



推动长三角地区居民供暖升级： 热泵开启供暖零碳转型之路





关于落基山研究所(RMI)

落基山研究所(RMI), 是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库。我们与政府部门、企业、科研机构及创业者协作, 推动全球能源变革, 以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所致力于借助经济可行的市场化手段, 加速能效提升, 推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。

作者与鸣谢

作者

郝一涵, 王广煦, 王萌

除非另有说明, 所有作者均来自落基山研究所。

其他作者

陈楷沛, 胡馨心, 李婷

作者姓名按姓氏首字母顺序排列。

联系方式

王萌: mwang@rmi.org

王广煦: gwang@rmi.org

版权与引用

郝一涵, 王广煦, 王萌, 推动长三角地区居民供暖升级: 热泵开启供暖零碳转型之路, 落基山研究所, 2022

鸣谢

本报告作者特别感谢以下来自企业和研究机构的专家对报告撰写提供的洞见与建议。

高屹峰, 中国节能协会热泵专业委员会

石文星, 清华大学建筑学院

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构的观点。

目录

前言	5
一、长三角地区居民供暖零碳转型的重要性	6
二、长三角地区居民供暖的现状、趋势与挑战	8
2.1 居民供暖现状	8
2.2 居民供暖发展趋势	8
2.3 燃气设备快速增长为长三角居民供暖零碳转型带来挑战	9
三、长三角地区分布式供暖设备对比分析	11
3.1 主要分布式供暖设备	11
3.2 不同供暖设备多维度分析对比	13
3.3 供暖设备对比小结	21
四、长三角地区热泵供暖减排潜力及推广路径	23
五、长三角地区推广热泵供暖发展的主要挑战与对应建议	25
5.1 推广应用热泵供暖的主要挑战	25
5.2 推动热泵供暖发展的建议	25
六、长三角地区热泵供暖贡献于全球供暖零碳转型	28
附录一：建筑能耗模拟输入参数	30
附录二：建筑用空气源热泵汇总	31
附录三：经济性分析概念与假设	32
参考文献	33

前言

居民供暖是关乎民生的大事，也是住宅建筑零碳转型的重点领域。近期全球能源危机造成部分地区居民供暖费用攀升，居民供暖再次成为被广泛关注的国际性民生议题。从全球来看，建筑供暖和生活热水能耗占建筑用能的近一半，2021年二氧化碳排放约24.5亿吨，占建筑总排放的23%，是建筑碳排放的最主要来源¹。因此，居民供暖的保障、提升以及零碳转型是体现气候公平性的主战场，成功的居民供暖转型将贡献于更加清洁、可负担、普惠的零碳未来。

长期以来，我国长三角地区居民供暖设施严重不足，引发了广泛的社会关注。作为我国人口最密集、经济最发达、能源消费最高的地区之一，长三角地区住宅建筑冬季室内温度无法充分满足居民的基本舒适需求，与发达国家相似气候区的室内舒适性还存在较大的差距。近年来，由于气候变化导致的极端天气频发，以及经济增长带来的人民对生活品质要求的提高，长三角地区的居民供暖需求愈发迫切。

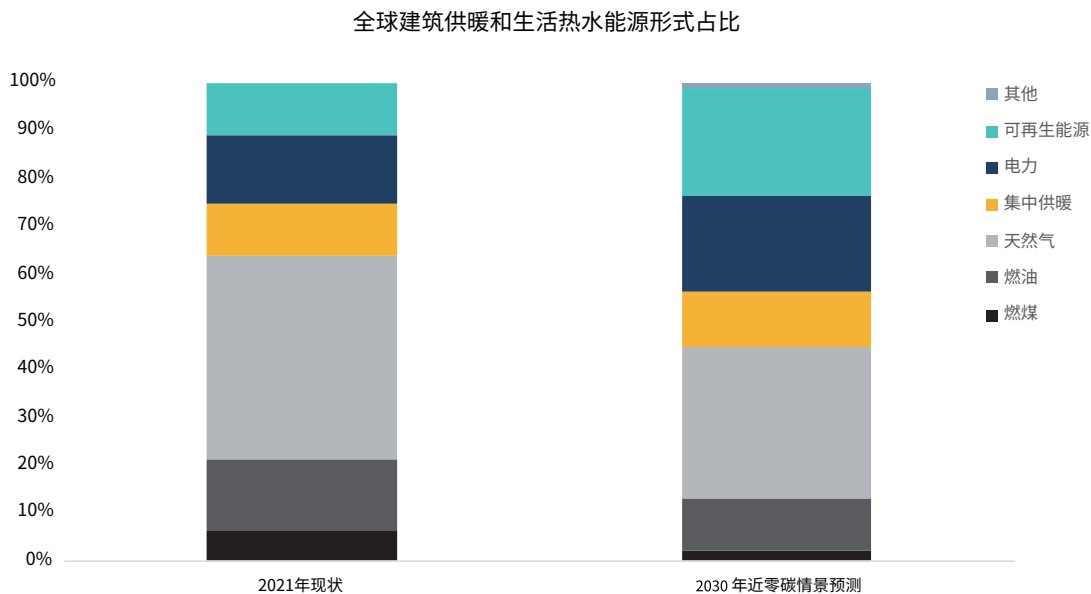
根据落基山研究所的初步分析，到2030年，长三角地区供暖将面临规模大、增幅高的实质性转变，超2000万居民将实现供暖设备从无到有，供暖需求将较2020年增加约40%；长期来看，超过100亿平方米的居住建筑将面临近乎刚需的供暖条件改善。目前，长三角地区居民供暖正在进入高速发展的升级转型阶段，需重视并尽快探索长三角地区居民供暖零碳转型路径与方式，并加快布局实施，避免这些供暖需求由化石能源驱动的供暖设备来满足，从而形成不可挽回的高碳锁定效应，影响到长江地区和我国双碳目标的顺利实现。

落基山研究所长期关注建筑电气化、清洁供暖、热泵经济性等行业议题，发布了《建筑电气化的新经济性》《纽约市建筑需求侧灵活性》等多个研究报告，聚焦以热泵供暖为核心的居民供暖零碳转型相关研究。在现有研究的基础上，本报告以长三角地区的居民供暖现状与发展趋势分析入手，全方位对比分析了在长三角地区应用热泵供暖相较于其他供暖设备的优劣势，初步探索了其减排潜力及技术推广路径，并针对不同的利益相关方提出了行动建议。同时，本报告对于热泵供暖的经济性分析、推广路径、行动建议也对中国其他地区乃至全球的供暖零碳转型有一定的借鉴意义。

一、长三角地区居民供暖零碳转型的典型性和重要性

建筑供暖与人民生活密切相关，也是能源消耗与碳排放的重要源头。2021年，建筑供暖与生活热水制备消耗了约全球15%的终端能源，这造成了约24.5亿吨的二氧化碳排放。随着全球人口的持续增长以及生活水平的提高，全球建筑供暖面积将在未来十年内保持增长，预计到2030年建筑供暖面积将在目前的基础上进一步增长近12%¹。根据国际能源署的统计，目前供暖所需的能源主要由以天然气为主的化石能源提供，供暖面积的增长将使得建筑供暖造成的二氧化碳排放进一步增加，为全球气候目标带来较大挑战。

图1 全球建筑供暖和生活热水能耗按能源形式分类及占比(数据来源:国际能源署)



在全球共同应对气候变化以及俄乌冲突引发世界能源危机的大背景下，建筑的供暖亟需加快零碳转型，众多西方发达国家也相继推出系列政策，从顶层规划（如欧盟的RePowerEU计划）、法规标准（德国建筑能源法）、财税补贴（美国的通胀削减计划）等多方面共同着手，鼓励推广更加低碳的供暖设备在建筑的应用，以在短期内尽可能的减少对于化石能源的依赖，进而为远期的零碳化打下基础，助力全球气候目标的实现。

在我国，随着近年来气候变化导致的冬季极端天气频发以及长江流域及广大南方居民生活水平的快速提升，这一区域居民供暖问题引发了广泛的社会关注。居民供暖一方面是关乎民生福祉的重要工程，同时还是影响区域能源转型以及碳中和的重要因素。国家能源局在《2021年能源工作指导意见》提出：“研究探索南方地区清洁取暖，在长江流域和南方发达地区，鼓励以市场化方式为主，因地制宜发展清洁取暖，培育产品制造和服务企业”，对于南方地区的居民供暖给予了高度重视和积极政策指导。在众多的南方城市群中，长三角地区是最具有潜力优先探索和发展适合南方居民供暖新模式的地区。

长三角地区供暖设施缺乏，冬季室内舒适度亟待改善。长三角地区具有典型的夏热冬冷地区的气候特点，冬季有2-3个月的平均气温在10°C以下，加上空气湿度较高，容易造成“湿冷”的感觉。另外，受气候变化影响，长三角地区的极端天气频发，冬季频繁的强寒潮导致持续低温出现，例如上海2021年1月上旬平均气温为1.2°C，为1987年以来的新低²，加上供暖设施的缺乏，冬季室内热环境进一步恶化，居民提升冬季室内舒适度的意愿强烈，居民供暖设备的升级十分必要。

长三角地区零碳转型压力较大，居民供暖的零碳发展十分重要。长三角地区是我国能源消费的聚集地，其能源零碳转型对我国实现双碳目标至关重要。长三角地区的能源消费具有需求总量大、化石能源比重高、对外依赖性强等特点。长三角地区终端能源消费量占全国17%，目前能源消费结构中化石能源占地区能源消费总量高达89.4%，本地能源资源匮乏，是我国“北煤南送”、“西气东输”、“西电东送”的主要目的地之一。长三角地区居民供暖的快速发展必然带来能源消费的继续加速增长，进一步加大该地区的能源安全保障和零碳能源转型的压力。因此，在长三角地区探索一条居民供暖零碳发展路径十分重要。

长三角地区经济发达，人民生活水平高，具备居民供暖升级转型的条件。长三角地区是我国人口最密集、经济最发达的地区之一。长三角地区包括上海市、江苏省、浙江省、安徽省，共41个城市，区域面积35.8万平方公里，2020年底常住人口2.35亿，GDP总量24.5万亿元，占全国GDP的贡献超过24%；人均可支配收入达49000元，是全国平均水平的1.5倍。长三角地区良好的经济发展情况与较高的人民生活水平为率先进行居民供暖升级转型提供了良好的基础，密集的人口所带来的巨大需求也能够助力供暖产业的快速发展。

长三角地区居民供暖还具备极强的典型性。从全国来看，与长三角地区气候类型相似、面临类似供暖问题的夏热冬冷地区拥有约180万平方公里的国土面积与超过5.5亿的常住人口；世界范围看，约15%的世界人口居住在亚热带湿润气候地区，也面临着应对气候变化背景下的居民供暖升级转型。长三角地区居民供暖的零碳转型将为这些地区的居民供暖转型以及零碳发展树立成功示范。

综上所述，长三角地区同时具备了供暖设施缺乏、零碳转型压力大、改善意愿强烈等特点，有需求、有必要、有条件进行居民供暖的零碳升级转型。本报告将从长三角地区居民供暖的现状入手，分析长三角地区居民供暖发展的主要趋势与挑战（第二章）；并通过全面对比当前主流的居民供暖方式与设备，分析热泵供暖设备相对于其他设备在长三角地区居民供暖应用的主要优劣势（第三章）；最后，对于热泵在长三角地区推广的减碳潜力与推广路径进行分析（第四章），并给出在长三角地区推广热泵供暖的主要建议（第五章）。

二、长三角地区居民供暖的现状、趋势与挑战

2.1 居民供暖现状

长三角地区处于中国的夏热冬冷气候地区，主要的气候特点是夏季炎热，冬季寒冷，全年湿度较高。与中国北方寒冷地区相比，该地区冬季的持续时间相对较短，室外温度也较少低至0°C以下。另外，受历史因素影响，长三角地区并未建立由政府主导的集中式供暖系统。当前，长三角地区居民供暖主要呈现出以下几个特点：

设备选择方面，分布式家用供暖设备是长三角地区的主流供暖方式，冷暖空调、电暖器等家用电器是目前最常见的供暖设备，仍有部分居民冬季并不采用供暖设备。长三角的大部分地区¹没有被纳入中国传统的集中供暖区，因此长三角地区的绝大多数居民采用分户式的供暖设备进行取暖，其中使用冷暖空调供暖的比例超过60%，电暖器、电热毯等小型电直热设备也受到较为广泛的应用³。此外，多组调查数据显示，仍有部分居民并未采用任何供暖设备，未采用供暖设备的居民占比在10%-30%之间⁴。

