

# 碳中和背景下既有建筑改造设计的减碳技术与效益

黄杰<sup>1,2</sup>, 袁泽伟<sup>2</sup>, 王德才<sup>2</sup>, 高松<sup>1</sup>

(1. 安徽省建筑设计研究总院股份有限公司, 合肥 230091; 2. 合肥工业大学建筑与艺术学院, 合肥 230601)

**摘要:** 随着存量建筑增多,既有建筑综合改造对减少全球能耗和碳排放发挥越来越重要的作用。通过对现有减碳改造的被动式技术、主动式技术、可再生能源技术进行分析,总结3种类型技术策略的应用形式,并对比分析其在办公建筑、教学建筑、居住建筑等不同类型改造中的减碳效益差异。在此基础上提出当前低碳改造技术策略存在的问题,为既有建筑减碳改造与相关研究提供理论参考。

**关键词:** 既有建筑改造; 建筑碳排放; 减碳措施; 减碳效益

**中图分类号:** TU746.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0117-08

建筑能源消耗约占全球能源消耗的40%<sup>[1]</sup>,减少建筑领域的能源消耗是减少全球碳排放的重要措施。2019年,欧盟委员会发布《欧盟绿色新政》,致力于截至2050年实现碳中和<sup>[2]</sup>。2020年9月,中国提出二氧化碳排放力争在2030年前达到峰值,在2060年前实现碳中和<sup>[3]</sup>。随着当下“增量时代”向“存量时代”转型的逐渐深入,减少存量建筑的能源消耗和碳排放愈加重要,虽然中国已开展了近30年的建筑节能改造工作并取得了一定的成果,但是已改造建筑占总存量的比例依然很小<sup>[4]</sup>,大多数既有建筑热工性能差<sup>[5]</sup>、功能待提升。为了实现存量建筑资源的可持续性利用,应当充分发掘既有建筑的功能、空间、结构、环境等方面的潜力,进行具有减碳效益的综合性改造。在新的“双碳”目标下,既有建筑减碳改造是对建筑节能改造的进一步提升,其改造体系按照设计对象可分为被动式改造技术、主动式改造技术和可再生能源技术3个方面,具体技术策略与节能改造存在一定区别,以碳排放作为效益评价依据,且充分考虑全生命周期的隐含碳排放。本文重点研究这3类减碳技术措施的应用要点和难点,并结合常见改造的建筑类型对比分析其减碳效益差异和改造成本,包括办公建筑、教学建筑、居住建筑等,为改造决策研究提供理论依据<sup>[6-7]</sup>。

## 1 被动式技术及其减碳效益

被动式技术旨在最大限度地利用建筑自身的形状、结构、构造等物理特性,结合自然采光、通风、太阳辐射等气候条件,提高建筑环境的舒适度,减少对机械设备的依赖,从而减少能源消耗和碳排放。该类型策略主要用于建筑围护结构改造,可行性高,在工程中往往被优先考虑。常见被动式改造技术见表1,其中外墙保温、屋顶保温、窗户更换、建筑遮阳是出现频次最高的措施,而调整建筑朝向<sup>[8]</sup>、窗墙比<sup>[9]</sup>、体形系数<sup>[10]</sup>、增强建筑表面反射<sup>[11-12]</sup>等则使用较少。

建筑室内外温差是造成冷、热量透过围护结构进行传递的原因,为了维持室内热环境的舒适与稳定,需要削弱围护结构的渗透性,增强墙体、屋顶、楼地层等保温与隔热。

(1)增加围护结构保温层构造。通常的做法是设置外保温或内保温,夹芯保温在改造中可实施性较低。使用最多的保温材料是发泡聚苯乙烯(EPS)板、挤塑聚苯乙烯(XPS)板和岩棉(RW)板等。不同材料保温板的减碳效益往往不同,应用于不同围护结构部位时的厚度也不同,一般来说,改造时屋顶的保温材料要比墙体和地面厚,但是墙体保温改造产生的减碳效益要高于屋顶改造,如在徐州地区的老旧多层住宅改造中,屋顶减碳率为7%~10%,

**收稿日期:** 2024-08-03

**基金项目:** 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2022YF052);中央高校基本科研业务费专项资金项目(JS2024ZSPY0017);安徽省自然科学基金(2108085QE240)

**作者简介:** 黄杰(1989—),男,安徽铜陵人,博士,讲师,研究方向为住宅工业化与产业化、既有建筑更新改造;袁泽伟(1998—),男,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为既有建筑更新改造;王德才(1982—),男,安徽合肥人,博士,副教授,研究方向为装配式建筑、传统建筑数字化保护;通信作者高松(1964—),男,安徽合肥人,正高级工程师,研究方向为建筑设计及其理论。

