尹玉霞 付松辉 朱建军 季盛昌

### **主要编写人员**

倪龙 赵恒谊 董世豪 李建德 任夫磊 张树前 袁晓军 徐志海

王昊 Philipp Geres 原祯 王派 许海生 王水 王跃 郑渊博 叶安琪 叶盛辉

## 序言

能源革命、双碳战略将“低碳”纳入国民经济和社会发展的全局规划，勾画了未来中国低碳发展的蓝图，其本质是为了更高质量地可持续发展。要实现低碳发展的目标，必须用可再生能源替代现有的化石能源。包括水电、风电、光电、核电在内的绿电替代将完全改变我们现在的能源体系。以往能源转换的链条是“燃料→热量→电”，即“热变电”，为落实碳中和、碳达峰目标，用电直接做功或者变热，即“电变热”是大势所趋，这是未来在能源应用领域里最大的变化。

碳中和的实现需要各行各业的共同努力，高效节能的热泵技术契合时代背景与政策导向，将被碳中和的时代需求推动而得到进一步发展。热泵契合终端用能电气化发展的需求，是用热领域实现零排放最好的技术路径，无论是建筑领域，还是工业、农业和其他民用领域，在有合适的低位热源的条件下，使用热泵替代锅炉或者电热炉来提供热能，将大大减少整个国家化石燃料的消耗，从而助力碳中和。

目前大部分电力来自于燃煤发电，一般认为只有当热泵的COP高于一定值时，热泵才是节能的。然而未来随着绿电逐步替代煤电，将大大拓宽热泵的适宜应用范围，如某些温度要求较高的工业领域，就算热泵COP只有1.5，仍然比直接采用电加热节省50%，给热泵开辟了一个巨大的市场。此外，采用电动热泵实现电向热的转化，也易于实现“需求侧响应”的柔性用电模式，通过主动式调节实现电力削峰填谷，一定程度上消除风电、光伏发电上网瓶颈，促进可再生能源电力发展。

为此，在能源革命、双碳战略的大背景下，热泵产业有着广阔的发展前景，发展电动热泵对于能源革命有着巨大意义，热泵的发展普及应与能源转型同步进行，其在低碳发展战略下将发挥不容忽视的作用。

中国节能协会热泵专业委员会这些年做了许多工作，在这个大形势下，仍然需要加倍发展，在各个应用领域不断推广热泵技术，引导改进工艺环节、攻克技术难题。本白皮书的发布也恰逢其时，详细介绍了双碳战略下的热泵技术发展现状与潜力，尤其是对于碳减排的巨大作用，向社会各界全面展示热泵技术在碳中和中的巨大贡献。



江亿

清华大学教授

中国工程院院士

中国节能协会理事长

## 摘要

我国建筑业、工业和农业消耗大量中低温热能，且大部分由化石燃料制备，可再生能源利用比例低。目前，建筑运行中化石能源消耗相关的碳排放约22亿吨；工业能耗约1400Mtce，其中50%~70%为化石燃料生产的热能形式消耗；农业温室大棚、畜牧养殖供暖热源仍主要为燃煤锅炉。在全面推进碳达峰与碳中和的战略背景下，能源领域将产生革命性变化，最显著的一点是能源转换链条由目前的“燃料产热、热发电”变革为“绿电生产、电制热”，终端用能电气化态势明显。

热泵作为一种可再生能源利用装置，是电制热的最有效方式，其显著的节能、减碳特征成为替代化石能源中低温热能生产的最优技术方案。本《热泵助力“碳中和”白皮书》从热泵技术原理、应用现状、应用前景和减碳效益四个方面分析了热泵技术在碳达峰与碳中和中发挥的作用。

随着碳达峰和碳中和政策的全面推进，热泵技术应用前景广阔。在建筑行业，热泵技术可应用于新建建筑和既有建筑改造的供暖制冷和热水供应，其二氧化碳排放量相对燃煤锅炉降低60~80%；对于工业生产，大容量的高温工业热泵是解决工业能源脱碳的有效方案之一；对农业部门，热泵技术在农业环境调控、农产品干燥中的应用可以带来20~60%的节能效果；另外，热泵在电动汽车空调、洗碗机和洗衣机中均有广阔的应用情景。

在热泵应用规模显著增长情景下，由热泵应用、电力生产方式改革、需求侧改造的共同作用下，2060年建筑供暖与热水供应、工业中低温用热、农业环境调控领域碳排放量将由现在的38.29亿吨降低至7.48亿吨，实现81%的碳减排，潜在碳减排占2019年碳排放的31.4%。其中热泵减排量达20.95亿吨，占总减排量的70%，电力端减排量和需求侧减排量分别为3.44亿吨和5.67亿吨。

显著增长情景下，建筑行业减排量为8.69亿吨/年、工业生产20.89亿吨/年、农业环境调控1.22亿吨/年。且随着热泵应用规模增速增加，碳排放量下降越快，减排量越明显。若2060年电力实现“脱碳”，热泵实现应用场景的全覆盖，则中低温供热领域可实现“零碳”。同时，热泵应用还能一定程度上实现柔性用电，有助于电力调峰。热泵应用的减排量也有助于在碳交易市场创造巨额价值。热泵技术的推广还能为我国环保、民生事业做出显著贡献。

热泵技术作为绿色低碳的热能供应方案，是供热领域替代化石能源、实现碳中和的必然路径。中低温供热领域实现碳中和的关键在于热泵技术的普及应用。碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，在创建社会主义生态文明建设的伟大征程上，热泵技术可为我国乃至全球的碳达峰、碳中和事业做出巨大贡献！

# 目录

序言	1
摘要	2
图目录	6
表目录	8
1 引言	9
1.1 碳中和的背景	9
1.2 热泵在碳中和中的作用与意义	11
参考文献	13
2 热泵技术原理	14
2.1 热泵的定义与基本原理	14
2.2 热泵的种类与特点	16
2.2.1 空气源热泵	16
2.2.2 土壤源热泵	17
2.2.3 水源热泵	18
2.3 热泵技术的应用	19
参考文献	21
3 热泵技术应用现状	22
3.1 总述	22
3.2 建筑行业	24
3.3 工业生产	26
3.4 农业环境调控	29
3.5 其他应用	30
参考文献	31
4 热泵技术在碳中和中的应用前景	33
4.1 建筑行业	33
4.2 工业生产	36
4.3 农业环境调控	39
4.4 其他行业	42
4.5 德国和欧洲热泵应用情景及支持政策	43

4.5.1 德国和欧洲热泵应用情景 .....	43
4.5.2 德国与欧洲的热泵支持政策与分析 .....	45
4.5.3 德国与欧洲热泵发展经验与启示 .....	48
4.6 热泵技术自身的低碳化及发展关键技术 .....	48
4.6.1 热泵自身技术的低碳化 .....	48
4.6.2 热泵发展关键技术 .....	50
参考文献 .....	52
<b>5 热泵减碳效益分析</b> .....	<b>55</b>
5.1 碳排放分析方法 .....	55
5.1.1 碳排放量计算方法 .....	55
5.1.2 碳排放因子选取 .....	56
5.1.3 减排量与减排百分比的计算 .....	56
5.2 建筑行业碳减排分析 .....	58
5.2.1 建筑规模预测 .....	58
5.2.2 建筑供暖减碳分析 .....	60
5.2.3 热水供应减碳分析 .....	63
5.3 工业生产碳减排分析 .....	67
5.3.1 工业用热规模预测 .....	67
5.3.2 工业热泵碳减排分析 .....	68
5.4 农业环境调控减碳分析 .....	71
5.4.1 温室大棚减碳分析 .....	71
5.4.2 畜禽养殖减碳分析 .....	75
5.5 热泵应用对碳中和的贡献 .....	79
5.6 热泵应用对电力的影响 .....	82
5.6.1 热泵应用的电力需求 .....	82
5.6.2 热泵对电网的改善 .....	83
5.7 热泵在碳交易市场中的效益 .....	84
5.7.1 国内碳交易市场的发展 .....	85
5.7.2 各行业碳交易市场中的效益 .....	86
5.8 社会与环境效益分析 .....	88
5.8.1 清洁环保 .....	88

5.8.2 节能收益 .....	90
5.8.3 改善民生 .....	91
参考文献 .....	91
6 总结 .....	93
附录 .....	95
附录1：“清洁取暖”相关政策文件 .....	95
附录2：碳中和相关政策、讲话与会议 .....	97
附录3：其他欧洲国家的支持政策一览 .....	100
附录4：热泵应用典型案例 .....	101

# 图目录

图1-1 1971-2018年世界燃料燃烧产生的二氧化碳排放量及占比 .....	10
图1-2 2°C情景下分品种的能源消费构成 .....	11
图1-3 热泵技术原理图 .....	11
图1-4 低碳技术盘点 .....	13
图2-1 不同供暖方案 .....	14
图2-2 热泵系统 .....	15
图2-3 空气源热泵 .....	17
图2-4 土壤源热泵 .....	18
图2-5 水源热泵 .....	19
图2-6 热泵技术在建筑业、工业、农业中的应用 .....	20
图3-1 可再生能源在全球热量消耗中的份额 .....	22
图3-2 热泵产品全球产量 .....	23
图3-3 中国建筑领域用能及CO <sub>2</sub> 排放（2019年） .....	24
图3-4 北京和上海居民家庭生活热水设备分布（2018年） .....	25
图3-5 城市集中供热量 .....	26
图3-6 按部门划分的最终能源消费总量前五名的国家（2018年） .....	27
图3-7 2020年部分地区工业用热量同比变化 .....	28
图4-1 中国总建筑面积增长趋势 .....	33
图4-2 不同供热系统的碳排放强度 .....	34
图4-3 中国城镇居民家庭平均沐浴热水器拥有量 .....	35
图4-4 SGH120 蒸汽热泵系统流程图 .....	37
图4-5 原油集输系统加热工艺流 .....	38
图4-6 酸奶厂应用热泵流程 .....	38
图4-7 热泵干燥流程图 .....	39
图4-8 农业部门碳排放绝对值及其占本国总排放量的比重 .....	40
图4-9 热泵在德国住宅、商业建筑和集中供热中的份额预测 .....	44
图4-10 热泵在在供暖领域的减排潜力 .....	45
图4-11 德国热泵销售情况与热泵直接支持政策变化趋势的关系 .....	47
图4-12 制冷剂的发展趋势 .....	50



图5-1 相关能源的碳排放因子 .....	56
图5-2 各减排量核算示意图 .....	57
图5-3 城镇和农村住宅规模预测 .....	59
图5-4 我国供暖面积发展趋势 .....	59
图5-5 建筑供暖不同情景下的碳排放 .....	61
图5-6 建筑供暖不同热泵增速下的碳排放量与减排量 .....	62
图5-7 采用不同热源供暖的碳排放强度变化 .....	63
图5-8 热水供应不同情景下的碳排放 .....	65
图5-9 建筑热水供应不同热泵增速下的碳排放量与减排量 .....	66
图5-10 2060年建筑热水供应碳排放量、碳减排量随热泵占比的变化 .....	67
图5-11 工业能源与用热量预测 .....	68
图5-12 工业生产不同情景下的碳排放 .....	69
图5-13 工业生产不同热泵增速下的碳排放量与减排量 .....	70
图5-14 2060年工业生产碳排放量、减排量随热泵占比的变化 .....	71
图5-15 我国温室大棚面积趋势预测 .....	72
图5-16 温室大棚不同情景下2060年碳排放 .....	73
图5-17 农业大棚不同热泵增速下的碳排放量与减排量 .....	74
图5-18 2060年温室大棚碳排放量、减排量随热泵占比的变化 .....	75
图5-19 猪和家禽养殖规模预测 .....	75
图5-20 畜禽养殖不同情景下的碳排放 .....	77
图5-21 畜禽养殖不同热泵增速下的碳排放量与减排量 .....	78
图5-22 2060年畜禽养殖碳排放量、减排量随热泵百分比变化 .....	78
图5-23 显著增长情景下潜在总减排量在各行业的占比 .....	80
图5-24 电力完全脱碳、热泵全覆盖条件下潜在减总排量在各行业的占比 .....	80
图5-25 不同来源的减排总量占比 .....	81
图5-26 碳排放总量逐年变化 .....	82
图5-27 国内碳交易市场发展历程 .....	85
图5-28 年平均碳价趋势预测 .....	86
图5-29 各行业热泵减排量价值估算 .....	87
图5-30 不同供热方式单位供热量的污染物排放因子 .....	89
图5-31 不同供热方式单位供热量的烟尘颗粒物排放量 .....	89
图5-32 不同供热方式一次能源消耗对比 .....	90

## 表目录

表3-1 欧盟工业热泵市场潜力概要 .....	29
表4-1 各类热水器运行费用 .....	35
表4-2 热泵与不同形式干燥系统的比较 .....	41
表4-3 部分农产品干燥参数 .....	41
表4-4 热泵系统应用车型 .....	43
表4-5 常见制冷剂的GWP和ODP值 .....	49
表5-1 建筑供暖各情景的计算指标 .....	61
表5-2 建筑供暖不同热泵增速的计算指标 .....	62
表5-3 热水供应各情景的计算指标 .....	64
表5-4 建筑热水供应不同热泵增速的计算指标 .....	65
表5-5 工业生产各情景的计算指标 .....	69
表5-6 工业生产不同热泵增速的计算指标 .....	70
表5-7 温室大棚各情景的计算指标 .....	72
表5-8 温室大棚不同热泵增速的计算指标 .....	74
表5-9 畜禽养殖各情景计算指标 .....	76
表5-10 畜禽养殖不同热泵增速的计算指标 .....	77
表5-11 各行业2060年潜在减排量和碳排放量汇总 .....	79
表5-12 各行业热泵、电力端、需求侧减排量汇总 .....	81
表5-13 热泵显著增长情景下的电负荷与节省量 .....	83
表5-14 各行业2021~2030年和2031~2060年间潜在总减排量及总价值汇总 .....	88

## 1 引言

### 1.1 碳中和的背景

自工业革命以来，地球的自然平衡受到前所未有的冲击。碳循环体系首当其冲，碳源和碳汇平衡被打破，大气层中的碳不断累积，引发了世界对全球变暖、海平面上升等后果的思考。面对日益严峻的气候危机挑战，早在2014年11月12日，中美双方共同发表《中美气候变化联合声明》中便提出中国2030年左右二氧化碳排放达到峰值且争取尽早达峰的计划；2015年11月30日，中国政府向联合国提交《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》报告，正式确定2030年左右二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰的目标。2020年9月22日第七十五届联合国大会一般性辩论中，中国国家主席习近平做出中国在2030年前碳达峰（二氧化碳排放达到峰值）、2060年碳中和（温室气体净零排放）的庄严承诺，并在气候雄心会议上进一步宣布，到2030年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右，森林蓄积量将比2005年增加60亿立方米，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。实现碳中和、重构人与自然和谐关系的重任需要全世界各国精诚合作，在构建人类命运共同体的过程中，中国在全球气候治理中承担重大责任，展现非凡勇气，为世界共同迎战全球气候环境改变注入信心。

我国将应对气候变化融入社会发展全局规划。“十二五”期间首次将“低碳”纳入国民经济和社会发展规划，勾画了未来五年中国低碳发展的蓝图，促进了低碳发展；2015年提出了碳排放2030年左右达峰并尽早达峰等自主贡献目标，采取了调整产业结构、节约能源和资源、提高能源资源利用效率、优化能源结构、发展非化石能源、发展循环经济、增加森林碳汇、建立运行碳市场、开展南南合作等各方面政策措施，推动全社会加速向绿色低碳转型。而最近的“十四五”期间则被认为是碳达峰的关键期、窗口期。十九届五中全会设定的社会主义现代化远景目标，要求2035年广泛形成绿色生产生活方式，碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转，美丽中国建设目标基本实现。2020年12月16日中央经济工作会议确定，为做好碳达峰、碳中和的工作，抓紧制定2030年前碳排放达峰行动方案，支持有条件的地方率先达峰；加快调整优化产业结构、能源结构，推动煤炭消费尽早达峰；大力发展新能源，加快建设全国用能权、碳排放权交易市场；完善能源消费双控制度；继续打好污染防治攻坚战，实现减污降碳协同效应；开展大规模国土绿化行动，提升生态系统碳汇能力。

图1-1为1971~2018年之间全球各地区的二氧化碳排放情况。2018年，全球二氧化碳排放量为335亿吨，中国是世界上最大的二氧化碳排放国家，排放量达95.7亿吨，占

全世界二氧化碳排放量的29%<sup>[1]</sup>。另外，煤炭仍是当前我国主要的能源支柱。图1-2显示2020年煤炭占我国能源消费总量的57%。按照《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》的情景分析显示，在全球温升限定在2°C的情境下，2050年煤炭的占比将约为9%<sup>[2]</sup>。2°C温升控制目标下，全球需要在2065~2070年左右实现碳中和，我国承诺在2060年达到碳中和，意味着我国的减碳速度超过2°C控制目标需求。由此可见，为实现碳中和的目标，我国能源结构势必改革，到2060年，煤炭在我国能源结构中的占比将大为降低，这将是一项巨大挑战。更为困难的是，欧盟和美国分别于1979年和2005年碳达峰，并表示在2050年实现碳中和，各自有71年和45年的时间从峰值走向净零排放<sup>[3]</sup>。作为世界上最大的发展中国家，中国“2030碳达峰、2060碳中和”目标达成要求仅用30年从峰值降至零碳排放，意味着中国推进碳中和的速度将是欧盟的2.3倍，是美国的1.5倍。与此同时，我国发展不平衡不充分问题仍然突出，发展的能源需求不断增加，在推进碳中和的过程中，还要兼顾社会经济发展、经济结构转型、能源低碳转型。因此，未来四十年的碳中和任务时间紧、任务重，减排任务的艰巨程度史无前例。

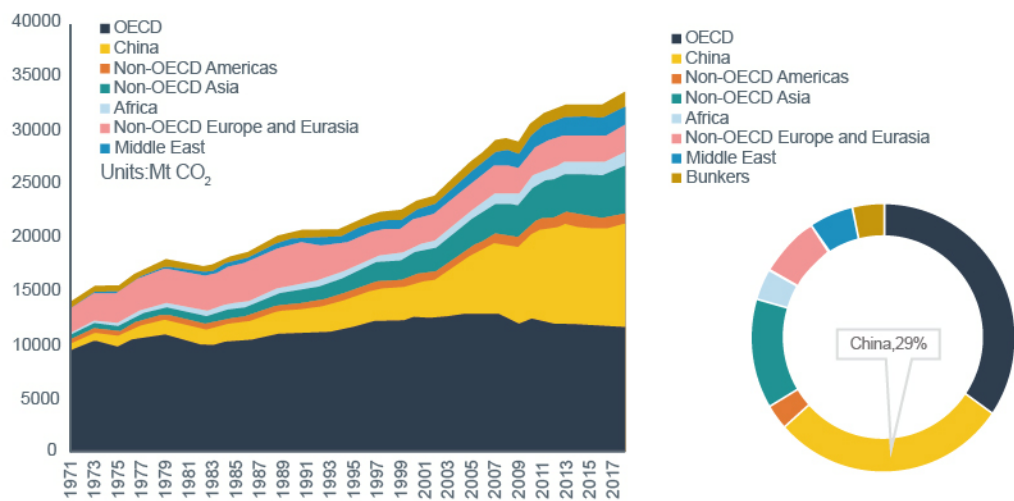


图1-1 1971-2018年世界燃料燃烧产生的二氧化碳排放量及占比

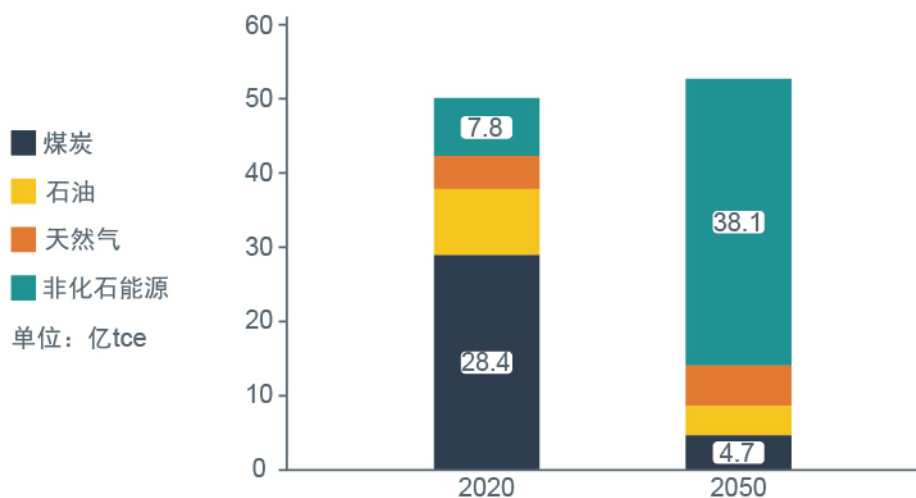


图1-2 2°C情景下分品种的能源消费构成

## 1.2 热泵在碳中和中的作用与意义

碳中和的实现需要各行各业的共同努力。从能源利用角度来看，热泵是一种使热量从低位热源流向高位热源的节能装置<sup>[4]</sup>，其基本原理如图1-3所示，通过输入1个单位的高位能（如电能）驱动热泵循环，吸收空气、土壤或水中的热能后，能够制取超过1个单位的热能，因此具有节能高效的特点。在仅考虑建筑和工业的终端用热的热能占比前提下，我国近一半的终端用能都以热能的形式消耗了。面对如此大的热量需求，在有合适的低位热源条件下，使用热泵来提供热能将大大减少整个国家化石燃料的消耗，从而助力碳中和。

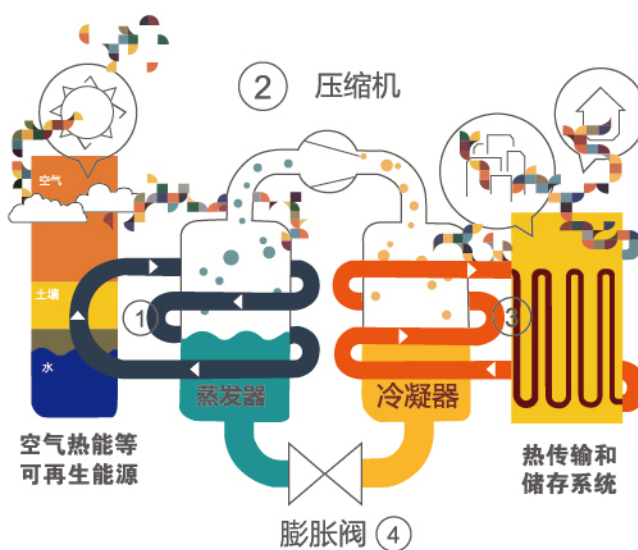


图1-3 热泵技术原理图

从能源革命的角度来看，能源转换链条将发生革命性变化，由目前的“燃料产热、热发电”变革为“绿电生产、电制热”，终端用能电气化态势明显。热泵作为一种可再生能源利用装置，是电制热的最有效方式。如图1-2所示，在2°C情景下，到2050年，我国能源总需求将达到52亿吨标煤，其中非化石能源占比超过73%，非化石电力在总电量中比例90%，煤炭比例将在9%以下；终端消费部门加强以电力替代化石能源直接燃烧利用，一次能源用于发电的比重由目前45%提升到2050年约75%，电力占终端能源消费的比重由当前25%提升到约55%<sup>[2]</sup>。这意味着使用电力驱动生产中低温热能的热泵比例将大幅提高，并逐步代替传统化石能源生产低品位热量的用能方式。国家能源局关于印发《2021年能源工作指导意见》<sup>[5]</sup>的通知指出，应大力推广高效节能技术，支持传统领域节能改造升级，推进节能标准制修订，因地制宜推进实施电能替代，大力推进以电代煤和以电代油，有序推进以电代气，提升终端用能电气化水平。江亿院士也多次指出，零碳能源的主要表现形式是直接输出电力，用电力替代化石能源以高效转换的方式生产热量是能源革命的需要<sup>[6]</sup>。同时，热泵应用还能一定程度上实现柔性用电，有助于电力调峰。高效节能的热泵技术契合时代背景与政策导向，将被碳中和的时代需求推动而得到进一步发展。

从技术路线角度来看，热泵是用热领域实现零碳的最好技术路径。碳排放分为直接碳排放与间接碳排放，使用热泵代替化石燃料，直接碳排放量就变为零，仅需考虑间接碳排放。图1-4从碳减排与碳吸收两个角度出发，纳入供给侧、需求侧分析，对已有的低碳技术进行了归纳<sup>[3]</sup>。供给侧减排方面的地热供热、需求侧减排方面的工业节能中的余热余压回收、建筑使用过程中当中的暖通空调及热水系统节能，这些技术路线上热泵装置均能充分发挥自身特点，为路线的实现提供有效工具。如中深层地源热泵可利用地热能供热；高温热泵十分适用于工业余热的回收利用，回收的热量既可以用于工艺过程，也可以用于供热，推动工业体系的低碳化；而建筑暖通空调、卫生热水供应方面，各类热泵供暖装置和热泵热水器已有大量的应用，尤其是清洁取暖的政策发布以来，空气源热泵在北方集中供暖应用迅速推广开来。

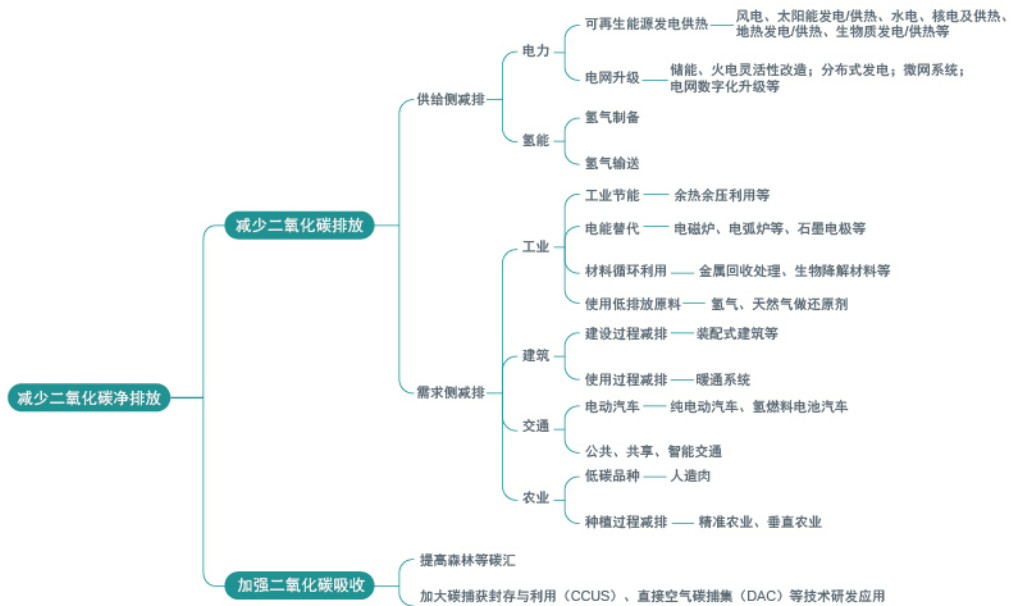


图1-4 低碳技术盘点

从能源革命角度来看，热泵契合能源转换链条的革命性变化，符合终端用能电气化发展的需求；从能量利用角度来看，热能是我国终端能耗的主要形式，而使用热泵提供中低温热能是最优方式；从技术路线角度，热泵能够为供给侧减排方面的地热发电/供热、需求侧减排中建筑、工业、农业、交通等领域的中低温热能生产提供工具。因此，为推进我国碳中和目标顺利达成，大力推广热泵技术是必由之路。

## 参考文献

- [1] International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2020. 2020.
- [2] 胡文娟. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究成果发布. 可持续发展经济导刊, 2020(10).
- [3] 红杉中国. 迈向零碳——基于科技创新的绿色变革2021. 2020.
- [4] 姚杨, 姜益强, 倪龙. 暖通空调热泵技术. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社. 2019.
- [5] 国家能源局. 《2021年能源工作指导意见》. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/22/content\\_5601529.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/22/content_5601529.htm). 2021.
- [6] 江亿. 能源革命与空气源热泵. 2019.

## 2 热泵 技术 原理

### 2.1 热泵的定义与基本原理

热泵（Heat Pump）是一种在高位能（一般为电能、热能）的驱动下，将低位热源（通常是空气、水或土壤）的热能转移到高位热源的节能装置，从而为住宅、商业和工农业供暖、供冷及提供热水等服务。

以室内供暖为例说明热泵节能的效果，图2-1给出了3种供暖方案。若向室内供应10kW热量维持室温20℃，采用燃煤供暖需要提供14.286kW的化学能（燃煤效率取70%），并排放大量污染物；采用电阻加热器，直接加热室内空气，至少需要供给电能10kW；而采用电能驱动热泵向室内供暖，仅消耗2.857kW的电能（COP取3.5）。可见，热泵供暖减少了大量高位能源消耗。

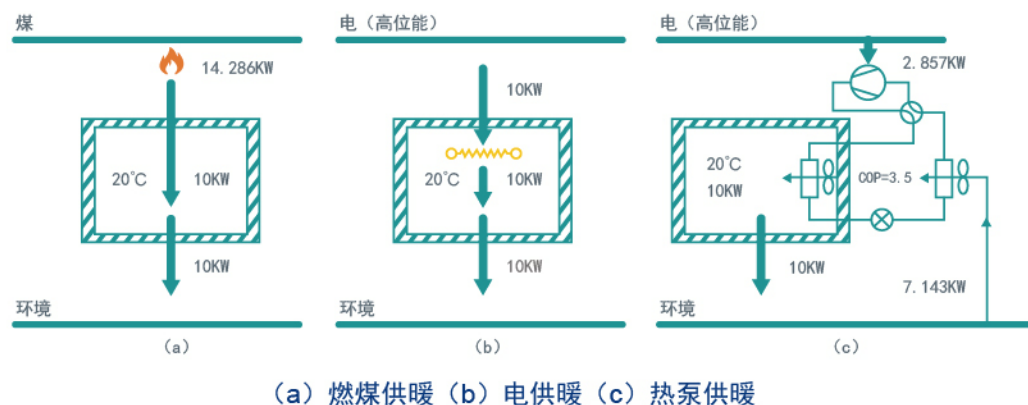


图2-1 不同供暖方案

热泵机组的组成部件主要有压缩机、冷凝器、蒸发器、节流机构和辅助设备等，吸收式热泵用发生器和吸收器等组合实现压缩机功能。热泵供热的基本原理是逆卡诺循环：压缩机排出的高温高压蒸汽，进入冷凝器，制冷剂蒸气向高温热源放热后被冷凝成液态制冷剂（液化），液态工质经节流装置降压膨胀后进入蒸发器，气液混合制冷剂在蒸发器中吸收低温热源（空气、水或土壤等）的热量而蒸发形成蒸气（汽化），制冷剂蒸气重新被压缩机吸入完成一个循环，周而复始制备热能。这样，将外界低温空气、水或土壤中的热量“泵”给温度较高的用户，故称为“热泵”。

如用户使用冷凝器的热量则为制热工况，使用蒸发器的冷量则为制冷工况。特殊情况下，冷凝器的热量和蒸发器的冷量可同时使用。小型热泵通常采用四通换向阀来实现制冷与制热工况的转换，中大型热泵通常采用水路切换实现工况的转换。热泵根据使用的制冷剂和系统设计的不同，其温度跨度通常在50-70K左右。工业热泵通常为满足特



定需求而设计的定制系统，其工作温度范围差别很大。

图2-2为热泵系统的组成，热泵系统由热泵机组、高位能输配系统、低位热源采集系统和热分配系统四部分组成。通过热泵系统能将热源中不可直接利用的热能变为热用户可直接利用的再生热能。当热泵循环的驱动能源是可再生能源(水能、风能、太阳能等)时，热泵就是一个100%可再生、100%无排放的解决方案。

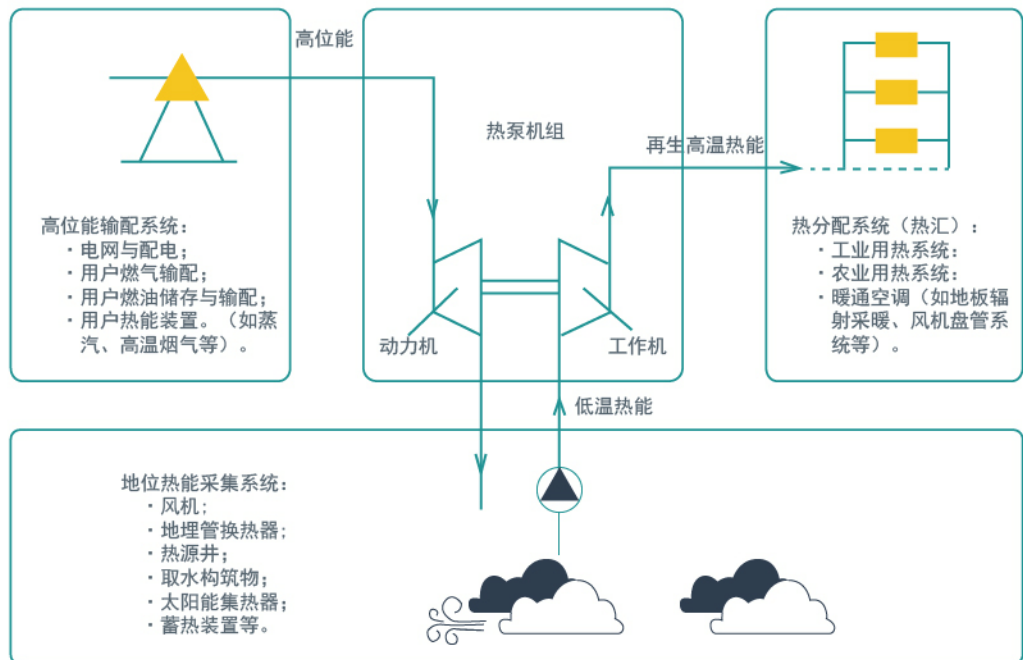


图2-2 热泵系统

典型的热泵只需要一个单位的最终能量（电）就能提供3-5个单位的热量或2-4个单位的冷量。这种能量的使用方式极大地提高了用能效率，降低了总体能源需求。为衡量热泵机组和系统的制热/制冷能力、效率和节能效果，通常采用以下参数对热泵机组和系统进行评价：

#### (1) 制热量 (Q<sub>h</sub>)

热泵按制热工况运行时，单位时间内向热用户（热汇）供给的热量，即制热工况热泵机组中冷凝器所供给的热量。制热量用来度量热泵机组的制热能力的大小。

#### (2) 制冷量 (Q<sub>c</sub>)

热泵按制冷工况运行时，单位时间内从被冷却物体中提取的热量，即制冷工况热泵机组的蒸发器所吸取的热量。制冷量用来度量热泵机组的制冷能力的大小。

#### (3) 性能系数 (COP)

定义为热泵机组的制热量（或制冷量）与其消耗功率之比，其值用W/W表示，无因次量。COP值是同运行工况有关的量，在热泵性能评价中，通常用其额定工况的COP值，其值反映了热泵额定工况性能。