在供暖习惯上，长三角地区居民多采用“部分时间、部分空间”的供暖形式。和北方地区“全时间、全空间”的集中供暖模式不同，由于冷暖空调和电暖器这类小型供暖设备在长三角地区的盛行，居民也通常会选择在部分时间（如回家后、睡觉前）采用供暖设备加热部分房间（如卧室、客厅）。

长三角地区居住建筑的冬季室内热舒适性较差。调查数据⁵显示，我国夏热冬冷地区的冬季室内温度处于不舒适范围的比例极高，冬季最冷月份平均室内温度通常低于15°C，而发达国家类似气候区域则有近90%的住户冬季室内温度超过20°C⁶，这展现了我国夏热冬冷地区冬季供暖设施和舒适性水平还明显不足。

2.2 居民供暖发展趋势

受舒适度改善需求、极端天气频发等因素的影响，长三角地区的居民供暖正进入高速发展与升级转型的阶段，到2030年将有约40%的供暖需求增长，超过2000万人将实现供暖设备的从无到有；长期来看，约100亿m²的居住建筑面积将面临供暖条件的改善升级，这将带来持续的供暖设备采购需求。

长三角地区居民供暖的发展与转型主要受到以下两方面因素的驱动：

- **供暖舒适度改善需求：**伴随着长三角地区的经济高速发展与居民生活水平的提高，居民对于室内舒适度的要求逐渐提高；另外，长三角地区是人口净流入地区，外来务工人员中很大一部分来自中国北方城市，有研究表明，这些人群对于供暖舒适性要求也明显更高⁷。
- **极端天气频发：**受气候变化影响，长三角地区的极端天气频发，冬季频繁的强寒潮导致持续低温度出现，冬季室内热舒适性差的问题进一步凸显，居民对于室内舒适度提升的意愿进一步增强。

同时，随着人口的持续流入以及人均居住面积的增长，长三角地区的总居住建筑面积将进一步增加，这也将带

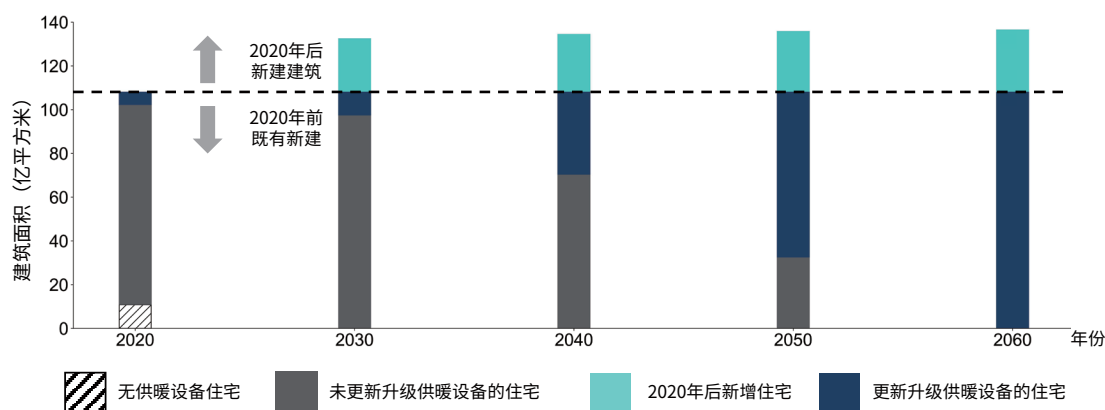
¹ 中国的城市集中供暖以秦岭淮河作为分界线，以北的城市地区大部分有集中供暖，而以南则没有。长三角地区的极个别地级市因为地理上处于秦岭淮河以北也被纳入了集中供暖区。

来新供暖设备的采购需求。在多方面因素的共同驱动下，长三角地区的居民供暖正进入高速发展与升级转型的阶段：新建建筑中，供暖设备基本成为标配；既有建筑的住户也开始越来越多地采购新的供暖设备。

短期来看（2020-2030），长三角地区的居住建筑面积预计还将增长超过20%，增加约25亿m²的居住建筑面积；既有建筑中，超过2000万人将实现供暖设备的从无到有的转变；预计2030年长三角地区将有超过5亿GJ的新增供暖热需求¹¹，较2020年水平增长近40%；可以预见，新建建筑的设备采购以及无供暖住户的设备添置将是供暖设备发展的主战场。

长期来看（2030-2060），随着长三角地区居住建筑面积逐渐饱和，以及长三角地区旧房改造的加速实施，既有居住建筑中供暖设备的更新升级将创造主要的供暖设备采购需求，根据落基山研究所预测，长三角地区有约100亿m²居住建筑面临供暖条件改善。图2展示了对于长三角地区居民供暖发展趋势的预测结果。

图2 长三角地区居民供暖发展趋势预测（2020年-2060年）



还需要指出的是，长三角地区的居民供暖发展还将延续以分布式设备为主的特点。众多研究显示，集中式供暖并不适合在长三角地区大规模发展。一方面发展集中供暖需要铺设大量城市热网管道，大规模发展的工程量巨大且投入极高，加上长三角地区供暖季通常较短、间歇供暖需求多，很难通过收取供暖费用回收建设成本，长三角地区发展集中供暖的经济性不高；另一方面，研究表明⁸，由于集中供暖的热源仍主要来源于化石能源，长三角地区发展整个供暖季持续供暖的集中供暖方式导致的碳排放将远高于分布式供暖，不利于地区碳中和目标达成。

2.3 燃气设备快速增长为长三角居民供暖零碳转型带来挑战

2.3.1 挑战一：燃气设备初具规模与口碑，发展迅速

落基山研究所的调查显示，目前长三角地区的新建住宅中供暖设备基本成为标配，其中燃气采暖热水炉（以下简称燃气采暖炉）最为常见，约八成以上的新建住宅采用燃气采暖炉作为供暖设备。在既有住宅中，也有越来越多的用户选择安装燃气采暖炉来升级供暖设备，以获得更加舒适的冬天室内环境。燃气设备的广泛使用将为长三角地区的能源稳定供给以及地区“双碳”目标的实现带来挑战。

¹¹ 居民供暖需求是指维持冬季居住建筑室内温度在某一较为舒适的区间内所需的热量输入。该热量可以由不同的终端能源满足（电能转化为热能、化石燃料燃烧所释放的热能等）。

根据落基山研究所的预测，到2030年，如果长三角地区新增的供暖热需求全部由燃气设备满足，长三角2030年居民生活用天然气总量将达到约260亿立方米，是2020年居民生活用天然气总量的约2.5倍。考虑到中国贫油少气、天然气供应愈发依赖进口，且北方农村地区“煤改气”的实施本就极大增加了天然气需求，在长三角大规模采用燃气供暖会进一步加剧国内天然气的供需紧张问题；另外，冬季天然气供应量的猛增也可能为长三角地区天然气供应基础设施的扩建带来较大挑战。

碳排放方面，燃气设备的广泛应用将造成大量的建筑内部的直接碳排放。根据落基山研究所的估算，在当前燃气为主的长三角居民供暖转型趋势下，短期来看，由于燃气设备在新建建筑中的大量采用将使得居住建筑碳排放进一步增长，到2030年，仅居民生活用燃气就将造成5600万吨的建筑直接碳排放，居民供暖造成的总碳排放将达到超过7000万吨二氧化碳¹¹¹。长期来看，尽管建筑围护结构更新升级将降低建筑热需求，但由于燃气供暖广泛使用，2060年长三角地区居民供暖仍将造成约4500万吨二氧化碳排放，为长三角地区的碳中和目标的达成带来较大困难。

2.3.2 挑战二：供暖设备的选择存在锁定效应

供暖设备的锁定效应是指用户或者某一地区采取了某一类供暖设备/产品之后，会在未来很长一段时间内延续该设备的使用。**供暖设备锁定效应主要体现在两个方面，即在供暖设备本身使用寿命周期内对于能耗和碳排放的锁定，以及某一供暖设备在一段时间内大规模使用后造成的供暖路径锁定。**

供暖设备的使用寿命通常在十年左右，一旦采用了某一供暖设备后，则在未来的十年内大概率会延续使用这一设备，相当于锁定了未来十年供暖造成的能耗，电热设备的碳排放可能会随着电力系统的脱碳而降低，但燃气设备则会在整个使用周期内持续造成较高的碳排放，也就造成了“碳锁定”。

而供暖路径的锁定，主要是指某一供暖设备在大规模使用后，无论是用户使用习惯、产品认知度，还是相关政策措施以及相关基础设施的建设，都会导致对于该设备的使用惯性增加，使得在未来更长一段时间内（十到几十年）切换成另一供暖路径的成本大大升高，造成更加深远的影响。以燃气设备为例，其大规模采用必然伴随着燃气基础设施和配套网络的扩建和进一步升级，还会使燃气设备的生产成本进一步降低，相关法律法规进一步健全，用户产生对于设备的依赖等，产生更强的规模化效应和路径依赖性，使得燃气设备在几十年的时间内持续作为供暖的主流设备，进一步加剧前文提出的对于能源供应和区域碳中和目标造成的影响。**因此，当前长三角地区新建居住建筑中燃气设备的大规模应用有造成燃气供暖路径锁定的风险。**

综上所述，在当前长三角地区居民供暖需求快速增长的趋势下，燃气设备发展迅速，为当地能源的稳定供应以及区域碳中和目标的实现带来较大挑战，而供暖设备的锁定效应则进一步加剧了这一挑战。**在供暖需求增长带来设备规模化增长的初期，发掘推广更加节能、造成更少碳排放的供暖设备是应对这一挑战的关键。**

¹¹¹ 居民生活用天然气包括了供暖、生活热水、炊事所需的天然气。居民供暖造成的碳排放包含了天然气燃烧造成的直接碳排放以及电能消耗造成的间接碳排放。

三、长三角地区分布式供暖设备对比分析

理想的供暖设备应具有高效、低排放、舒适、经济的特点，然而目前市场上的供暖设备品类众多，不同产品的评价方式（如能效等级评价）并不互通，难以直接横向比较，无论是对于产品的购买方（如住户、地产公司），还是相关政策制定者，都缺乏较为公允的方式选择出最理想的供暖设备路径。因此，对目前长三角地区主流的分布式供暖设备的统一对比评价十分重要。在本章节中，我们首先对于长三角地区主流的供暖设备进行介绍，并定义典型居民供暖设备应用场景，识别出对比评价的多个维度，从这些维度对于各供暖设备在典型场景的应用进行对比评价。

3.1 主要分布式供暖设备

分布式供暖（也叫非集中供暖）指每户分别配备一台或多台供暖设备，形成以户或房间为单位的供暖系统。如前文介绍，分布式供暖是长三角地区当前最为普遍的供暖方式，未来长三角地区也将继续保持以分布式设备为主的居民供暖。分布式供暖的形式多样，主要包括热泵两联供、冷暖空调、电暖器、电地暖、燃气采暖炉，其中热泵两联供和冷暖空调这两种设备均为广义上的热泵供暖设备。从供暖原理上，热泵供暖与其他几种供暖方式有着根本上的区别。因此下文将重点介绍热泵供暖原理及供暖设备（即热泵两联供和冷暖空调），并简要介绍其他供暖设备（即电暖器、电地暖和燃气采暖炉）。