表 1 被动式改造措施

被动式技术	材料/构造	应用说明
增加墙体、 屋顶、地面 保温隔热	保温板、保温砌块	应用较广泛
	增加空气间层、通风层	改动较大、工艺较复杂
	相变材料	成本、隐含碳排放较高
	气凝胶材料	成本、隐含碳排放较高
提高门保 温性能	STP(超薄真空保温板)	成本、隐含碳排放较高
	—	同时应该提高气密性
提高窗保 温性能	单玻、双玻、三玻两腔,空 腔填充氩气或空气,玻璃 用 Low-e(低辐射)玻璃或 普通玻璃、钢化玻璃等	应用较广泛
建筑遮阳	窗洞口凹陷	应用较少
	设置遮阳板	应用较广泛
利用太阳 热辐射	被动式阳光房	热量利用具有即时性
	呼吸式玻璃幕墙	成本较高
	蓄热型墙体	可与相变材料结合
立体绿化	屋顶绿化、立面绿化	维护成本较高
在墙面、屋顶 涂反射涂层	反射材料	高性能材料成本较高
调整窗墙比	南外墙窗墙比	可参考节能设计标准

外墙减碳率为 12%~16%<sup>[13]</sup>。住宅层数越多,屋顶改造对整体建筑的减碳影响越小,如在寒冷地区的高层居住建筑中,屋顶改造产生的减碳率仅 0.3%<sup>[14]</sup>。但是当建筑层数较少,只有 1~3 层时,尤其是单层建筑,屋顶改造的减碳率较大,如在建筑面积较小的工业办公建筑中,屋顶改造的减碳率可达约 22%<sup>[15]</sup>。针对不同年代建筑,其围护结构热工性能差异较大,需要有针对性地设置保温层厚度<sup>[16]</sup>,可以在改造设计阶段模拟增设保温层的热工性能与减碳效益,在达到最优保温厚度之后,继续增加保温材料不会再有明显的保温性能提升并且会增加隐含碳排放<sup>[11]</sup>。改造成本方面,RW 板约 280~380 元/m<sup>2</sup>,XPS 板约 270~370 元/m<sup>2</sup>。

(2)新材料应用。相变材料是具有高热惰性的材料,通过物理形态变化实现热量的吸收与释放,如固体转变为液体、液体转变为气体等<sup>[17]</sup>,其中固-液相变材料较为成熟,可以作为墙体和屋顶隔热材料。其影响减碳率的主要因素有在围护结构中的位置、厚度和熔点温度。例如在突尼斯夏热冬暖地区,产生较好减碳效益的情况是设置在靠近墙体内侧,厚度 40 mm,熔点 21 °C<sup>[18]</sup>,应用于缺乏保温构造的居住建筑的墙体和屋顶时,产生的减碳率平均约 34%。较低的熔点有利于节省加热能量,高熔点如 29 °C 则有利于制冷。气凝胶材料可由硅、铝、铬、锡等基材制成,最常用的是以二氧化硅为基础的材料,与 XPS、EPS 等常规保温板相比,其隔热性、隔

音性、耐湿能力更强。超薄真空保温板(STP)是一种无机不燃保温材料,导热系数极低,保温效果是 EPS 板的 5 倍,仅需很小的厚度就能达到传统材料的保温效果,对围护结构改造厚度受限的情景较为有利。虽然新材料较传统保温材料有更好的性能,但是可能存在较高的初期成本和隐含碳排放<sup>[5]</sup>。在相同保温效果下,一些常见外保温材料的隐含碳排放量由大到小顺序为 STP 板薄抹灰外保温系统、岩棉薄抹灰外保温系统、粘贴 XPS 板外保温系统、粘贴硬泡聚氨酯板外保温系统、粘贴 EPS 板外保温系统<sup>[19]</sup>。

(3)使用特殊构造。例如在墙体内部设置垂直空气间层<sup>[20]</sup>,通过在原有墙体基础上新增构造层、平屋顶改坡屋顶、平屋顶上加建通风层等。这类措施旨在增加一个“附加空间”,以更好地阻隔室外不利的热环境。由于特殊构造做法需要根据具体建筑形态确定,其减碳效益不具有典型性,相关数据也较少。针对农村地区的砌体结构住宅,为提高施工可行性,可使用木板、通风格栅、双层中空玻璃等材料构筑双层蓄热屋顶、非透光双层墙体、特朗勃墙、附加阳光间等,增量成本为 100~200 元/m<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。