#### （4）制热季节能效比（HSPF）

在制热季节中，热泵进行制热运行时向室内送入的热量总和与消耗的高位能总和之比，其值用kWh/kWh表示，简称HSPF。

#### （5）全年性能参数（APF）

由于热泵一般是全年冬、夏两季运行（制热和制冷工况），APF为考核其综合性能，其定义为：以一年为计算周期，同一台热泵在制冷季节从室内除去的热量及制热季节向室内送入的热量总和与同一期间内消耗的高位能总和之比，其值用kWh/kWh表示，简称APF。

$$APF = \frac{\text{制冷期间总负荷} + \text{制热期间总负荷}}{\text{制冷期间消耗高位能} + \text{制热期间消耗高位能}}$$

在热泵性能评价中引入APF将会使用户了解更接近实际使用状态的热泵能耗和年耗电能的多少。

#### （6）能源利用系数（E）

定义为热泵机组的制热量（制冷量）与消耗的初级能源之比。通常用E来评价热泵的节能效果。

## 2.2 热泵的种类与特点

热泵的种类很多，分类方法各不相同，常用的是按低位热源种类分类，可分为空气源热泵、土壤源热泵和水源热泵等。

### 2.2.1 空气源热泵

以室外空气为热源（或热汇）的热泵机组，称为空气源热泵机组。空气源热泵是最具有普适性的热泵形式<sup>[1]</sup>。根据冷却介质的不同，又可分为空气/空气热泵（如分体柜式热泵空调器、热泵型窗式空调器等）和空气/水热泵（如空气源热泵热水器、空气源热泵冷热水机组等）。图2-3是空气源热泵的原理示意图。

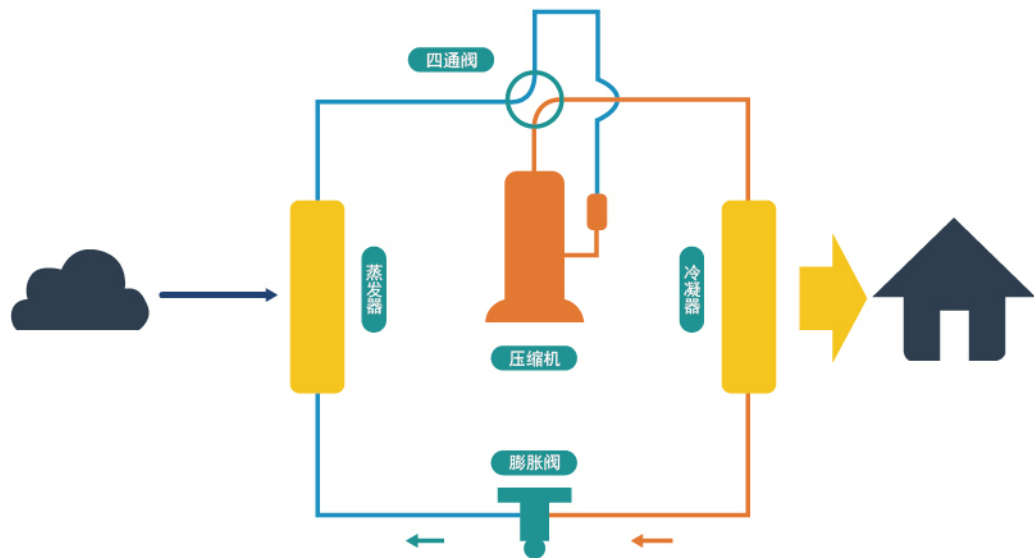


图2-3 空气源热泵

空气源热泵机组具有以下特点：

（1）低位热源最为普遍。空气在空间上处处存在、在时间上时时可得、在数量上随需而取，使得空气源热泵机组的安装和使用都比较简单和方便，应用也最为普遍。

（2）室外侧换热器冬季易结霜。空气源热泵机组冬季运行时，当室外空气侧换热器表面温度低于周围空气的露点温度且低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时，换热器表面就会结霜。机组结霜将会降低室外侧换热器的传热系数，增加空气侧的流动阻力，导致机组的COP及供热能力下降。因此，空气源热泵机组一般都具有必要的除霜系统或防霜措施。

（3）机组运行有一定噪声。一方面，空气源热泵机组一般不需要围护结构，布置在室外；一方面，空气的热容量比水小，在同样的换热量要求下，空气源热泵机组所需要空气量比水大很多，这样所选用的风机也较大，导致空气源热泵机组的噪声增大。

### 2.2.2 土壤源热泵

以地下常温土壤或增温岩土体为热源（或热汇）的热泵机组，称为土壤源热泵机组。如图2-4所示，土壤源热泵通过深埋于建筑物周围的管路系统，冬季从土壤中取热，向建筑物供暖；夏季向土壤排热，为建筑物制冷。

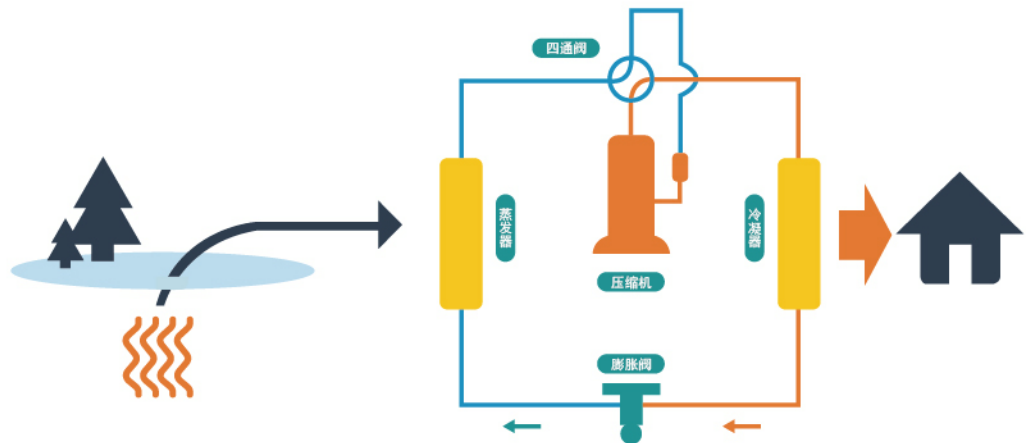


图2-4 土壤源热泵

土壤源热泵同其他型式热泵相比，具有以下特点：

（1）相对于地表水和空气，土壤的温度全年波动较小，可以分别在夏冬季提供相对较低的冷凝温度和较高的蒸发温度，使得热泵机组运行更加高效、稳定、可靠。通常土壤源热泵消耗1kWh的能量，用户可以得到4kWh以上的热量/冷量。

（2）相比空气源热泵，土壤源热泵不存在除霜问题，热泵机组一般布置在室内，有较好的隔音效果和降噪措施。

（3）土壤的传热性能欠佳，通常需要较大的传热面积，导致埋管占地面积较大或埋深较深，长远看还需要考虑埋管对未来土地开发的影响。另外在地下埋设管道成本较高，运行中若产生故障也不易检修。

（4）土壤源热泵冬季从地下取热，夏季向地下排热，当冬夏取热和排热负荷不平衡或热量补充和消纳不充分时，长期使用易造成地温升高或降低，使得热泵的换热效果下降。所以设计时应进行热平衡计算，必要时可采用辅助冷却和加热的方法控制土壤长期温度波动在允许范围内。

### 2.2.3 水源热泵

以地表或地下水为热源（或热汇）的热泵机组，称为水源热泵机组。水源热泵的水源主要来自地下水、地表水、污水和废水等。图2-5是其原理示意图。

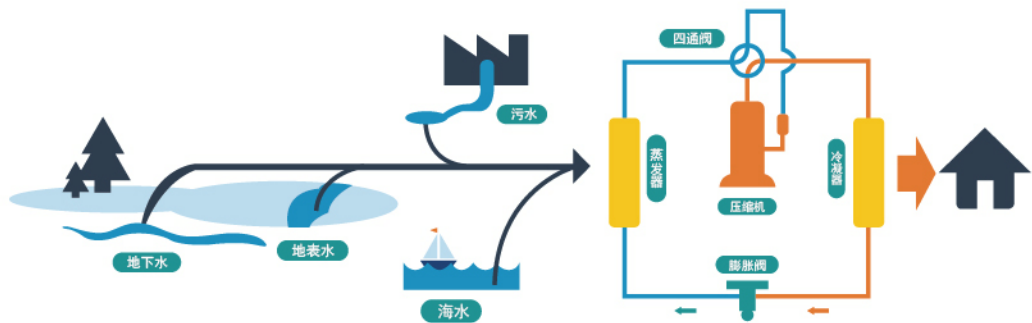


图2-5 水源热泵

水源热泵同其他型式热泵相比，具有以下特点：

（1）水体的温度相对稳定，其波动范围小于空气，可利用的水体温度能在夏冬季提供相对较低的冷凝温度和较高的蒸发温度。因此水源热泵机组运行稳定可靠，也不存在空气源热泵的冬季除霜等问题。

（2）取水构筑物复杂，较适用于中大规模工程。大型水源热泵机组供热能力通常在1000~3000kW左右<sup>[2]</sup>，供大型热泵站用的水源热泵机组供热能力可达到15MW、20MW、25MW、30MW<sup>[3]</sup>。

（3）水源热泵的应用，应先了解当地水源情况，对水源状况进行充分调查，确定用水方案。

（4）若利用地下水，必须考虑回灌问题，且应结合当地的地质情况考虑回灌方式。回灌困难是目前大多数工程遇到的问题，地下水地源热泵的应用应慎重。

## 2.3 热泵技术的应用

热泵作为高效、节能、绿色、环保的生态系统，在建筑供暖供冷、除湿、热水供应和工业生产过程、农业环境调控中都有着广阔的应用，如图2-6所示。

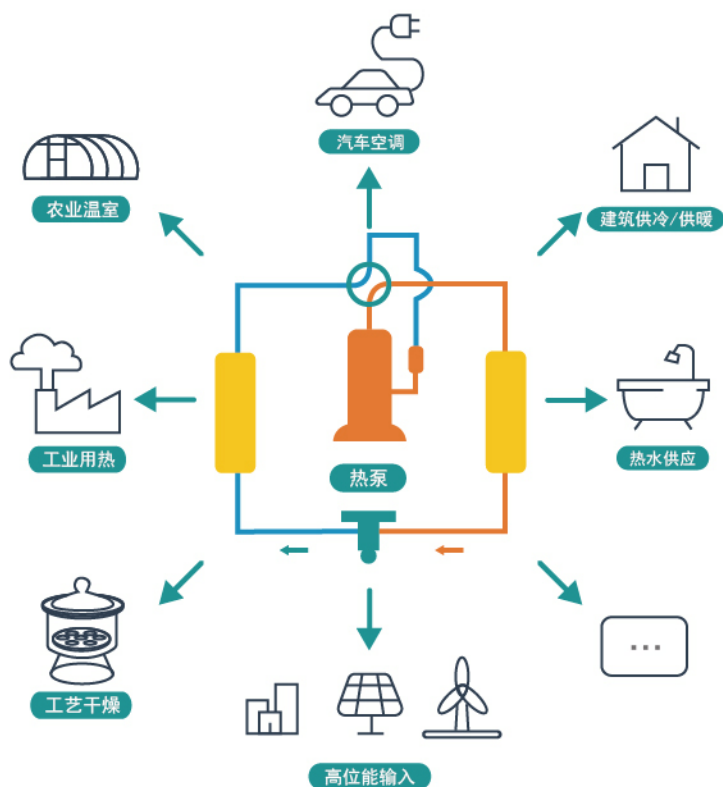


图2-6 热泵技术在建筑业、工业、农业中的应用

目前国内外生产的热泵主要用于住宅和商业建筑的空调，为适应各地区的气候和环境，不同地区的热泵空调系统形式具有不同的特点。例如在寒冷地区，使用喷气技术的空气源热泵以改善其运行特性；在水源充足或者地热源充足的地区，可以采用水源热泵或土壤源热泵供暖。热泵热水机可以为用户提供生活热水，一年四季工作。近年来，二氧化碳热泵热水机得到重视，一方面二氧化碳是环保制冷剂，且二氧化碳跨临界热泵循环放热为变温过程，适合把温度较低的自来水加热到较高温度（65℃甚至90℃）。

对于高温高湿建筑（如泳池、浴室、室内温泉等），在控制室内温度的同时也需对空气进行除湿，以确保室内的舒适。热泵空调除湿机能把水蒸发的热损失加以回收利用，重新加热水或者室内空气，同时利用冷凝器热量和蒸发器冷量，夏季还可通过户外冷凝器将热量排出，从而实现制冷。

我国是农业大国，农产品收获后常需再加工，干燥是一个关键的工艺过程。与传统的燃煤、燃油蒸汽烘干相比，热泵干燥热效率高、除湿快，所得到的干燥制品品质高，且能源消耗量也很大程度降低。稻谷收割时经常遭遇阴雨天，而稻谷热泵干燥机的干燥效率是普通燃油干燥机的1.1倍，但能耗费用却降低60%，用热泵干燥可彻底解决谷物

霉变问题。热泵烘干在农业领域的广泛应用将改善农村经济结构，并对农民增收、食品安全等方面带来积极影响。

高温热泵系统（冷凝温度高于 $100^{\circ}\text{C}$ ）可以满足大多数工业生产工艺（如石油化工、纸浆加工、陶瓷工业、印刷业和纺织工业等）中对高温热水、蒸汽的需求。此外，近年来我国的热泵海水淡化技术也取得了技术突破，采用机械压缩式热泵海水淡化，可直接将海水加热到 $80^{\circ}\text{C}$ 以上，与现有膜法海水淡化技术相比，可节约能源约40%，成本降低约50%，而且不会造成环境污染。

### 参考文献

- [1] 江亿. 能源革命与空气源热泵. 2019.
- [2] 马最良, 姚杨. 民用建筑空调设计（第二版）. 北京, 化学工业出版社, 2011.
- [3] 马最良, 吕悦. 地源热泵系统设计与应用（第二版）. 北京, 机械工业出版社, 2014.

### 3 热泵 技术 应用 现状

#### 3.1 总述

热能是最大的能源终端用户，占全球最终能源消耗的一半，大大超过电力（20%）和运输（30%）。然而，2019年可再生能源仅满足11%的全球热需求（如图3-1），化石燃料仍占主导地位，并排放了全球40%的二氧化碳。2020年，中国消耗了全球热量的四分之一，其中三分之二用于工业过程，美国、欧盟、印度和俄罗斯共同消耗了全球热量的35%。

过去十年，热泵的迅速普及使环境热成为日益重要的可再生热源，如全球地热能利用的近60%由地源热泵承担<sup>[1]</sup>。我国是热泵生产和安装大国，据中国节能协会、欧洲热泵协会、日本热泵与储热中心、产业在线的数据统计，中国热泵产品年产量大致占到全球的60%以上（图3-2）。

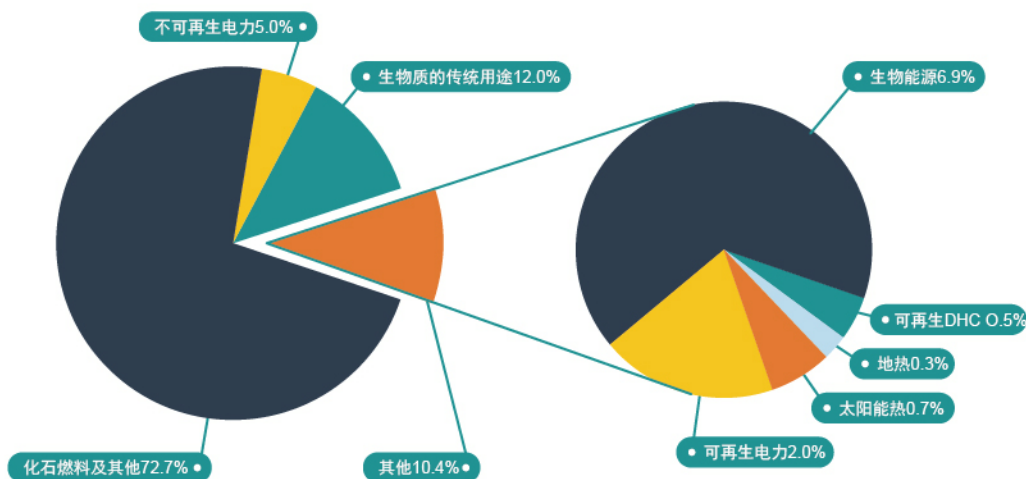


图3-1 可再生能源在全球热量消耗中的份额



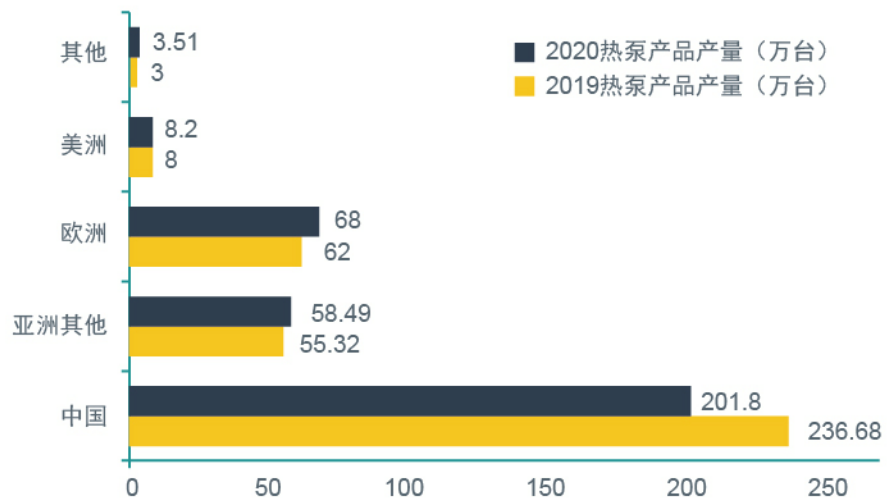


图3-2 热泵产品全球产量

仅考虑建筑业和工业生产的终端用热占比，我国近一半的终端用能以热能的形式消耗<sup>[2]</sup>。其中，建筑部门的热能消耗主要是供暖制冷、供热水，工业部门则用于工艺生产。从2019年国内热泵应用市场看，热泵供暖占热泵应用市场的47.5%，热泵热水占比为45.8%，热泵烘干占比为6.7%<sup>[3]</sup>。因此，热泵主要应用于建筑业，降低建筑部门的能耗和碳排放，工业、农业部门应用较少。

另外，虽然热泵供暖在我国热泵应用市场占据主导地位，但在全国范围内的应用量仍不足。据《供热行业2020年度发展状况报告》<sup>[4]</sup>，截止2018年底，燃煤热电联产集中供热面积占总供热面积的45%，燃煤锅炉集中供热占比27%；其次为燃气供暖，以燃气为主要热源的供暖总面积达到20%；电供暖占比4%，可再生能源供暖占比3%，工业余热供暖占比1%。从这组数据可以看出，尽管燃煤锅炉供暖的比例有较大幅度的下滑，但煤炭仍占据我国供热能源的主导地位，可再生能源供暖及电供暖占比仍然较低，作为热泵应用市场主导行业的供暖占比不超过7%，同年，德国热泵供暖系统在供暖市场占比已达13%。

显然，中国对热能有着巨大需求，从建筑运行中的供暖、供热水，到工业生产中的热工艺过程和农业环境调控均需要大量的热能，但目前这些热能大部分仍由传统化石燃料及设备提供，热泵的使用量还很少。2019年，全球近2000万户家庭购买了热泵，北美、欧洲和亚洲都表现出明显的增长。热泵已成为许多国家新建住宅中最常用的供热技术，但目前热泵也仅能满足全球建筑供暖需求的5%。根据国际能源署（IEA, International Energy Agency）预测，为实现可持续发展战略，到2030年，热泵的市场

份额将达到22.1%，这需要进一步的政策支持和创新激励，以降低采购和安装成本，消除改造的市场障碍，提高热泵性能和发展环境友好型制冷剂<sup>[5]</sup>。

### 3.2 建筑行业

建筑行业中，热泵可用于供暖及生活热水供应，从而促进建筑节能减碳。依据国际能源署报告，建筑业占全球最终能源消耗的三分之一以上，其直接和间接二氧化碳排放量占总量的近40%<sup>[6]</sup>。并且，由于发展中国家生活水平提高，能源供应的改善、能源消费设备的拥有率和使用的增加及全球建筑面积的快速增长，建筑业的能源需求还将继续上升。

如图3-2所示，2019年中国建筑建造和运行用能耗占全社会总能耗的33%<sup>[7]</sup>，与全球比例接近。另一方面，从二氧化碳排放角度看，中国建筑建造和运行相关二氧化碳排放占中国全社会总二氧化碳排放量的比例约为38%，其中建筑建造占比为16%，建筑运行占比为22%。可预见的是，随着我国逐渐进入城镇化新阶段，人们生活水平进一步提高，建筑用能在全社会用能中的比例还将继续增长，并且建筑的运行能耗和排放将占比更大。2019年中国建筑运行中化石能源消耗相关的碳排放约22亿吨，其中生活热水供应、分户燃气壁挂炉及燃煤炉具供暖、北方城镇集中供热分别排放0.8亿吨、3.0亿吨以及4.5亿吨二氧化碳，共占据建筑运行碳排放量的38%左右<sup>[7]</sup>。这些用热项中，热泵使用的比例都较低，扩大热泵的使用量，将对减少碳排放起到积极作用。

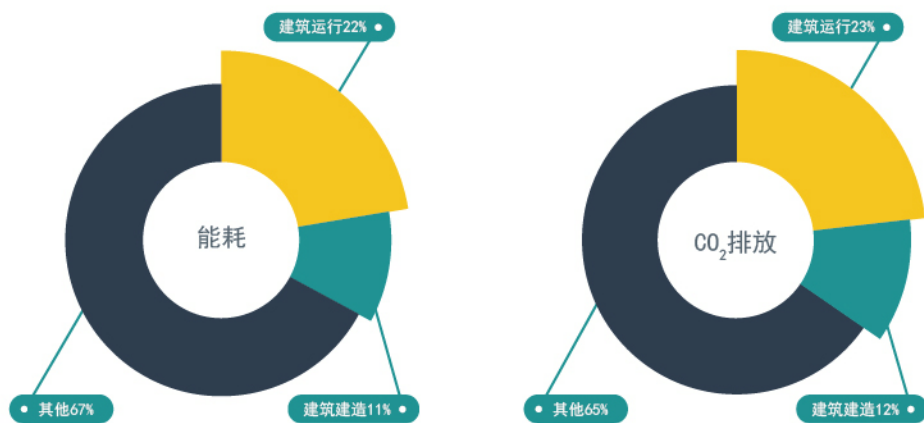


图3-3 中国建筑领域用能及CO<sub>2</sub>排放（2019年）

首先是使用热泵热水器为建筑提供生活热水。随着城镇化的发展，生活热水的供应已经成为一种普遍需求，如图3-4所示，北京与上海生活热水的生产主要有3种方式：燃气热水器、电加热热水器和太阳能热水器，共占据了超过90%的热水设备市场份额，而电热泵热水器（主要为空气能热泵热水器）所占的份额很小，大约在2%左右。目前，全国制备生活热水大约造成全年二氧化碳排放0.8亿吨左右<sup>[7]</sup>，使用热泵技术能够有效降低生活热水制备的碳排放。燃气热水器虽然使用清洁燃料，但仍然有碳排放，而且未来建筑终端用能结构的变化，其被取代指日可待<sup>[8]</sup>；而电热泵热水器由于利用了环境热量，性能系数能达到3左右，即输入1份电能产生3份热能，在能量利用上的表现远优于电加热型热水器，从而有效地减少碳排放量。此外，如果将空气能热泵热水器与太阳能热水器相结合，构成太阳能辅助空气能热泵热水器等复合系统，将会有更好的节能表现。因此，在生活热水供应方面，热泵热水器具有很大的优势以及广阔的市场。

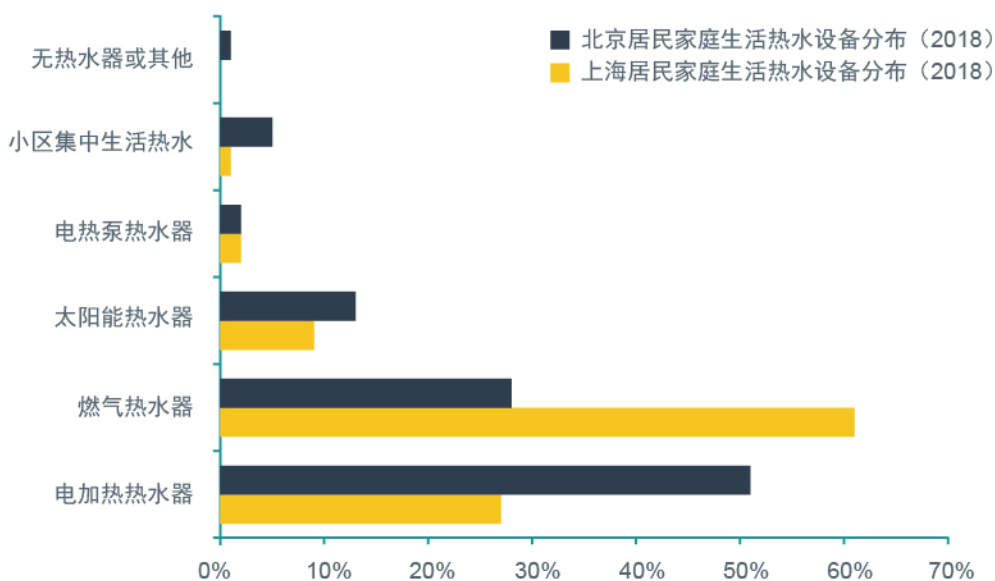


图3-4 北京和上海居民家庭生活热水设备分布（2018年）

另外，北方城镇住宅建筑约5%为燃气壁挂炉供暖，70%以上的北方农村以及部分城乡结合部的居住建筑冬季也仍采用燃煤炉具取暖，这些供暖设施导致每年超过3亿吨的二氧化碳排放，应该是全面取消建筑内二氧化碳直接排放工作的重点<sup>[7]</sup>。分散的空气源热泵供暖将是减少该部分碳排放的最优方案之一，在可接受的成本前提下，兼顾环境保护与居住舒适的要求，除极少部分严寒地区外，适合在大部分北方城镇推行。

目前，我国有约150亿m<sup>2</sup>的北方城镇建筑冬季需要供暖，随着城镇化进一步发展和

居民对建筑环境的要求不断提高，未来北方城镇冬季供暖面积将达到200亿平米<sup>[7]</sup>。据国家统计局统计数据显示（图3-4），2019年我国供暖消耗了39.3亿GJ的热量<sup>[9]</sup>，目前这些热量中约有40%是由各种规模的燃煤燃气锅炉提供，50%则由热电联产电厂提供，仅有10%是通过不同的电动热泵从空气、污水、地下水及地下土壤等各种低品位热源提取热量来满足供热需求<sup>[7]</sup>。针对集中供热技术，清华大学付林教授提出了“中国清洁供热2025”模式<sup>[10]</sup>，该模式以电厂及工业余热回收为核心，通过能源结构创新、网络结构创新、能源站取代热力站、利用储能热泵实现热电气的协同这四个创新，使用吸收式热泵深度回收烟气余热、汽轮机乏汽余热以及工业余热，实现低成本、低碳的清洁供热。据其统计，当前的电厂余热足以承担120亿平米的供热面积，工业余热能承担50亿平方米的供热面积。

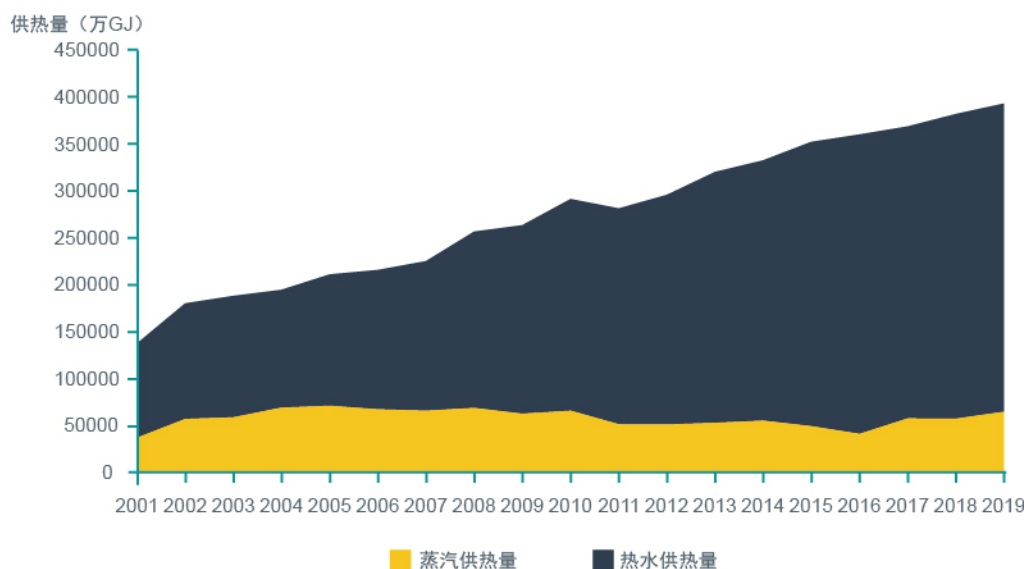


图3-5 城市集中供热量

因此，热泵技术不论是在分散供暖模式还是集中供热模式方面，均有着巨大的发展空间，利用热泵技术改造既有供热方式、发展新的供热路径，是建筑行业热量供给实现低碳的必由之路。

### 3.3 工业生产

我国是能源消费大国，如图3-5所示<sup>[11]</sup>，工业、交通以及住宅是我国最主要的耗能部门，其中工业能耗达1423.4Mtce（995.7Mtoe），约占全国最终能源消费的48.4%，而工业能耗的50%~70%都以热能形式消耗，并且45%为中低温热量，即温度小于250℃，

大多在80°C~170°C<sup>[2]</sup>。随着中高温热泵技术的发展，已能够利用热泵技术回收工业余热及其他低品位能源代替部分现有的燃油、燃煤及燃气等锅炉设备，满足石油化工、发电、工业烘干、纺织、冶金、食品及屠宰等行业生产工艺中对高温热水或蒸汽的需求。如生产酸奶制品过程中，生产线要采用大量80°C热水间歇式清洗，应用高温热泵回收这部分冷却水中的热量，省掉了冷却系统，并制取80~85°C的热水供清洗生产线；采用机械压缩式热泵海水淡化，可直接将海水加热到80°C以上，与现有膜法海水淡化技术相比，可节能40%，成本降低约50%；电厂废热回收方面，我国一般大型火电厂实际热效率仅为40%，核电不及35%，60%以上热量由冷却水带走，排到环境，将这部分热能用吸收式热泵加以回收，用于工业用热水或者供暖热水，不仅能提高热电厂热能的综合利用率，而且为电厂带来良好的经济和社会效益；此外，在化工、食品、药品生产过程当中常用到蒸发浓缩技术，采用高温热泵技术，可以把蒸发浓缩过程中的冷量和热量充分利用，综合提高能源利用率<sup>[12]</sup>。

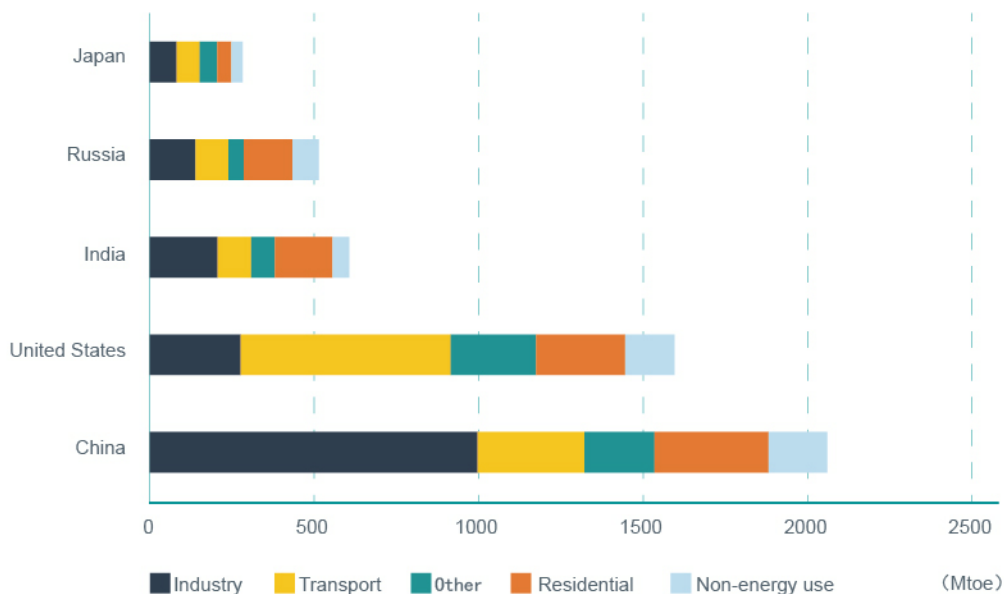


图3-6 按部门划分的最终能源消费总量前五名的国家（2018年）

据国际能源署统计数据，图3-6给出了7个国家或地区工业用热量同比变化<sup>[13]</sup>，受疫情影响，除中国外其他国家或地区2020年的工业热能消耗较之于2019年有不同幅度的降低；而中国经济复苏表现强劲，工业用不可再生热能以及可再生热能消耗量分别提高了 $412 \times 10^6 \text{GJ}$ 、 $50 \times 10^6 \text{GJ}$ ，同比增长1%及13%。根据该数据估计，2020年中国工业用可再生热量仅占工业用总热能消耗的0.83%。显然，碳中和目标的达成过程中的可再生

热量的比例远远不足，必须对高耗能行业的工艺流程进行根本性的改变。工业转型最前沿的脱碳选择是：通过提高工艺效率和新工艺来减少最终能源消耗，余热回收以及使用可再生能源代替化石能源。这里，热泵技术能够作为工业部门碳中和的解决方案之一，为我国工业部门减少二氧化碳排放提供一条可行的路径。