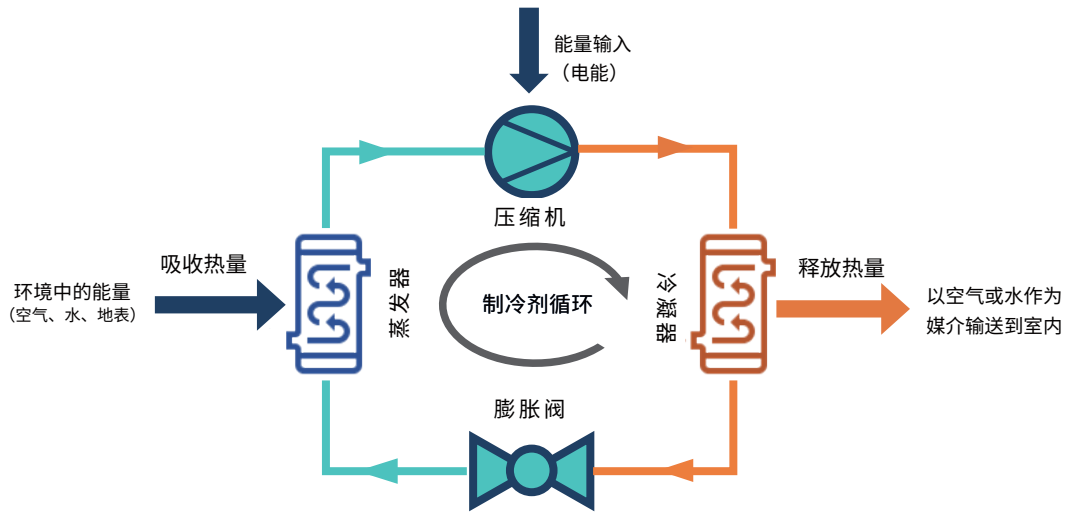
3.1.1 热泵供暖设备

热泵是一种将热能由低温物体转移向高温物体，从而实现加热功能的设备。相比于其他供暖设备直接将其他能源转化为热能，热泵供暖主要依靠搬运热能实现加热，其工作原理如图3所示。热泵主要有如下几个特征：

- **从低温热源吸收热量：**低温热源是热泵运行的必备条件，从而实现从低温侧向高温侧搬运热量的功能，且热泵的能效受低温热源温度高低的影响。按热源分类热泵包含空气源热泵、地源（土壤源）热泵、水源热泵（“空气”、“地”、“水”就是指热泵从何处吸热），其中，空气源热泵是热泵最常见的类型。
- **需要输入能量驱动：**和水泵利用电能将水从低位送向高位类似，热泵将热能从低温侧转移向高温侧也需要辅助能源的驱动，电能是热泵最常用的驱动能源。另外，燃气热泵可以由燃气发动机驱动，吸收式热泵需要外部（高品位）热源驱动。
- **高效（节能）：**尽管热泵的驱动需要消耗能量，但其生产的可用热能（高温侧）主要来自于从低温侧的吸热，通常能够实现1千瓦时的电能输入生产3千瓦时或更多的热能（即热泵从低温热源吸收了2千瓦时甚至更多的热能），从而实现了高效制热^{iv}。
- **兼具制热和制冷的功能：**热泵的本质是将热量从低温侧向高温侧转移，使高温侧温度升高的同时，低温侧的温度则会降低，因此热泵也可以用于制冷。

^{iv} 热泵的能效通常可以通过能效系数COP (Coefficient Of Performance) 进行评价，可以通过标准工况下制造的可用热能除以电能输入计算得出。

图3 热泵工作原理简单示意图

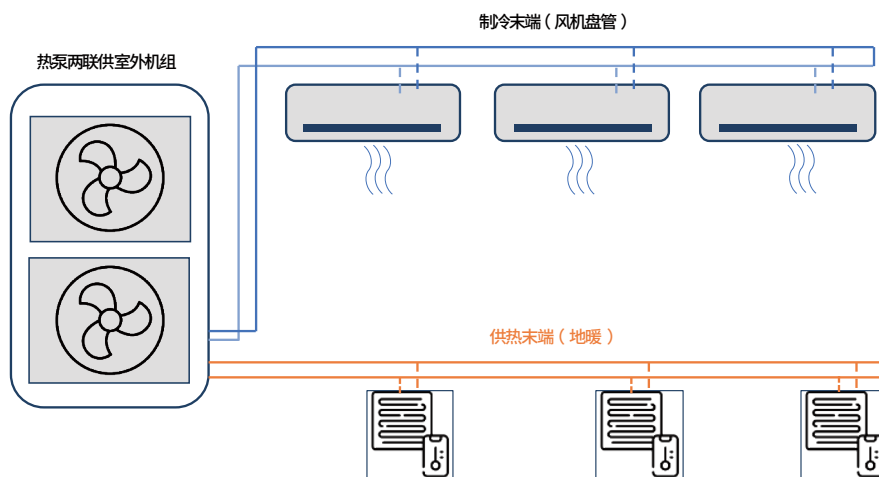


建筑中的供暖和制备生活热水是热泵最常见的应用场景，在工程实践中，根据实地情况采取不同热源的热泵，包括空气源、地源、水源等进行供暖；由于空气源热泵的安装条件较为灵活，审批、施工的难度也较低，因此获得了最为广泛的应用。本研究主要聚焦在空气源热泵作为建筑供暖设备的应用。在建筑中使用的空气源热泵也有不同的细分种类，在长三角地区的居住建筑中，最常见的两种空气源热泵设备是热泵冷暖两联供（“空气-水”热泵）和冷暖空调（“空气-空气”热泵）。

空气源热泵冷暖两联供系统

“空气源热泵冷暖两联供系统”（后文简称“热泵两联供”）是长三角地区新兴的一种供暖方式。热泵两联供通过“天氟地水”或“天水地水”的形式，实现夏天为房间制冷，冬天为房间供暖两种功能，系统示意图见图4。夏季制冷工况下，设备将热泵制备的冷水（或直接将制冷剂“氟”）送入室内的风机盘管，与循环空气换热实现制冷的目的。冬季制热工况下，设备通过热泵制备热水，输送到室内的末端，从而实现供暖的目的。热泵两联供用于制热时的室内末端既可以是安装在地面下的地暖盘管，也可以是传统的暖气片。由于地暖的舒适性更高，末端是地暖的热泵两联供在长三角地区较为常见，也是本文主要的研究对象。

图4 热泵两联供(天水地水)系统示意图



冷暖空调

冷暖空调指同时具有制冷和制热功能的空调设备，但与“热泵两联供”不同，冷暖空调没有水系统，而是直接对于空气进行加热并吹向室内。冷暖空调通常不适宜在室外低温环境下使用，且通常需要配备电直热作为辅助热源，因此供暖能效也会相对低于热泵两联供。冷暖空调的形式有多种，包括一体机、分体机、多联机等，本研究中冷暖空调主要指家用的小型分体机 (mini-split)，一般只能满足单个房间的供暖需求。

3.1.2 其他常见分布式供暖设备

燃气采暖热水炉

燃气采暖热水炉（后文简称“燃气采暖炉”）使用燃气作为热源，制备热水通过管道输送到室内末端实现供暖的目的，地暖、暖气片均是燃气采暖炉可以配备的室内末端，地暖多见于新建建筑，而暖气片则多用于既有建筑改装，为了更好的和热泵两联供进行对比，本研究主要聚焦在以地暖为末端的燃气采暖炉供暖方式（后文简称“燃气炉地暖”）。燃气采暖炉通过燃烧化石燃料获得热量，能效更低，也造成更多的碳排放。另外，燃气采暖炉仅具备制热的功能，制冷则需要额外购置空调来实现。

电地暖

电地暖是一种较为新型的地暖形式。与上述的使用热水的地暖系统不同，电地暖系统采用铺设在地板下的发热电缆直接对地板加热。因为不需采用水系统，电地暖相比热泵两联供和燃气采暖炉维护更便捷、加热更迅速，也不涉及管道渗漏风险，但电地暖往往单位面积的造价更贵，相比热泵两联供的能耗也大得多。

电暖器

电暖器泛指直接使用电能作为热源的小型供暖设备，原理包括电阻加热、远红外加热、对流加热等，是一种将电能直接转换为热能的供暖设备。较小型的电暖器如小太阳等价格便宜、购置方便、可以移动，但是供暖效果不佳，通常只能满足局部空间的供暖。因此，电暖器一般很难完全满足一个家庭的供暖需求，而仅适合于作为辅助供暖设备，用电暖器配合冷暖空调使用也是长三角地区较为常见的家用供暖设备组合。

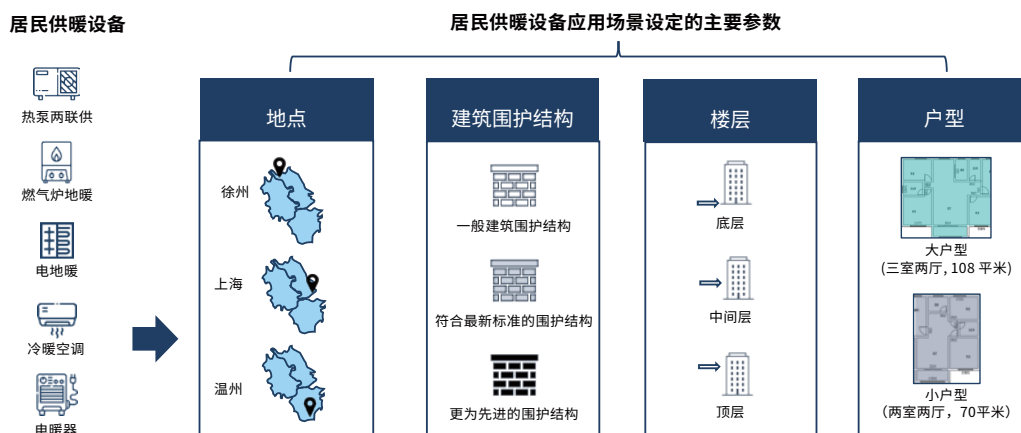
3.2 不同供暖设备多维度分析对比

对比不同供暖设备需要首先对于其具体应用场景进行定义，然后在相同的应用场景下从不同维度分析对比供暖设备的优劣势。本章节首先定义了居住建筑典型户型的供暖设备应用场景，然后对于五种常见分布式供暖设备（热泵两联供、冷暖空调、燃气炉地暖、电地暖和电暖器）在各场景中的应用展开分析，从不同的维度对于各设备进行定性和定量的分析对比。

在供暖设备应用场景定义上，考虑到居民供暖需求主要受到地理位置、建筑围护结构、楼层以及户型的影响，本研究从这四个方分别选取了长三角地区的较具代表性的居民供暖设备应用场景：地理位置选取了江苏徐州、上海、浙江温州3个城市，分别代表了长三角地区以内冬季最冷、冬季温和、冬季最暖的三种气候类型；建筑围护结构选取了一般居住建筑（保温性较差）、仅满足能效规范的建筑（保温性尚可）、和高能效建筑（保温性优异）三种建筑围护结构，各围护结构的性能参数可见附录一表3；此外，楼层和户型也对建筑的供暖需求产生影响，本研究选取了底层、中间层、顶层3个楼层的场景，并选取了长三角地区占比最大的两种家庭结构对应的典型户型，作为设备对比的主要场景（附录一表4）。图5对于供暖设备应用场景的设定进行了汇总。

在评价维度的选择上，本研究选取了碳排放、经济性、舒适度作为评价居民供暖设备的三个最主要维度。在全球共同应对气候变化的大背景下，尽量低的碳排放是未来供暖设备所必须具备的特质；经济性则是选购供暖设备时最为重要的考虑因素之一；而保证冬天的室内舒适度，是供暖设备所应具备的最基本的功能。除此之外，本研究还将对于其他可能会影响供暖设备实际应用与选择的因素进行探讨，从而更加全面的分析各类供暖设备的优劣。

图5 长三角地区居民供暖设备应用场景设定



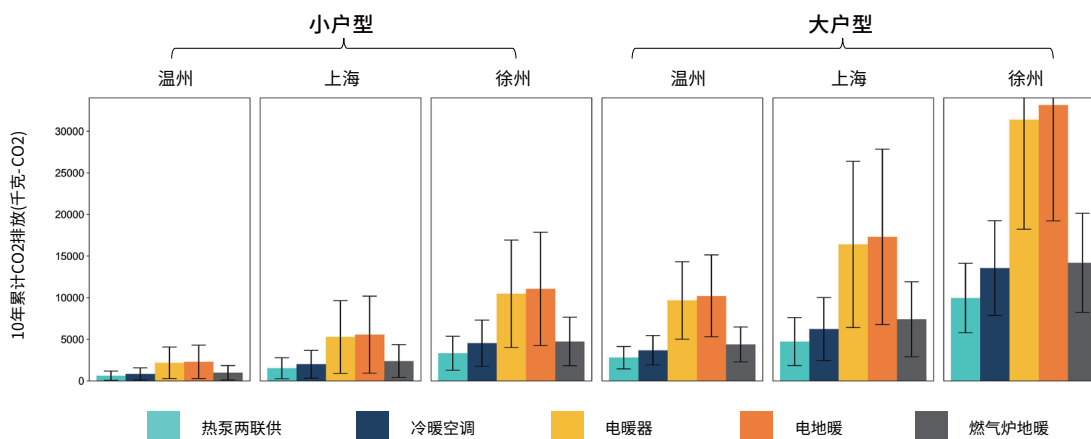
3.2.1 对比维度一：碳排放

在长三角地区居民供暖设备应用场景中，热泵设备是造成碳排放最低的供暖设备，热泵设备在未来十年的使用周期内相比其他设备可实现30%-70%的二氧化碳减排；相对于燃气设备，热泵的碳减排优势将随着建筑用电的单位碳排放的降低愈发突出，2020到2060年热泵设备可累计减排超过50%。