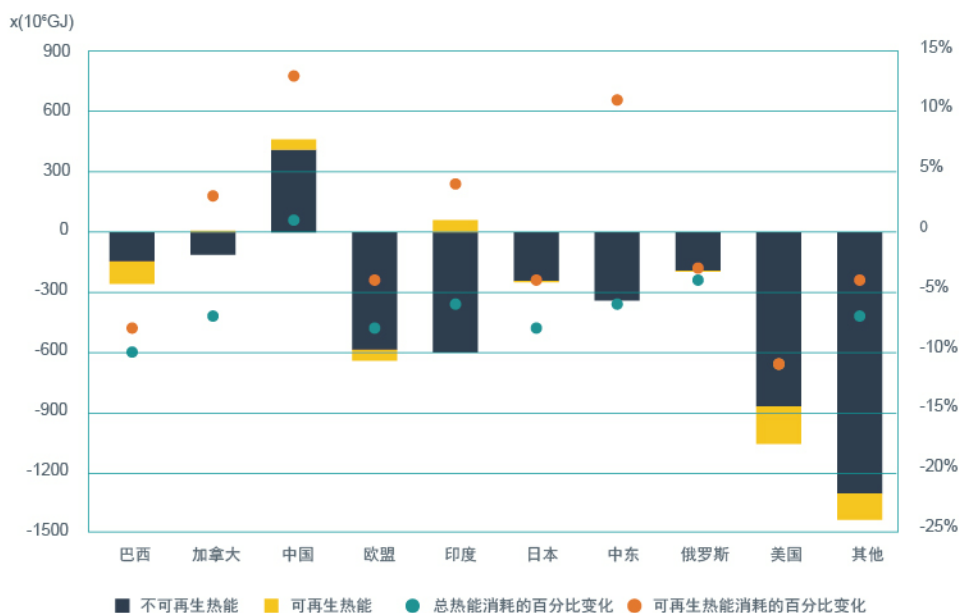


图3-7 2020年部分地区工业用热量同比变化

目前，我国工业热泵使用量还较少，欧盟对于工业热泵市场潜力的估计可提供一定程度的参考。食品、造纸、化工以及石油精炼被欧盟认为是最适合集成热泵的工业部门。Marina, A<sup>[14]</sup>估算了欧盟工业热泵的市场潜力，结果如表3-1所示。在该情境下，这四个部门一年的工艺用热量达到了745×10<sup>6</sup>GJ/a，对于150℃热泵市场而言，这四个部门累积加热能力可以达到20GW，使用热泵回收温度适宜的余热可覆盖73%的生产工艺用热所需，并最终可减少37.3Mt/a的二氧化碳排放以及371×10<sup>6</sup>GJ/a的化石燃料的燃烧。虽然我国工业结构以及工艺水平与欧盟存在着一定的差异，但从这场景来看，工业热泵投入使用是建设社会主义现代化强国中由高速度发展转向高质量发展、实现碳达峰与碳中和的必然要求。

表3-1 欧盟工业热泵市场潜力概要

工业部门	工艺用热量 (PJ/a)	累积加热能力 (GW)	热泵供热量覆盖 工艺用热量比例 (%)	减少CO <sub>2</sub> 排放量 (Mt/a)	减少化石燃料 (PJ/a)
造纸	228	6.6	89%	12.8	107
化工	295	8.1	85%	18.4	203
食品	130	5	64%	5.2	55
精炼	92	0.3	10%	0.8	6
合计	745	20	73%	37.3	371

综上所述，工业部门是我国能耗大户，并且中低温用热是其主要的能源消耗形式，随着产业结构升级，低端高耗能产业的限制和淘汰，中国的工业能耗中，中低温用热所占比重还将进一步提高，这对工业热泵的使用非常有利，工业热泵极具发展潜力。

### 3.4 农业环境调控

根据生态环境部印发的《京津冀及周边地区、汾渭平原2020-2021年秋季大气污染防治综合治理攻坚行动方案》环大气〔2020〕61号要求：河北、河南、山东等地要加强农业大棚、烤烟叶、中药材烘干、畜禽养殖等领域清洁能源替代散煤工作<sup>[15]</sup>。在此之前，热泵虽然在农业中有应用，但总体而言应用规模很小。随着政策推动，热泵在农业生产环境调控中将会有更多的应用，主要的应用情景包括畜禽养殖供暖、农业大棚供暖以及农作物干燥等。

首先，传统的畜牧养殖供暖方式大多使用燃煤锅炉，养猪场采用热泵供暖的比例不到10%，环境污染严重，且温度不好控制，影响养殖场的整体效益。结合政策要求，空气源热泵等技术因能实现温度的灵活控制，保证室内的温度需求，提高牲畜的成活率和成长速度，逐渐受到市场青睐。目前冀鲁豫3省生猪存栏量合计为16679.8万头，家禽出栏量合计约为45亿只，预计三省的养猪场供暖的市场需求量在12.5亿元以上，禽舍供暖的热泵总市场需求量约为11.8亿元，总计将产生超过24亿的市场<sup>[15]</sup>。

其次，冬季需要供暖的温室大棚一般是连栋温室大棚。使用燃煤热水锅炉时，大棚供暖年耗煤量约为24kg/m<sup>2</sup>，燃煤成本占整个生产成本的30%~50%，且污染大，设计不合理的温室或地处严寒地区的温室，加热耗煤可能会远超出上述指标<sup>[16]</sup>。此外，作物各自都有最低温度、最适温度和最高温度“三基点温度”，在最适温度条件下，当其它环境条件得到满足时，作物干物质积累速度最快，作物生长发育迅速而良好。温度不适宜会影响农作物生长速度与品质，甚至造成农作物大面积死亡。空气源热泵等更易于温度

控制，比传统供暖方式更加适合大棚供暖。冀鲁豫三地连栋温室大棚的面积分别为4897.39公顷、442.57公顷和285.26公顷，合计约5625公顷，折算成平方米约为5625万平方米。按照每平米初投资130元、热泵供暖的农业大棚占比50%估算，市场总量可达到36亿元<sup>[15]</sup>。

此外，热泵也被应用于农作物或经济作物的烘干。热泵烤房具有如下特点：绿色烘烤，新建保温板块结构烤房和现行砖混结构烤房改造，烤出1kg干烟叶耗电量一般在1.8-2.2度，COP达到了3.5~4；温湿度控制精准，一般能达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，保证了烟叶的品质；自控简洁，节省人工，传统烤房一个人最多可同时管理5个，热泵烤烟房一个人至少可同时管理20个。在2005年以前，全国大约有自然通风燃煤烤房380~400万座；2005~2019年建设燃煤密集烤房110多万座；2010年以来，改造生物质供热密集烤房5.9万多座；而热泵烤烟房截至2019年仅有1700座左右<sup>[17]</sup>。河南省污染防治攻坚战领导小组办公室发布了《全省烟叶烤房电代煤工作三年行动计划的通知》，提出河南省烟草公司从2020年开始，用三年时间，全省27903座烤烟连片燃煤烤房完成电代煤改造。目前，选择的热源形式都是空气源热泵，单个新建烤房的招标金额约为8.2万元，单个烤房改造的招标金额为4.6万元。按以上标准计算，河南电代煤工作三年行动市场总量超过了13亿元<sup>[15]</sup>。

综上所述，热泵在农业当中能得到广泛利用，具有巨大的市场，特别是空气源热泵，具有初投资较小，使用灵活，节能环保的特点，特别适用于畜禽养殖供暖、农业大棚供暖、烟叶烘干以及中药材烘干等生产活动。虽然目前应用的比例较小，但是随着农业领域碳达峰碳中和的推进，相关政策将逐渐引导热泵在农业领域的应用。

### 3.5 其他应用

除了上文所列举的方面，热泵的应用无处不在，在很多高效能源方面都有热泵的应用，如：

（1）热泵式干衣机已成为干衣机的“新宠”。南方潮湿多雨气候使得衣服难以晾干，而北方的很多地区又饱受风沙、雾霾的困扰，因此干衣机受到了追捧。但是，简单的热风式干衣机烘干温度很高（ $100\sim 120^{\circ}\text{C}$ ），容易对衣物造成较大的损伤，并且能耗极高；普通冷凝式干衣机，烘干温度一般在 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ ，减少了高温对衣物的损伤，但烘干时间长，也比较费电。而热泵式干衣机使用热泵回收了热风的热量，从而在保持较低烘干温度同时，用电量仅仅是一般冷凝式干衣机的50%。

（2）热泵技术也开始应用于家用和商用洗碗机中。目前，在售的洗碗机普遍存在



着洗涤漂洗加热电耗高及干燥时间长两个问题，非常适合热泵技术应用。首先，热泵技术具有高节电的特点，1份电能约能生产3份热能，能够有效解决洗碗机整机电高的问题；另外，使用热泵技术干燥时间短，方便用户在短时间内多次使用。

（3）热泵能大大提高电动汽车的续航能力，热泵空调是未来电动汽车空调的重要方案。特斯拉执行官埃隆·马斯克毫不吝啬的夸赞了电动汽车的热泵技术：“Model Y热泵是近阶段以来见过的最好的技术之一”。电动汽车上普遍使用的PTC（热敏电阻）制热可使电动汽车的冬季续航里程减少一半左右；而使用热泵制热将有效降低电耗，显著提高冬季续航里程。新浪汽车发起的冬季真实续航大PK比赛挑选了市场上比较具有代表性的四款电动车型参加，模拟正常冬季用车环境，搭载热泵技术的某品牌电动车的冬季每100km实测耗电量较之其他三款电动汽车分别降低了11%、13.9%和14.9%，节电效果显著，因此在相同电池容量下，电动汽车的续航能力大为提高。

## 参考文献

- [1] IEA. Renewables 2020. 2020.
- [2] 王如竹. 热泵技术创新及其在2060碳中和国家战略中的关键作用. 2021.
- [3] 中国节能协会热泵专业委员会. 2019年中国热泵供暖产业发展年鉴. 2019.
- [4] 中国城镇供热协会技术委员会. 供热行业2020年度发展状况报告. 2020.
- [5] IEA. Heat Pumps. 2020.
- [6] IEA. 2019 Global status report for buildings and construction. 2019.
- [7] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2021. 北京, 中国建筑工业出版社. 2021.
- [8] 江亿, 胡姗. 中国建筑部门实现碳中和的路径. 暖通空调. 2021, 51 (5): 1-13.
- [9] 国家统计局. 城乡建设统计年鉴. 2019.
- [10] 付林. 中国清洁供热2025及工程实践. 2020.
- [11] IEA. Top five countries by total final consumption by sector, 2018. 2019.
- [12] 吴治将, 张学伟. 中高温热泵技术在工业中的应用现状. 制冷, 2017, 36(01):83-89.
- [13] IEA. Renewables 2020. Paris International Energy Agency; 2020.
- [14] Marina A, Spoelstra S, Zondag HA, Wemmers AK. An estimation of the European industrial heat pump market potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;139:110545.

- [15] 《京津冀及周边地区、汾渭平原2020-2021年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》环大气〔2020〕61号
- [16] 热泵市场. 82亿！冀鲁豫3省大棚+养殖供暖+烟叶+药材烘干市场报告. 2020.
- [17] 热泵在线. 角逐蓝海 | 温室大棚“煤改电”，空气源热泵“技压群雄”. 2020.
- [18] 宫长荣. 烟叶密集烤房技术标准及烘干工艺优化——热泵在烤烟中应用的几个问题. 2020.

## 4 热泵技术在碳中和中的应用前景

热泵技术的优势在于能整合可再生或废弃的热源，从而减少化石燃料的需求，同时有效和可控地利用电力或余热供热制冷。热泵在建筑行业、工业生产、农业环境调控中都有巨大应用潜力，热泵技术的应用更在节能减排中扮演重要角色。

### 4.1 建筑行业

2014年至今，我国民用建筑每年竣工面积基本稳定在40亿m<sup>2</sup>以上，每年大量建筑的竣工使得我国建筑面积存量不断高速增长（如图4-1<sup>[1]</sup>），2019年我国建筑面积总量约644亿m<sup>2</sup>。如此巨大的建筑规模导致我国目前建筑运行每年二氧化碳的排放在20亿吨以上。据中国建筑节能协会预测，中国建筑行业的碳排放将继续增加，达到峰值时间预计为2039年前后<sup>[2]</sup>，比全国整体实现碳达峰的时间预计晚9年。从碳排放的来源看，2018年建筑运行阶段碳排放占全国碳排放的21.9%，主要来自居民和工业的供热/制冷。

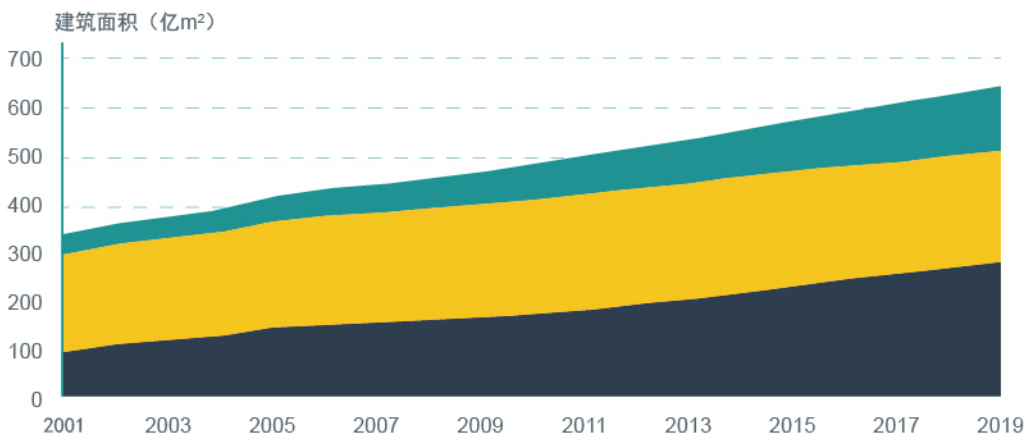


图4-1 中国总建筑面积增长趋势

建筑供热可采用的热源多种多样，包括燃气锅炉、燃煤锅炉、燃油锅炉、电供暖、热泵等。根据目前的排放因子，计算各类建筑热源的二氧化碳排放情况，如图4-2所示，热泵供暖系统在各类供暖能源系统中每供1GJ的热量所排放的二氧化碳最少，这也说明热泵技术是实现碳中和的最有效方式。因此，热泵技术拥有巨大的节能减排优势，建筑热泵技术应用将为建筑行业带来巨大减排量，建筑热泵应用可从“既有建筑改造”和“新建建筑热泵应用”两方面入手。

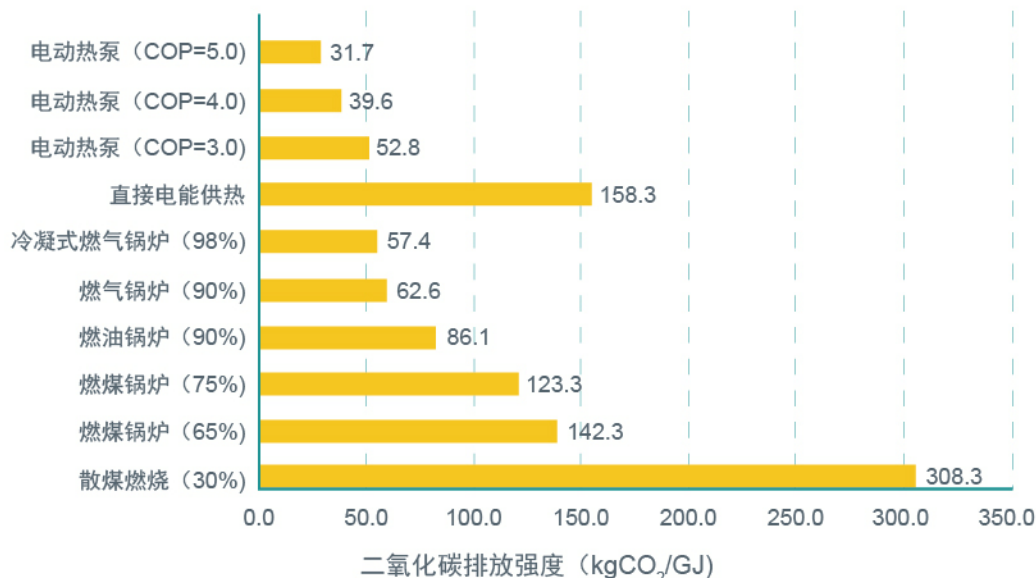


图4-2 不同供热系统的碳排放强度

#### (1) 既有建筑改造

规模庞大的存量建筑的低碳改造难度较大，热泵可以在建筑物的深度改造中代替锅炉和常规冷水机组为建筑进行供暖和制冷。与燃煤锅炉相比，其二氧化碳排放量可降低30~50%，尤其是将热泵与其他可再生能源（驱动能源是风能、太阳能、水能等）相结合，将进一步减少既有建筑的能源需求，充分发挥可再生能源替代一次能源的潜力。当热泵用于医院、发廊、学校、集体宿舍等既需要空调又需要热水供应的建筑时，经济效益非常显著。由于建筑部门的用热温度大多在100℃以下，以现有热泵技术水平，可以直接采用生活中的常见低位热源对这个温区进行供热。此外，热泵替代锅炉，可直接对接供暖和热水供应系统，末端系统不需要额外改造。

此外，热泵系统可不需要任何屋顶冷却设备，将顶部空间留给光伏发电、太阳能制热，进一步促进建筑的产能。为使热泵应用效益最大化，用热系统应进行必要改造：降低需用供热温度、减少中间传热环节（如输出热风）、实现小型、分散化用热等。据国际能源署测算，2019年热泵在全球家庭用能中的占比仅为5%，2030年这一比例将提高到22%，这将降低供暖能耗，为建筑部门减少50%的碳排放<sup>[3]</sup>。

实现建筑部门的零碳转型，同样需要推进居民家庭生活热水的全面电气化。如图4-3所示，随着人们生活水平的提高，生活热水的普及率迅速增长，2013-2019年中国城镇居民家庭每百户淋浴热水器拥有台数从80.3台迅速增长至98.2台，基本实现了城镇家庭热水器普及<sup>[1]</sup>。近年来，热泵热水机（也称“空气能热水器”）在我国家用热水器市

场上逐渐兴起。据相关产业数据<sup>[4]</sup>，我国热泵热水器的总销量从2016年的72.4亿元上升到2019年的77.3亿元，且市场规模仍保持上涨趋势。

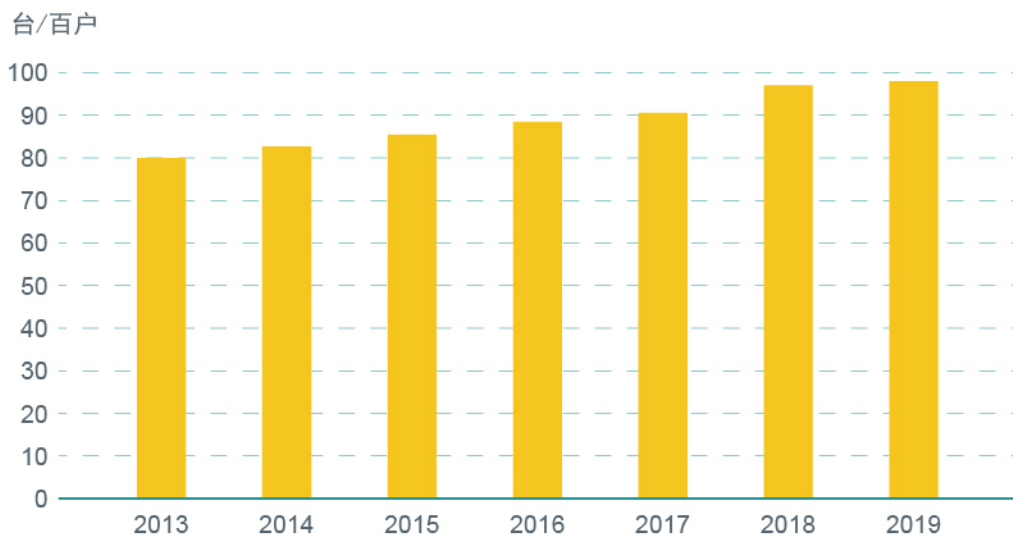


图4-3 中国城镇居民家庭平均沐浴热水器拥有量

现有价格体系下，燃气热水器、蓄热式电热水器及热泵热水器的运行费用如表4-1所示，热泵热水器年运行费用最低。虽然目前热泵热水器的设备价格还高于普通燃气热水器与蓄热式电热水器，但随着市场规模扩大，其价格也会逐渐下降。从我国建筑领域零碳转型以及节能减排角度看，在非即热式场景大力推广热泵热水器、实现生活热水电气化指日可待。

表4-1 各类热水器运行费用

	燃气热水器	蓄热式电热水器	热泵热水器
年用水量L	18250 (50 L/d×365d)		
热效率	90%	95%	300%
用能量	82.8m <sup>3</sup>	784kWh	248kWh
能源费用（元）	248.4	376.5	119.2

热泵用于建筑供暖制冷、除湿和热水生产虽然具有较低的能源需求和较小的占地面积等优势，但未来需要努力提升系统的集成水平，构建以热泵为核心，融合供暖、空调、通风和热水供应系统的集成解决方案。

## （2）新建建筑应用

实现碳中和需要继续推动超低能耗建筑发展，消除常规的化石能源供热方式，以被动式技术为基础，结合分布式可再生能源和先进热泵技术，有效降低建筑用能。热泵的特性使其成为低能耗建筑的理想技术，包括近零能耗、被动式建筑设计。中国2019年正式实施《近零能耗建筑技术标准》GB/T51350-2019，高性能围护结构、建筑能源系统、暖通空调系统及可再生能源建筑一体化设计是近零能耗建筑示范项目的核心。将可再生能源与热泵技术结合，从而大幅度降低建筑能耗，将热泵与蓄热设备结合还可通过蓄热克服能源需求与供应之间的时间差，为电网削峰填谷。

我国幅员辽阔，南北气候差异大，建筑的类型和特点不尽相同，在建筑低碳设计中也不能简单堆砌可再生能源技术与热泵系统，而应根据不同气候环境特点、建筑负荷需求，因地制宜的采用包括热泵系统在内的低碳技术。此外，还应当注意后期的监控、调试及运行策略控制，才能最大化地实现节能，降低建筑部门的二氧化碳排放。

## 4.2 工业生产

我国50%~70%的工业能耗都以热能形式消耗，并且45%为中低温热量（小于250℃），大多在80℃~170℃之间。用热泵提供这部分热量将显著减少化石能源消耗和二氧化碳排放。由于许多工业过程是在高温下进行，因此大容量的高温工业热泵是解决工业能源脱碳的有效方案之一。热泵在工业生产中的应用场景也非常丰富，下面列举了热泵在工业中具有较大发展潜力的典型应用：

### （1）高温工业热泵

热泵技术在工业应用中的可行性取决于生产需要的温度水平。常温热泵的冷凝温度小于60℃，中温热泵的冷凝温度在60℃~90℃，目前中低温热泵的技术相对较成熟，市场上也有大量的商业化产品。高温热泵能够提供高达150℃的热媒介质，我国现已有实验性解决方案和多款原型机，如热泵蒸汽发生系统<sup>[9]</sup>，正在进行产业化，预计很快投入商业使用。可以预见，在碳达峰、碳中和的大背景下中，高温热泵是未来热泵技术研究的重要方向之一，技术突破将导致的性能和可靠性的大幅提升。中高温热泵的应用前景十分广阔，市场前景不可限量。

日本神户制钢公司2011年在世界上首先制造出了直接采用压缩机，不需辅助加热设备就可以产生蒸汽的超高温热泵机组。目前按产生蒸汽的温度分为两种：SGH120和SGH165，分别可产生100℃~120℃和135℃~175℃的蒸汽，可对工厂内的温排水实施热回收，适用于食品、药品、轻化工等工业的原料浓缩及干燥等多种工序。其原理如图4-4所示。

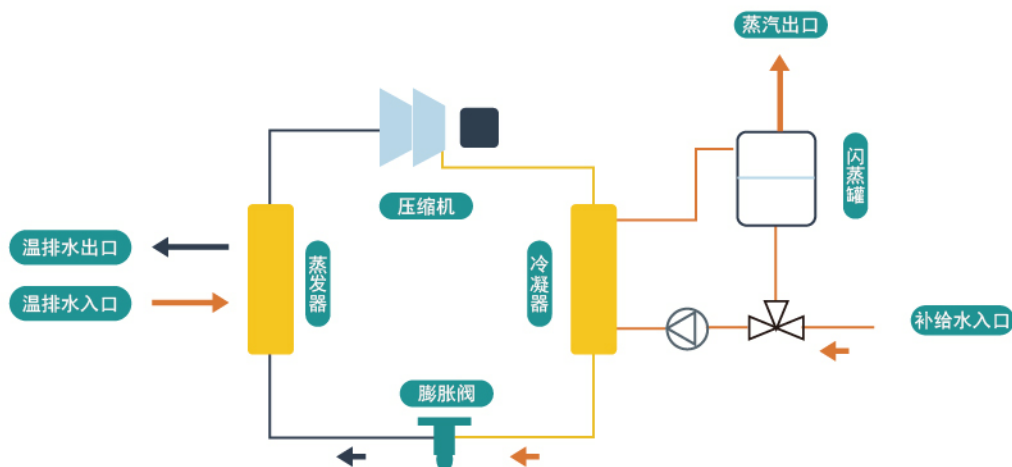


图4-4 SGH120 蒸汽热泵系统流程图

## （2）余热回收

目前，我国工业能源利用率低于世界平均水平，工业产品的平均单位能耗比发达国家高出约30%，工业消耗的能源有50%以上转变为废气和废水形式的余热，但仅有30%的废热得到回收再利用。大量的工业余热为热泵的使用提供了良好的条件，利用中高温热泵技术，结合具体工艺生产进行系统性的设计，不但可减少对环境的热污染，又可将低温余热提高到可直接利用的温度，提高能源的利用率，降低二氧化碳排放。如在原油产业中，原油在联合站的加热分离和集输都要消耗大量的热能，目前热能主要由燃油锅炉和天然气锅炉提供。如果利用高温热泵对石油开采过程中油水分离产生的30~50℃的余热水进行热回收，输出70℃~90℃的高温热水，取代原油加热炉对输油管道进行加热，可以降低原油的粘度，提高原油输送效率，同时节省外供热，从而获得节能效果。原油集输系统加热工艺原理如图4-5所示。另外，生产酸奶制品过程中，要对牛奶进行一级降温，须将37℃冷却水降至30~32℃循环使用，同时车间每天需要用80℃~85℃的热水进行间歇式清洗，应用高温热泵+蓄热水箱系统回收冷却水中的热量制取高温热水供清洗生产线使用，充分利用低谷电价，省掉了冷却系统，同时节省外供热的能源消耗，节能和经济效果良好<sup>[6]</sup>。酸奶厂的热泵工艺原理如图4-6所示。

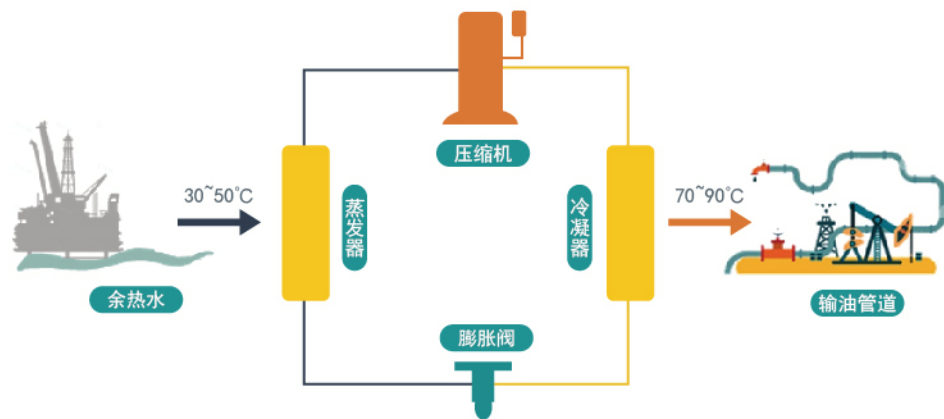


图4-5 原油集输系统加热工艺流

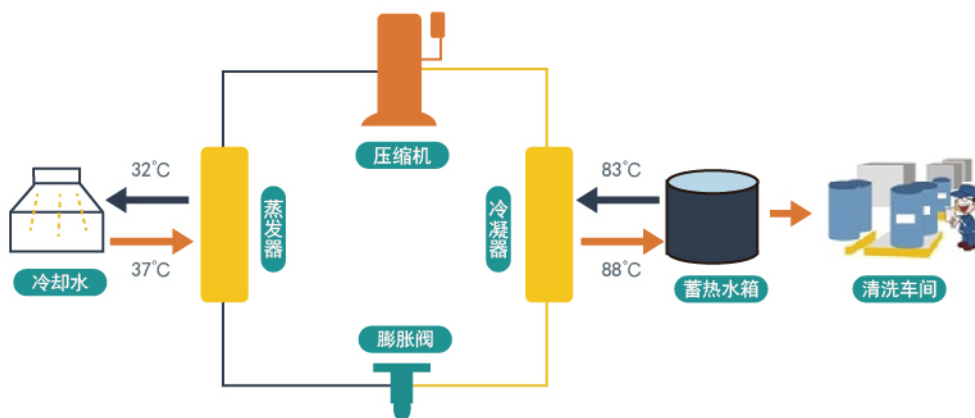


图4-6 酸奶厂应用热泵流程

利用热泵还可以回收电厂冷却水、工业废水和城市污水排放中所含的热量。工业废水的出水温度往往比较高，利用水源热泵回收其中的热量，可以用于冬季供暖或生产工艺，并逐渐应用于石油、化工、冶金、纺织、食品等行业。据统计，直接利用热泵技术回收电厂余热和工业余热可承担170亿平米的供热面积。利用城镇污水资源，发展污水源热泵具有显著的减排效益。现阶段，我国城市污水年排放量约750亿吨，蕴涵的热能按4°C温差回收和利用50%的水量估算，可实现约4.5亿m<sup>2</sup>建筑的清洁取暖。污水热能回收所具有的节能环保特征完全契合清洁取暖需要，这种鲜明的需求导向使得工程推广迅速，但面临的普遍问题是污水换热器阻塞引起的换热器频繁拆洗和传热性能低下。目前正在开发低成本、高性能和免清渣的物理分离方法，适应分散、闭式、低成本污水热能回收系统的需求。

### (3) 工业干燥技术



工业干燥是一项高耗能操作，在各种工业部门总能耗中，干燥能耗大约为4%（化学工业）~35%（造纸工业）之间<sup>[7]</sup>。在中国，干燥能耗在5280kJ/kgH<sub>2</sub>O<sup>[8]</sup>，而美国的工业耗能中有12%用于干燥<sup>[9]</sup>。因此，利用热泵技术降低干燥能耗对于减缓能源紧张局面具有重要现实意义。

如图4-7所示，热泵干燥系统工作时，热干空气进入干燥室内吸收物料水分，变成热湿空气，制冷剂在蒸发器吸收干燥室排出热湿空气中的全热，蒸发为气体，经压缩机压缩后被输送到冷凝器中放出冷凝热，加热蒸发器脱水后的干冷空气，由冷凝器出来的干热空气再进入干燥室，对湿物料进行干燥。干燥空气和制冷剂均实现闭式循环。热泵干燥系统相对传统干燥技术虽维护要求较高<sup>[10]</sup>，但有着高效节能（例如热泵低温干燥木材时可节约能耗40%~70%<sup>[11]</sup>，干燥污泥的节能率达20%~50%<sup>[12]</sup>）、干燥过程参数易控制、干燥时间短（相较于传统的干燥方式时间可缩短1/3<sup>[12]</sup>）、无废气排放、环境友好等特点。

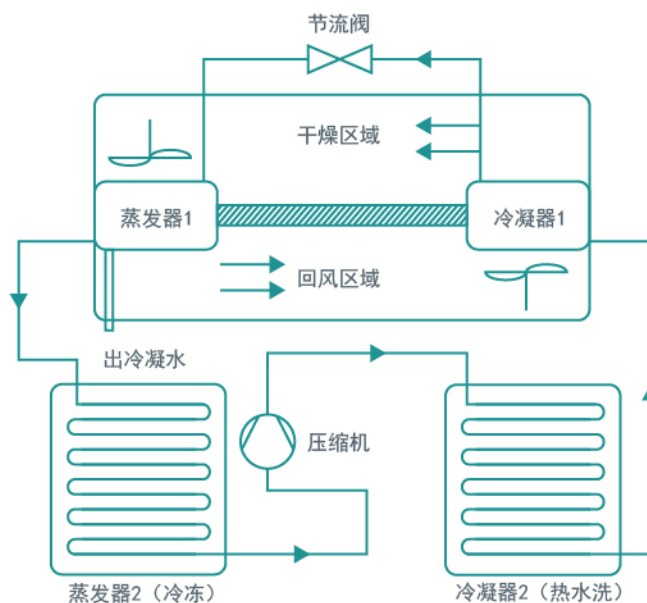


图4-7 热泵干燥流程图

总体而言，工业生产过程上下游联系紧密，碳中和目标必将改变现有生产流程，势必也带来整体产业链的变革，促进工业生产用热的技术革命和工业热泵的应用。

### 4.3 农业环境调控

受经济发展水平、气候环境、技术、政策等多重因素的影响，不同国家和地区农业碳排放总量与结构占比存在较大差异。自20世纪90年代以来，全球的农业碳排放增加

了14%<sup>[13]</sup>。中国作为第一农业大国，虽本世纪初中国碳排总量陡峭爬升，农业碳排放占总排放的比例出现明显下降，但农业碳排放量始终高于欧盟和美国（见图4-8<sup>[14]</sup>）。目前，农业碳排放保持在7%~8%的水平，虽然从总体上看占比不高，但随着碳中和目标的推进，农业部门必须在减排上发挥更大作用。

热泵在当前农业环境调控领域主要应用于农业生长环境调控与农产品加工，开发应用潜力巨大。一方面工农业节能和环保要求越来越高，各个行业都在制定具体的能耗限额指标；另一方面，在农业生产中，农产品深加工的比例也在逐年提高，这为热泵的应用创造了良好的条件。

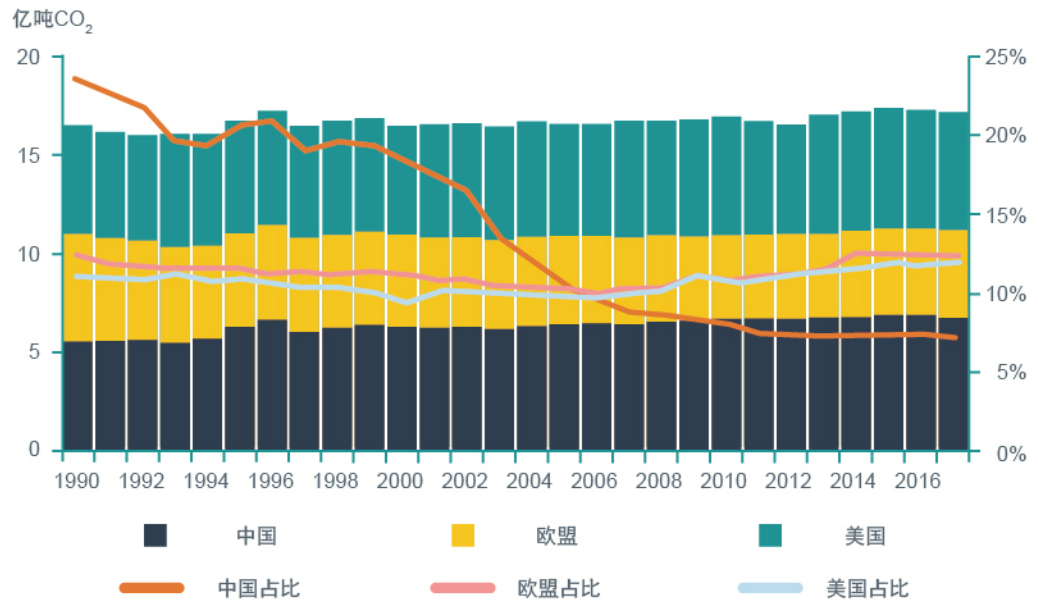


图4-8 农业部门碳排放绝对值及其占本国总排放量的比重

#### （1）农业生长环境调控

农业生产需要提供与作物/畜禽生长相适应的环境条件，由于热泵具有供热、供冷和除湿的功能，且能耗远低于传统的热风炉、暖风机等，是节能环保的应选替代技术，可应用于农业生长环境调控。在农业设施调温方面，主要针对农业温室大棚和农业畜禽猪舍，目前大多应用空气源热泵和地源热泵。目前已有大量实例证明在农业温室环境中采用热泵相比燃煤加热可节约20~60%的能源消耗<sup>[15]</sup>。

由于单一类型热泵具有一定局限性，可通过复合型热泵发展多能互补技术。复合型热泵可充分利用各种能源，多种能源互为备用，根据环境和时间的不同切换工况，打破地域和环境的局限性，提高能源利用率。因此未来热泵在农业设施上的广泛应用，复合

型热泵将会成为今后的重点发展方向。

在我国农村，有丰富的环境热源，热泵技术具有高效、容易控制、节能环保的特点，在设施农业环境调节中，具有较好的应用前景。

#### （2）农产品加工

农副产品富含糖、蛋白质、维生素等营养物质，同时又富含水分，为便于运输、贮藏及加工，常需要进行干燥等加工作业。与常规干燥方式相比，热泵农产品干燥具有以下特点：1) 能源利用率高，运行费用低，表4-2是热泵与不同形式系统干燥农产品的比较<sup>[16]</sup>；2) 低温干燥可有效减少氧化和化学分解等现象，特别适应热敏性农产品的干燥，干燥产品质量高；3) 干燥条件可调，表4-3给出了部分农产品的干燥参数<sup>[17]</sup>，可见热泵适合多种农产品的干燥；4) 热泵系统中蒸发器的除湿效率高，相比传统的干燥方式时间可缩短1/3；5) 采用闭路循环的热泵干燥系统时，干燥工艺不受外界环境气候的影响，干燥过程稳定，也无环境污染问题。

表4-2热泵与不同形式干燥系统的比较

	传统加热	真空干燥	热泵干燥
抽湿率 (kg/kWh)	0.1-1.28	0.72-1.2	1.0-4.0
干燥效率 (%)	35-40	≤70	95
温度范围 (°C)	40-90	30-60	10-65
设备投资	低	高	中等
运行费用	高	极高	低

表4-3部分农产品干燥参数

农产品	初水分 (%)	终水分 (%)	最高允温 (°C)
小麦	20	16	45
洋葱	85	6	55
绿豆	80	5	60
香蕉	80	15	70
棉花种子	50	8	75

目前在欧美等发达国家热泵已用于木材、食品、粮食、种子、果蔬、烟草等行业中，农产品的热泵干燥工程实例已可见经济效益，是热泵农业工程应用的一个重点方向。

农业的全面脱碳需要创新农业生产技术与方式，提高农业生产效率。但由于传统农业惯性强，新技术难以快速渗透，而目前热泵设备的投资仍较高，农业新技术的普及需要政策的鼓励和支持，吸引资本及优秀人才加入。

#### 4.4 其他行业

在能源、工业等部门碳排放增速趋缓甚至下降时，中国交通部门的碳排放却在继续增加。2018年交通部门已经成为了中国第四大碳排放部门，排放量达到9.3亿吨二氧化碳当量<sup>[18]</sup>。从运输方式来看，2018年中国道路交通所产生的碳排放占交通部门总碳排放的73.5%，是减排的重点。据统计，美国、欧盟和日本交通部门排放达峰时千人乘用车保有量分别为845、423和575辆，而中国目前仅有173辆<sup>[19]</sup>，远低于其饱和值水平，中国汽车保有量仍然呈持续增长态势。随着新能源汽车行业技术的快速发展，汽车从传统燃油汽车朝新能源方向发展是大势所趋，并且也是我国汽车行业的重点政策。

冬季燃油车可利用发动机余热提供足够的热量，而电动新能源汽车面临着电机余热不足以维持冬季尤其极寒天气下乘员舱的热环境。采用高压PTC材料电加热的热电效率不可能大于1，这将大幅降低整车电池的剩余电量，满负荷制热时电动汽车续航里程降低近50%。热泵利用电能可以实现2~3倍的热量输出，热泵汽车空调是目前最有潜力且效率最高的解决方案。目前统计的已售车型带热泵系统汇总如表4-4所示<sup>[20]</sup>。

表4-4热泵系统应用车型

车系	品牌车型	热泵类型	上市年份
日系	丰田 Prius Prime	补气热泵	2017
	日产 Leaf	直接热泵	2013
韩系	起亚 Soul	直接热泵	2014
英系	捷豹 i-pace	直接热泵	2018
法系	雷诺 Zoe	直接热泵	2013
德系	宝马 I3	间接热泵	2013
	奥迪 R8, Q7, E-tron	间接热泵	2018
	大众 新 e-golf	直接热泵	2017
国产	荣威 Ei5	直接热泵	2018
	荣威 Marvel X	直接热泵	2018
	长安 CS75 PHEV	/	2018
	蔚来 ES6	直接热泵	2019

目前，受限于成本及技术成熟度，热泵技术在汽车空调行业中发展缓慢，但仍需对新能源汽车热泵系统进行持续优化，如商业化二氧化碳汽车热泵空调系统，从而使新能源汽车热泵系统性能更优越，解决电动汽车续航里程焦虑的问题。

#### 4.5 德国和欧洲热泵应用情景及支持政策

放眼国际，热泵逐渐得到重视。在过去的20年间，德国的供暖行业越来越认识到热泵对温室气体减排的贡献，热泵销量呈稳步上升的趋势，特别是2016年以来，由于政策的支持，热泵销量增速迅猛，优于其他技术在供暖市场中的发展。2020年，德国共售出约14万台热泵，同比增长40%<sup>[21]</sup>；同时，热泵占供热市场的份额也在增加，在2020年达到了迄今为止的最高值，约为13%。截至2020年，德国共安装了137万台热泵系统，其中包括约30万台热泵热水器和107万台供暖热泵，供暖热泵中约有65万组空气源热泵和42万组地源热泵系统<sup>[22]</sup>。

在欧盟，2020年热泵的安装总量为1480万台。从2010年到2020年，热泵年销量翻了一番，从2010年的80万台增长到2020年的近160万台，其中空气源热泵约占40%。盟国家中，热泵销量最高的国家是法国（2020年销量为39.4万台），其次是意大利（23.3万台）和德国（14万台），三个国家总计占欧盟热泵市场的一半<sup>[23]</sup>。

##### 4.5.1 德国和欧洲热泵应用情景

根据德国联邦经济事务与能源部的统计数据，2017年德国供热与制冷占终端能耗的57%，排放二氧化碳2.54亿吨，占德国总排放量的约28%。其中，受气候条件影响，供

热占比远超制冷，占2017年德国终端能耗的53.4%，因此，供热领域的温室气体减排对于德国实现其气候目标将起到关键作用<sup>[24]</sup>。而热泵则是助力供热领域脱碳的重要技术手段之一，热泵具有很高的节能潜力，可以广泛应用在建筑与工业部门。

2019年，德国提出将在2050年实现气候中和，并在2021年5月将此目标提前至2045年。德国Agora能源转型论坛和其他权威智库机构在《德国气候中和2045》研究报告中估算，若德国碳中和的目标提前到2045年，德国供热领域热泵的安装数量至少要达到1400万台。

由于德国2045年气候中和目标更新时间较短，现有研究多以德国在2050年实现气候中和为目标年份进行分析。对诸多智库的研究报告汇总后，本部分针对热泵在建筑行业和生产中的使用潜力和热泵的温室气体减排潜力进行了分析：

#### （1）建筑行业

热泵技术为德国住宅和商业建筑提供了高效的供暖和热水供应等供热解决方案。在德国，为了实现气候中和目标，热泵在建筑供热环节的终端能耗占比必须大幅提高。德国能源署（dena）估计，如果德国在2050年前实现气候中和目标，则热泵在住宅、商业建筑和集中供热中的终端能耗占比必须达到如图4-9的份额。

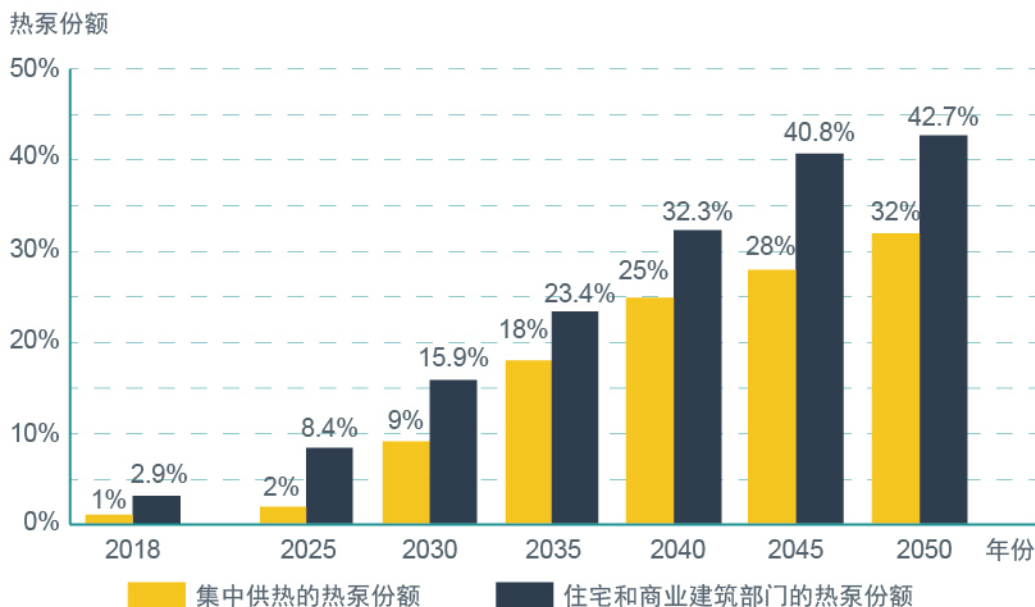


图4-9 热泵在德国住宅、商业建筑和集中供热中的份额预测

## （2）工业生产

供热电气化是工业脱碳的一个关键步骤。在工业领域，目前热泵尚未大量应用，但却有巨大的潜力，特别是在低温应用（ $<100^{\circ}\text{C}$ ）方面。分析显示，到2050年，热泵可提供约三分之二的低温工业用热，约25%的中温应用（ $100^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ ）。目前已有德国企业可生产工业级 $150^{\circ}\text{C}$ 高温热泵，预计到2030年，随着技术进步和创新， $180^{\circ}\text{C}$ 高温热泵或将普及，并在2050年前实现 $300^{\circ}\text{C}$ 高温热泵，从而释放热泵的进一步应用潜力<sup>[25]</sup>。

## （3）热泵的温室气体减排潜力

据德国热泵协会（BWP）估算，热泵的二氧化碳排放比传统燃油锅炉平均低80%。如德国采取适当力度推广热泵，至2030年和2050年，热泵在供暖领域的减排潜力将分别为2500万吨和5800万吨二氧化碳（图4-10<sup>[26]</sup>）。

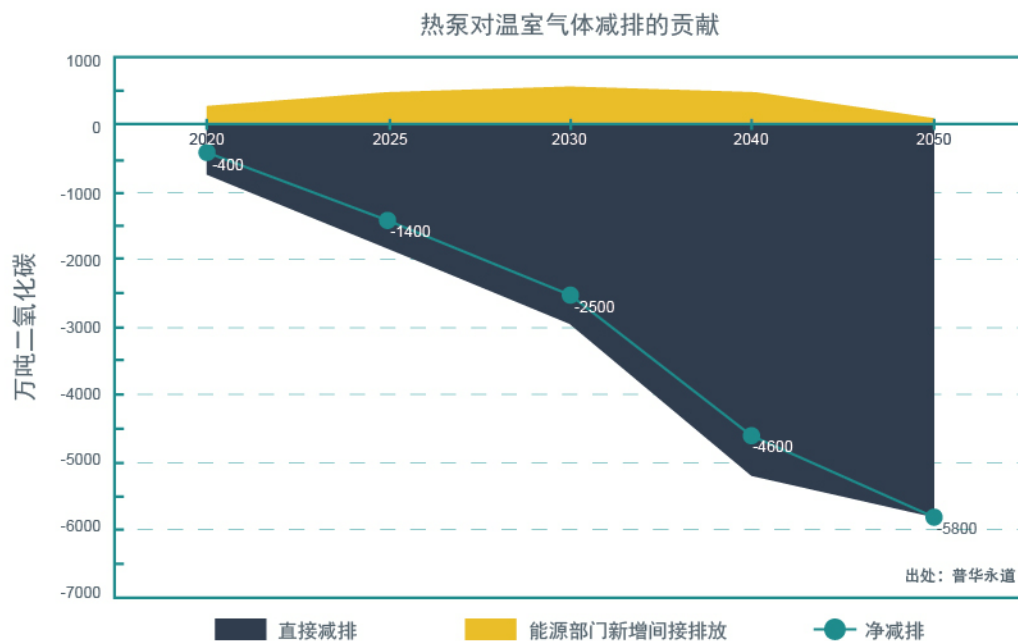


图4-10 热泵在在供暖领域的减排潜力

一项针对欧盟热泵减排潜力的研究显示，如果欧盟全部使用热泵供暖，即使热泵用电来自于燃气发电，欧盟能源相关的温室气体排放将减少7.5%；如果热泵使用的电力50%来自可再生能源，则对应的温室气体减排为12%；如果热泵用电全部来自可再生能源，欧盟能源相关的温室气体排放将减少16%<sup>[27]</sup>。

### 4.5.2 德国与欧洲的热泵支持政策与分析

为实现气候中和目标，德国联邦政府制定了一系列政策手段，直接或间接推动热泵在供暖领域的广泛应用。这些政策包括更加严格的能效约束性标准，也包括有效的财政激励措施以及碳市场的间接辅助。多种政策手段的共同作用形成了奖惩并存的机制，推动了热泵市场在德国的快速发展。

#### （1）热泵的直接支持政策

a) 财政支持政策。2000年，德国推出了《市场激励计划》（MAP），支持包括热泵在内的可再生能源供热。2015年，《市场激励计划》修订后大幅提高了对热泵的补贴力度，进一步推动热泵的安装。2021年，《联邦建筑能效经费计划》（BEG）出台，取代并整合了之前的《市场激励计划》等其他经费支持计划。原则上，《联邦建筑能效经费计划》提供两种形式的财政支持：直接补贴或贷款还款补贴。根据该计划规定，热泵可获得直接补贴为安装热泵成本的35%-45%。如用热泵取代燃油锅炉，用户可获得45%的补贴。此外，如果改用热泵是建筑综合能效提高整体改造的一部分，而非仅升级供暖设施，用户还可以获得5%的额外补贴。对于住宅，更换热泵的补贴上限为6万欧元，商业建筑的补贴上限为1500万欧元<sup>[28]</sup>。

根据该计划规定，热泵用户还可以申请德国复兴信贷银行的贷款偿还减免。新建建筑和现有建筑改造的贷款额度从12万-15万欧元不等。新建建筑的贷款偿还补贴为贷款额的15%-25%，现有建筑的补贴为25%-50%。新建或改造后建筑物的能效级别越高，补贴则越高<sup>[29]</sup>。

b) 严格的能效约束性标准。除了财政支持，建筑和能效标准的提高在促进热泵的使用方面也发挥了重要作用。在德国，2007年颁布的《节能条例》（EnEV）是促进热泵发展最重要的能效规范，它规定了新建建筑和改造建筑的最低能效要求。2016年修订的《节能条例》能效标准进一步趋严，它要求新建建筑的一次能源消耗减少25%。严格的能效要求下，热泵技术优势明显，热泵是唯一一个不需要任何额外措施就能够使新建筑达到最高能效等级的供热技术<sup>[31]</sup>。2020年，德国颁布《建筑能源法》（GEG）取代了《建筑节能法》同时废止《节能条例》，《建筑能源法》进一步完善了对新建建筑和现有建筑的能效要求，并明确规定除特殊情况外禁止德国在2026年后安装燃油锅炉。

c) 直接支持政策对热泵市场的影响。德国热泵协会的一项研究分析了电价、补贴政策 and 能效标准对热泵销售情况的影响，分析结果显示，尽管高电价会影响热泵的销售量，但这也并非绝对，如果补贴足够高，对于热泵的销售量影响也会很小或可忽略。但



补贴力度的增加和能效标准的升级一定可以促进热泵的销售：《市场激励计划》在2015年进行改革，加大了补贴力度，当年德国热泵整体销售增长15.8%；2016年《节能条例》的修订也让当年热泵销售增长了16.1%。此外，这一分析还指出，对于热泵销量而言，补贴对现有建筑中热泵的使用有更大的影响，而严格的能效标准则对新建建筑的热泵使用影响更大。图4-11显示了德国热泵销售情况与热泵直接支持政策变化趋势的关系。

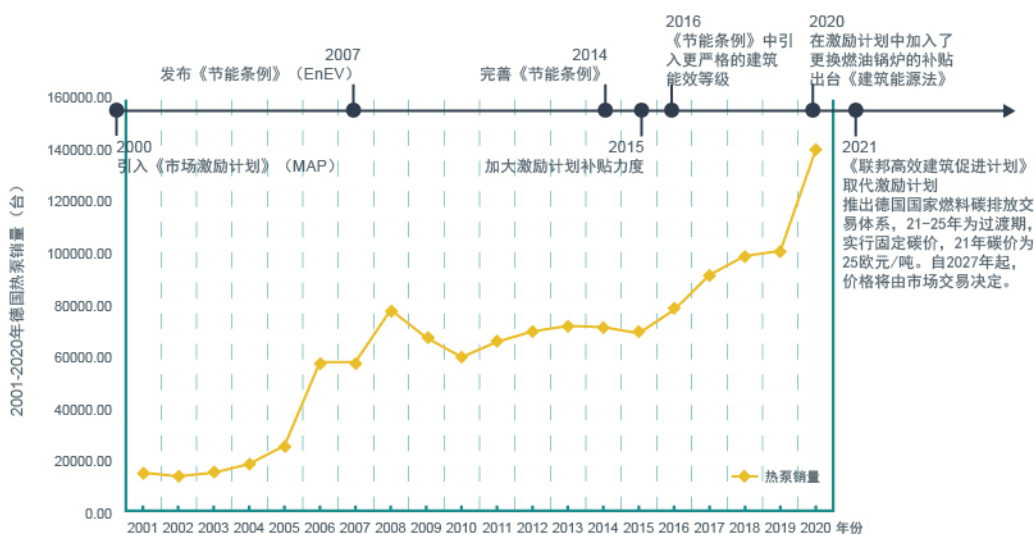


图4-11 德国热泵销售情况与热泵直接支持政策变化趋势的关系

## (2) 间接机制—碳价机制

在碳价机制下，使用化石能源要为其排放的二氧化碳付出相应成本。化石能源成本的增加成为推动热泵使用的另一个重要驱动力。从2021年开始，除了参与欧盟碳市场(EUETS)外，德国还推出了独立的德国国家燃料碳排放交易体系(GermannETS)，管控包括交通和建筑等未被欧盟碳市场涵盖领域的碳排放。目前，德国二氧化碳的定价为25欧元/吨，且将逐年增加，到2025年将达到55欧元/吨。2026年后碳价将通过交易决定，且碳价区间为55~65欧元/吨。自2027年起，价格将由市场交易决定。2021年7月14日，欧盟发布了改革其气候和能源政策的各种立法建议。其中一个重要的建议是，从2026年开始为建筑（供热）和交通部门建立单独的、欧盟范围内的排放交易计划<sup>[32]</sup>。如果这个建议得以落实，在欧盟范围内，随着建筑供热领域化石能源成本的提高，将触发热泵在欧盟的快速发展。

在欧盟国家中，引入碳价机制的国家也是热泵数量和比例最高的国家。瑞典1991年起对所有化石燃料征收碳税，且价格逐步增加。2021年，瑞典每吨二氧化碳114欧元，

为全球最高<sup>[33]</sup>。芬兰1990年引入碳税，2021年价格为62欧元/吨、挪威1991年引入碳税，2021年价格为58欧元/吨<sup>[34]</sup>。这些高碳税国家中，挪威每千户家庭的热泵销售量为41台，芬兰为39台，瑞典为24台，而其他大多数欧洲国家则低于10台<sup>[35]</sup>。

#### 4.5.3 德国与欧洲热泵发展经验与启示

除德国外，其他欧洲国家也在推广热泵。附录3总结了一些欧洲国家支持热泵等清洁供热技术的相关政策规定<sup>[36]</sup>，主要包括补贴或减税、低息贷款、能效法规、技术禁令、税收或碳定价相结合的措施，以引导清洁低碳的供热投资。尽管不同国家采用了不同措施激励热泵的使用，但如下几个要素是欧洲国家普遍采取的促进热泵发展的措施：

（1）政策组合。大多数欧洲国家采用了组合政策，整体推动对热泵和其他可持续低碳供热技术的发展。

（2）财税政策。多欧洲国家采用补贴、减税或为购买及安装热泵提供贷款优惠等财税政策拉动热泵市场，例如为热泵用户提供约30~40%的前期成本补贴，这对欧洲国家热泵推广起到了良好的收效。

（3）提升能效标准。提升供热技术和建筑领域的能效标准，明令规定高能耗供热技术的退出时间，可以增加热泵技术的竞争力，促进热泵更广泛的使用。

（4）引入碳价机制。包括碳市场和碳税在内的碳价机制，将增加化石燃料的使用成本，从长远的角度可以促进能源结构的清洁转型，推动热泵在供热领域的快速发展。

（5）降低热泵的运行成本。通过电力需求侧管理和灵活的电力市场机制降低热泵用电的价格，减少热泵的运行成本，鼓励热泵的使用。

（6）针对使用热泵的不同领域制定有针对性的政策。在住宅和商业建筑、集中供热和工业领域，分别制定有针对性的热泵推广政策，促进热泵在各个领域的发展。

### 4.6 热泵技术自身的低碳化及发展关键技术

#### 4.6.1 热泵自身技术的低碳化

热泵技术的推广应用能有效降低用户的二氧化碳排放，但热泵设备生产、安装、维护、拆除等也会产生二氧化碳或非二氧化碳温室气体的排放，应注重热泵技术自身低碳化研发和应用。

热泵常采用制冷剂，制冷剂在热泵系统中不断循环，并通过自身的相态或状态变化实现制热功能。制冷剂是非二氧化碳温室气体排放关注的重点。数据表明，我国由于建筑相关制冷剂泄漏造成的温室气体相当于1亿吨二氧化碳当量<sup>[37]</sup>。制冷剂温室效应一般采用全球变暖潜能（Global Warming Potential, GWP）指标衡量，表示非二氧化碳气体

中一个碳原子与二氧化碳气体中一个碳原子所产生的温室效应之比。另一个表示制冷剂环境影响的指标是臭氧破坏潜能（Ozone Depletion Potential, ODP），指制冷剂对臭氧层的破坏能力大小，以R12的破坏能力为基准1。表4-6给出了几种常见制冷剂的GWP和ODP值。

表4-5 常见制冷剂的GWP和ODP值

制冷剂类型	代号	GWP	ODP	备注
HCFC	R22	1810	0.055	
HFC	R134a	1430	0	
HFC	R32	675	0	
HFC	R152a	124	0	
HFC	R407C	1700	0	
HFC	R410A	2088	0	
HFO	R1234yf	<1	0	
自然工质	R290	~20	0	丙烷
自然工质	R744	1	0	二氧化碳
自然工质	R718	<1	0	水

因此，如现在正大量应用的HFC类制冷剂，尽管从质量上来说排放量远小于二氧化碳，但其GWP值相对较高，对气候变化的影响不容忽视。诚然，HCFC、HFC类制冷剂只有排放到大气中才会产生温室效应，形成碳排放。理论上，通过改进密封工艺，实现热泵运行过程中的无泄漏，可实现运行过程中的制冷剂零碳排放。目前，我国热泵制造、安装技术水平已使热泵系统制冷剂运行泄漏量显著减少。只要继续改进密封工艺，并严格监管，杜绝固定热泵机组运行泄漏是完全可实现的。而对于汽车热泵等移动设备，由于其处于剧烈振动中，做到无泄漏有一定困难，应该发展新型的低GWP热泵制冷方式，如采用二氧化碳等自然工质。

目前制冷剂实际排放出现在维修和拆除过程中。尤其是住宅建筑分体热泵空调，移机或废弃时多直接将制冷剂放空到环境中。在集中大型热泵机组的维修中，也有向大气直接放空的现象。需通过严格的政策机制，形成制冷剂回收制度，禁止各种场合下的制冷剂直接排放，可有效消除这部分非二氧化碳温室气体排放。近年来，制冷剂的回收和再利用技术开始研发，但成本较高。若从避免排放的角度，当回收制冷剂难以处理和再利用时，可以采用燃烧方式<sup>[37]</sup>，使其转变为二氧化碳排放，GWP降为1。

《蒙特利尔议定书基加利修正案》规定，发达国家从2019年开始冻结，发展中国家从2024（中国）或2029（印度）开始冻结并削减高GWP制冷剂，分别到2035年和2045年达到冻结年度产量的15%（发达国家）或20%（中国）。我国目前正处在淘汰HCFC类（如R22）制冷剂的阶段，将在2030年完成；2024年开始淘汰HFC类（如R134a、R410A、R407C等）制冷剂，未来我国制冷剂的发展趋势如图4-12所示<sup>[38]</sup>。制冷剂替代一方面是积极研发零ODP、低GWP的合成化合物，另一方面是采用自然工质，如二氧化碳、水、CH类化合物等，并重新评估其在热泵领域中的应用前景。

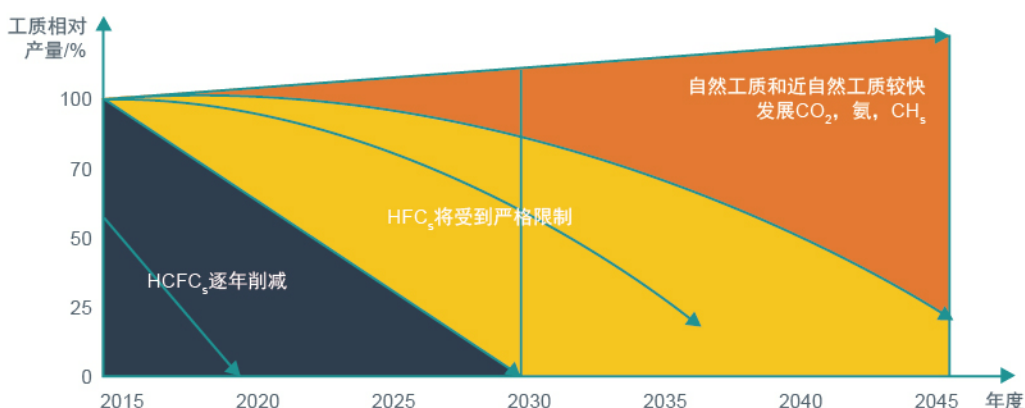


图4-12 制冷剂的发展趋势

除此之外，还应关注热泵设备生产、运输、安装、维护、改造及拆除等环节、热泵技术相关企业和上下游企业中的二氧化碳和非二氧化碳类温室气体排放，在加大热泵技术应用的同时，降低其自身的碳排放。

#### 4.6.2 热泵发展关键技术

热泵技术不仅具有显著的节能减排优势，其应用场景也非常丰富，几乎深入了社会发展、人民生活的方方面面。热泵技术经过长时间的发展，已经取得了突出的技术进步，但是仍有多技术亟待突破。

（1）压缩机技术。压缩机是热泵机组的核心部件，其性能直接影响着热泵机组能效。压缩机技术发展关键技术包括：1）新型压缩技术开发及压缩机性能提升，通过提高制造质量、优化设计参数，有望将其性能提升10%以上，同时也要促进压缩机技术与其他学科前沿成果的融合，如永磁电机、变频技术的应用；另外，压缩机油供应不及时导致压缩机产能不足的现象时有发生，成为压缩机发展的卡脖子问题，因此加大力度进行无油压缩机的研发，有助于压缩机技术的发展；2）压缩机与热泵整机匹配，实现整

机能效提升；3）压缩机国产化，加大研发力度，扩大自主研发生产压缩机范围，巩固热泵制造技术安全。

（2）热泵多场景应用设备研发。热泵技术应用场景十分丰富，除了建筑外，工业、农业、交通等各领域都有应用，不同应用场景对于热泵供热温度、运行方式、压缩机容量等各种特性都有自身要求，针对不同的应用场景开发更具有针对性的热泵机组，拓展热泵应用范围是发展方向之一。至少包括：1）高温热泵，工业很多用热需求高于 $100^{\circ}\text{C}$ ，未来高温热泵技术生产蒸汽和高温热水，将满足一大部分的工业应用；2）超低环境温度热泵，近年超低环温热泵技术发展较快，成为我国特色，未来应进一步研发，满足严寒地区空气源热泵的应用；3）交通热泵，近年来电动汽车迅猛发展，而热泵作为汽车热管理的重要技术，电动汽车热泵需求将会更加巨大，开发适用于汽车应用场景的热泵成套技术将成为热门研究方向。

（3）低GWP工质及相关技术研发。上节已经指出，HFC类制冷剂工质泄漏会造成温室气体排放。随着热泵普及，如何减少工质对环境的影响也成为了重点发展方向。未来制冷工质主要有三大发展方向：工质替代、减少泄露、特殊应用场景工质研发。1）工质替代，一方面是采用自然工质，如二氧化碳、水、CH类化合物等；另一方面是研发零ODP、低GWP的合成化合物；2）减少泄露，除技术层面改进，重要的是政策法规的完善和严格执行，通过严格管理机制减少制冷剂泄漏，推进制冷剂的使用、回收与再生规范化；3）特殊应用场景工质研发，一方面满足工质环保性能，另一方面适应高温、低温等特殊应用场景，并研发配套的载热载冷和润滑剂。

（4）热泵与蓄热技术结合。随着碳中和的进行，可再生电力规模逐渐增大，但是可再生电力波动性明显，电力峰谷差价较大。热泵与蓄热技术结合可利用谷电产生热量并蓄存，帮助电力系统进行调峰，同时降低供热运行费用。另外，各类余热或自然热源均具有波动性或季节差异性，将热泵与蓄热技术结合，稳定性和经济性也将得到提升。热泵与蓄热技术结合的方式、运行调控、可靠性和经济性等均是发展关键技术。

（5）热泵供热系统能效提升。根据应用场景自身属性，应用适宜的热泵系统；匹配热泵系统源网荷储各环节，实现系统整体能效提升；热泵系统与大数据、人工智能、数字孪生等相结合，实现热泵供热系统的智能化。

（6）其他方向。热泵生产过程也会产生碳排放，因此未来需要进一步优化生产工艺，减少生产过程碳排放，将减碳进行得更加彻底；另外，研发更长寿命的热泵系统，降低热泵生产、拆除碳排放。

## 参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2021. 北京, 中国建筑工业出版社. 2021.
- [2] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告（2019）
- [3] IEA. Heat Pumps. 2020.
- [4] 房庆, 宋忠奎, 高屹峰, 等. 中国空气能（空气源热泵供热）产业发展报告2019. 2019.
- [5] Yan HZ, Hu B, Wang RZ. Air-source heat pump for distributed steam generation: A new and sustainable solution to replace coal-fired boilers in china[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2020, 4(11): 2000118.
- [6] 董明, 周鹏, 刘纯鑫, 等. 高温水源热泵在酸奶生产线上的应用[J]. *节能与环保*, 2014 (01):64-65.
- [7] Shelton S V, Christiansen P J. Analysis of a nozzle condensation drying cycle. *Applied Thermal Engineering*, 1999, 19(8):831–845.
- [8] Takahiro Noda, Yasuyuki Hidaka, Mio Yokoe, et al. Study on application of a heat pump system to grain drying. Zhangyong Li. *Proceedings of 7th Asia-Pacific Drying Conference*. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2011.
- [9] Hodgett D L. Efficient Drying Using Heat Pumps. *The Chemical Engineer*, 1976,311:510 -512.
- [10] 张昌. 热泵技术与应用. 北京, 机械工业出版社,2012.
- [11] 张璧光, 李延军. 热泵干燥木材的技术现状与发展趋势. *干燥技术与设备*, 2003, (1):6-8.
- [12] 王伟, 倪龙, 马最良. 空气源热泵技术与应用. 北京, 中国建筑工业出版社. 2017.
- [13] Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions:1990—2020. USEPA. EPA 430-R-06-005 . 2006
- [14] 迈向2060碳中和——聚焦脱碳之路上的机遇和挑战
- [15] 王强, 杨禹尧, 夏礼如, 等. 热泵技术在温室中的应用. *中国农学通报*, 2020, 36 (29): 139-144.
- [16] K.J. Chua, S.K.Chou, W.M. Yang. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*. 2010, 87: 3611-3624.
- [17] A.Fudholi, K.Sopian, M.H.Ruslan, M.A.Alghoul, M.Y.Sulaiman. Review of solardryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews. 2010, 14: 1-30.

[18] 袁志逸, 李振宇, 康利平等. 中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述. 气候变化研究进展, 2021, 17 (1): 27-35.

[19] 王海林, 何建坤. 交通部门CO<sub>2</sub>排放、能源消费和交通服务量达峰规律研究. 中国人口·资源与环境, 2018, 28 (2): 59-65.

[20] 赵宇, 嵇天炜, 瞿晓华, 穆景阳. 电动汽车热泵空调系统综述. 制冷与空调, 2020, 20 (7): 72-81.

[21] 了解国家排放交易. 德国排放交易局, 2021-07-19.