本小节^V对比分析了每一种供暖设备在典型的应用场景下的未来十年碳排放累计总量以及更长时期内的累积碳排放。供暖设备产生的碳排放主要来源于设备使用过程中用能造成的二氧化碳排放：燃气设备直接燃烧天然气释放二氧化碳，产生建筑内的直接碳排放；电气化设备并不造成建筑内的直接碳排放，可以通过实际供暖设备用电量乘以地区的电网排放因子^{VI}计算得出。

在同样的供暖设备应用场景下，热泵两联供以及冷暖空调造成的碳排放始终为最低。燃气炉地暖的碳排放位居中位。电暖器与电地暖因为效率较低、电网排放因子较高的原因，造成的碳排放明显高于其他设备。以徐州大户型为例，热泵两联供的使用周期内供暖碳排放仅为燃气炉地暖的70%，电地暖的三分之一，减碳优势十分明显。图6展现了不同地理位置的大小户型采用不同供暖设备的十年累计碳排放量（图中工字线代表围护结构和楼层对碳排放的影响）。

图6 不同城市和户型下各供暖设备的十年累计碳排放

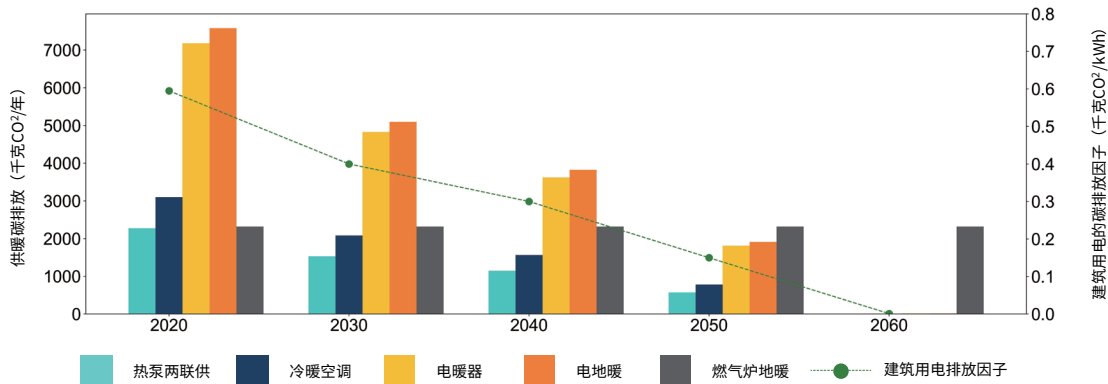


^V 本研究计算的供暖设备碳排放为利用供暖设备使冬季整个房间都维持在18°C时，所消耗能源造成的碳排放。

^{VI} 每发一度电所产生的二氧化碳排放，单位 (kg-CO₂/kWh)

随着未来建筑用电碳排放的降低，热泵的减碳优势越发突出。热泵由电能驱动，造成的碳排放也受到建筑用电单位碳排放的影响。随着建筑屋顶光伏等分布式可再生技术的快速应用，建筑用电的单位碳排放会逐渐下降，热泵供暖设备造成的碳排放也会随之进一步降低。图7展示了在典型供暖应用场景下不同供暖设备碳排放随着时间的变化。热泵两联供2020年的二氧化碳排放已经低于燃气炉设备，随着电力系统的逐步脱碳其减排的优势将愈发明显，可以在2060年建筑用电零碳化^{vii}的基础上实现零碳。虽然电地暖和电暖器也由电能驱动，到2060能够实现零碳供暖，但电地暖和电暖器的近期碳排放明显高于其他设备，且由于能效较低，电暖器和电地暖供暖的电功率极高并消耗较高的电量，对于电力系统的稳定运行带来极大挑战。基于对典型户型供暖设备累积碳排放的计算，到2060年，相比于燃气炉地暖，单个住宅使用热泵两联供将累计减碳超过50%，相比于电暖器和电地暖，累计减碳超过70%。

图7 建筑用电脱碳趋势下不同供暖设备造成的年碳排放变化



3.2.2 对比维度二: 经济性

热泵设备具有运行成本低的优势，然而其整体经济性主要取决于其购置成本。同样作为热泵设备，冷暖空调的购置成本低，其经济性为五种设备中最优，然而热泵两联供由于购置成本较高导致其整体经济性欠佳。

本小节计算对比了不同供暖设备应用场景下的供暖设备全生命周期（10年）成本，从而对于不同供暖设备的经济性进行评估。全生命周期成本包括设备的初始购置成本、运行成本、维护成本以及残值，附录三对于各成本的概念以及研究所用假设进行了详细介绍。为了便于对比，全生命周期成本在本研究中以现金流折现（折现率取5%）后的现值（Present Value）^{viii} 和等额年金（Equivalent Annual Cost）^{ix}来呈现。

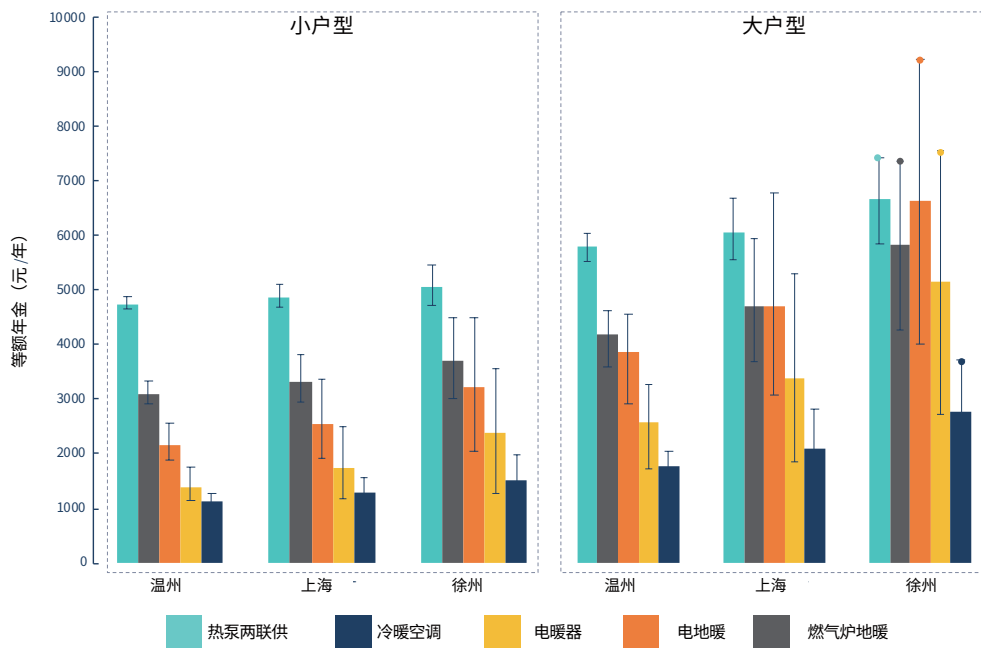
^{vii} 考虑到分布式光伏（如屋顶光伏）与光储直柔等技术在建筑领域的发展趋势，本研究预计2060年建筑用电可以实现完全零碳排放

^{viii} 现值（Present Value）即未来的现金流折算到现在的价值。整个生命周期的所有现金流的现值总和为净现值（Net Present Value）。

^{ix} 等额年金（Equivalent Annual Cost）即净现值在生命周期内的每年等值，其折现后便是净现值。

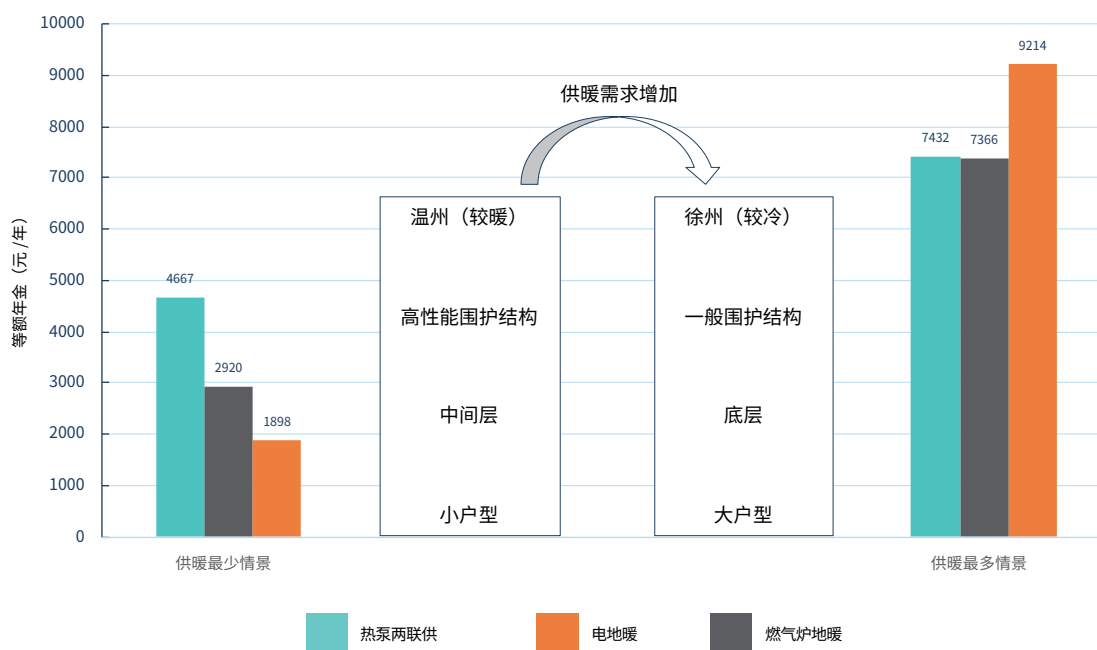
图8 展示了不同地理位置的大小户型采用不同供暖设备的等额年金（图中工字线代表围护结构和楼层的影响），等额年金越低，代表用于供暖的花费越低，设备经济性就越好。在大部分应用场景下，热泵两联供的经济性最差，电地暖和燃气炉地暖经济性略优于热泵两联供，冷暖空调的经济性最优。对于小户型来说，热泵两联供和冷暖空调的等额年金分别为每年4900元左右和1300元左右，相当于每年在供暖上每年分别需要花费约4900元和1300元。这一数字在不同应用场景下略有差异：小户型的热泵两联供等额年金范围在每年4670元-5450元间，冷暖空调等额年金范围在每年1040元-1970元间。对于大户型，热泵两联供和冷暖空调的等额年金分别为每年6200元左右和2200元左右。大户型的热泵两联供等额年金范围在每年5520元-7430元间，冷暖空调的等额年金范围在每年1440元-3710元间。燃气炉地暖和电地暖的平均等额年金也低于热泵两联供，然而两者的等额年金随着应用场景的变化呈现出较大波动（见图8中的工字线），而冷暖空调以及热泵两联供的等额年金则相对稳定，这导致部分情况下，热泵两联供的经济性已经接近或者超过电地暖和燃气炉地暖（见图8圆圈）。