[https://www.dehst.de/DE/Nationaler-Emissionshandel/nEHS-verstehen/nehs-verstehen\\_node.html#doc16289998](https://www.dehst.de/DE/Nationaler-Emissionshandel/nEHS-verstehen/nehs-verstehen_node.html#doc16289998)

[22] Thomas Nowak, "The future of heating is already here", European Heat Pump Association (EHPA), presentation used at the event "Heat pump market: State of play and outlook in view of the "Fit for 55" package", on 30 June 2021, at <https://www.ehpa.org/about/news/article/heat-pump-market-state-of-play-and-outlook-in-view-of-the-fit-for-55-package-material-now-avail/>

[23] Heat pump sales overview", European Heat Pump Association (EHPA), accessed on 18 August 2021, at [http://www.stats.ehpa.org/hp\\_sales/story\\_sales/](http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/story_sales/)

[24] Energiedaten: Gesamtausgabe", Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, in October 2019, at

[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=40](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=40)

[25] Philip Sterchele, Julian Brandes, Judith Heilig, Daniel Wrede, Christoph Kost, Thomas Schlegl, Andreas Bett, Hans-Martin Henning, "Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem", Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, in February 2020, at

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>

[26] "Roadmap Heat Pump", Federal Heat Pump Association (BWP), on 29 April 2021, available at

[https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user\\_upload/waermepumpe/07\\_Publikationen/Sonstige/2021-04-29\\_BWP\\_Roadmap\\_final.pdf](https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/Sonstige/2021-04-29_BWP_Roadmap_final.pdf)

- [27] Georg Thomaßen, Konstantinos Kavvadias, Juan Pablo Jimenez Navarro, “The decarbonisation of the EU heating sector through electrification: A parametric analysis”, Energy Policy 148 (2021), available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421520306406>
- [28] “Neue Energie für das Neue Jahr! BAFA startet Januar 2021 mit Umsetzung der BEG Einzelmaßnahmen”, BAFA, on 21 December 2020, at [https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Heizen\\_mit\\_Erneuerbaren\\_Energien/20201214\\_beg.html](https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/20201214_beg.html)
- [29] “Wer fördert was 2021? Alle Fördermittel von KfW und BAFA“, Effizienzhaus Online, accessed on 13 August 2021 at <https://www.effizienzhaus-online.de/foerdermittel-von-kfw-und-bafa/>
- [30] 德国节能条例(EnEV).联邦热泵协会(BWP), 2015. . [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Standardartikel/FAQ/faq\\_map.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Standardartikel/FAQ/faq_map.html)
- [31] 德国节能条例(EnEV).联邦热泵协会(BWP), 2015. [https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user\\_upload/waermepumpe/05\\_Presse/01\\_Pressemitteilungen/Ratgeber\\_EnEV.pdf](https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/05_Presse/01_Pressemitteilungen/Ratgeber_EnEV.pdf)
- [32] Simone Tagliapietra. Fit for 55 marks Europe's climate moment of truth. Bruegel, 2021-07-04. <https://www.bruegel.org/2021/07/fit-for-55-marks-europes-climate-moment-of-truth/>
- [33] 瑞典的碳税. 瑞典财政部, 2019-02-26. <https://www.government.se/government-policy/taxes-and-tariffs/swedens-carbon-tax/>
- [34] Elke Asen. 欧洲的碳税. 2021-06-03. <https://taxfoundation.org/carbon-taxes-in-europe-2021/>
- [35] EHPA ADD
- [36] Niall Kerr, Mark Winskel. A review of heat decarbonisation policies in Europe. climateXchange, 爱丁堡大学, 2021-02. <https://www.climateexchange.org.uk/media/4625/cxc-a-review-of-heat-decarbonisation-policies-in-europe-feb-2021.pdf>
- [37] 江亿, 胡姍. 中国建筑部门实现碳中和的路径. 暖通空调. 2021, 51 (5): 1-13.
- [38] 杨昭, 马一太. 制冷与热泵技术. 北京: 中国电力出版社. 2020.



## 5 热泵 减碳 效益 分析

热泵系统因具有显著的节能减排效果，其推广与应用潜力巨大。热泵技术的大规模应用可以为我国碳达峰、碳中和事业做出巨大贡献，其巨大的潜在减排量也将使我国在碳交易市场上占据有利位置。另外，热泵技术应用也可为民生、环境带来巨大改善。本章对建筑、工业和农业三大部门的碳排放潜力进行定量分析，并计算其在碳交易市场带来的巨大价值，展现热泵对我国碳中和目标的贡献。

### 5.1 碳排放分析方法

#### 5.1.1 碳排放量计算方法

碳中和是指碳排放总量等于或小于碳汇所吸附的总量，因此碳排放量的计算对于碳中和分析非常重要。碳排放计算方法有排放因子法、质量平衡法和实测法，其中排放因子法是目前应用最广泛的计算方法，它适合任何尺度的计算，这种方法简单明了，有全面的排放因子数据库作为参考<sup>[1]</sup>，因此后续分析均采用碳排放因子法。

碳排放可以分为直接碳排放和间接碳排放，直接碳排放是指化石燃料燃烧过程中产生的二氧化碳排放，这类碳排放一般直接在用户处产生，如供暖、炊事、生活热水、燃煤供热等导致的燃料排放；间接碳排放指外界输入的电力、热力等包含的碳排放<sup>[2]</sup>。碳排放量的公式为<sup>[3]</sup>：

$$C = C_1 + C_2 \quad (5-1)$$

式中， $C_1$  ——直接二氧化碳排放量，tCO<sub>2</sub>；

$C_2$  ——间接二氧化碳排放量，tCO<sub>2</sub>；

$C$  ——二氧化碳排放总量，tCO<sub>2</sub>。

能源活动的直接二氧化碳排放量 $C_1$ 可以根据不同种类能源的使用量和排放因子计算得到，即：

$$C_1 = \sum A_i \times EF_i \quad (5-2)$$

式中， $A_i$  ——不同类型能源的使用量，GJ；

$EF_i$  ——表示不同种类能源的碳排放因子，tCO<sub>2</sub>/GJ。

间接二氧化碳排放量可以利用消耗电量、热力与所属区域的平均碳排放因子相乘得到，即：

$$C_2 = \sum A_e \times EF_e \quad (5-3)$$

式中， $A_e$  ——消耗的热力、电量等，GJ或kWh；

$EF_e$  ——平均碳排放因子，tCO<sub>2</sub>/GJ或gCO<sub>2</sub>/kWh。

### 5.1.2 碳排放因子选取

对于热泵系统来说，其低位热源来自于空气、土壤/岩土体、水体等清洁可再生能源，但另外还需要消耗一定的电能或热能；对于建筑和工业用热场景，消耗的能源多为煤炭和天然气等化石能源。图5-1给出了相关能源的碳排放因子变化曲线，其中煤炭的碳排放因子为 $333\text{gCO}_2/\text{kWh}$ （ $92.5\text{kgCO}_2/\text{GJ}^{[4-5]}$ ），天然气为 $203\text{gCO}_2/\text{kWh}$ （ $56.3\text{kgCO}_2/\text{GJ}^{[6-7]}$ ），燃油为 $279\text{gCO}_2/\text{kWh}$ （ $77.5\text{kgCO}_2/\text{GJ}^{[7-8]}$ ）；电力碳排放因子2001~2020年间在波动中下降<sup>[6]</sup>，同时，可以预测2020年以后随着碳中和的推进，电力碳排放因子随着电力生产方式和结构的改变而迅速下降，2060年可望降至 $150\text{gCO}_2/\text{kWh}^{[9]}$ 。

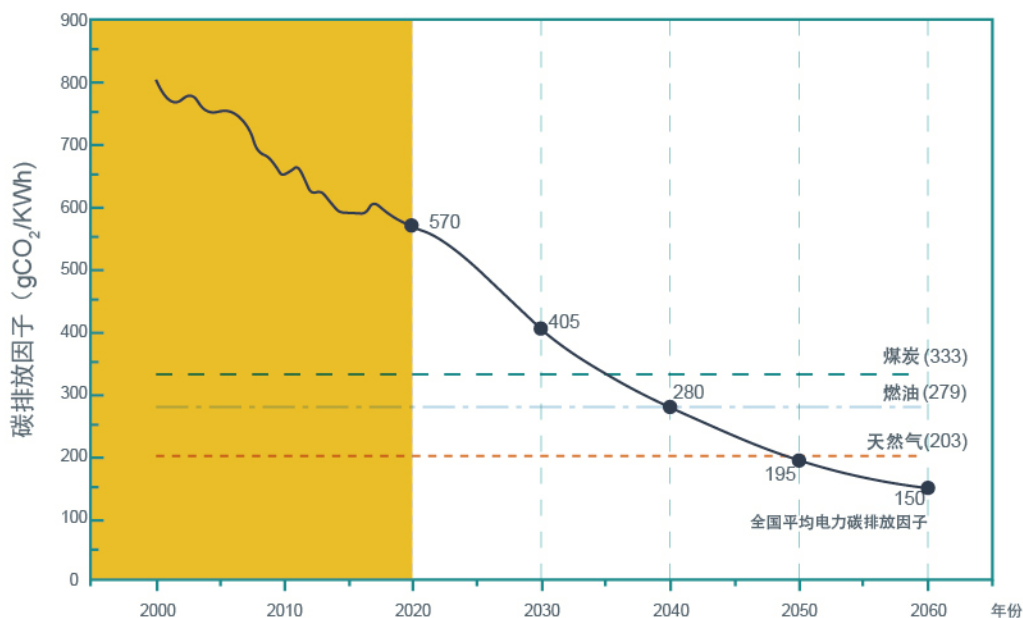


图5-1 相关能源的碳排放因子

### 5.1.3 减排量与减排百分比的计算

本章通过潜在减排量来定量分析热泵在不同情境下的碳减排潜力，这里热泵主要指电动热泵。潜在减排量是指当前情景（情景1）碳排放量与未来推广热泵、进行电力生产方式变革、需求侧改造（如进行围护结构改造、生产方式变革以及用热规模变化）之后的碳排放量的差值，可进一步细分为热泵减排量、电力端减排量和需求侧减排量三部分，如图5-2所示。各减排量的计算公式与定义如下：

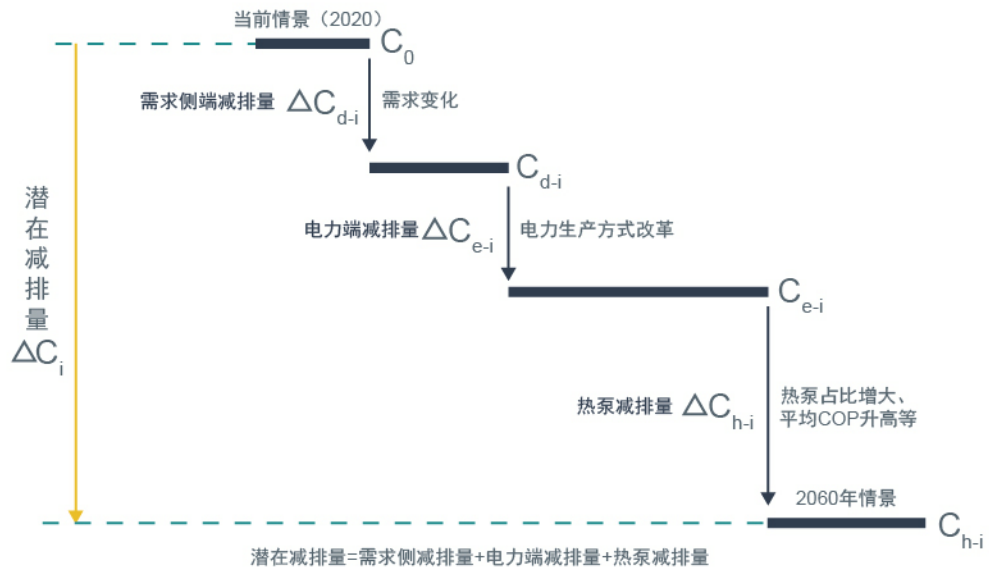


图5-2 各减排量核算示意图

#### （1）潜在减排量

潜在减排量的计算方法如下：

$$\Delta C_i = C_0 - C_{h-i} \quad (5-4)$$

式中， $\Delta C_i$  ——第i年的潜在减排量，亿tCO<sub>2</sub>/年；

$C_{h-i}$  ——第i年的碳排放量，亿tCO<sub>2</sub>/年；

$C_0$  ——当前情景（情景1）的碳排放量，亿tCO<sub>2</sub>/年。

#### （2）需求侧减排量

需求侧减排量是指仅由于需求变化带来的减排量，计算公式如下：

$$\Delta C_{d-i} = C_0 - C_{d-i} \quad (5-5)$$

式中， $C_{d-i}$  ——第i年，仅需求发生变化之后的碳排放量，亿tCO<sub>2</sub>/年；

$\Delta C_{d-i}$  ——第i年的需求侧减排量，亿tCO<sub>2</sub>/年。

对于建筑供暖，由于供暖面积增加和耗热量指标下降会导致供热量变化，最终使得碳排放量变化；对于建筑热水供应，建筑面积、热水供应负荷、住房空置率以及热水供应普及率均会随生活水平提高和社会发展而变化；对于工业生产，随着产业升级、生产方式改革和高质量发展，我国的工业用热量会发生变化，用热量的变化最终使得需求侧碳排放量发生变化；对于农业环境调控，需求变化主要体现在养殖规模变化、围护结构改造导致热负荷指标下降两方面。若需求侧减排量为负值，说明需求增加导致碳排放量增加。

### （3）电力端减排量

随着碳中和的推进，电力部门势必进行改造，电能更多来源于风电、水电、太阳能、核电等清洁低碳电力，因此我国未来的平均电力碳排放因子会逐年下降。这样，热泵耗电造成的碳排放量就会下降，因此电力端减排量就是电力碳排放因子下降所带来的减排量，计算方法如下：

$$\Delta C_{e-i} = C_{d-i} - C_{e-i} \quad (5-6)$$

式中， $\Delta C_{e-i}$  ——第*i*年的电力端减排量，亿tCO<sub>2</sub>/年；

$C_{e-i}$  ——第*i*年在需求变化的基础上，仅电力碳排放因子发生变化之后的碳排放量，亿tCO<sub>2</sub>/年。

### （4）热泵减排量

由于热泵占比增加替代原来的化石燃料或电能直接供热带来的减排量，计算方法如下：

$$\Delta C_{h-i} = C_{e-i} - C_{h-i} \quad (5-7)$$

式中， $\Delta C_{h-i}$  ——热泵减排量，亿tCO<sub>2</sub>/年；

$C_{h-i}$  ——第*i*年，在电力碳排放因子降低和需求变化的基础上，仅热泵占比增加和COP提升之后的碳排放量，亿tCO<sub>2</sub>/年。

### （5）减排百分比

减排百分比指的是第*i*年的减排量与当前情景（情景1）碳排放量的比值，计算方法如下：

$$\eta = \Delta C_i / C_0 \times 100\% \quad (5-8)$$

式中， $\eta$  ——减排百分比。

## 5.2 建筑行业碳减排分析

研究表明我国未来可实现的碳汇很难超过15亿tCO<sub>2</sub>，只相当于我国近年来二氧化碳排放总量的七分之一<sup>[10]</sup>。由于有些基础工业需要燃烧过程，不可避免排放二氧化碳，所以碳汇指标最多用于中和这些无法实现零排放的工业过程，对大多数部门来说实现碳中和就意味着零碳排放。因此，建筑部门应该把零排放作为其实现碳中和的基本目标。

### 5.2.1 建筑规模预测

每年大量建筑的竣工使得我国建筑面积存量不断增长，2019年我国建筑面积总量约644亿m<sup>2</sup>，其中，城镇住宅建筑面积为282亿m<sup>2</sup>，农村住宅建筑面积228亿m<sup>2</sup>，公共建筑面积136亿m<sup>2</sup>，北方城镇供暖面积141亿m<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。图5-3给出了我国近年的住宅建筑面积

变化，并通过参数拟合预测未来变化趋势。结果显示，我国住宅面积稳步增长，由于我国人口逐步趋于稳定，增长率会逐渐放缓；同时，随着城镇化不断深入，农村人口不断减小，农村住宅面积略有下降。

目前，我国北方城镇建筑约有152亿 $m^2$ 冬季需要供暖，图5-4给出了我国未来供暖面积的发展趋势，由图5-4可知，我国供暖面积不断增加，但是增长率逐渐放缓。预测结果与文献<sup>[10]</sup>基本一致，即2040年以后我国人口稳定在14亿，城乡建筑总规模将达到750亿 $m^2$ ，其中北方城镇需要供暖的建筑面积为200亿 $m^2$ ，农村供暖建筑面积约为100亿 $m^2$ 。

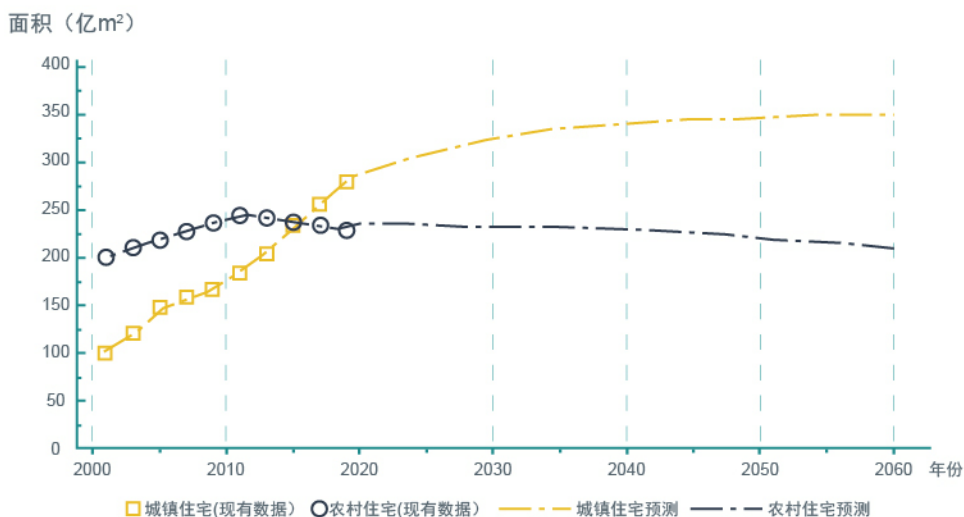


图5-3 城镇和农村住宅规模预测

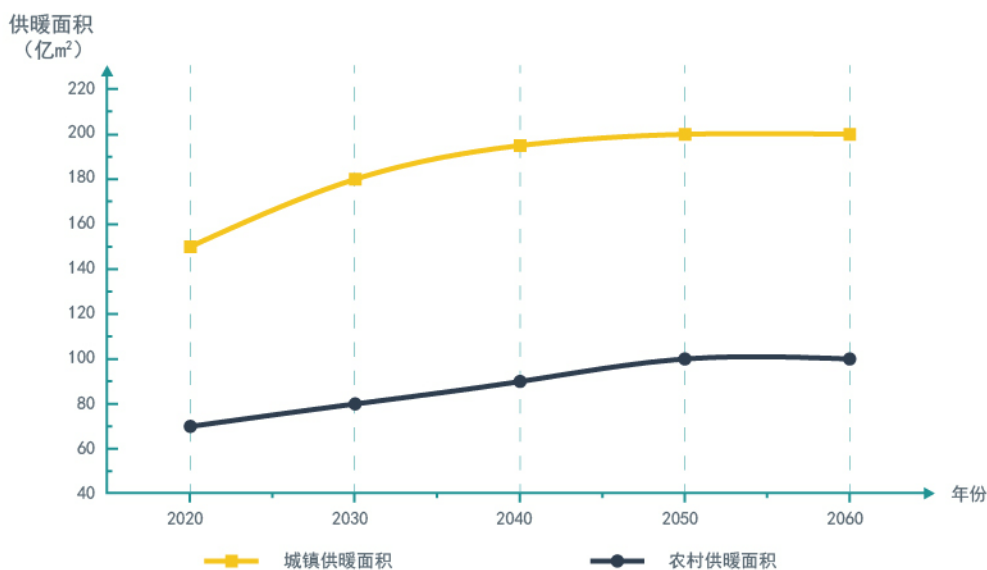


图5-4 我国供暖面积发展趋势

## 5.2.2 建筑供暖减碳分析

目前北方城镇建筑需要每年42.3亿GJ的热量来满足供暖需求<sup>[10]</sup>，因此热泵应用前景非常广阔，减碳潜力非常巨大。热泵的运行依靠电力，大规模应用热泵使电消耗增加，导致二氧化碳间接排放量增大。而目前我国发电量中仅有30%为“零碳”电力，其余为需要燃煤、燃气“碳排放”电力。因此，要想进一步降低建筑碳排放，必须改变电力生产方式，努力实现电力生产的“零碳”。同时，通过建筑围护结构改造降低热负荷，对碳减排也有促进作用。

综合考虑发电方式改革引起的电力碳排放因子降低，建筑围护结构改造导致的耗热量指标下降和我国供暖面积的变化，设置1个当前情景和2个2060年情景，进行不同情景的碳排放量核算。2017~2018年北方城市平均单位面积耗热量约为0.355GJ/m<sup>2</sup><sup>[11]</sup>，随着节能改造的进行，2020年建筑供暖耗热量取0.35GJ/m<sup>2</sup>。对比供暖方式，城镇折算为燃煤供暖的综合能效取70%、农村为50%；对于热电联产方式集中供热，根据《民用建筑能耗标准》(GB/T51161-2016)，通过输出的电力和热量的焓分摊输入的燃料来计算碳排放<sup>[12-13]</sup>。由于农村取暖具有“部分时间、部分空间”的特点<sup>[14]</sup>，因此考虑农村取暖的同时使用率为50%，未来随生活水平提高增加至60%。各情景计算指标如表5-1所示，情景主要含义如下：

当前情景（情景1）：按照目前我国建筑规模、各类主要供热方式占比及电力碳排放因子得到的碳排放量。

自然增长情景（情景2）：热泵规模自然增长，2060年热泵占比增长至城镇20%、农村30%；热电联产也得到一定普及，燃气壁挂炉完全被取代；供暖面积增加，建筑围护结构和电力生产方式得到改造，耗热量指标下降至城镇0.20GJ/m<sup>2</sup>、农村0.30GJ/m<sup>2</sup>，电力碳排放因子降至0.150kgCO<sub>2</sub>/kWh，管网输配效率更高，输配能耗降至1.2 kWh/m<sup>2</sup>，热泵COP随着技术进步而有所提高。

显著增长情景（情景3）：在情景2的基础上，大力推动热泵技术在碳中和中的应用，热泵占比显著增长至城镇40%、农村90%。

表5-1 建筑供暖各情景的计算指标

情景	供暖面积 (亿m <sup>2</sup> )	热泵 占比	热电联 产占比	燃气壁 挂炉占比	耗热量指标 (GJ/m <sup>2</sup> )	同时 使用率	管网输配能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	COP	
当前情景 (情景1)	城镇	152	10%	45%	10%	0.35	100%	2.5	2.80
	农村	70	5%	0%	0%	0.60	50%	—	2.80
自然增长 (情景2)	城镇	200	20%	60%	0%	0.20	100%	1.2	4.00
	农村	100	30%	0%	0%	0.30	60%	—	4.00
显著增长 (情景3)	城镇	200	40%	60%	0%	0.20	100%	1.2	4.00
	农村	100	90%	0%	0%	0.30	60%	—	4.00

图5-5给出了不同情景下的碳排放量，当前建筑供暖碳排放量达到了8.83亿tCO<sub>2</sub>/年，由于城镇集中供热和热电联产方式占比较大，因此间接碳排放量较多，而农村散煤燃烧较多，直接排放量更大。对于自然增长情景（情景2），采取电力改革、围护结构改造等措施，但是热泵占比自然增长，未大规模推广，2060年的碳排放量仍有4.95亿tCO<sub>2</sub>/年，仅能实现43%的减排，建筑供暖碳排放量仍然巨大。对于显著增长情景（情景3），2060年热泵技术得到大力推广，仅有2.09亿tCO<sub>2</sub>/年的碳排放，可实现76%的减排。可见，推广热泵技术能大规模降低建筑供暖碳排放。显著增长情景（情景3）下，仍有少量碳排放，一方面是热电联产会产生间接碳排放；另一方面是电力生产仍存在碳排放。若2060年热泵占比达到100%，电力实现零碳，其碳排放量可进一步下降。

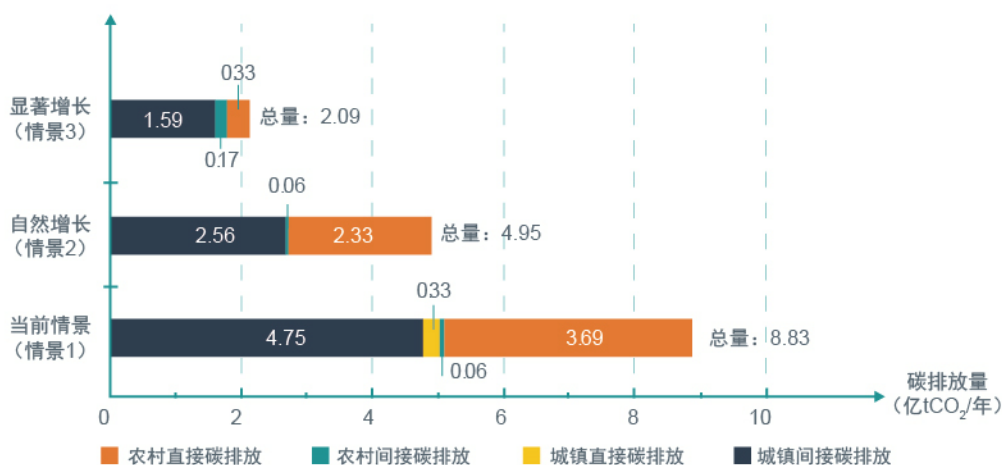


图5-5 建筑供暖不同情景下的碳排放

图5-6给出了不同热泵增速下2020~2060年的碳排放量与潜在减排量，不同增速的含义如表5-2所示。在热泵零增速下，建筑供暖的碳排放量缓慢降低，碳减排仅来源于需求变化、热电联产规模扩大和电力碳排放降低，因此热泵减排量为0；在低、中、高增速下，碳排放量逐年降低，且热泵占比增速越大，减排效果越明显。在高增速下，2060年碳排放量仅有2.09亿tCO<sub>2</sub>/年，减排量达到6.74亿tCO<sub>2</sub>/年，可实现76%的碳减排，其中热泵减排量3.91亿tCO<sub>2</sub>/年（占比58%），需求侧减排量为1.67亿tCO<sub>2</sub>/年，电力端减排量为0.41亿tCO<sub>2</sub>/年；另外热电联产规模扩大也贡献了0.75亿tCO<sub>2</sub>/年的减排量。可见，热泵的快速普及可以带来显著的碳减排。

表5-2 建筑供暖不同热泵增速的计算指标

年份		热泵占比				供暖面积 (亿m <sup>2</sup> )	年耗热量 (GJ/m <sup>2</sup> )	同时 使用率	管网输配能耗 (kWh/m <sup>2</sup> )	COP
		高增速	中增速	低增速	零增速					
2020	城镇	10%	10%	10%	10%	152	0.35	1	2.5	2.8
	农村	5%	5%	5%	5%	70	0.60	0.5	—	2.8
2030	城镇	22%	18%	14%	10%	180	0.29	1	2.1	3.30
	农村	32%	21%	11%	5%	80	0.48	0.53	—	3.30
2040	城镇	31%	24%	17%	10%	195	0.24	1	1.7	3.60
	农村	54%	37%	18%	5%	90	0.40	0.56	—	3.60
2050	城镇	37%	28%	19%	10%	200	0.21	1	1.4	3.85
	农村	75%	50%	25%	5%	100	0.34	0.58	—	3.85
2060	城镇	40%	30%	20%	10%	200	0.20	1	1.2	4.00
	农村	90%	60%	30%	5%	100	0.30	0.6	—	4.00

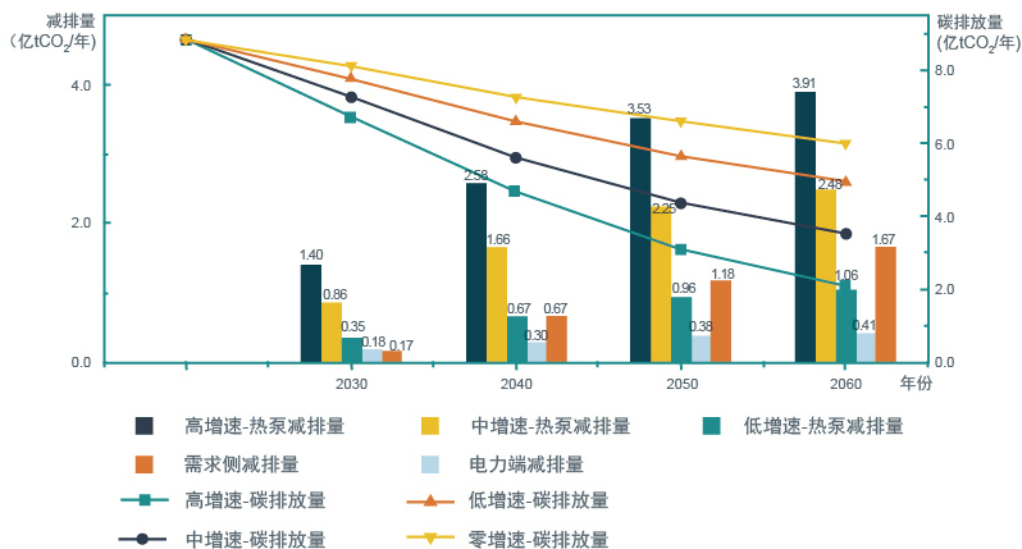


图5-6 建筑供暖不同热泵增速下的碳排放量与减排量



图5-7给出了采用不同热源为建筑供暖的碳排放强度变化，燃煤、燃油和燃气供暖方式的碳排放强度基本不变。直接电热供暖方式的碳排放随着电力生产方式改造逐年下降，但是2060年其碳排放强度仍显著高于热泵。研究也指出，直接电热供暖可行性较差<sup>[15]</sup>。

热泵的碳排放随电力碳排放因子的下降而不断下降，直至趋近于0，且热泵COP越高，其碳排放强度越低。在2030~2060年间，热泵都是碳排放最低的供暖方式，且在持续下降，相对于其它供暖方式具有显著的节能减排优势，也说明热泵技术是建筑供暖领域实现碳中和的最优路径。

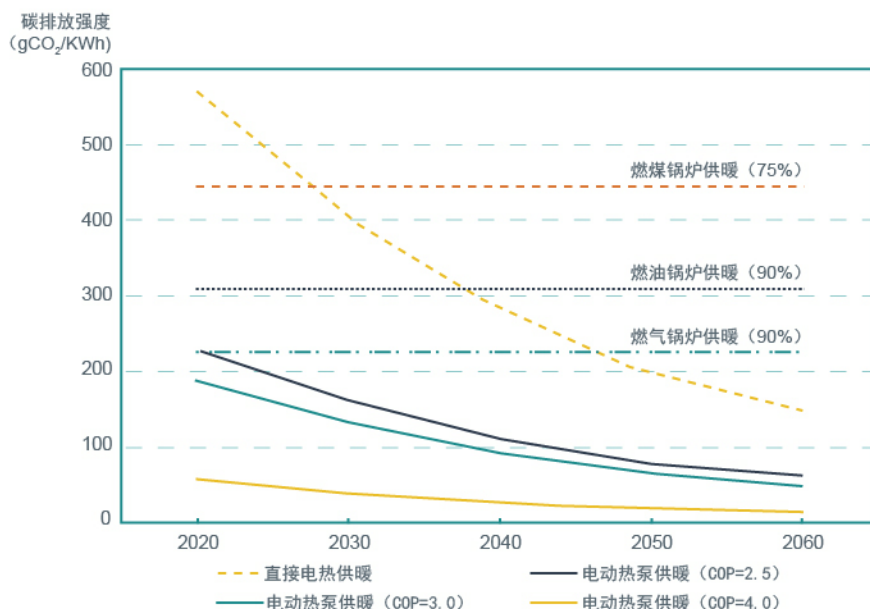


图5-7 采用不同热源供暖的碳排放强度变化

除分析的电动热泵潜在减排量贡献之外，吸收式热泵在城镇集中供暖中也正在扩大应用，在电厂、工业余热回收，烟气热回收、吸收式换热等大温差供热系统中变得越来越重要，也是供暖热源、输配系统减排的重要技术措施。

### 5.2.3 热水供应减碳分析

目前，我国居民主要通过燃气热水器、电热水器、太阳能热水器等方式制备生活热水，也造成了较多的碳排放<sup>[4]</sup>。未来，我国城镇建筑面积逐年增长；另外，随着生活水平的提高，热水供应普及率和每户的热水使用量增加，使得热水供应热负荷和生活热水耗能增加。而现阶段我国热水供应大多依赖燃气或直接电热，随着需求增加，碳排放势必更大，因此热水供应的碳减排也不容忽视。

热水供应同样设置了2个2060年的情景和1个当前情景，并进行不同情景的碳排放量核算。各情景计算指标如表5-3所示，其中，现阶段我国住房空置率约为城镇20%<sup>[16]</sup>、农村40%，而未来城镇合理空置率应该控制在10%。燃气热水器的效率取90%。各情景设计如下：

当前情景（情景1）：按照目前我国建筑规模、空置率、普及率和热泵占比得到的碳排放量。

自然增长情景（情景2）：建筑规模、热水供应普及率、热负荷指标均随需求增加，电力生产方式得到改造，空置率下降至城镇10%、农村20%；热泵占比自然增长至15%，仍然存在燃气热水器和电热水器，其它为太阳能热水器。

显著增长情景（情景3）：在情景2的基础上，热泵占比显著增长到90%，燃气热水器基本被取代，城镇有少量电热水器，农村仍有少量太阳能热水器。

表5-3 热水供应各情景的计算指标

情景	当前情景（情景1）		自然增长（情景2）		显著增长（情景3）	
	城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村
住宅面积（亿m <sup>2</sup> ）	292	236	350	210	350	210
热负荷指标 <sup>[17]</sup> （W/m <sup>2</sup> ）	3.0	2.0	4.0	3.0	4.0	3.0
热泵热水器占比	2%	2%	15%	15%	90%	90%
燃气热水器占比	40%	10%	33%	4%	0%	0%
电热水器占比	50%	30%	40%	22%	10%	0%
热水供应普及率	100%	50%	100%	90%	100%	90%
住房空置率	20%	40%	10%	20%	10%	20%
COP	3.00	3.00	4.50	4.50	4.50	4.50

图5-8为不同情景下我国热水供应的碳排放。当前（情景1）热水供应造成了2.57亿tCO<sub>2</sub>/年的碳排放，农村由于生活热水普及率低、采用太阳能热水器较多，因此农村碳排放低于城镇。对于自然增长情景（情景2），若2060年热泵自然增长至占比15%，但仍存在大量燃气和电热水器，碳排放量会小幅降至1.79亿tCO<sub>2</sub>/年。对于显著增长情景（情景3），热泵得到大力推广且占比显著增长，则碳排放量可降低至0.62亿tCO<sub>2</sub>/年，相对于当前减排76%，比自然增长情景（情景2）降低1.17亿tCO<sub>2</sub>/年。由此可见，热泵在建筑热水供应中的减排潜力也很巨大。

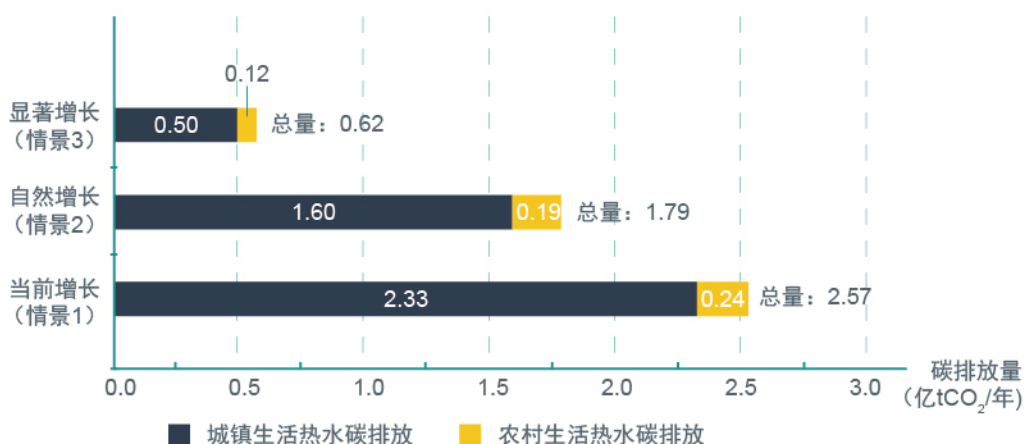


图5-8 热水供应不同情景下的碳排放

图5-9给出了建筑热水供应在不同热泵增速下2020~2060年的碳排放量与减排量，不同增速的含义如表5-4所示。由表5-4可知，随着碳中和推进，燃气热水器和电热水器逐步淘汰，热泵热水器占比增加，光伏技术的发展使得太阳能热水器占比也逐渐降低。

表5-4 建筑热水供应不同热泵增速的计算指标

年份	2020		2030		2040		2050		2060		
	城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村	
高增速占比	热泵热水器	2%	2%	27%	30%	50%	60%	70%	80%	90%	90%
高增速占比	电热水器	50%	30%	40%	20%	30%	15%	20%	6%	10%	0%
高增速占比	燃气热水器	40%	10%	30%	7%	20%	15%	10%	2%	0%	0%
中增速占比	热泵热水器	2%	2%	20%	20%	35%	35%	45%	45%	50%	50%
中增速占比	电热水器	50%	30%	43%	32%	38%	33%	34%	34%	31%	35%
中增速占比	燃气热水器	40%	10%	30%	8%	22%	7%	17%	6%	15%	5%
低增速占比	热泵热水器	2%	2%	8%	8%	14%	14%	18%	18%	20%	20%
低增速占比	电热水器	50%	30%	48%	35%	46%	40%	45%	43%	44%	45%
低增速占比	燃气热水器	40%	10%	38%	8%	36%	7%	34%	6%	32%	5%
零增速占比	热泵热水器	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
零增速占比	电热水器	50%	30%	50%	30%	50%	30%	50%	30%	50%	30%
零增速占比	燃气热水器	40%	10%	40%	10%	40%	10%	40%	10%	40%	10%
热水供应普及率		100%	50%	100%	65%	100%	75%	100%	84%	100%	90%
住房空置率		20%	40%	17%	33%	14%	27%	12%	23%	10%	20%
建筑面积 (亿m <sup>2</sup> )		292	236	327	229	342	231	348	220	350	210
热负荷 (W/m <sup>2</sup> )		3.0	2.0	3.3	2.3	3.6	2.6	3.8	2.8	4.0	3.0
COP		3.00	3.00	3.60	3.60	4.00	4.00	4.30	4.30	4.50	4.50

由图5-9可知，在热泵零增速情况下，碳排放量先增加后降低，降低是由于电力碳排放因子降低贡献了更多的碳减排，升高是由于需求增加导致燃气、电能消耗增加，使得碳排放增加。在高、中、低增速下，碳排放量随时间降低，且增速越大碳排放量下降越明显，2060年碳排放量越低。高增速下，2060年碳排放降至0.62亿tCO<sub>2</sub>/年，是现阶段碳排放的24%，潜在减排量达1.95亿tCO<sub>2</sub>/年，其中热泵减排量为1.49亿tCO<sub>2</sub>/年（占比76%），需求侧由于需求增加减排量为-2.39亿tCO<sub>2</sub>/年，电力端减排2.86亿tCO<sub>2</sub>/年。因此，采用热泵进行热水供应，可以大幅度降低热水供应碳排放。

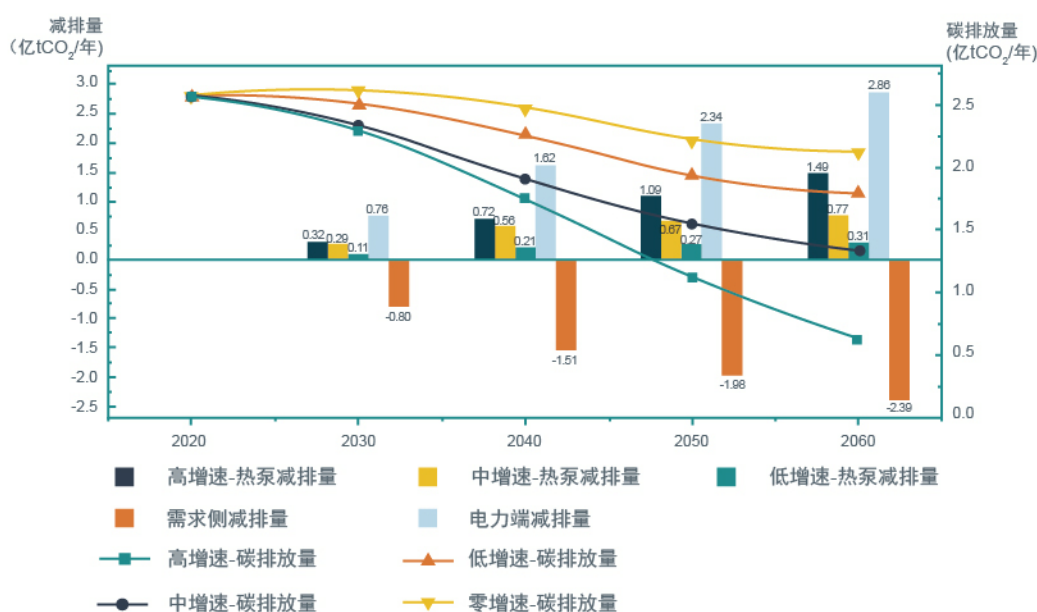


图5-9 建筑热水供应不同热泵增速下的碳排放量与减排量

图5-10给出了2060年不同热泵占比所能实现的碳排放量和潜在减排量。由图5-10可知，随着热泵占比增加，碳排放量降低，减排量增加。当热泵占比为10%时，2060年热水供应碳排放仍然巨大，为1.78亿tCO<sub>2</sub>/年；当热泵占比达到90%，且燃气和电热水器完全被取代时，就可实现85%的碳减排，2060年碳排放仅有0.40亿tCO<sub>2</sub>/年，剩余的碳排放是由于热泵消耗少量电能产生的间接碳排放，若电力有望实现“零碳”，建筑热水供应就有可能实现“零碳”。

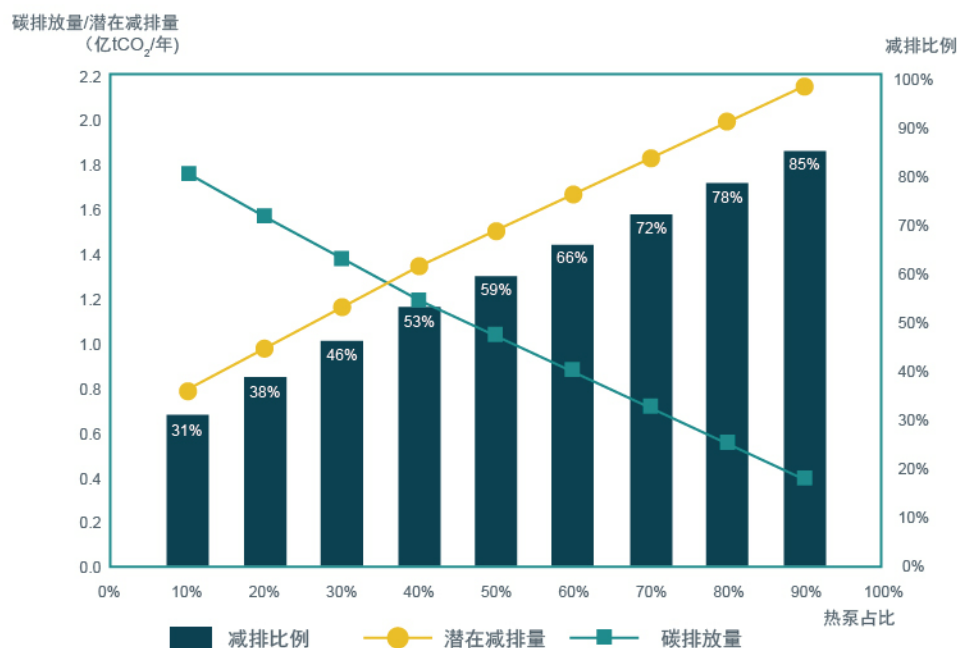


图5-10 2060年建筑热水供应碳排放量、碳减排量随热泵占比的变化

### 5.3 工业生产碳减碳分析

我国工业能耗的50%~70%以热能形式消耗，45%为中低温热量，大多在80℃~170℃之间<sup>[9]</sup>，而2020年中国工业用可再生热量仅占工业用总热能消耗的0.83%。因此，工业部门的碳减排潜力更加巨大。

#### 5.3.1 工业用热规模预测

由于供给侧结构性改革及高质量发展的不断深入，工业能耗不会持续上升，文献<sup>[18]</sup>预测中国工业能源消费总量将于2030年达到峰值 $29 \times 10^8$ tce左右，另有文献<sup>[19]</sup>预测2049年中国工业能源需求为 $21.4 \times 10^8$ tce。国家统计局给出了最近20年工业能源消费总量<sup>[20]</sup>，根据结构性改革和高质量发展趋势，并考虑工业能源发展趋势，进行我国工业能源消费规模预测，如图5-11所示。

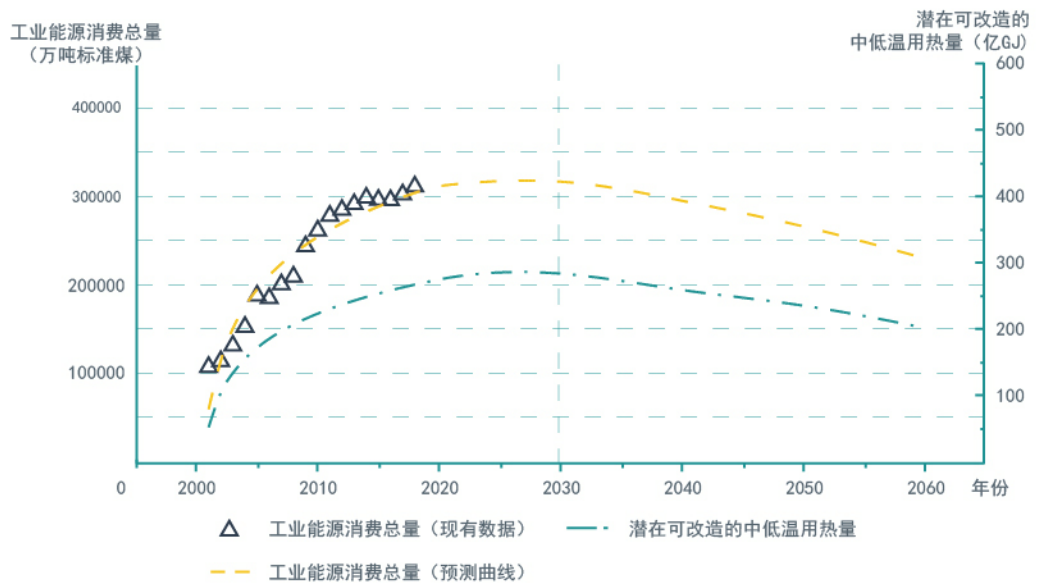


图5-11 工业能源与用热量预测

我国工业能源消费量在2020~2030年之间缓慢增加，2030年前后达到峰值 $32 \times 10^8 \text{tce}$ ，消费总量在2030~2060年之间不断下降。假定潜在可改造的中低温用热变化趋势与工业能源消费总量一致，考虑到并不是所有工业用热都适合应用热泵技术，因此取工业能源消费总量的30%为潜在可改造为热泵技术的中低温用热量，如图5-11所示。下文仅针对潜在可改造用热量部分进行碳排放分析。

### 5.3.2 工业热泵碳减排分析

综合考虑因发电系统升级引起的电力碳排放因子降低和我国工业用热规模的变化，进行2060年不同情景下的碳排放量核算，各情景计算指标如表5-5所示。各情景设置如下：

当前情景（情景1）：按照当前我国工业中低温用热量、热泵占比与COP计算得到碳排放量。

自然增长情景（情景2）：工业中低温用热量发生变化，电力生产方式得到改造，电力碳排放因子降低，热泵COP随技术发展提高至3.00；2060年热泵自然增长，占比达到8%。

显著增长情景（情景3）：在情景2的基础上，热泵得到了大力推广而显著增长，2060年潜在可改造的中低温用热中热泵占比达到90%。

表5-5 工业生产各情景的计算指标

情景	潜在可改造的中低温用热量 (亿GJ)	热泵占比	COP
当前情景(情景1)	275	1%	1.80
自然增长(情景2)	202	8%	3.00
显著增长(情景3)	202	90%	3.00

图5-12给出了我国工业中低温用热不同情景下的碳排放，现阶段（情景1）我国潜在可改造的中低温用热造成的碳排放达到了25.28亿tCO<sub>2</sub>/年；对于自然增长情景（情景2），热泵应用规模自然增长，2060年的碳排放有一定程度的下降，降至15.43亿tCO<sub>2</sub>/年；对于显著增长情景（情景3），热泵得到大力推广，热泵占比显著增长到90%，此时的碳排放量降低至4.38亿tCO<sub>2</sub>/年，相对于当前降低了83%，比自然增长情景（情景2）降低11.05亿tCO<sub>2</sub>/年。显著增长情景（情景3）剩余的碳排放是由于热泵未完全覆盖和热泵消耗的电力仍存在碳排放，说明热泵技术的在工业用热中碳减排潜力十分巨大。

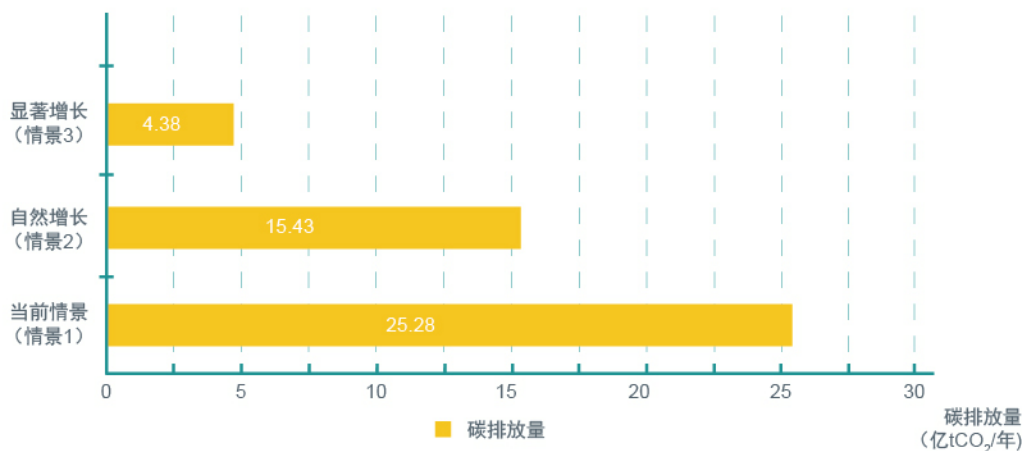


图5-12 工业生产不同情景下的碳排放

图5-13给出了不同热泵增速下逐年的碳排放量和减排量，不同增速的热泵占比变化如表5-6所示。若热泵占比增速为零，碳排放量先增加后下降，到2060年达到了18.44亿tCO<sub>2</sub>/年，排放量下降主要是由于中低温用热需求降低。在高、中、低增速下，随着热泵带来较大减排量，碳排放量逐渐降低，且增速越大降低越快、越显著。低增速时，2060年碳排放仍然有13.85亿tCO<sub>2</sub>/年，将会成为碳中和的巨大负担；而在高增速时，2060年碳排放量仅有4.38亿tCO<sub>2</sub>/年，相对于现阶段的减排量达到了20.89亿tCO<sub>2</sub>/年，其中热泵减排量为14.06亿tCO<sub>2</sub>/年（占比67%），电力端减排量为0.13亿tCO<sub>2</sub>/年，需

求侧减排量为6.70亿tCO<sub>2</sub>/年。可见，热泵高速发展可以为工业用热带来显著的碳减排。

表5-6 工业生产不同热泵增速的计算指标

年份	热泵占比				潜在可改造的中低温 用热量（亿GJ）	COP
	高增速	中增速	低增速	零增速		
2020	1%	1%	1%	1%	275	1.80
2030	24%	17%	9%	1%	284	2.30
2040	46%	31%	16%	1%	259	2.70
2050	68%	46%	23%	1%	235	2.91
2060	90%	60%	30%	1%	202	3.00

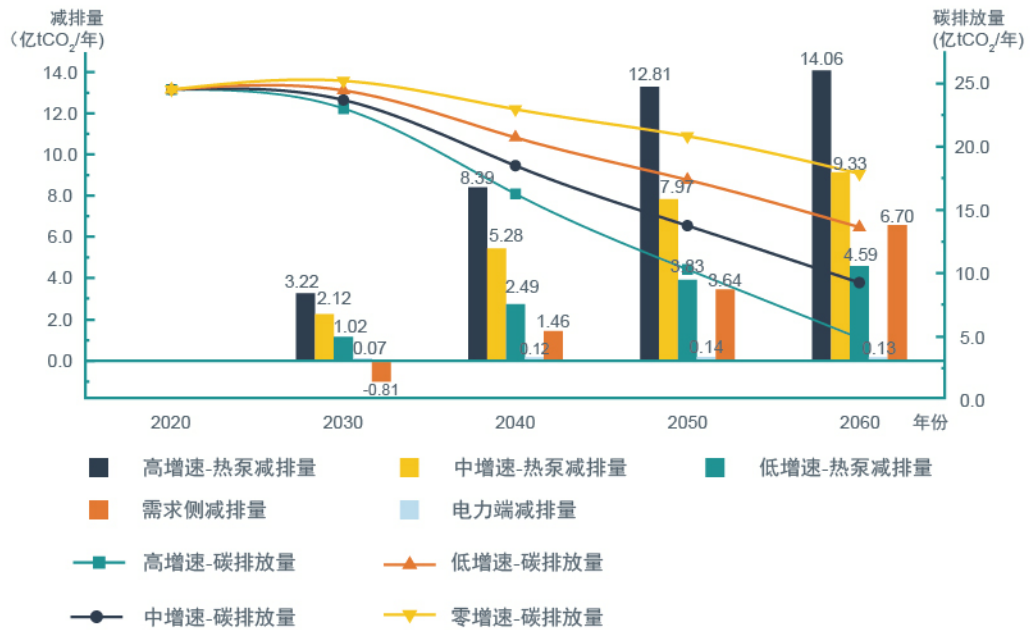


图5-13 工业生产不同热泵增速下的碳排放量与减排量

图5-14是2060年工业中低温用热碳排放量、减排量和减排百分比随热泵占比变化情况。随着2060年热泵占比增加，碳排放量迅速降低，潜在减排量和热泵减排量显著增加。当热泵占比10%时，相对于当前的减排百分比仅有33%，其中17%是由热泵带来的减排量；当热泵普及至100%时，相对于现阶段减碳89%，其中69%是纯粹由热泵应用带来的减排量，剩余的碳排放是由于热泵耗电存在的碳排放，若电力实现脱碳，则可以达到零碳排放。



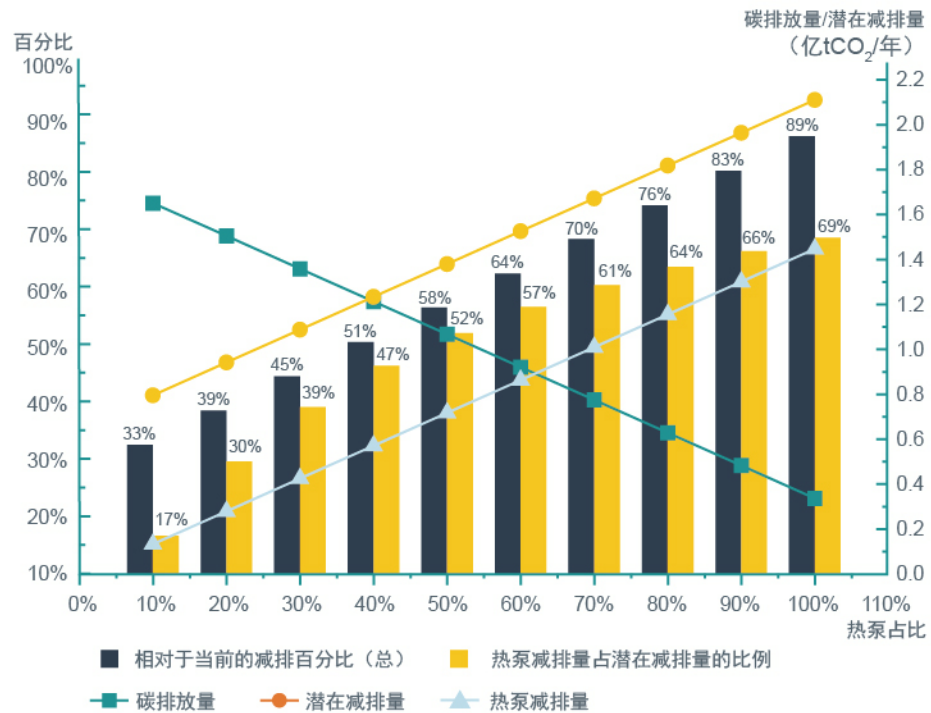


图5-14 2060年工业生产碳排放量、减排量随热泵占比的变化

由此可见，我国工业部门热泵应用碳减排潜力更加巨大，而现在工业热泵应用没有得到重视，因此要实现工业用热的碳中和，必须改革工业中低温用热的供给方式。热泵作为一种高效、清洁、低碳的供热方式，应该成为工业中低温用热的最优选择。工业部门热泵应用也将为我国工业碳减排做出很大贡献。

## 5.4 农业环境调控减碳分析

农业环境调控中的禽畜养殖、温室大棚、农作物干燥等都需要用热，而现阶段大多数温室大棚、畜禽猪舍仍然采用燃煤燃气等传统化石燃料方式供暖，造成了较大的碳排放。

### 5.4.1 温室大棚减碳分析

2006年末，全国温室面积81千公顷，大棚面积465千公顷，中小棚面积231千公顷<sup>[21]</sup>；到2016年末，全国温室占地面积334千公顷，大棚占地面积981千公顷<sup>[22]</sup>，温室大棚规模增长迅速。按国家统计局给出的近10年间农业温室大棚面积，进行规模预测，如图5-15所示。按照近年趋势，我国温室大棚面积不断增长，一方面，由于人们对饮食品种、质量要求逐渐提高，未来温室大棚面积持续增长，但另一方面，人口规模逐渐稳定，增长率会略有放缓。虽严寒地区和寒冷地区占我国国土面积70%，考虑南北方经济发展的不平衡，设约有30%温室大棚需要供暖。

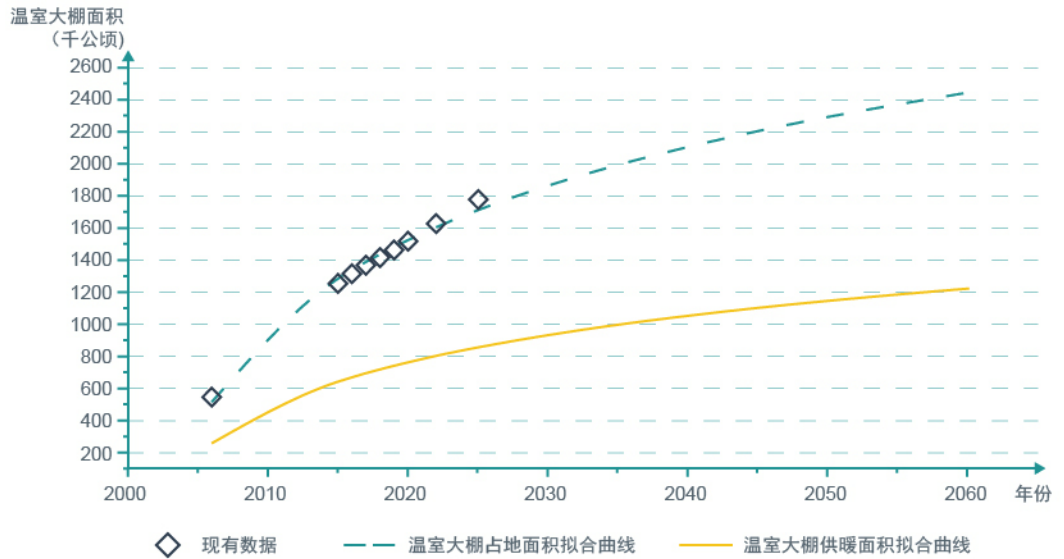


图5-15 我国温室大棚面积趋势预测

综合考虑热泵市场增长、电力生产方式变革以及温室大棚面积增长等因素，共设置3个情景，各情景的计算指标如表5-7所示。各情景含义如下：

表5-7 温室大棚各情景的计算指标

情景	温室大棚面积 (千公顷)	耗煤量指标 (kg/m <sup>2</sup> )	热泵供热占比	COP
当前情景(情景1)	1525	24	5%	2.80
自然增长(情景2)	2446	20	12%	4.00
显著增长(情景3)	2446	20	90%	4.00

当前情景（情景1）：现阶段我国农业温室大棚供暖造成的碳排放。

自然增长情景（情景2）：热泵规模自然增长的情景，2060年农业温室大棚热泵供热占比达12%；温室大棚规模增加，电力排放因子下降，温室大棚保温性能改善使得耗煤量指标下降，热泵COP随技术改进而提高。

显著增长情景（情景3）：在情景2的基础上，热泵技术得到大力推广，2060年温室大棚中热泵供热显著增长到占比90%。

各情景的碳排放量如图5-16所示。现阶段（情景1）我国温室大棚燃煤供暖造成的碳排放总量达到1.25亿tCO<sub>2</sub>/年；对于自然增长情景（情景2），热泵自然增长至2060年的12%，由于供暖需求增加，碳排放量仍然会增加，达到1.52亿tCO<sub>2</sub>/年，说明温室大棚

热泵供暖规模缓慢增长并不能抑制需求增长带来的碳排放量增加，2060年温室大棚碳排放将持续上升，最终成为碳中和的巨大负担。对于显著增长情景（情景3），热泵在农业中得到大力推广，热泵供热占比显著增长达到90%，此时碳排放总量仅有0.34亿tCO<sub>2</sub>/年，相对于当前减排73%，比自然增长情景（情景2）降低1.18亿tCO<sub>2</sub>/年。由此可见，热泵带来的减排效果非常显著，而且随着电力行业逐渐实现“零碳”，且热泵占比达到100%，农业温室大棚供暖有望实现“零碳排放”。

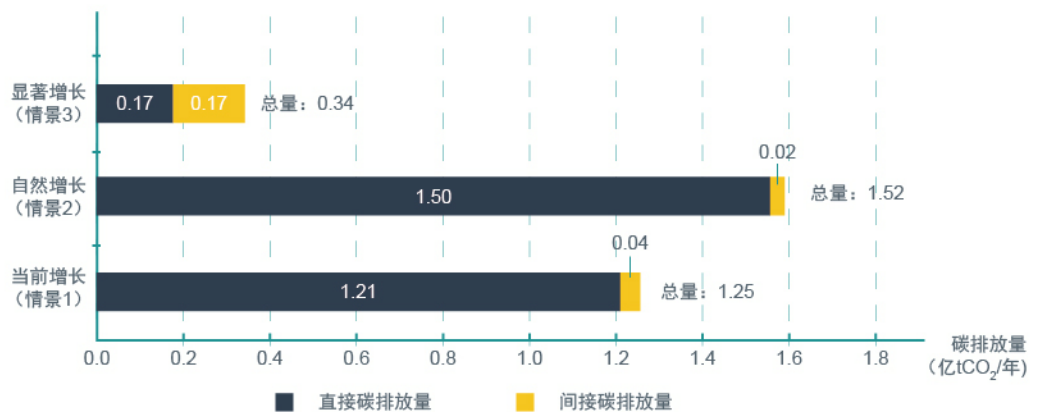


图5-16 温室大棚不同情景下2060年碳排放

图5-17是不同热泵占比增速下逐年的潜在减排量和和排放量变化，不同增速的热泵占比变化见表5-8。在热泵占比没有增长的情况下，碳排放量持续增加，2060年碳排放量将达到1.63亿tCO<sub>2</sub>/年；在低、中、高增速下，碳排放量先增后减，且增速越大峰值越提前，2060年的碳排放量越低。高增速下，最终碳排放量降至0.34亿tCO<sub>2</sub>/年，相对当前的减排量为0.91亿tCO<sub>2</sub>/年，实现了73%的减排，其中热泵减排量为1.29亿tCO<sub>2</sub>/年，由于需求明显增加导致碳排放量放升高，因此需求侧减排量为-0.42亿tCO<sub>2</sub>/年，电力端减排0.04亿tCO<sub>2</sub>/年。因此，热泵占比增速越大减排效果越明显，而热泵占比增速快慢主要依赖于相关技术与政策的支持，只要热泵技术得到足够的支持，农业温室大棚供暖碳中和便可实现。

表5-8 温室大棚不同热泵增速的计算指标

年份	热泵占比				温室大棚面积 (千公顷)	耗煤量指标 (kg/m <sup>2</sup> )	COP
	高增速	中增速	低增速	零增速			
2020	5%	5%	5%	5%	1525	24	2.80
2030	24%	17%	9%	5%	1865	23	3.30
2040	46%	31%	16%	5%	2106	22	3.70
2050	68%	46%	23%	5%	2293	21	3.91
2060	90%	60%	30%	5%	2446	20	4.00

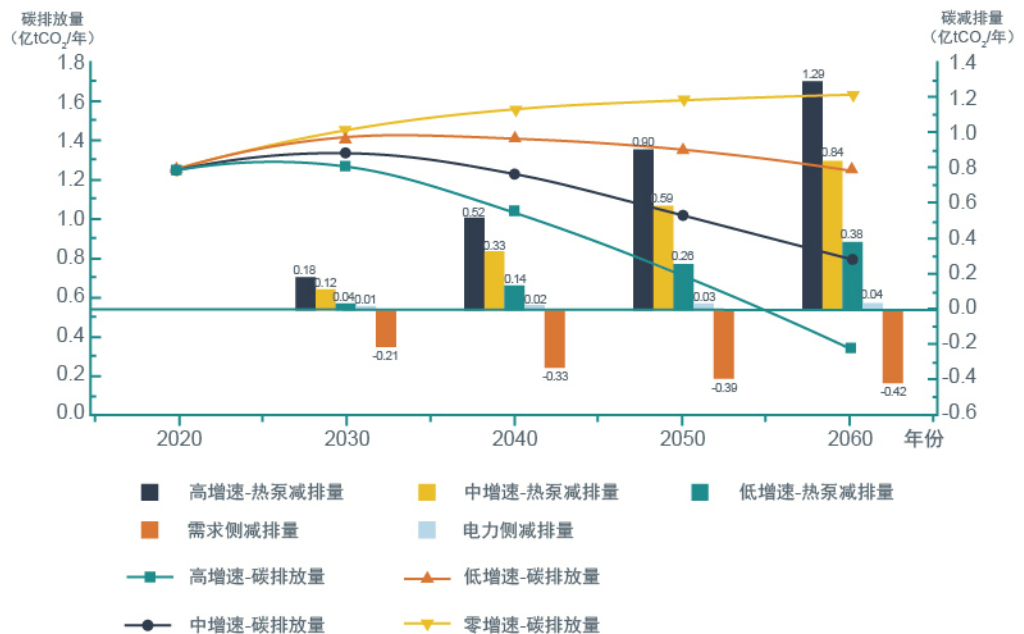


图5-17 农业大棚不同热泵增速下的碳排放量与减排量

图5-18给出了2060年碳排放量、潜在减排量和减排比例随热泵占比的变化。随着热泵占比增加，碳排放量降低，潜在减排量和热泵减排量增加，减排百分比增加。热泵占比10%时，总碳排放量仍然增加；当2060年热泵占比超过30%时，才能实现碳减排；若热泵实现100%全覆盖，则有望减少温室大棚供热85%的碳排放量，剩余仍然存在碳排放是由于电力未完全脱碳。

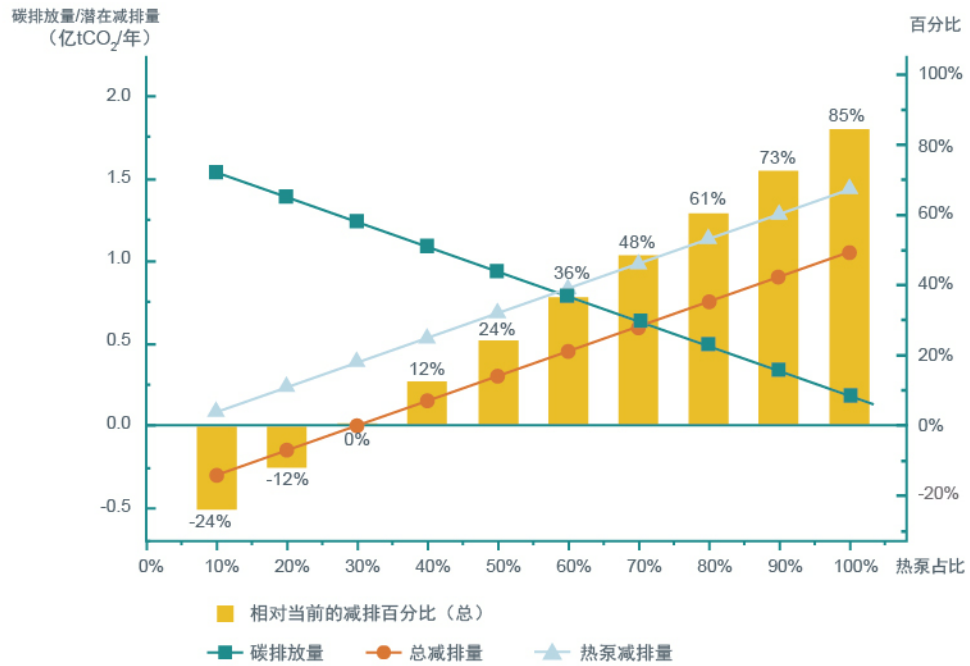


图5-18 2060年温室大棚碳排放量、减排量随热泵占比的变化

#### 5.4.2 畜禽养殖减碳分析

畜禽养殖的环境与肉类品质密切相关，因此畜禽养殖的环境调控非常重要，目前养猪场采用热泵供暖的比例还不到10%<sup>[23]</sup>，大多为传统燃煤方式供暖。国家统计局给出了近年“猪年底头数”和“家禽出栏量”，如图5-19所示。近年来猪的存量不断浮动，没有明显增加，随着未来人们饮食结构的改善，且人口趋稳，猪的存栏量显著增长的可能性不大；家禽出栏量近年来波动中略有增长。根据既有数据给出未来规模预测如图5-19所示。