图8 不同城市和户型下各供暖设备的等额年金



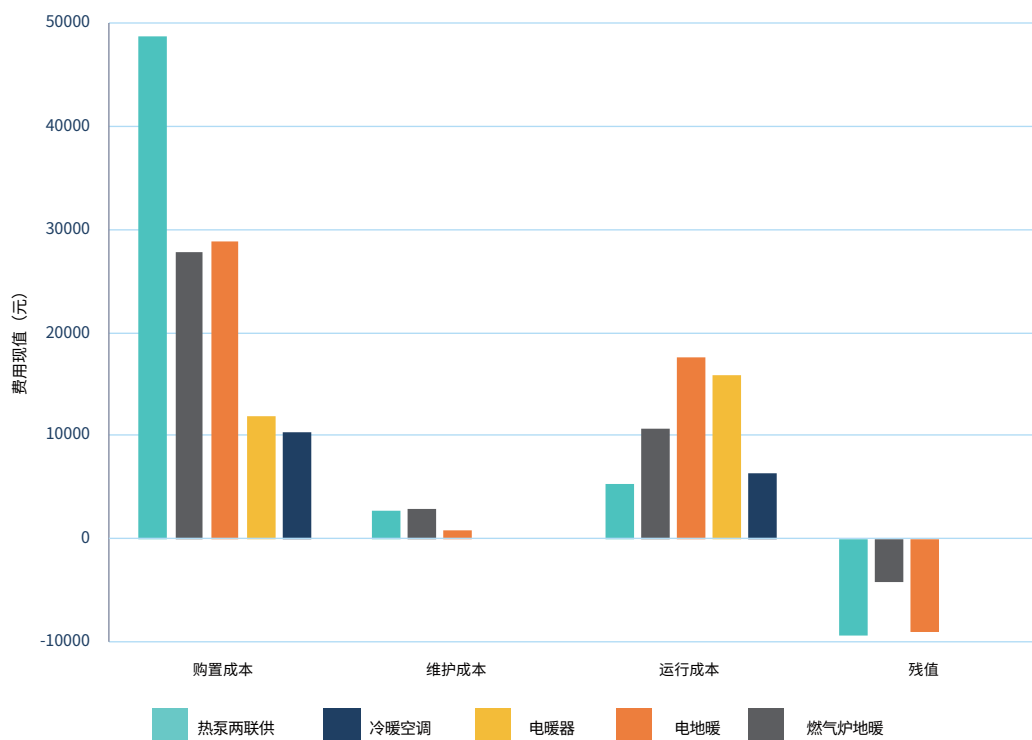
热泵的经济性随着供暖需求量的增大而得到提升。在研究模拟得到供暖需求量最多的应用场景下，热泵两联供的等额年金约为7432元/年，远低于电地暖的9214元/年，趋近于燃气炉地暖的7366元/年。导致供暖需求量增加的因素有很多，包括更冷的冬季温度、保温更差的围护结构、更大的户型、以及住宅更靠近建筑物底层/顶层等。换言之，对于位于气候较冷地区的、较旧的、面积更大的、靠近底层或顶层的住宅来说，采用热泵两联供供暖会更具有经济性。通过对各供暖途径等额年金随供暖需求的变化趋势分析，研究也发现在全年供暖量超过11500 kWh时，即对应每年供暖消耗的燃气量超过1500立方（对应整个供暖季的燃气费用超过3900元），热泵两联供的全生命周期经济性会超过燃气炉地暖。

图9 供暖需求最少的应用场景和供暖需求最多的应用场景的等额年金对比



运行成本为热泵优势所在，购置成本决定热泵整体经济性。在所有设备中，热泵两联供系统的购置成本最高、运行成本最低。其次，燃气炉地暖和电地暖系统也有较高的购置成本，且运行成本上并无优势。电暖器和冷暖空调的购置成本很低，但前者运行成本高，后者运行成本低。除了购置和运行成本外，维护成本和残值也对生命周期经济性有一定影响，尤其是热泵两联供和电地暖系统的残值较高，回收价值可观，但是不足以给整个生命周期的经济性带来显著优势。

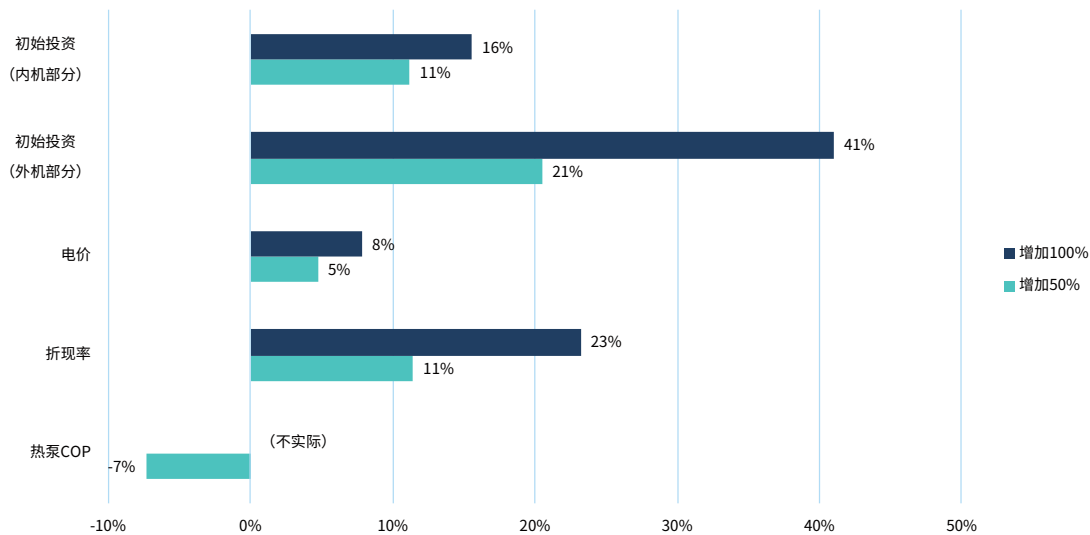
图10 一般围护结构下，各供暖途径生命周期费用构成的平均现值



除了购置成本外，其他因素也对热泵的经济性有一定的影响。其中影响最为直接的包括峰谷电价、折现率，以及热泵的供暖设备效率（消耗单位电量能够产生的供暖量，即COP）。针对这些因素，本研究进行了单变量的灵敏度分析（见图 11），得到以下结论：

- **热泵的购置成本（包括室外机和室内系统）对热泵生命周期经济性影响超过其他的因素。**由于热泵两联供购置成本占比最大，购置成本的变化会对生命周期经济性造成最大的影响。其中，热泵外机的价格影响超过了热泵室内系统价格的影响^x。
- **折现率增加对热泵有明显劣势。**热泵的主要优势是节省运行成本，即减少未来的支出。高折现率下，未来的现金流折损更多，节省未来运行成本的价值更低，不利于应用热泵。
- **电价对热泵经济性影响有限。**电价高低主要影响热泵的运行费用，如图10所示，运行费用在热泵生命周期费用中占比远低于其购置成本，因此电价变化对于热泵整体经济性影响较为有限。
- **增加热泵COP对提升热泵生命周期经济性效果有限。**虽然更高的COP能降低热泵能耗，减少运行费用，但是运行费用在热泵生命周期费用中占比低，而且目前市面上的热泵COP提升空间有限，因此优化COP并不是提升热泵经济性的理想手段。

图11 各参数增加导致热泵两联供等额年金的变化（以一般围护结构下上海的大户型为例）



^x 此处“热泵室内系统”并不包括地暖，因为地暖并不仅仅存在于热泵两联供系统内，也存在于燃气炉地暖系统内。地暖造价的变化也会对燃气炉地暖的经济性造成影响，因此并不会实质上改变热泵两联供和燃气地暖二者间的相对优势。

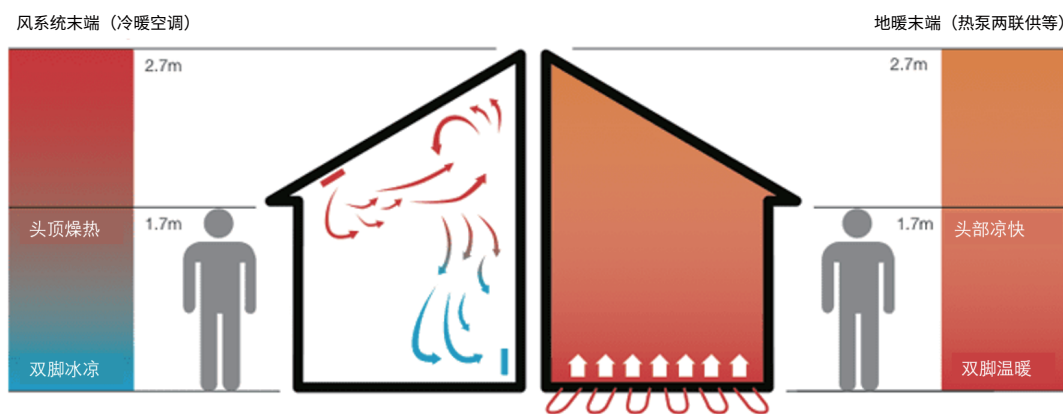
3.2.3 对比维度三：舒适与健康

热泵两联供在温度、湿度、噪音和空气质量几个影响舒适与健康的因素中表现最优。热泵两联供、燃气炉地暖、电地暖能够提供更为均匀的温度分布且干燥感较低、供暖舒适性好。相比于燃气炉地暖，热泵两联供还能够提供更优的室内空气质量。

温度、湿度、噪音是最容易直观感受到的影响室内舒适度的因素，供暖设备在这三方面的表现对于冬季室内舒适度的评价尤其关键。另外，室内的空气质量（如过敏原、扬尘、二氧化碳浓度等）在影响室内舒适度的同时，还会对于人员的健康造成影响，也是需要予以考虑的方面。供暖设备采用的末端形式对以上几个因素有着重要影响，在常见的五种分布式供暖设备中，热泵两联供、燃气炉地暖、电地暖均采用地暖作为设备的室内末端，而冷暖空调则采用了风系统作为室内末端，电暖器的末端形式则相对较为多样。下文将从上述几个方面对比评价不同分布式供暖系统对于舒适和健康的影响。

在室温控制方面，室内温度的分布对于室内舒适度的高低至关重要。供暖设备采用的室内末端形式是室内温度分布的决定性因素。图12展示了地暖末端与风系统末端的温度舒适度对比，可见地暖的供暖曲线最接近人理想供暖曲线^{XI}，这是由于两种系统不同的加热方式导致的：地暖可以通过辐射散热形成舒适的室内温度分布，使人足底先暖和起来；而冷暖空调通过强制送风系统供暖，由于冷暖空调出风口位于房间靠近天花板的位置，热空气上浮，容易造成“头热脚冷”的不适感。除温度分布外，加热快慢也是需要考虑的因素，采用地暖作为末端的设备由于供暖面积较大且需要先加热介质（水、地板）然后再以辐射的方式向室内供热，因此其加热速度相对于冷暖空调和电暖器较慢（但停机后还能利用热介质以及地板的蓄热持续供热一段时间），这也造成设备的使用模式的差异，通常地暖系统为全时间使用，而冷暖空调和电暖器则可以更加灵活的选择开关时间。整体来讲，热泵两联供、燃气炉地暖、电地暖这三种末端为地暖的供暖设备相比冷暖空调和电暖器能够提供较高的温度舒适度，然而其加热速度要慢于冷暖空调和电暖器，因此并不适合间歇性的使用模式。

图12 地暖与空调舒适度的对比⁹



^{XI} 地暖运用热空气上升的原理，加热地面向上辐射散热，当地面温度达到24摄氏度时，头顶处空气的温度为16摄氏度，使人足底先暖和起来，促进了人体血液循环。

湿度方面，一般供暖设备本身均不具备在冬季供暖工况下直接调节室内湿度的功能。而冷暖空调通常会造室内更加干燥的感觉，普通冷暖空调采用自上而下的送风方式，风感强，空气中的水分和皮肤表面的水分蒸发都会加快，导致住户感到空气更加干燥。而地暖和暖气片由于是通过辐射散热的无风系统，干燥感会大大降低。

噪音方面，采用地暖作为末端的供暖设备与电暖器在制热工况下不需要风系统，避免了送风噪音，因此运行相比冷暖空调更为安静。同样是采用地暖作为末端，电地暖由于无机械结构，可以完全避免噪音问题；热泵两联供的室外机与燃气炉地暖机箱均会产生一定的噪音，但由于安装位置通常远离室内人员的主要活动区域（热泵室外机安装在室外，燃气炉地暖机箱通常安装在厨房），因此噪音影响均较小。

室内空气质量方面，引入室外空气是促进良好空气质量的重要因素之一，现大多数住宅加热系统都没有新风系统，它们只有排风系统并依靠渗透和人为通风将室外空气带入房屋，这样不但容易引入室外污染物，且人为通风难以保证足够的新风量，降低了室内空气质量。部分较为先进的热泵两联供可以选配机械新风系统，这可以帮助提升室内空气质量，由于机械新风系统通常具有过滤（HEPA/MERV）装置，可以有效过滤室外空气中的污染物，且机械控制更为准确，能够保证室内新风量满足健康需求。目前市面上一些较为先进的冷暖空调也具备新风功能，但其提供的新风量通常较低，对于室内空气质量的提升较为有限。

表 1 对于各分布式供暖设备的舒适健康方面的优劣进行了总结。

表1 供暖舒适健康对比

评价维度	冷暖空调	热泵两联供	燃气炉地暖	电地暖	电暖器
温度	温度分布不均匀，有吹风感，舒适性较差	脚暖头凉，温度分布合理，舒适性好，但加热相对较慢。			温度分布不均匀，舒适性差，仅适用于局部供暖
湿度	风系统容易造成干燥的感觉	无风系统，无吹风感，不易造成干燥的感觉			
噪音	有送风噪声	噪音较低	噪音较低	几乎无噪音	几乎无噪音
空气质量	部分机型可以提供新风，对室内空气质量的提升有限	可以选择加装新风除湿模块，提升室内空气质量	通常不具备新风功能		

3.2.4 其他对比维度

除上述三个主要的对比维度之外，安装的难易程度以及与未来的能源系统的匹配性，也是影响供暖设备选择的重要因素，这些方面也在一定程度上会影响供暖设备能耗及碳排放，本小节将针对这些特点对于上述的供暖设备进行对比。

安装难易程度

由于采用了地暖作为室内末端，热泵两联供、燃气炉地暖、电地暖通常安装较为麻烦，热泵两联供室外机的安装大大限制了热泵在既有老旧小区推广。燃气炉地暖、热泵两联供以及电地暖因为需要在地板下方铺设水管或者发热电缆以及其配套措施，安装需要较为复杂的施工过程，因此一定程度上会影响用户选择这类设备。与之相比，冷暖空调、电暖器这类相对小型家电设备则明显更具优势，特别是对于既有房屋，住户在不需要对于房屋整体进行重新装修的情况下则更容易选择“即插即用”型设备进行供暖。还必须指出的是，热泵两联供通常需要体积较大的室外机组，长三角地区的老旧小区通常没有预留足够的空间，会直接导致热泵两联供设备在这类房屋中无法安装。

与新型能源系统的适配性

在未来面向零碳的新型能源系统中，相比于工业和交通，建筑是最容易实现电气化的部门，因此天然气设备在建筑领域的应用必然会逐渐减少直到实现全面电气化。**热泵两联供系统因为其超高能效以及具备一定储热能力的特点，是五种长三角地区常见供暖设备中，与新型能源系统适配度最高的供暖设备。**

如果长三角地区迅速增长的供暖负荷全部由电气化手段满足，也会造成地区用电量与尖峰用电负荷的大幅增长，造成间接碳排放的增加并为电网的稳定运行带来挑战，应对这一问题，热泵供暖能效较高的特点使其在提供同样的热量时消耗较低的电能，相对于电暖器和电地暖这类能效较低的电直热设备对于电力系统的影响较小。

另外，随着光伏、风电等可再生发电在电力系统中占比的逐渐提升，提升电力系统的灵活性变得愈发关键，相比于在供给侧提供更多储能设施（如利用电池储能等），需求侧响应通常是更具经济性的手段。热泵两联供系统中，水是热能的主要载体，同时也是良好的储热媒介，热泵可以在电力需求尖峰时段来临之前或者可再生能源发电充裕的时间提前运行，把制备的热量预存在水中，并在需要的时候释放出来，从而实现了在不牺牲室内舒适度的同时以极低的成本完成了需求侧的负荷管理（转移负荷）。通过热泵提供需求侧负荷的转移与调节也成为近年来的热点研究课题之一，有研究显示，为热泵系统加装额外的热缓冲装置（thermal buffering）可以实现长达6小时的负荷转移¹⁰，老旧房屋的围护结构更新改造配合热泵提供的灵活性能够极大地降低新型电力系统所需的储能建设成本¹¹。

3.3 供暖设备对比小结

本章节对于长三角地区常见的五种供暖设备进行了多维度的对比（见表2），热泵设备是最为符合居民供暖设备升级以及零碳转型趋势的设备，其造成的碳排放明显低于其他设备，且具备和新型能源系统良好适配的能力，然而热泵设备依然存在着一定的短板：冷暖空调供暖的舒适性较低，而热泵两联供也存在初始投资较高造成的整体经济性较差，安装较困难，供暖灵活性不高的问题。

表2 五种供暖设备的多维度对比汇总

		热泵设备		其他设备		
		热泵两联供	冷暖空调	电暖器	电地暖	燃气炉地暖
舒适与健康		★★★	★★☆	★☆☆	★★★	★★★
碳减排潜力		★★★	★★☆	★☆☆	★☆☆	★☆☆
经济性		★☆☆	★★★	★★★	★☆☆	★★☆
其他方面对比	容易安装	★☆☆	★★☆	★★★	★☆☆	★☆☆
	适配新型能源系统	★★★	★★☆	★☆☆	★☆☆	★☆☆

（备注：实心星的数量越多，代表了该设备在这一对比维度相对其他设备更具优势。）

在实际的供暖设备选择时，用户往往可以按照实际需求被分为两类：一类是对于室内舒适度相对不敏感的人群，另一类则是对于室内舒适度要求较高的人群。

冷暖空调和电暖器这两类设备是第一类用户主要选择的供暖设备，相较于电暖器，冷暖空调存在较为明显的优势，是更加值得推荐的供暖设备。电暖器尽管价格相对更加低廉，且灵活性更高，但由于其能效较低，并不适合作为房间的主力供暖设备。

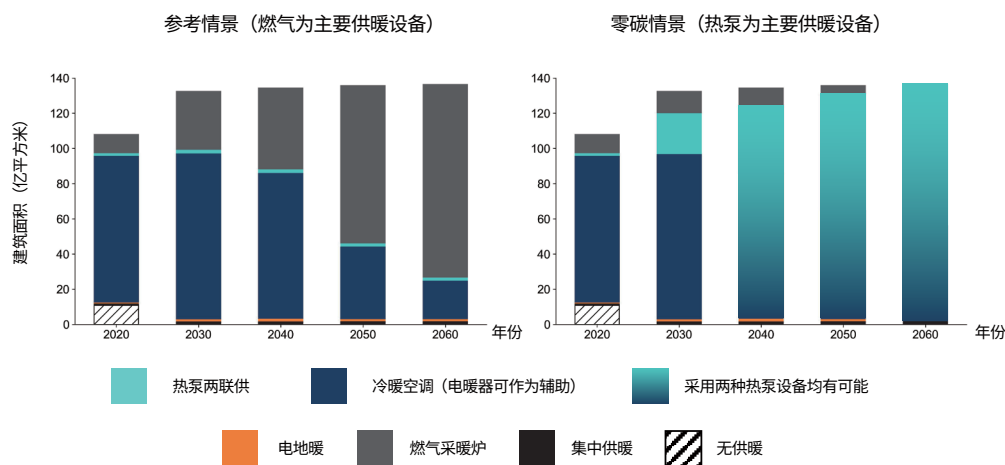
第二类用户由于对于舒适度的高要求，更偏向于在辐射型供暖设备中（即热泵两联供、燃气采暖炉和电地暖）做出选择。对于这类用户，热泵两联供是最值得推荐的供暖设备。首先，其节能减碳的优势十分明显；相比其他两种地暖设备，热泵两联供由于其“冷热两联供”的特点，具备提供更优舒适性的可能性，如新风、湿度调节等，更加符合高舒适度要求类用户的需求；成本方面，对于热需求较大的住宅（户内面积较大、气候相对较冷、处于建筑的顶层或底层），热泵两联供的超高能效带来的运行成本优势也将得到凸显，提升其整体的经济性。

四、长三角地区热泵供暖减排潜力及推广路径

长三角地区居民供暖正处于发展转型的初期，选择节能、低碳的热泵设备是长三角地区居民供暖零碳转型的关键因素。落基山研究所的研究表明，在零碳情景下，到2060年长三角地区采用热泵供暖相比于采用燃气供暖能够累计减少近6亿吨的二氧化碳排放。

为了分析热泵供暖在长三角地区应用的减排潜力，本研究设定了长三角地区的两种居民供暖发展情景：在参考情景下，燃气设备最先在新建建筑中广泛应用，并在规模化效应的影响下快速扩张，最终形成了2060年以燃气为主的居民供暖格局；在零碳情景下，新建建筑中热泵设备的推广避免了燃气设备规模化的形成，热泵设备逐渐取代既有燃气设备。图13展示了两情景下的设备应用对比。

图13 参考情景与零碳情景的设备应用情况对比(2020年 - 2060年)

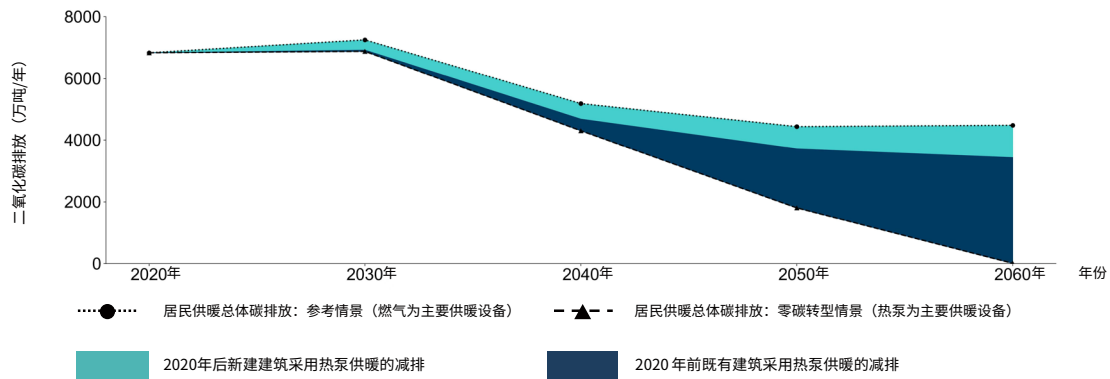


如图14所示，参考情景下的居民供暖的总体碳排放将呈现“上升-下降-稳定”的趋势。2020-2030年间燃气设备在新建建筑中的广泛应用是初期居民供暖碳排放上升的主要原因；2030-2040年间，燃气设备还没有在既有建筑中大规模的推广，大部分既有建筑依然采用冷暖空调^{xii}作为供暖设备，因此随着既有建筑围护结构节能改造带来的供暖热需求的降低以及建筑用电碳排放因子的降低，居民供暖整体的碳排放将随后呈现下降趋势；2040-2060年间，燃气设备由于规模化效应在既有建筑中占比逐步加大，围护结构节能改造带来的减碳效果逐渐被燃气带来的碳排放增长效果抵消，居民供暖的碳排放将逐渐下降并趋于稳定，到2060年，长三角地区居民供暖仍将造成约4500万的二氧化碳排放。

^{xii} 在长三角地区居民供暖发展情景预测中，“冷暖空调”包含了以“冷暖空调为主，电地暖作为辅助”的供暖方式，由于电暖器通常作为辅助性供暖设备，因此在情景分析中并未作为单独的设备列出。

零碳转型情景下的居民供暖的总体碳排放呈现“先不变再持续下降”的趋势。2020-2030年间的新建建筑主要采用热泵两联供进行供暖，伴随建筑用电碳排放因子的降低，尽管居民供暖需求上升，但造成的碳排放基本维持稳定。在2030-2060年间，受到建筑围护结构升级以及热泵设备占比逐渐提高带来的双重作用，居民供暖的碳排放将持续降低，热泵大规模应用的减排潜力将随着电力系统的逐步脱碳愈发明显，在2060年建筑用电完全零碳化的情况下可以实现居民供暖的零碳化。零碳转型情景相比参考情景从2020到2060累计减少约6亿吨二氧化碳排放，其中2020年后的新建建筑累计减排约2亿吨，2020年前的既有建筑累计减排约4亿吨，极大贡献了长三角地区碳中和目标达成。