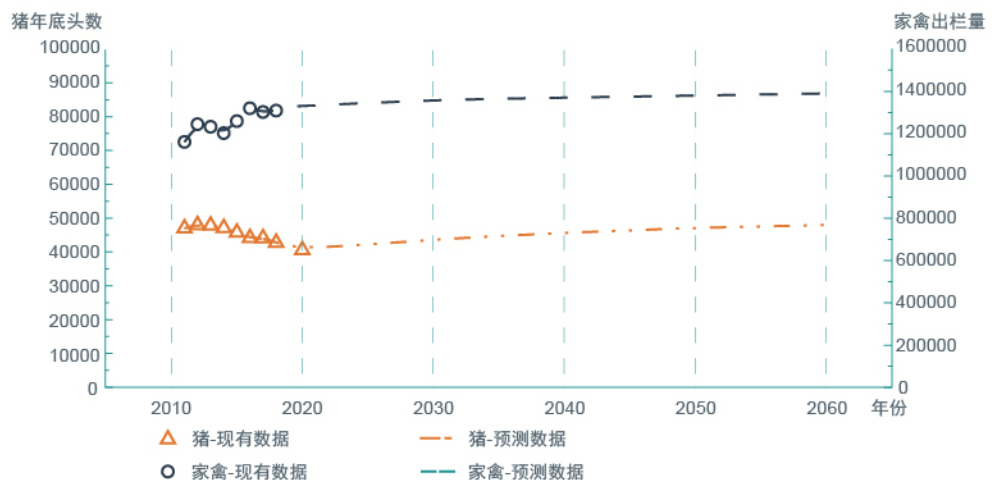


图5-19 猪和家禽养殖规模预测

《国家标准化规模养猪场建设规范》（NY/T1568-2007）列出了不同阶段猪的饲养密度，根据数据可得到平均密度为 $2.7\text{m}^2/\text{头}$ <sup>[24]</sup>。对于鸡舍等禽类养殖，我国很少采取地面平养，多采用笼养，饲养密度达到 $20\sim 24\text{只}/\text{m}^2$ <sup>[25]</sup>；另外，我国禽类饲养周期为 $40\sim 80$ 天，因此每年大概可出栏5次。保温节能改造后的猪舍热负荷可按照 $40\text{W}/\text{m}^2$ 计算，不保温改造的热负荷按照 $70\text{W}/\text{m}^2$ 配置<sup>[26]</sup>，鸡舍热负荷指标取 $120\text{W}/\text{m}^2$ <sup>[27]</sup>。供暖期取100天，根据气候区分布并兼顾经济发展，取50%的畜禽猪舍需要冬季供暖。

综合考虑热泵市场增长速度、电力生产方式变革以及畜禽养殖面积增长等因素，共设置3个情景，各情景的计算指标如表5-9所示。

当前情景（情景1）：现阶段我国畜禽养殖供暖造成的碳排放。

自然增长情景（情景2）：热泵规模自然增长的情景，2060年畜禽养殖热泵供暖占比达12%；畜禽养殖规模略有增加，电力排放因子下降，畜禽养殖保温性能改善使得热负荷指标下降，热泵COP随技术进步而提高。

显著增长情景（情景3）：在情景2的基础上，热泵技术得到大力推广，2060年畜禽养殖中热泵供热显著增长到占比90%。

表5-9 畜禽养殖各情景计算指标

情景	猪年底头数 (万头)	家禽出栏量 (万只)	热负荷指标 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )		热泵占比	COP
			猪舍	家禽		
当前情景(情景1)	40650	1350000	70	120	5%	2.80
自然增长(情景2)	48030	1390000	50	90	12%	4.00
显著增长(情景3)	48030	1390000	50	90	90%	4.00

各情景碳排放量如图5-20所示，现阶段（情景1）畜禽养殖供暖碳排放达到了0.36亿 $\text{tCO}_2/\text{年}$ ，由于现阶段燃煤方式占比大，所以直接碳排放量更大。若热泵规模自然增长（情景2），由于畜禽养殖保温性能改善，热负荷指标下降，而总体规模增加不多，最终使得碳排放略有下降，降至0.23亿 $\text{tCO}_2/\text{年}$ 。若热泵占比显著增长（情景3），碳排放将降至0.05亿 $\text{tCO}_2/\text{年}$ ，且由于热泵占比更大，耗电造成的间接碳排放较大，说明热泵可以显著降低碳排放。

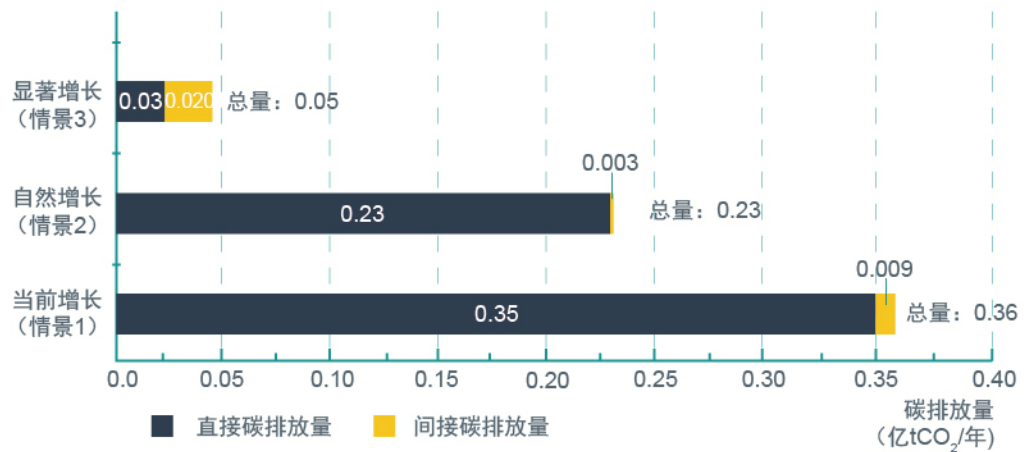


图5-20 畜禽养殖不同情景下的碳排放

图5-21是不同热泵增速下的逐年的碳排放量和潜在减排量变化，不同增速下的指标如表5-10所示。在各种增速下，碳排放量均逐年下降，在零增速情况下，虽然热泵占比未变，但是由于畜禽养殖保温改造、电力碳排放下降，而规模增加不大，也会使得碳排放逐年下降。热泵增速越高，排放量降低越快，在高增速下，2060年碳排放量降低至0.05亿tCO<sub>2</sub>/年，潜在减排量为0.31亿tCO<sub>2</sub>/年，其中由热泵带来的减排量为0.20亿tCO<sub>2</sub>/年（占比65%），电力端减排为0.004亿tCO<sub>2</sub>/年，需求侧减排为0.11亿tCO<sub>2</sub>/年，减排效果显著。

表5-10 畜禽养殖不同热泵增速的计算指标

年份	热泵占比增速				猪年底头数 (万头)	猪舍热负荷 指标 (W/m <sup>2</sup> )	家禽出栏量 (万只)	禽舍热负荷 指标 (W/m <sup>2</sup> )	COP
	高	中	低	零					
2020	5%	5%	5%	5%	40650	70	1350000	120	2.80
2030	24%	17%	9%	5%	43884	62	1360000	112	3.30
2040	46%	31%	16%	5%	45728	54	1370000	104	3.70
2050	68%	46%	23%	5%	47250	47	1380000	97	3.91
2060	90%	60%	30%	5%	48030	40	1390000	90	4.00

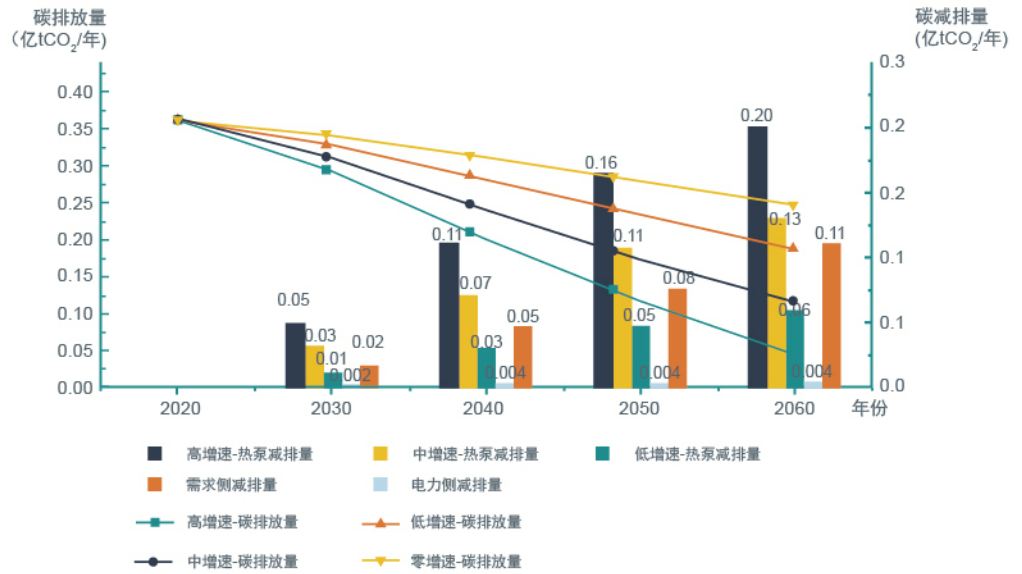


图5-21 畜禽养殖不同热泵增速下的碳排放量与减排量

图5-22是2060年碳排放量、碳减排量和减排百分比随热泵占比的变化。随着热泵占比增加，碳排放量逐渐降低，热泵减排量及减排百分比增加。当热泵占比10%时，能实现36%的碳减排，其中6%是热泵带来的减排量；而当热泵占比达到100%时，可实现94%的碳减排，其中64%的减排量由热泵带来，剩余6%的碳排放是由于热泵消耗电能带来的间接碳排放，只要电力脱碳，畜禽养殖供暖就会实现“零碳”。

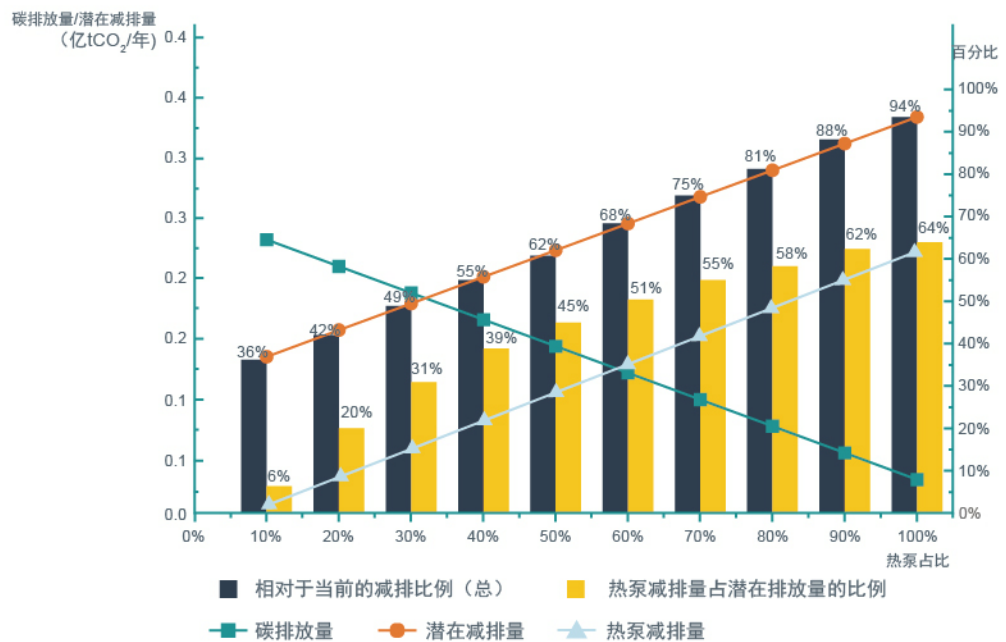


图5-22 2060年畜禽养殖碳排放量、减排量随热泵百分比变化



## 5.5 热泵应用对碳中和的贡献

根据5.2~5.4节分析，各行业的潜在减排量汇总如表5-11所示。在显著增长情景（情景3）下，我国仅建筑供暖、生活热水供应，工业生产中低温用热，农业温室大棚以及畜禽养殖潜在的减排总量就达到30.81亿tCO<sub>2</sub>/年。2019年我国与能源相关的碳排放量为98亿吨<sup>[10]</sup>，由此计算，热泵带来的减排量相当于现阶段我国能源碳排放总量的31.4%。自然增长情景（情景2）下，2060年相关领域碳排放仍有23.92亿tCO<sub>2</sub>/年。而若采取积极措施，推动热泵发展和大规模应用，使热泵实现显著增长，则建筑供暖、热水供应，工业生产中低温用热，农业温室大棚以及畜禽养殖等领域的碳排放仅为7.48亿tCO<sub>2</sub>/年，可实现80%的碳减排，减排量是自然增长情景（情景2）下的2倍以上，可见热泵可以为上述行业的碳达峰、碳中和做出巨大贡献！

表5-11 各行业2060年潜在减排量和碳排放量汇总

行业	显著增长（亿tCO <sub>2</sub> /年）		自然增长（亿tCO <sub>2</sub> /年）		当前情景（亿tCO <sub>2</sub> /年） 排放量
	减排量	排放量	减排量	排放量	
建筑供暖	6.74	2.09	3.88	4.95	8.83
建筑生活热水	1.95	0.62	0.78	1.79	2.57
工业中低温用热	20.89	4.38	9.85	15.43	25.28
农业温室大棚	0.91	0.34	-0.27	1.52	1.25
农业畜禽养殖	0.31	0.05	0.13	0.23	0.36
总量	30.81	7.48	14.37	23.92	38.29

图5-23给出了热泵在各行业的潜在减排量与现阶段碳排放量的占比。由图5-23可知，显著增长情景（情景3）下，潜在减排量可达我国现阶段能源活动总排放量的31.4%，其中建筑部门（包括建筑供暖和热水供应）贡献8.9%减排量，工业生产中的中低温用热热泵替代贡献21.3%，农业环境调控（温室大棚和畜禽养殖）占比1.2%。另外，上述数据均是在2060年电力未完全脱碳、热泵未实现100%覆盖的条件下得到的，若电力实现脱碳、热泵占比达到100%，则潜在减排量可达到现阶段碳排放量的39.1%（图5-24），即可以减少现阶段近40%的碳排放，减排潜力十分巨大。

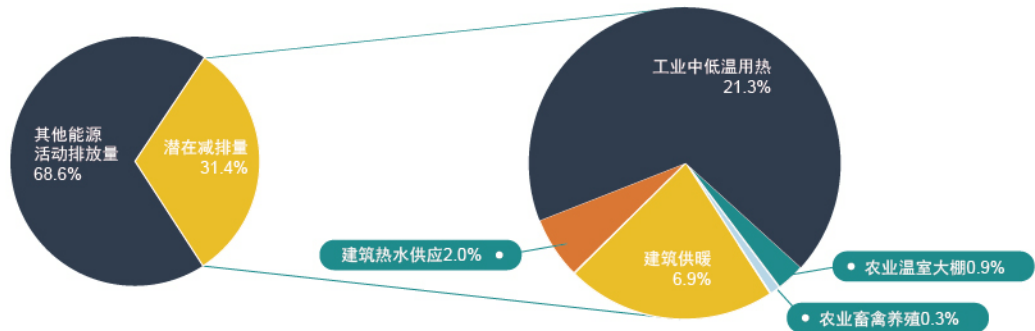


图5-23 显著增长情景下潜在总减排量在各行业的占比

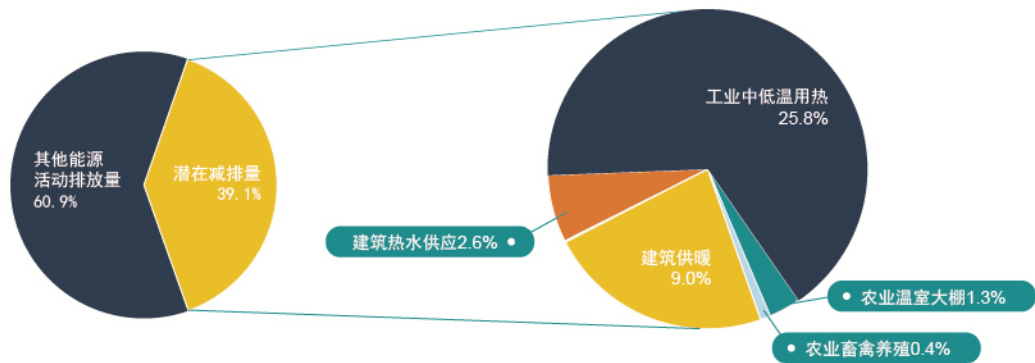


图5-24 电力完全脱碳、热泵全覆盖条件下潜在减总排量在各行业的占比

表5-12给出了各行业热泵、电力端和需求侧的分项减排量汇总。由表5-12可知，单独由热泵带来的减排量达到了20.95亿tCO<sub>2</sub>/年，占我国现阶段碳排放总量（98亿t）的21%。另外，由于电力碳排放因子下降带来的电力端减排总量为3.44亿tCO<sub>2</sub>/年，由于需求变化带来的需求侧碳减排量为5.67亿tCO<sub>2</sub>/年。其中，建筑热水供应和农业温室大棚由于需求增加迅速，需求侧减排量为负值，即需求变化引起碳排放量增加。图5-25给出了不同来源的碳减排总量占比，其中热泵减排量占比最大，达到了70%，说明热泵带来的减排量最多，减排潜力最大；另外，电力减排占比11%，需求侧减排占比19%。

表5-12 各行业热泵、电力端、需求侧减排量汇总

分类	热泵减排量 (亿tCO <sub>2</sub> /年)	电力端减排量 (亿tCO <sub>2</sub> /年)	需求侧减排量 (亿tCO <sub>2</sub> /年)	潜在减排量 (亿tCO <sub>2</sub> /年)
建筑供暖	3.91	0.41	1.67	6.00
建筑热水供应	1.49	2.86	-2.39	1.95
工业中低温用热	14.06	0.13	6.70	20.89
农业温室大棚	1.29	0.04	-0.42	0.90
农业畜禽养殖	0.20	0.004	0.11	0.32
总量	20.95	3.44	5.67	30.07

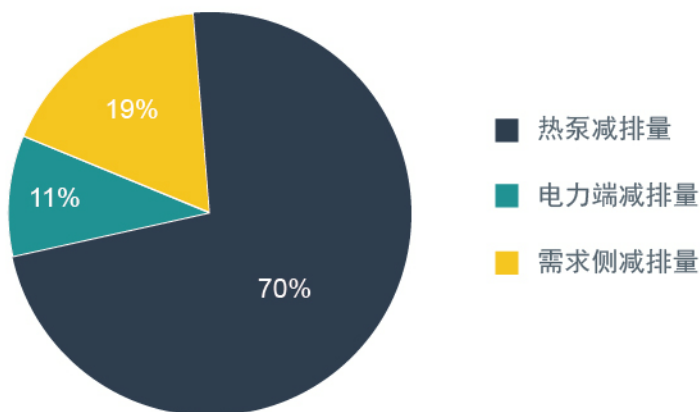


图5-25 不同来源的减排总量占比

图5-26给出了热泵占比高增速条件下，建筑行业（供暖和热水供应）、工业生产（中低温用热）、农业环境调控（农业大棚和畜禽养殖）的碳排放量与减排量变化。我国总体碳达峰之前（2020~2030），上述碳排放量有所下降，2030年碳排放量降至33.38亿tCO<sub>2</sub>/年，在2030年我国碳达峰以后迅速下降，2060年降到7.48亿tCO<sub>2</sub>/年，下降81%。热泵减排量、电力端减排量和需求侧减排量均逐年增加，2020~2030年由于需求增加，热泵和其他方面减排量较低，使得需求侧减排量为负值。2030年热泵减排量为4.96亿tCO<sub>2</sub>/年，电力端减排1.02亿tCO<sub>2</sub>/年，需求侧碳排放增加1.64亿tCO<sub>2</sub>/年，减排总量达到4.91亿tCO<sub>2</sub>/年。2060年热泵减排量达到了20.95亿tCO<sub>2</sub>/年，电力端减排量达3.44亿tCO<sub>2</sub>/年，需求侧减排量达5.67亿tCO<sub>2</sub>/年，减排总量为30.81亿tCO<sub>2</sub>/年。可见，热泵技术应用带来巨大的减排效果，随着热泵技术进一步推广、电力行业进一步脱碳，这三个部门的碳减排量势必更加巨大！

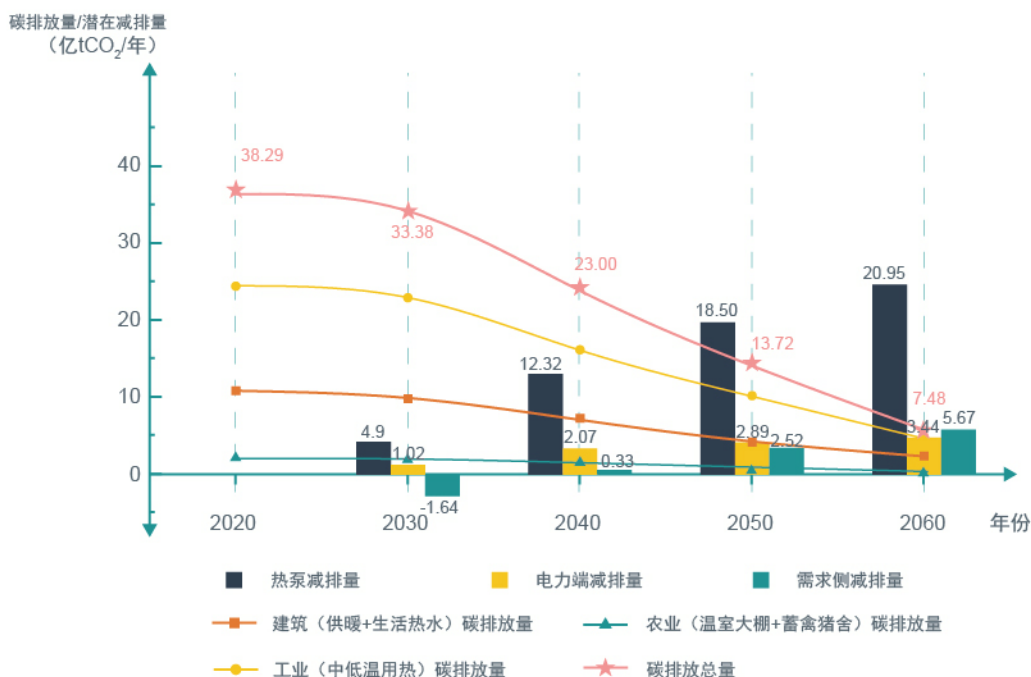


图5-26 碳排放总量逐年变化

另外，热泵技术还广泛应用于干燥、交通运输等场景，在终端电气化趋势下，热泵技术还可减少对电力等能源供应部门压力，减少电力需求，助力电力行业碳中和，因此热泵带来的减排量会更加巨大。随着热泵应用不断推广，热泵技术一定会带来非常可观的减排量，将会为我国碳达峰、碳中和事业做出重要贡献！

## 5.6 热泵应用对电力的影响

### 5.6.1 热泵应用的电力需求

随着我国碳中和的推进，零碳电力逐步增多，风电、光电、水电、核电为成为电力供应的主力军，终端用能电气化成为趋势。未来用能结构会逐步减少对燃料的依赖，尽可能使用电力替代燃料制热，最终实现电气化，因此未来电力消耗量将会迅速增加，电网供电负荷增加。热泵大规模推广也会一定程度上增加电网负荷，表5-13给出了热泵显著增长情景下需要的峰值电负荷与耗电量估算值，以及相对于直接电热的节省量。热泵若实现显著增长，则峰值负荷达到6.99亿kW，需要消耗电能23590亿kWh/年。而相对于直接电热节省量达到了54484亿kWh，峰值电负荷降低了17.64亿kW，大大减轻了电网的供电负荷。

表5-13 热泵显著增长情景下的电负荷与节省量

分类	热泵所需电负荷		相对于直接电热的节省量	
	峰值电负荷（亿kW）	年耗电量（亿kW）	峰值电负荷（亿kW）	年耗电量（亿kW）
建筑供暖	1.23	2476	3.68	6468
建筑热水供应	1.03	3002	3.60	10508
工业中低温用热	3.84	16830	7.69	33661
农业温室大棚	0.80	1152	2.40	3456
农业畜禽养殖	0.09	130	0.27	391
总量	6.99	23590	17.61	54484

### 5.6.2 热泵对电网的改善

由于发电能力和用电负荷不匹配、缺少有效的快速高效的电力调峰手段、相配套的电力输送能力不足等原因，可再生能源发电仍存在消纳困难的问题，如2015年京津冀地区北部与内蒙连接处大规模陆上风电场弃风超过20%。根据国家能源局的统计，2019年可再生能源发电量达2.04万亿千瓦时，发电量占全部发电量比重为27.9%，全国主要流域弃水电量约300亿千瓦时，弃风电量169亿千瓦时，弃光电量46亿千瓦时。因此在用电终端上，未来应该发展更加灵活用电的柔性负载，实现风电、光电等可在能源发电的有效消纳。

利用部分热系统热惯性大的特点，采用电动热泵供热在一定的控制调节下，可实行“需求侧响应”的柔性用电模式。即在风电、光电充裕而电网电力负荷低谷时，用电力驱动热泵供热；在风电、光电不足而电力负荷达到高峰时，停止电力供热，利用热系统本身的热惯性维持被控对象的热状态，从而平衡风电、光电发电能力与电力负荷需求间的不匹配问题，解决弃风弃光问题。

如空气源热泵建筑供暖即可利用建筑物本身的热惯性，通过接受电力调控中心命令，作为虚拟电力调峰站，对京津冀电网进行削峰填谷起到重要作用<sup>[15]</sup>。技术路径如下：1）通过集中调控设置每台空气源热泵运行在强行开启、强行停止、自主控制三种状态之一；2）在电网调度中心根据电网负荷峰谷变化和风电状况向各空气源热泵发出调度指令，使热泵按照电力调峰的需求运行。计算表明，若每台热泵连续接受“强开”或“强关”命令不超过4h，房间温度波动幅度不会超过2℃，对热舒适的影响不大。这样，优化地组织分散在各地的海量的空气源热泵根据电力负荷状况运行，就可以在保证建筑满足室内舒适性要求的前提下有效地对电力进行削峰填谷，热泵供暖系统也就有机结合

成一座虚拟的电力调峰站。以京津冀电网为例，选取京津冀地区周边600万农户安装的空气源热泵为例，模拟结果表明<sup>[15]</sup>，利用空气源热泵做电力调峰可以实现：

- (1) 使电网负荷的峰谷变化问题得到有效解决；
- (2) 风电可有效上网，替代部分煤电；
- (3) 现有燃煤电厂不需要承担调峰任务，可在全负荷下高效运行，或部分机组完全停止运行，发电煤耗降低9gce/kWh；
- (4) 可减少农村散煤1572万tce，而只需要电厂多消耗636万tce用于热泵供暖，实现节煤936万tce；
- (5) 降低燃煤造成的污染物排放45%。

适当场合下的热泵供热系统通过主动式调节，构建“虚拟调峰电厂”，一定程度上电力削峰填谷，提高燃煤电厂发电效率，改善高效电厂低效运行状况，缓解风电、光电上网瓶颈，促进可再生能源电力发展。

## 5.7 热泵在碳交易市场中的效益

国际社会针对全球气候变暖问题签署的一系列条约和协定等规定了不同发展程度国家的减排责任。发达国家能源利用效率高，能源结构优化，大量的新能源技术被采用，使得本国进一步减排成本高，难度较大。而发展中国家能源利用效率较低，减排空间大，成本也低。这导致同一减排量在不同国家成本不同，形成了价格差。发达国家有需求，发展中国家有供应能力，碳交易市场由此产生。

碳排放权交易也称为“总量控制与排放交易”机制，简称“限额-交易”机制，是指在一定管辖区域内，确立一定时限内的碳排放总量，并将总量以配额或排放许可证的形式分配到个体或组织，使其拥有合法的碳（温室气体）排放权利，并允许这种权利像商品一样在交易市场的参与者之间进行交易，确保碳实际排放不超过限定的排放总量，以成本效益最优的方式实现碳减排目标的市场减排机制。

碳排放权交易市场可分为强制性（或称履约型）碳排放权交易市场和自愿性碳排放权交易市场。强制性碳排放权交易市场，是目前国际上运用最为普遍的碳排放权交易市场。强制性碳排放权交易市场已经为《京都议定书》中强制规定温室气体排放标准的国家或企业有效提供碳排放权交易平台，通过市场交易实现减排，其中较为典型或影响力较大的有欧盟排放交易体系（EUETS）、美国区域温室气体减排行动（RGGI）、美国加州碳市场（California Cap & Trade）等<sup>[28]</sup>。自愿性碳排放权交易市场，多出于企业履行社会责任、强化品牌建设、扩大社会效益等一些非履约目标，或是具有社会责任感的

个人为抵消个人碳排放、实现碳中和生活，而主动采取碳排放权交易行为以实现减排。

### 5.7.1 国内碳交易市场的发展

国内碳交易市场从清洁发展机制（CDM）起步。2011年，国家发展改革委印发《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》（发改办气候〔2011〕2601号），在北京市、天津市、上海市、重庆市、湖北省、广东省及深圳市开展碳排放权交易试点工作。从2013年6月18日开始，深圳市、上海市、北京市、广东省、天津市、湖北省、重庆市相继启动了上线交易。另外，2016年底，福建省建成具有福建特色的碳排放权交易市场。2012年国家发展改革委颁布《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》，确立了我国自愿减排项目的申报、审定、备案、核证、签发等工作流程，中国核证自愿减排量（CCER）入市。2017年3月17日国家温室气体自愿减排主管部门暂停了自愿减排项目备案申请的受理，并组织修订《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》。2020年末《碳排放权交易管理办法（试行）》由生态环境部审议通过，并于2021年2月1日起正式实施，标志着中国全国碳排放权交易体系正式投入运行。2021年7月16日，全国碳排放权交易市场完成了首笔线上交易。其发展历程梳理如图5-27所示。



图5-27 国内碳交易市场发展历程

## 5.7.2 各行业碳交易市场中的效益

### （1）碳价预测

根据碳价政策高级别委员会测算，若达到巴黎协定的温控目标，2020年的碳价至少应达到40~80美元/tCO<sub>2</sub>，2030年须达到50~100美元/tCO<sub>2</sub><sup>[29]</sup>。北京市2015年~2021年的CCER年平均碳价由4.8元/tCO<sub>2</sub>震荡上涨为36.77元/tCO<sub>2</sub><sup>[30]</sup>。显然，当前碳价水平距离实现《巴黎协定》目标所需的碳价存在明显差距，由此，碳价在未来很长一段时间内会稳步增长。本节根据北京市2015年~2021年的CCER年平均碳价对未来的年平均碳价进行初步估算，碳价预测曲线如图5-28所示，年平均碳价由2025年的43.62元/tCO<sub>2</sub>上涨为2060年的195.19元/tCO<sub>2</sub>。

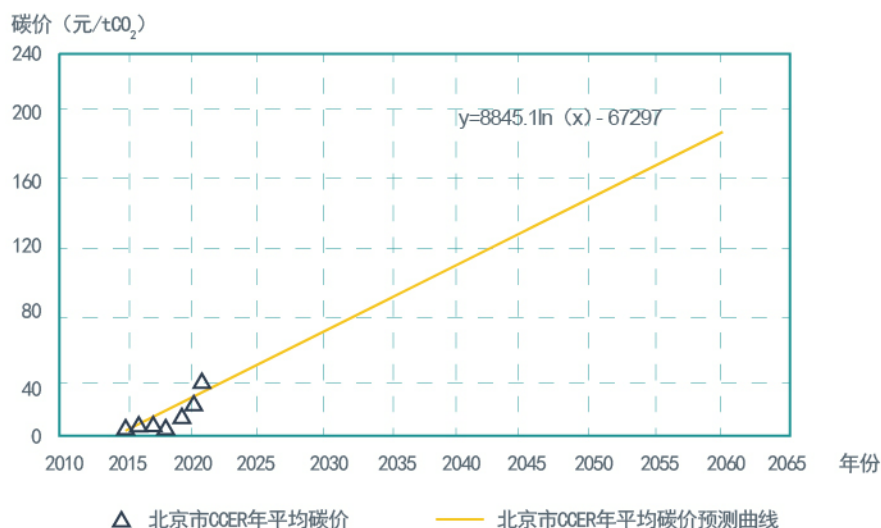


图5-28 年平均碳价趋势预测

### （2）各行业热泵碳减排量价值估算

为区分不同技术应用产生的碳减排量价值，这里仅分析热泵应用规模扩大而贡献的减排量产生的价值，也即以前述各节中显著增长情景（情景3）下的热泵减排量计算产生的价值。图5-29给出了各行业热泵减排量及碳交易价值。以建筑供暖热泵应用为例，热泵减排量在2030年为0.134亿吨，价值8.74亿元，随着年份的增加，热泵每年的减排量渐渐减少，其潜在价值呈现先增后降的趋势，在2043年，热泵减排量价值达到最高，为11.14亿元，到2060年热泵应用规模已扩展为最大，减排量降低到了0.036亿吨，潜在价值为7.08亿元。其他领域的变化趋势有所不同，每年的碳减排量基本保持稳定或小幅稳步增长，随着碳价的增长，其潜在价值逐年升高。由此可以看出，热泵技术在各行业高速发展能够创造巨大的碳减排价值，且发展潜力巨大。