图14 不同情景下长三角地区居民供暖的碳排放总量变化



当前燃气供暖设备的快速发展（特别是在新建建筑中）正为长三角地区居民供暖的零碳转型带来巨大挑战，尽快推动热泵设备在居民供暖中加速推广十分重要。分阶段、针对不同类型的建筑有序推广热泵设备是解决这一问题的核心抓手。基于以上情景分析，长三角地区热泵供暖的推广大体可以分为以下三个阶段：

○ **第一阶段：居民供暖系统转型初期（2020-2030年）：居民供暖面积持续上升，推动新建建筑采用热泵供暖。** 在该阶段中，新建建筑以及无供暖设备的既有建筑的住户面临新供暖设备的选择，避免这些用户选择燃气设备是该阶段的首要任务，应大力推广热泵两联供在新建建筑的应用，同时，鼓励无供暖设备的既有建筑住户采用冷暖空调而非燃气炉进行供暖。到2030年，长三角地区居民供暖的覆盖率达到100%，约2000万人实现了冬季供暖从无到有的转变；约17%的居民采用热泵两联供的方式进行供暖，较2020年水平提升约15%；燃气炉供暖扩张的势头得到遏制，维持在2020年水平（占比约10%）。

○ **第二阶段：居民供暖系统转型中期（2030-2045年）：推广热泵作为既有建筑的舒适性改善设备，逐渐降低燃气供暖占比。** 在该阶段中，居民供暖面积基本达到饱和，既有设备的更换是居民供暖转型的主要动力：燃气设备将逐步被热泵两联供设备取代，到2045年占比降至5%以下；同时，随着旧房改造的逐步推进以及热舒适性要求的提升，既有居住建筑中热泵两联供也将取代部分冷暖空调，逐步成为居民供暖的主流设备之一。

○ **第三阶段：居民供暖系统全面转型（2045-2060年）：居民供暖完全“低碳化”，实现零碳居民供暖。** 在该阶段中，燃气设备以及电地暖等能效较低的电气化供暖设备将完全由热泵取代，除极少数采用集中式供暖^{xiii}的居住建筑外，长三角地区居民供暖全部由热泵设备覆盖。随着建筑用电逐渐实现零碳排放，居民供暖将在2060年实现零碳。

^{xiii} 集中式供暖涵盖了采用城市管网的集中供暖以及以小区为单位采用统一热源的供暖方式，在零碳情景下，集中式供暖应采用集中式热泵、工业余热、生物质锅炉等零碳热源以实现居民供暖零碳化。

五、长三角地区推广热泵供暖发展的主要挑战与对应建议

在我国积极推动落实“双碳”政策的大背景下以及长三角地区居民供暖向更舒适的系统形式转型的大前提下，热泵是长三角地区当下最值得推广应用的供暖设备。然而，热泵设备的大规模推广应用仍然面临着诸多挑战。本章将基于前文的分析，对于热泵供暖在长三角地区推广应用的挑战进行梳理总结，并针对这些挑战从各个利益相关方的角度给出建议。

5.1 推广应用热泵供暖的主要挑战

购置成本高是热泵两联供推广的最主要挑战。落基山研究所调查显示，长三角新建住宅配套供暖已成为主流，开发商在配置何种供暖设备方面起着决定作用，而优先选择燃气地暖系统的主要原因在于其购置成本低于热泵两联供系统约15%。在提供相同的供暖服务的情况下，如果没有相应的热泵推广优惠政策，开发商从溢价的角度倾向于选择成本更低的配套产品。

公众对热泵两联供的认知度较低也阻碍了热泵供暖的推广。相比于电暖器、燃气炉、电地暖，由于热泵两联供的普及度比较低，很多用户完全不了解该供暖设备，或者只是听说过但是不了解其舒适度、环保性及运行费用低的优势。此外，用户获取热泵产品信息的渠道依赖于线下的经销商，缺少线上等便捷的了解购买渠道，这一情况也客观上造成了用户选择热泵的障碍。

热泵两联供与建筑的适应性不足则是热泵两联供推广的另一大挑战。热泵两联供系统的室外机安装所需空间较大，既有建筑预留位置不足，使得建筑不具备安装热泵的条件。热泵两联供系统安装及后期维护比较复杂，对用户也造成一定顾虑。另外，长江流域室外空气的湿度较大，热泵运行时，其室外换热器容易结霜，将导致供暖量衰减和供热不稳定的问题，有可能降低用户的使用体验。

冷暖空调的供暖舒适性欠佳是导致用户选择其他供暖设备的主要原因。目前主流的冷暖空调在制热工况下依然采用“上送风”的方式，导致热舒适性较差。有调研显示³，约50%的空用户反映空调供暖时“制热慢、制热效果不好”。提升冷暖空调的供暖舒适性是推动居民采用冷暖空调进行供暖的核心问题。

5.2 推动热泵供暖发展的建议

5.2.1 给住户的建议

在面临供暖设备选择时，优先选择热泵设备。热泵两联供无论在冬季夏季，均能提供极佳的室内舒适度，在供暖需求较大的应用场景中，其较低的运行成本使其使用周期内的花费接近甚至低于燃气采暖炉，综合来看是更优于供暖设备的选择。尽管当前冷暖空调的供暖舒适性欠佳，但随着产品的逐渐升级，目前新型的冷暖空调制热能力逐渐提升，通过送风方式调整等方法也提升了其供暖舒适性，加上价格相对低廉、购买安装方便等特点，也是十分值得推荐的供暖设备，尤其适用于对于设备投资较为敏感的住户或不适宜安装热泵两联供的老旧小区。另外，也建议用户在购置冷暖空调时充分关注其供暖能力（制热量），以免因为仅考虑了设备制冷能力（制冷量）而导致供暖效果不佳。

结合热泵对老旧住宅进行翻新。老旧住宅安装热泵可能会遇到外机安装麻烦的问题，譬如外立面没有室外机安装位置、墙面老化脱落、墙体承重低等。针对这些问题，老旧小区住户可以考虑多户共享一套主机设备（类似可分户计量的“一拖多”空调系统或空气源热泵冷热水机组+风机盘管空调系统），并将室外机安装到地面或屋顶等不影响墙体结构的位置。这可以通过住户间自发组织或物业公司协调实现。另一方面，老旧住宅也能通过翻新围护结构提高其保温性能，在根源上减少供暖需求，从而能够安装体积更小的热泵设备，减轻结构负担。

5.2.2 给政策制定者的建议

政策补助热泵生产销售。有针对性的政策补助对缩小热泵和其他供暖设备的购置成本差额至关重要。由于供暖在长三角地区难以定义为刚需，且热泵作为供暖方案并非不可替代，热泵消费端的补助难免招致有关财政公平性的争议。相反，在生产端进行补助，能让热泵企业直接受益，助力热泵产业有序发展。补助形式可以多样，例如研发补贴、产品补贴、税收减免等。

尽快推出并落实对于新建住宅使用热泵供暖的鼓励或强制政策。对新的住宅开发项目收紧供暖设备的购置安装要求，例如禁止使用化石燃料设备或对特定环境下的住宅项目要求使用热泵供暖。另一方面，建议对主动采用热泵的地产开发项目放宽限制，例如提高可售容积率的限制等。

把热泵减排纳入自愿减排计量认证体系。热泵在供暖和供冷上的减碳潜力巨大，能通过建筑、工业供暖等途径给碳市场带来大量减排量。组织研究热泵减排计量方法学，准许对于热泵减排项目发行国家核证减排量（CCER），有利于将热泵的环境权益变现，降低热泵成本。除此之外，还可以研究发展针对热泵产品的碳普惠机制，一方面提升热泵使用的经济性，还可以借此提升热泵产品的公众认知度。

提高公众的热泵认知度。目前长三角地区大众对热泵的了解有限，是热泵推广应用的一大阻力。提高热泵认知度，需要相关部门、社会组织 and 热泵企业联手，增加科普宣传力度，从用户舒适度、经济性、环境影响三个维度讲好热泵的故事，让公众认识到热泵不仅是一个舒适、经济的供暖方式，也是实现国家双碳目标的关键技术，以体现采用热泵供暖的每个人都是节能降碳事业的贡献者。

5.2.3 给地产开发者的建议

建立与热泵供应商的长期合作机制。通过与热泵生产或经销商合作，一方面简化热泵的购置流程，另一方面推动热泵产业扩大，助力热泵的规模化发展。开发商也能帮助对接业主和热泵解决方案供应商，既能让业主获得更便利的热泵产品购买和售后服务渠道，也能让热泵供应商获得大量稳定的潜在用户群体。

开发“热泵友好”和“热泵精装”住宅。开发商可以在项目规划和设计流程中充分考虑热泵安装的所需条件，譬如留出室外机安装平台^{xiv}以及管道安装位置等，让业主安装热泵更方便、建筑更美观、热泵运行更高效。另外，开发商也可以在装修时配套热泵，减轻业主负担，提升房产价值。

探索创新商业模式，分摊热泵初期成本。针对热泵两联供产品初投资较高的问题，开发商可以探索帮助用户分摊初期成本的创新商业模式，例如提供贷款、出资安装部分或整套设备，并通过后期收取供暖费、物业费，或提成热泵利润等方式回收资金。

^{xiv} 参考中国土木工程学会《建筑外墙空调器室外机平台技术规程 T/CCES 10-2020》

5.2.4 给生产厂家、经销商的建议

针对长三角地区的特点进一步优化热泵产品。由于近年来“煤改电”政策的推行，众多热泵厂家更多针对于北方农村市场开发热泵产品，对于南方居民供暖特点的针对性热泵产品开发则相对较少。为了提升热泵产品在长三角地区的竞争力，可以针对以下几个方面进行优化：

- **优化冷暖空调的制热功能，提升其供暖舒适度：**针对冷暖空调供暖舒适性差的问题，可以对于制热工况下的送风方式进行优化，小型壁挂式冷暖空调可以通过提高风量、向下吹风的方式改善制热时的温度分布；柜机式空调则可以进一步开发优化“冷暖分送”（即制冷时上出风，制热时下出风）的送风方式。

- **针对中小户型研发推广小型热泵两联供产品：**热泵两联供购置成本高的一个主要原因是市场的主流热泵功率较大，制热量普遍在10kW以上，适合大户型使用，但对于长三角地区中小户型的来说则过大。这导致不少小户型配大热泵的尴尬情形，用户因此承担了不必要的费用。建议热泵厂家针对中小户型设计功率在8kW以下、体型更小（如单风扇外机）、更易安装的热泵，并加以推广。

- **长三角地区较高的空气湿度导致的热泵结霜问题：**在高空气湿度条件下，热泵的室外机容易产生结霜，这会导致热泵制热性能的下降与能耗的升高，这将降低用户供暖的舒适性，并造成用能费用的上升。

积极研发推广“热泵三联供”产品。“热泵三联供”产品是指能够提供夏季制冷、冬季供暖、生活热水制备三种功能的集成型一体化热泵机组。目前大多数的热泵两联供机组不具备制备生活热水的功能，用户在购买热泵两联供供暖系统之外还需额外购买热水器，而燃气采暖炉则通常兼具供暖和热水的功能，这往往会成为用户选择燃气采暖炉而非热泵两联供的原因之一。因此，开发发展集成热水功能的三联供暖泵机组会大大增加用户选择热泵供暖的可能性。另外，三联供机组在夏天还能通过热回收装置进一步实现生活热水制备的节能减排。

通过成功案例积极宣传与推广热泵。目前长三角地区一般用户身边能接触到的热泵用户也有限，能获得了解热泵的渠道也有限。因此，热泵商家在宣传产品时除了描述热泵性能优势并提供相关数据，最好能给出具有示范意义的成功案例。研究团队通过采访也发现热泵供应商将和开发商合作的成功项目作背书是一个可行的推广策略。

六、长三角地区热泵供暖路径探索对其他地区供暖零碳转型的积极贡献

在全球共同应对气候变化的大背景下，热泵高能效低排放的特点使其在全球范围内也受到广泛应用，被认为是应对全球变暖的关键技术之一。目前，各国均在积极采取政策措施，加速低碳供暖设备的推广与部署：欧盟在2022年3月发布的RePowerEU计划中提出在未来五年内热泵销售量翻倍，增加1000万台热泵，到2030年新增3000万台热泵的目标；美国在2022年8月颁布的Inflation Reduction Act（《通货膨胀削减法案》）中提出将通过高额补贴来鼓励居民购买热泵进行采暖。