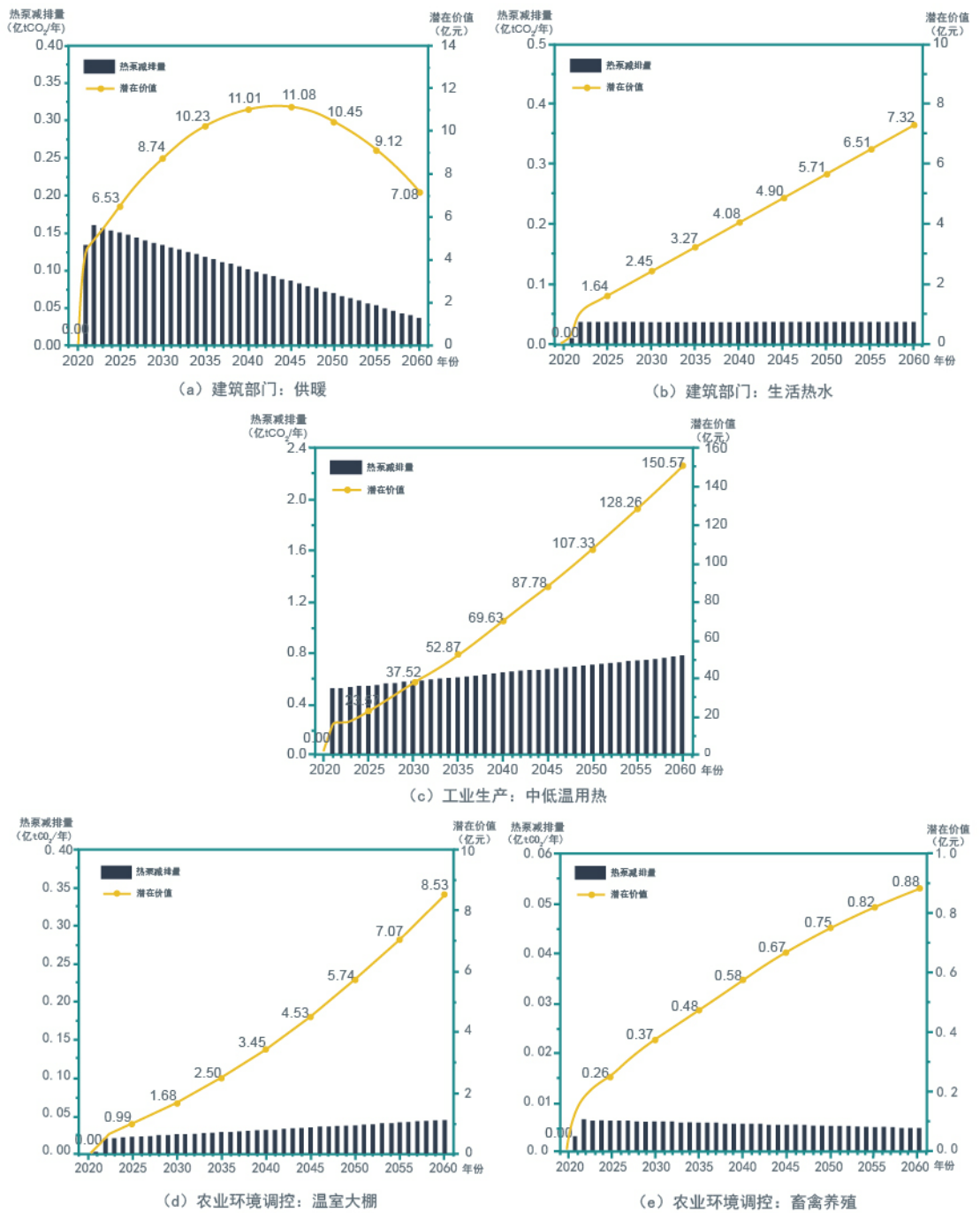


图5-29 各行业热泵减排量价值估算

### (3) 热泵在碳交易市场中的效益

根据热泵行业的特点，热泵可考虑通过自愿减排交易的方式获得一定的受益。各行业2021~2030年间10年潜在减排总量及总价值和2031~2060年间30年潜在减排总量及总价值汇总如表5-14所示。建筑部门、工业生产和农业环境调控在2021~2030年间10年潜在减排总量为7.50亿吨CO<sub>2</sub>，其中建筑部门占比24.0%，工业生产占比72.4%，农业

环境调控占比3.6%，潜在总价值为353.7亿元，其中建筑部门占比23.7%，工业生产占比72.6%，农业环境调控占比3.7%。建筑部门、工业生产和农业环境调控在2031~2060年间30年潜在减排总量为25.10亿吨CO<sub>2</sub>，其中建筑部门占比14.4%，工业生产占比80.8%，农业环境调控占比4.8%，潜在总价值为3366.9亿元，其中建筑部门占比13.3%，工业生产占比81.8%，农业环境调控占比4.9%。

此外，在其它领域热泵技术还广泛应用于干燥、交通运输等，其碳减排量和潜在价值进一步增加。但目前，热泵行业还未进入碳交易市场，后期应积极推动热泵行业进入碳交易市场，推动热泵纳入CCER。开展热泵碳交易方法论研究，为引导热泵供热项目进入碳交易市场创造技术条件，让热泵技术在碳交易市场上发挥作用、创造效益。

表5-14 各行业2021~2030年和2031~2060年间潜在总减排量及总价值汇总

年份	行业	领域	热泵减排量 (亿吨CO <sub>2</sub> )	减排量 占比	潜在价值 (亿元)	潜在价值 占比
2021~2030 (10年)	建筑部门	建筑供暖	1.45	24.0%	67.3	23.7%
		生活热水	0.35		16.6	
	工业生产	中低温热量生产	5.44	72.4%	256.8	72.6%
	农业环境 调控	温室大棚	0.21	3.6%	10.3	3.7%
		畜禽猪舍	0.06		2.6	
汇总			7.50	100%	353.7	100%
2031~2060 (30年)	建筑部门	建筑供暖	2.50	14.4%	299.9	13.3%
		生活热水	1.13		149.2	
	工业生产	中低温热量生产	20.27	80.8%	2752.8	81.8%
	农业环境 调控	温室大棚	1.05	4.8%	145.1	4.9%
		畜禽猪舍	0.15		19.9	
汇总			25.10	100%	3366.9	100%

## 5.8 社会与环境效益分析

### 5.8.1 清洁环保

热泵供热具有清洁环保的特点，单位供热量污染物排放因子相较于其它供热方式有较大的差别，具体统计结果如图5-30所示。热泵用电间接排放的污染物即使按煤电310gce/kWh折算，每提供1GJ的热量时，其氮氧化物的排放量相对于燃气锅炉和燃煤锅炉可以减排一半以上；其SO<sub>2</sub>的排放量相对于燃煤锅炉可以减排80%左右，同时也稍低于燃气锅炉和生物质锅炉的排放量。

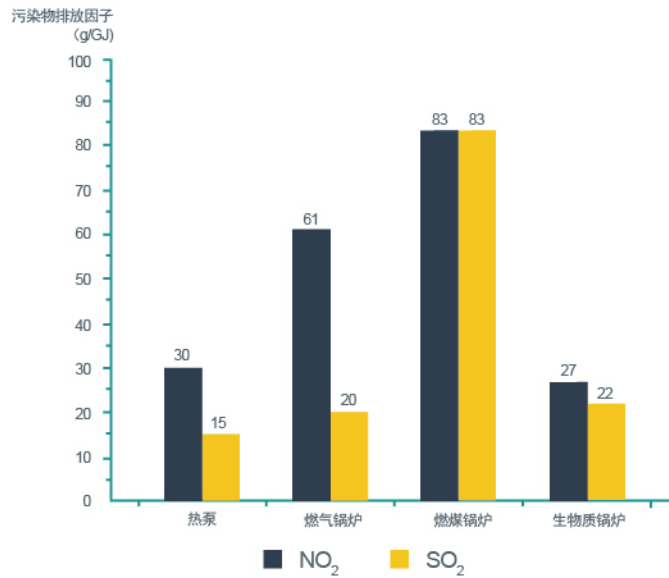


图5-30 不同供热方式单位供热量的污染物排放因子

供暖季常连续出现雾霾现象，主要是由于PM2.5颗粒物的大量聚集。据此，图5-31比较了不同热源种类的供暖方式烟尘颗粒物的排放量。结果表明，每提供1GJ的热量时，热泵排放的烟尘颗粒物分别比燃煤锅炉和燃气锅炉降低了25.9%和53.8%，而且远远低于散煤土暖气的烟尘颗粒物的排放量。由此可见，热泵供暖方式相比于传统的化石燃料供暖方式，有良好的清洁性。在我国大力推进清洁取暖的政策下，热泵供暖正在得到积极推广。

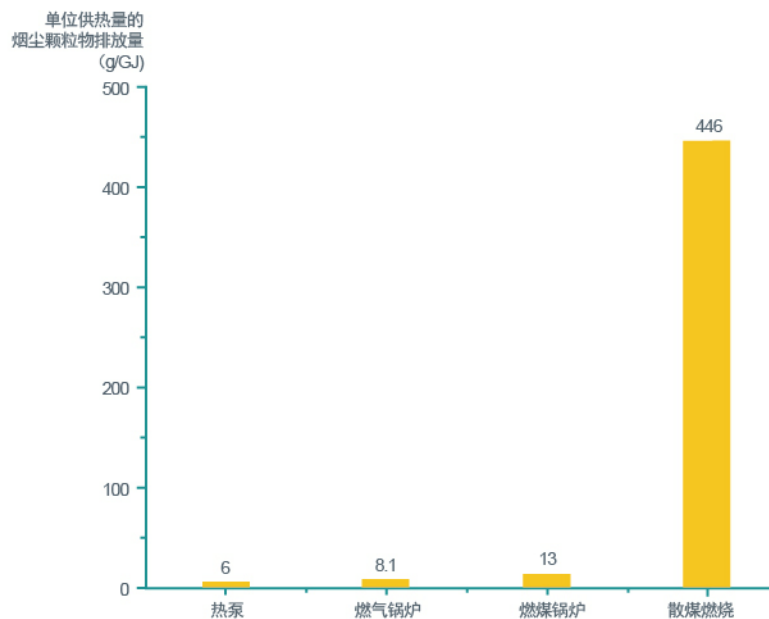


图5-31 不同供热方式单位供热量的烟尘颗粒物排放量

### 5.8.2 节能收益

因热泵是利用少量的高位能拖动产生更多热能，相比于其它产热方式，有良好的节能性。图5-32对几种常见产热方式的一次能源消耗量进行了分析，基于理论计算，每产生1kW的热量，热泵比燃煤锅炉减少了51%的一次能源消耗量；与电锅炉相比，热泵降低约72%一次能源消耗量；与燃气锅炉相比，热泵降低约41%一次能源消耗量。由此可见，产生相同热能，热泵所需一次能源更少，因此热泵具有明显的节能效果。

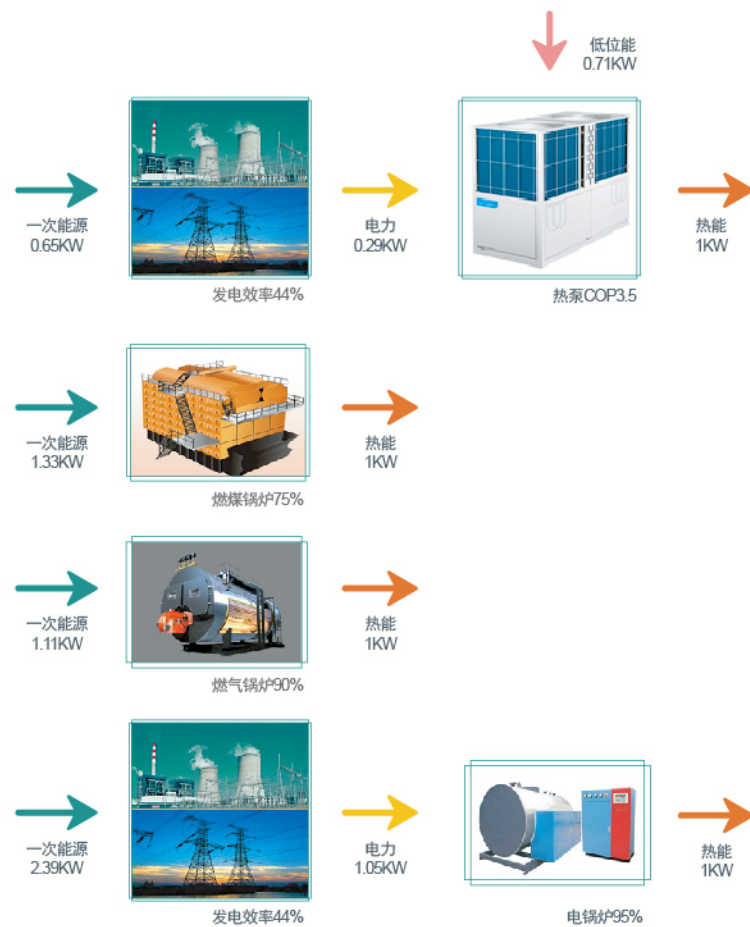


图5-32 不同供热方式一次能源消耗对比

### 5.8.3 改善民生

建设资源节约型社会是我国社会发展的重要战略决策。热泵技术能够发挥高位能的高品质优势，符合国家提倡的用能形式，具有普惠的民生价值。热泵供热能够满足城乡建筑生活热水和冬季供暖的要求，满足人民对美好生活的追求，同时热泵技术在工业和农业的应用使得PM2.5等相关污染物的排放能有所降低，空气质量改善，让居民真正感受到了清洁供热带来的益处。

新时期我国城市发展的主要矛盾已经转变成持续发展和社会公平与交通拥堵、用能增加、环境污染以及减少碳排放总量以应对气候变化的矛盾。我国未来的城市能源系统将以低碳发展和雾霾治理为导向，调整能源结构，全面实现能源供给侧和消费侧革命，缓解气候变化，还百姓以蓝天。

### 参考文献

- [1] 王勇,毕莹,王恩东. 中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估. 中国人口·资源与环境, 2017.
- [2] 林波荣. 建筑行业碳中和挑战与实现路径探讨. 可持续发展经济导刊, 2021, 22(Z1): 23-25.
- [3] 生态环境部. 省级二氧化碳排放达峰行动方案2020. 2020.
- [4] 江亿,胡姗. 中国建筑部门实现碳中和的路径. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.
- [5] 王庆一. 2020能源数据. 北京, 绿色创新发展中心, 2020: 115-116.
- [6] 张希良,齐晔. 中国低碳发展报告. 北京, 社会科学文献出版社, 2017: 238-239.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GBT51366-2019. 2019.
- [8] 杜受祜. 全球变暖时代中国城市的绿色变革与转型. 北京, 社会科学文献出版社, 2015.
- [9] 王如竹. 热泵技术创新及其在2060碳中和国家战略中的关键作用. 2021.
- [10] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2021. 北京, 中国建筑工业出版社, 2021.
- [11] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2019. 北京, 中国建筑工业出版社, 2019.
- [12] 胡姗,张洋,燕达等. 中国建筑领域能耗与碳排放的界定与核算. 建筑科学, 2020, 36 (S2): 288-297.

- [13] 民用建筑能耗标准: GB/T 51161-2016
- [14] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2020（农村住宅专题）. 北京, 中国建筑工业出版社, 2020.
- [15] 乐慧,李好玥,江亿. 用空气源热泵实现农村采暖的“煤改电”同时为电力削峰填谷. 中国能源, 2016, 38(11): 9-15.
- [16] 甘犁. 2017中国城镇住房空置分析. 成都: 中国家庭金融调查与研究中心, 2018: 5-9.
- [17] 邹平华,方修睦,王芑,倪龙. 供热工程(下册 集中供热). 北京, 中国建筑工业出版社, 2018.
- [18] 马丽,刘立涛. 基于发达国家比较的中国能源消费峰值预测. 地理科学, 2016.
- [19] 周琼芳,张全斌. 面向2049年的中国能源市场展望. 经济界, 2019.
- [20] 国家统计局. 分行业能源消费总量. 2021.  
<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>
- [21] 国家统计局. 第二次全国农业普查主要数据公报（第二号）. 2008.  
[http://www.stats.gov.cn/tjgb/nypcgb/qgnypcgb/t20080222\\_402463937.htm](http://www.stats.gov.cn/tjgb/nypcgb/qgnypcgb/t20080222_402463937.htm)
- [22] 国家统计局. 第三次全国农业普查主要数据公报（第二号）. 2017.  
[http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/nypcgb/qgnypcgb/201712/t20171215\\_1563539.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/nypcgb/qgnypcgb/201712/t20171215_1563539.html)
- [23] 热泵市场. 134.4亿禽畜养殖市场如何把握? 2021中国热泵展上海尔分享了这些干货. 2021. [https://mp.weixin.qq.com/s/FCEIRBiiou\\_mFVlzk0z-YQ](https://mp.weixin.qq.com/s/FCEIRBiiou_mFVlzk0z-YQ)
- [24] 国家标准化规模养猪场建设规范: NY/T1568-2007. 2007.
- [25] 袁建敏. 肉禽饲养密度应激及营养调控研究进展. 中国家禽, 2017.
- [26] 热泵市场. 养猪场注意: 财政部36.9亿元生猪建立下发各省! 采暖别忘用热泵. 2021.  
[https://mp.weixin.qq.com/s/wyxpA\\_adLq4lIt0BtREGpQ](https://mp.weixin.qq.com/s/wyxpA_adLq4lIt0BtREGpQ)
- [27] 李光元,黄伟,于洪文,等. 基于物联网控制的太阳能+空气源热泵的采暖系统研究. 节能, 2019.
- [28] 碳排放权交易（发电行业）培训教材. 中国环境出版社集团, 2020.
- [29] 郑爽. 市场持续增长, 交易更加活跃, 规模价格有望创新高 2020年国际碳市场评述与2021展望. 中国能源, 2021 (3): 49-51.
- [30] 北京市碳排放权电子交易平台. <https://www.bjets.com.cn/article/jyxx/>

## 6 总结

碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，已纳入社会主义生态文明建设整体布局。为此，我国正在出台大量政策和任务清单实现这一目标。双碳战略下，能源领域将产生革命性变化，最显著的是能源转换链条由目前的“燃料产热、热发电”变革为“绿电生产、电制热”，终端用能电气化态势明显。热泵因其电热转换的高效性，是电制热的最有效方式，为替代化石能源燃烧供热提供了一种可靠的备选方案，将在碳达峰、碳中和过程中发挥重要作用。本《热泵助力“碳中和”白皮书》从热泵技术原理、热泵应用现状、热泵应用前景和减碳效益四个方面分析了热泵技术在实现碳达峰与碳中和中的潜力与贡献，相关结论如下：

（1）热泵技术的迅速普及使环境中储存的低位热能成为日益重要的可再生能源，目前我国热泵技术主要应用于减少建筑部门的能耗，但作为热泵应用市场主导行业的供暖占比不超过10%，且在工业、农业中使用的情況更低。为实现碳中和目标，热泵在建筑、工业、农业以及其它行业的应用亟需进一步推广。

（2）热泵技术的优势在于整合可再生或废弃的环境热源，有效和可控地供热，从而替代对化石能源的需求。这个特点使得热泵技术能够降低建筑供热不可再生能源消耗，在工业余热回收、工业干燥、农业环境调控、农产品加工及其它行业的中低温热能供应的广阔应用前景中，起到节能减排降碳的作用。

（3）在热泵应用规模显著增长情景下，2060年建筑供暖和热水供应碳排放降至2.71亿吨，工业中低温用热碳排放仅为4.38亿吨，农业环境调控仅0.39亿吨，碳排放总量7.48亿吨，潜在减排量达到了30.81亿吨，可实现81%的碳减排，占到我国现阶段碳排放总量的31.4%。若2060年电力实现“零碳排放”，热泵在中低温供热领域实现100%覆盖，则中低温供热领域将实现“零碳”。

（4）潜在减排量由热泵应用、电力端和需求侧减排量组成，对于建筑行业，热泵减排量达5.40亿吨，电力端减排量3.27亿吨，需求侧减排量-0.72亿吨；对于工业生产，热泵减排量为14.06亿吨，电力端减排量为0.13亿吨，需求侧减排量达到6.70亿吨；对于农业环境调控，热泵减排量为1.49亿吨，电力端减排0.04亿吨，需求侧减排量为-0.31亿吨。合计热泵减排量达20.95亿吨，电力端减排量为3.44亿吨，需求侧减排量为5.67亿吨。热泵减排量占潜在减排量的70%，减排潜力最大。

（5）热泵技术进入碳交易市场，将创造巨大的碳交易价值。根据预测碳价，热泵技术在建筑供暖和生活热水领域分别最高可实现11.1亿元和7.3亿元的碳减排价值，在工业生产领域最高可实现150.6亿元的碳减排价值，在农业大棚和农业畜禽领域，其碳减

排价值最高分别可达8.5亿元和0.9亿元。2021~2030年10年间热泵应用带来的碳交易价值总量高达353.7亿元；2031~2060年30年间热泵应用带来的碳交易价值总量高达3366.9亿元。此外，热泵技术推广应用还有巨大的环境效益和社会效益。

综上所述，热泵技术是供热领域替代化石能源、实现碳中和的必然路径，中低温供热领域实现碳中和的关键在于热泵技术的普及应用。但热泵技术的快速发展离不开政府、企业、科研机构的相互协作与共同努力：

（1）加强政策引导与资金支持。推动空气热能纳入可再生能源范畴，将热泵技术列入各地和行业的碳中和行动纲要；进一步开放行业市场准入，鼓励社会资本进入热泵供热领域，建立健全政府引导、部门参与、市场运作、多元投入的投融资机制；积极推出支持热泵技术应用的资金扶持政策，健全财政补贴机制，创新经营管理模式，提高管理效率，降低热泵技术应用成本；加强热泵项目管理和运行监管，健全完善故障应急预案，保证热泵技术的可持续发展；充分利用互联网等新兴媒体，通过各种方式大力宣传热泵技术优势，营造良好的社会认知氛围，及时总结热泵技术相关先进经验和做法。

（2）加强热泵技术的研发与革新，推广应用适宜的热泵系统。健全适应未来大规模发展的热泵相关制造、应用、运行维护和测评相关标准体系；研发包括工业在内的特殊场景热泵技术，研发更高效、更可靠、大温差及具有更长寿命的热泵系统，进一步提升系统能效、避免频繁拆建；加快低GWP制冷剂及相关技术研发，积极推广包括自然工质在内的环境友好型制冷剂；综合考虑工程所在地气候、经济及工程自身的技术及未来规划等因素，选择适宜的热泵技术和供热方案，发挥热泵系统的应有优势。

（3）加强国际合作，积极推动热泵行业进入碳交易市场，推动热泵纳入CCER。开展热泵碳交易方法论研究，为引导热泵供热项目进入碳交易市场创造技术条件；强化国际交流合作，尽早推动热泵供热进入国内外碳交易市场，让热泵技术在碳交易市场上发挥作用、创造效益。



## 附录

### 附录1：“清洁取暖”相关政策文件

时间	部门	名称
2013年6月14日	国务院	大气污染防治十条措施
2013年9月13日	国务院	《大气污染防治行动计划》 (国发〔2013〕37号)
2016年10月22日	环保部	《民用煤燃烧污染综合治理技术指南 (试行)》、《民用煤大气污染物排 放清单编制技术指南(试行)》
2016年12月21日	-	中央财经领导小组第14次会议
2017年2月17日	环境保护部、国家发展改革委等	《京津冀及周边地区2017年大气污染 防治工作方案》
2017年5月16日	财政部、住房城乡建设部、环境 保护部、国家能源局	《关于开展中央财政支持北方地区冬 季清洁取暖试点工作的通知》(财建 〔2017〕238号)
2017年6月5日	财政部、住房和城乡建设部、 环境保护部、国家能源局	《关于对2017年北方地区冬季清洁取 暖试点城市名单进行公示的通知》
2017年12月5日	国家发改委、国家能源局等 十部委	《北方地区冬季清洁取暖规划 (2017-2021年)》
2018年7月3日	国务院	《打赢蓝天保卫战三年行动计划》 (国发〔2018〕22号)
2018年7月23日	财政部、生态环境部、住房城乡 建设部、国家能源局	《关于扩大中央财政支持北方地区冬 季清洁取暖城市试点的通知》 (财建〔2018〕397号)
2018年8月27日	财政部、生态环境部、住建部、 国家能源局	中央财政支持北方地区冬季清洁取暖 试点城市扩围竞争性评审工作
2018年9月21日	生态环境部	《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》 (环大气[2018]100号)
2019年2月27日	生态环境部	发《2019年全国大气污染防治工作要 点》(环办大气〔2019〕16号)
2019年4月10日	国家能源局等四部委	《关于开展北方地区清洁取暖中期评 估工作的通知》(国能综通电力 〔2019〕30号)
2019年6月13日	财政部	《关于下达2019年度大气污染防治 资金预算的通知》(财资环〔2019〕 6号)
2019年9月25日	生态环境部	《京津冀及周边地区2019-2020年秋冬 季大气污染综合治理攻坚行动方案》 (环大气〔2019〕88号)

2019年11月4日	生态环境部等	《汾渭平原2019-2020年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》（环大气〔2019〕98号）
2020年9月28日	生态环境部	《京津冀及周边地区、汾渭平原2020-2021年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案（征求意见稿）》（环办大气函〔2020〕506号）
2021年3月23日	财政部	《关于组织申报北方地区冬季清洁取暖项目的通知》（财办资环〔2021〕19号）
2021年4月21日	财政部等四部委	《2021年北方地区冬季清洁取暖项目竞争性评审结果公示》（财办资环〔2021〕19号）
2021年4月22日	国家能源局	《2021年能源工作指导意见》
2021年6月9日	财政部	《大气污染防治资金管理办法》（财资环〔2021〕46号）

## 附录2：碳中和相关政策、讲话与会议

	习近平总书记重要讲话
2014年11月12日	中美气候变化联合声明
2015年9月25日	中美元首气候变化联合声明
2015年11月30日	气候变化巴黎大会开幕式
2020年9月22日	习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话
2020年9月30日	习近平在联合国生物多样性峰会上的讲话
2020年11月12日	共抗疫情，共促复苏，共谋和平——习近平在第三届巴黎和平论坛的致辞
2020年11月17日	守望相助共克疫情携手同心推进合作——习近平在金砖国家领导人第十二次会晤上的讲话
2020年11月22日	习近平在二十国集团领导人利雅得峰会“守护地球”主题边会上的致辞
2020年12月12日	继往开来，开启全球应对气候变化新征程——习近平在气候雄心峰会上的讲话
2020年12月16日	中央经济工作会议
2021年1月11日	省部级主要领导干部学习贯彻党的十九届五中全会精神专题研讨班
2021年1月25日	让多边主义的火炬照亮人类前行之路——习近平在世界经济论坛“达沃斯议程”对话会上的特别致辞
2021年2月19日	中央全面深化改革委员会第十八次会议
2021年3月15日	中央财经委员会第九次会议
2021年4月16日	中法德领导人视频峰会
2021年4月22日	领导人气候峰会

2021年4月30日	中共中央政治局第二十九次集体学习
2021年5月21日	中央全面深化改革委员会第十九次会议
2021年7月6日	中国共产党与世界政党领导人峰会
2021年7月16日	亚太经合组织领导人非正式会议
2021年7月30日	中共中央政治局第二季度会议

#### 国家层面重大会议与战略部署

生态环境部部令 第19号	《碳排放权交易管理办法（试行）》
2020年12月21日	国务院新闻办公室：《新时代的中国能源发展白皮书》
环气候〔2020〕57号	关于促进应对气候变化投融资的指导意见
国发〔2021〕4号	国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见
国发〔2021〕6号	国务院关于落实《政府工作报告》重点工作分工的意见
2021年3月5日	十三届全国人大四次会议：《政府工作报告》
环综合〔2021〕4号	关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见
发改环资规〔2021〕655号	污染治理和节能减碳中央预算内投资专项管理办法
2021年3月12日	中国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要
2021年5月26日	碳达峰碳中和工作领导小组第一次全体会议

2021年7月16日

全国碳市场启动仪式

各部委“碳中和”相关会议

2020年12月

生态环境部

中国环境记协第十一期环境茶座

2020年12月

国家能源局

全国能源工作会议

2021年1月

工信部

全国工业和信息化工作会议

2021年2月

生态环境部

2月例行新闻发布会

2021年2月

工信部

中国水泥协会开展调研座谈

2021年2月

中国人民银行

绿色金融有关情况吹风会

2021年3月

国家能源局

国家能源局电力司负责人专访

2021年4月

生态环境部

生态环境部党组会议

### 附录3：其他欧洲国家的支持政策一览

国家	支持热泵的政策规定
英国	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 提议从2022年起，对功率不超过45千瓦的热泵提供4,000英镑补贴。</li> </ul>
荷兰	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,000-2,500欧元的家用热泵补贴。</li> </ul>
挪威	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 新建筑：自2011年起禁止使用燃油，自2016年起禁止使用化石燃料供热；</li> <li>• 所有建筑：除少数例外，从2020年起禁止使用燃油供热；</li> <li>• 燃油的税率为45%，电力的税率为36%。较高的电力税率促使人们从以前普遍使用的电阻式采暖设备转换为效率更高的热泵；</li> <li>• 将旧的供热系统替换为清洁供热系统的补贴（90%的设备都改为采用热泵）。</li> </ul>
瑞典	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 采用高碳税，化石气体税（45%）和电力税（39%）激励热泵和集中供暖。</li> </ul>
芬兰	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 通过减免热泵用户的个人所得税，返还热泵用户热泵安装（劳务部分）费用的60%，最高为3,000欧元；</li> <li>• 碳税、石油总税率为45%，天然气43%，电力33%。</li> </ul>
丹麦	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 热泵替换燃油设备有相应补贴；</li> <li>• 燃油（50%）、化石气体（56%）、居民用电（70%，但取暖费减半至35%）的税率；</li> <li>• 从2013年起禁止在新建筑中使用燃油锅炉，从2016年起禁止在现有建筑中新建或更换为燃油锅炉。</li> </ul>
法国	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 节能和可再生能源设备投资成本的税收抵免不超过30%（或16,000欧元），且这类项目改建的增值税由10%降至5.5%；</li> <li>• 为包括可再生供热技术在内的改造提供最高不超过30,000欧元的零利率贷款；</li> <li>• 取消对化石燃料的补贴，能源税与燃料的碳含量挂钩。燃油的总体税率为34%，化石气体为24%，电力为36%；</li> <li>• 根据能效要求，新建独户住宅不能使用电阻类采暖设备。</li> </ul>
爱尔兰	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 为热泵（和其他可再生能源技术或能效措施）提供高达30%的成本补助，对达到最低能效性能标准的个人住宅提供高达3,500欧元的补助。</li> </ul>

## 附录4：热泵应用典型案例

### 案例一：太原中泽纯境小区空气源热泵供暖工程

#### 项目介绍

##### 1、建筑物概况和用途简介

中泽纯境位于山西省太原市小店区唐槐路与榆东线交叉口东北500米（山西科技创新城，太原大学新校区正北面）。中泽纯境生活区总占地236亩，总建筑面积55万m<sup>2</sup>。中泽纯境生活区为集住宅、商业、酒店、超市、公寓、养生会所、有机生态农场、社区医疗中心、养老乐园等为一体的一站式全配套建筑群。生活区内配套地板辐射供暖，室内末端及小区供暖管网已建成。

##### 2、设备配置概况和用途简介

选择140台48匹超低温二联供机组作为供暖热源，提供45~55℃供暖热水，由已建成室外管网供至各供暖建筑。



## 方案设计

小区最初未考虑空气源热源方案，造成项目改造条件苛刻，在设计及选型上，浙江中广电器股份有限公司技术服务团队依靠扎实的技术功底，克服诸多困难，最终完美实现空气源热泵供暖对接。

### 1、设备数量选取

小区属节能建筑，按太原地区集中供暖绿色建筑推荐热负荷指标及去年运行情况看，建筑面积55万m<sup>2</sup>，供暖面积50万m<sup>2</sup>需要总热负荷约为15500kW。该方案最终选用140台48P空气源热泵和4000kW电辅热作为供暖热源。

### 2、系统设计

空气源热泵连接按原供暖管网分为高、低区两个系统，其中高区63台和1800kW电辅热，低区77台和2200kW电辅热。主机和配件均选择承压能力1.6MPa以上的标准。

为保证设备通风量，采用侧面+下部的双面进风方式，每台主机基础均为镂空结构，终保证机组侧面和下方有足够通风面积。同时为了避免管路对设备通风造成遮挡，所有供暖、化霜水及电气管道全部预埋地下，除节省地上空间，还可保证停电时水管道系统防冻。

考虑机房系统庞大，为保证每台主机额定循环量，采用“单机单泵”方式，每台设备配置一台循环泵，与地下环形水箱循环加热供暖用水，确保每台主机额定流量的同时，还可在低负荷时降低水泵消耗。

地下环形水箱经过特殊设计，可根据需要随时调整系统水流流量和流向，调节能力更强。小区内采用变频水泵供水，根据小区供暖变化，自动调节供水量，达到负荷变化时的传输节能效果。

## 应用效果

### 1、节能与环保

(1) 节能：在入住率不高的情况下，2017年平均供暖费约为14.3元/m<sup>2</sup>，低于当地18元/m<sup>2</sup>集中供暖费用；空气源系统采用单机单泵的形式，水泵和主机联动，启停随主机而定，减少系统非满负荷运行时的能耗；用户侧水泵采用变频泵，根据末端负荷自行调整转速，当系统非满负荷运行时，水泵低频运行，减少能耗；空气源系统主管路都采用直埋形式，较少热量损失。

(2) 环保：该设计选用空气源热泵所充注的冷媒为R410a，属于环保冷媒；设备除霜时产生的废水由水管收集后排放到室外雨水系统，如不做统一有序的排放，路面结冰



后将对小区生活环境造成恶劣的影响，严重时冷凝水会使空气源主机故障；浙江中广电器股份有限公司所生产的产品取得了中国环境标志产品认证证书，如下：



## 案例二：石家庄市职业教育园区二期综合能源站项目

### 项目概况：

- (1) 项目名称：石家庄市职业教育园区二期综合能源站项目
- (2) 建设单位：国网河北综合能源服务有限公司
- (3) 建设地点：石家庄市正定新区职业教育园区二期项目
- (4) 建设规模：A、C二个地块共建设4个能源站，其中A地块3个，C地块1个。能源站热源设备使用涡旋式空气源热泵机组。

能源站热源设备使用涡旋式空气源热泵机组。

**应用领域：**建筑行业

### 项目背景：

石家庄市职业教育园区二期项目总计建设A、B、C三个地块，总体建设用地面积1378亩，总建筑面积约47.91万 $m^2$ ，项目总投资约32.5亿，规划建设58个单体。项目供热要求应用清洁能源。

### 能源方案：

- (1) 热泵种类：超低温涡旋式空气源热泵
- (2) 建设内容：以石家庄市职业教育园区二期项目原规划二级换热站供能范围为基准，A地块拟建设3座供能站、C地块拟建设1座供能站，以满足区域内的热需求。



### 减碳效益：

该项目的建设符合国家节能减排的政策，有良好的社会效益和经济效益，同时供能站建设各项外部条件具备，本工程作为石家庄市职业教育园区二期的能源供应系统，分布式能源站的建设具有必要性。项目每供暖季运行可实现减排12230tCO<sub>2</sub>。

### 案例三：海阳市鼎立盘石种鸡场养殖供热项目

#### 项目概况：

- (1) 项目名称：海阳市鼎立盘石种鸡场养殖供热项目
- (2) 建设单位：海阳市鼎立种鸡责任有限公司
- (3) 建设地点：烟台海阳市盘石镇
- (4) 建设规模：4栋种鸡鸡舍(单栋面积2250m<sup>2</sup>)。种鸡场热源设备使用涡旋式超低温空气源热泵机组。

**应用领域：**农业环境调控

#### 项目背景：

海阳市鼎立盘石种鸡场养殖项目总建设4栋种鸡鸡舍，单栋鸡舍面积为2250m<sup>2</sup>，总建筑面积为9000m<sup>2</sup>。在燃煤锅炉拆除后，应用清洁能源进行供热。

#### 能源方案：

- (1) 热泵种类：超低温涡旋式空气源热泵
- (2) 建设内容：盘石种鸡场总建筑面积9000m<sup>2</sup>，总制热量需求1580kW，舍内末端采用地面敷设地暖管，以满足区域内的热需求。



#### 减碳效益：

面对环境治理逐步加深，空气源热泵因能实现温度灵活控制，保证室内温度需求，提高养殖的成活率和生长速度，得到了养殖用户的高度认可。该项目每年养殖实现减排583tCO<sub>2</sub>。