IEA的报告指出，目前全球有约1.9亿台热泵用于建筑供暖，覆盖了10%的建筑热需求。尽管热泵的应用近年来持续增加，但仍距离2050净零碳目标所需的热泵部署有一定差距¹²。各方仍需进一步采取措施，加速热泵的应用推广。长三角地区热泵供暖的推广在助力自身供暖零碳转型的同时，也将极大的贡献于全球热泵的加速应用，从而实现更大范围的零碳转型。

推动中国其他地区的零碳供暖转型

在长三角地区的热泵供暖零碳转型模式可以直接为中国其他南方地区（例如长江中下游的湖南湖北、川渝地区等）提供示范，这些地区具有和长三角相似的“夏热冬冷”气候特点以及利用分布式设备供暖的使用习惯，在长三角地区的成功推广将极大助力热泵设备在这些类似地区的规模化推广应用，从而助力地区的居民供暖零碳转型。

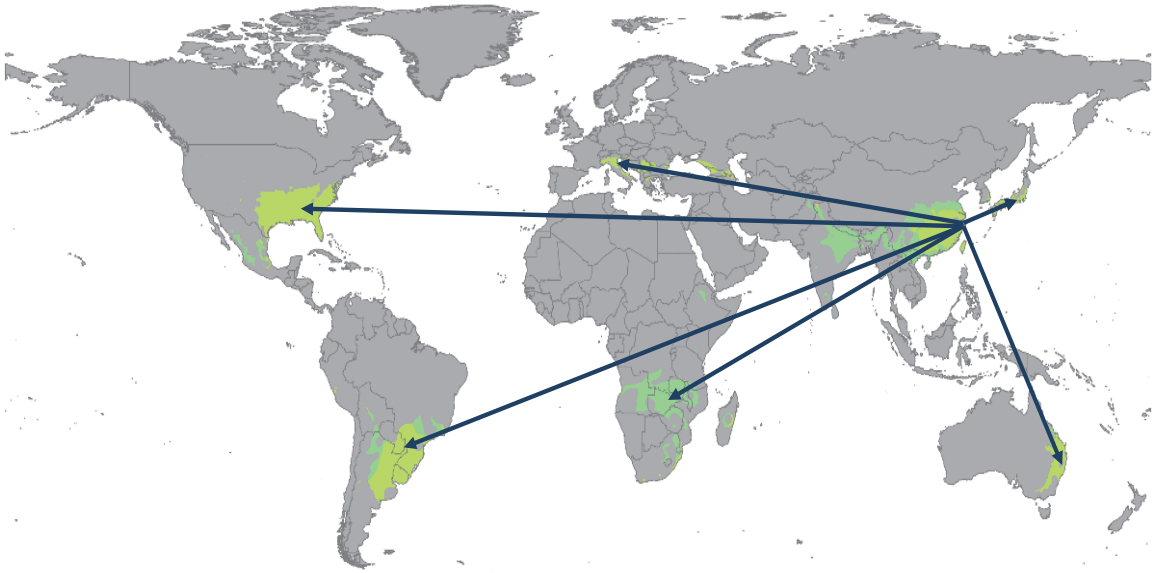
在供暖需求更高的北方寒冷地区，低环温型空气源热泵（见附录二表5）目前也得到了一定规模的应用，如在京津冀的农村地区，热泵是“煤改电”推广的主要设备。但推广模式主要局限于政策支持下的集中采购，类似于“整县光伏”的推行。除此之外热泵在居民供暖中的应用则十分有限，进一步的推广模式还依然有待探索。长三角地区的居民供暖的采购模式则多为用户自采或地产开放商的集中采购，热泵在该地区成功探索可以为其在北方地区的进一步推广提供宝贵经验。

助力全球零碳供暖转型

作为制造业大国，中国也是世界上最大的空气源热泵出口国，近年来中国空气源热泵出口市场规模高速增长，2021年出口额为48.6亿元，为2017年的近4倍¹³。在全球积极应对气候变化的背景下，热泵的需求正飞速增长，2021年全球热泵销售增长达到13%，欧洲热泵市场更是以年35%的增长率屡创纪录，2022年俄乌冲突带来的欧洲燃气供应紧张将进一步激发对于热泵的需求，热泵设备的需求还将在未来很长一段时间内持续增加，中国的热泵出口依然存在广泛的上升空间。热泵在长三角地区的大规模推广将为我国热泵企业积累宝贵的市场经验与用户反馈，从而进一步提升我国出口热泵供暖在国际市场上的竞争力。

在世界范围内，也存在着诸多与长三角地区有着相似的亚热带湿润气候特点的地区（图15），约15%的世界人口居住在这一地区，长三角地区推广热泵供暖的先进模式与宝贵经验，也将为这些地区的居民实现零碳供暖转型提供参考，助力全球范围内的零碳供暖转型。

图15 全球与长三角气候类似的气候区



附录一：建筑能耗模拟输入参数

表3 围护结构性能参数表

场景	一般围护结构	满足能效规范	高性能围护结构
来源	中国建筑节能年度发展研究报告2021: 长江流域居住建筑基准建筑 ³	建筑节能与可再生能源利用通用规范 2021 ¹⁴	中国建筑节能年度发展研究报告2021: 长江流域居住建筑被动优化方案 ³
外墙传热系数(W/m ² -K)	1.14	0.6	0.53
屋顶传热系数(W/m ² -K)	0.93	0.4	0.48
外窗传热系数(W/m ² -K)	2.8	2.5	1.71
外窗得热系数(SHGC)	0.75	0.67	0.67
气密性指标(ACH)	1	0.5	0.5

表4 户型参数表³

户型	大户型	小户型
套内面积 (平方米)	108	70
房型	三室两厅两卫	两室两厅一卫
家庭结构	三代家庭 (退休老人+上班族夫妻+子女, 5人)	核心家庭 (上班族夫妻+子女, 3人)
工作日 (周一到周五) 在室时间	客厅: 08:00-12:00, 14:00-22:00; 卧室1: 12:00-14:00, 22:00-08:00; 卧室2: 22:00-08:00	客厅: 18:00-22:00; 卧室: 22:00-8:00
休息日 (周六日、节假日) 在室时间	客厅: 08:00-12:00, 14:00-22:00; 卧室: 12:00-14:00, 22:00-08:00	客厅: 08:00-12:00, 14:00-23:00; 卧室: 12:00-14:00, 23:00-08:00

附录二：建筑用空气源热泵汇总

如表5所示，建筑用空气源热泵（以下简称“热泵”）在我国有狭义和广义的区分。广义上讲，所有基于图3所示的工作原理实现制热功能的设备都可以被纳入广义热泵的范畴；但狭义层面上，只有以制热功能为主的基于图3所示工作原理的设备才被认为是热泵。以普通家用的具备制热功能的冷暖空调为例，其通常具备制热功能，可以被认为是广义上的热泵，然而其主要功能为制冷，因此并不被纳入狭义热泵的范畴。

在国际上，各个国家对于建筑用热泵的具体定义也不尽相同，如美国就将具备制热功能的空调直接纳入热泵的范畴，欧洲则主要根据末端形式来定义产品的归属。

表5 建筑用空气源热泵分类及其描述

		热泵种类	对应标准	特点
广义空气源热泵	狭义空气源热泵	低环温型空气源热泵(冷水)机组	GB/T 25127.2	利用热泵加热水并送向室内的供暖设备，末端设备可以是地暖或散热器，同时具备制冷能力，可以在低环境温度下(-20℃)使用
		低环境温度热泵热风机	JB/T 13573	利用热泵加热空气并送向室内的供暖设备，一般不具备制冷能力，可以在低环境温度下使用
		热泵热水器	GB/T 23137	利用热泵制备生活热水的设备
		蒸气压缩循环冷水(热泵)	GB/T 18430.2 JB/T 14077-2021	同低环温型空气源热泵(冷水)机组类似，但并不适宜在低环境温度下使用，末端形式以地暖为主
	带制热功能的房间空气调节器	GB/T 7725	即国内最普遍的家用空调，主要功能为制冷，但通常也具备制热的功能，通过向室内送入冷/热风实现制冷/热的目的。	

附录三：经济性分析概念与假设

初始购置成本

包括供暖设备的购买和安装成本。本研究中的购置成本结合了厂商线上直销店、网上商城、厂商采访、以及供暖方案供应商等途径提供的数据。因为不同设备的购置方式不一，因此价格调研途径也有不同。对于普通家庭用户来说，不同设备的购置方式有所不同，例如冷暖空调和电暖器一般能在线上、线下的厂家直销或专卖店买到，厂家也一般会配套安装服务。对于热泵两联供、燃气采暖炉、电地暖这三种安装铺设较为复杂的系统，厂家则会安排当地的供暖设备经销商协助用户出具方案、选择设备、并完成安装。

值得注意的是，除热泵两联供和冷暖空调外，其他场景的购置成本包括了制冷设备的购置成本。这是因为热泵兼具制冷供暖功能，而其他场景则只满足供暖，需要另外购置制冷设备，因此会有额外的成本。对于这些场景，额外的制冷设备成本以家用空调（小型分体机）的价格为参考。

运行成本

包括供暖造成的用电或用气成本，即供暖能耗和能源价格的乘积。为了获得在时间维度上更详细的供暖能耗数据，研究团队在能源价格方面，电价采用了长三角地区生活用电的平均峰谷电价^{XV}，气价采用了全国36个大中城市的民用管道天然气平均价格^{XVI}。制冷造成的运行成本并不在考虑范围内。

维护成本

即设备使用期间维修、部件更换、设备保养等的费用。本研究中的维护成本主要通过市场调研来确定。由于空调和电暖器厂家一般在购买时提供保修，因此在分析中没有另外计算维护成本。

残值

残值指设备使用期满后的剩余价值。残值仅存在于寿命超过10年分析期限的设备中，例如地暖系统一般能用50年，而热泵配备的制冷系统寿命也可达20年左右。本研究针对这些设备采用直线折旧法计算10年后的折旧额，并用设备购买成本减去折旧额得到残值，表示为10年后的一个正现金流。

^{XV} 数据来源：网上国网

^{XVI} 数据来源：CEIC, 国家发改委价格监测中心

参考文献

- ¹ IEA (2022), Heating, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/heating>, License: CC BY 4.0
- ² 上海市气候中心, 2021.《2021年上海市十大天气气候事件发布! 你都经历过吗? 》
- ³ 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. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- ⁴ Hu, Shan, et al. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. *Energy and Buildings*. 2017, Vol. 148, pp. 366-378.
- ⁵ Li, Baizhan, et al. 2018. Indoor thermal environments in Chinese residential buildings responding to the diversity of climates. *Applied Thermal Engineering*. 2018, Vol. 129.
- ⁶ U.S. Energy Information Administration. 2015. Residential energy consumption survey. 2015. <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2015/>.
- ⁷ Lin, Borong, et al. 2016. Investigation of Winter Indoor Thermal Environment and Heating Demand of Urban Residential Buildings in China' s Hot Summer – Cold Winter Climate Region. *Building and Environment*. 2016.
- ⁸ Hu, Shan, et al. 2016. Urban residential heating in hot summer and cold winter zones of China—Status, modeling, and scenarios to 2030. *Energy Policy*. 2016, Vol. 92.
- ⁹ CernivecStephanie. 2018. Answering Some of Electric Floor Heating' s Most Frequently Asked Questions (FAQs). 2018. <https://www.warmlyyours.com/en-US/posts/answering-some-of-electric-floor-heating-s-most-frequently-asked-questions-faqs> .
- ¹⁰ Hong, J, et al. 2013. ASSESSING HEAT PUMPS AS FLEXIBLE LOAD . *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2013, Vol. 227.1.
- ¹¹ Rinaldi, Arthur, et al. 2022. What adds more flexibility? An energy system analysis of storage, demand-side response, heating electrification, and distribution reinforcement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, Vol. 167.
- ¹² IEA (2022), Heat Pumps, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>, License: CC BY 4.0
- ¹³ 中国节能协会热泵专业委员会, 2021年中国热泵供暖产业发展年鉴, 2021.
- ¹⁴ 中华人民共和国住房和城乡建设部, 建筑节能与可再生能源利用通用规范, 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

郝一涵, 王广煦, 王萌, 推动长三角地区居民供暖升级: 热泵开启供暖零碳转型之路, 2022

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别说明, 本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2022年12月, 落基山研究所版权所有。 Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。