(4)提高门、窗保温性能。窗户部位的热传递是建筑围护结构其他部分的 5 倍<sup>[22]</sup>,可以通过改变玻璃的材料、玻璃厚度、构造层次等增强窗的保温隔热性,在不同类型的建筑中,该措施的减碳率为 1.3%~11%。在玻璃材料选用上,太阳透射度由弱到强分别是 Low-e 玻璃、吸热玻璃、普通透明玻璃<sup>[23]</sup>;当采用多层多腔体玻璃时,空腔厚度及腔内填充的气体类型对透射率影响较小<sup>[24]</sup>,相同玻璃材料与规格下,增加玻璃层数会明显提升隔热性能,但是不应盲目追求多层多腔玻璃,如“6 mm+空腔+6 mmLow-e”组合的热透过率要比“3 mm+11 mm 空腔+3 mmLow-e+11 mm 氩气空腔+3 mm”组合低 0.27 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[25]</sup>。窗框的导热面积较小,但其导热系数较大,常用材料中木材与塑料的导热系数远低于金属材料<sup>[23]</sup>,为满足硬度与隔热要求,断桥铝合金窗框使用较多。需要注意的是,应用高效能窗户的初期投入成本较高,其成本效益可能小于其节能减碳效益<sup>[5]</sup>。在门改造方面,通常是直接换成导热性更弱的门扇。

(5)增加建筑遮阳。为了降低空调在炎热季节的冷负荷,通过遮阳可以有效减少太阳热辐射进入室内,在气候温和或无制冷需求的地区,对于窗户遮阳要求则较低。外窗遮阳的方法有窗洞凹陷<sup>[26]</sup>、

设置遮阳板<sup>[8]</sup>、遮阳帘等,通过控制窗洞深度和遮阳板垂直于墙面方向的长度,改变太阳透过窗户进入室内的热辐射。该措施在多层、高层居住建筑中的减碳率为 4%~7%<sup>[13-14]</sup>,在办公建筑中为 2%~11%<sup>[15]</sup>,但是在教学楼建筑中减碳作用相对较低甚至可能不减碳,原因是部分教学楼本身存在外廊遮阳以及朝向问题,同时金属遮阳板的使用与更换存在较高隐含碳排放<sup>[27]</sup>。

(6)利用太阳热辐射。主要通过玻璃等透明建筑材料充分利用太阳辐射加热室内空气,该策略可用于建筑采暖,如被动式阳光房。其特点是升温速度快,太阳辐射停止后降温也快,具有即时性。该策略也应用在呼吸式玻璃幕墙体系中,通常由双层幕墙组成,在每块幕墙单元的顶部和底部都设有排气口,可以起到夏季隔热、冬季采暖的作用。另外,采用蓄热型墙体可以延长利用太阳热辐射的时间,在白天吸热,夜晚散热,这种蓄热墙体通常在顶端和底部也留有排气口,使其可以通过对流换热调节温度,适应不同季节。在中国西部地区,合理设置阳光房可降低约 16%的采暖能耗、集热蓄热墙可降低约 14%的采暖能耗,综合利用阳光房、蓄热墙和直接收益式太阳能可降低建筑全生命周期 20%~60.8%碳排放量<sup>[28]</sup>。

(7)增加立体绿化。将绿化与建筑体结合,可以增强建筑围护结构的遮阳与隔热性能,但是保温隔热能力远不如保温板,不能替代屋顶保温板的作用<sup>[29]</sup>,在减碳作用方面,植物的固碳作用占减碳率的主导。通常在建筑立面与屋顶栽种绿植。该措施的主要影响因素为叶面积指数、土壤层厚度、植物高度等。例如理想状态下西安地区较优取值为叶面积指数 2~3,土壤厚度 0.3~0.5 m,植物高度 0.6 m,多层办公建筑外墙以爬山虎全覆盖时的减碳率约 6.2%,屋顶绿化的减碳率约 2.5%,用于高层办公建筑时,外墙全绿化和屋顶绿化减碳率分别约为 3.2%和 0.5%<sup>[30]</sup>。提高叶面积指数有利于增加固碳提高减碳率,如天津地区与上述近似的多层办公建筑,叶面积指数为 5,减碳率约 9.6%<sup>[31]</sup>。在居住建筑和教学楼建筑中应用的减碳率数据较少,草皮植被单位面积的年减碳量约 0.35 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[32]</sup>。覆土、水体、植物会增加建筑荷载,且屋顶的构造做法需要额外考虑防水与防植物根部穿刺,提高了改造建设成本,同时,使用该措施的后期维护成本较高,是难以广泛应用的重要原因之一。

针对不同建筑类型,被动式技术可产生的减碳

率(减碳率是指减少的碳排量与改造前碳排量的比值)往往不同(表 2),从整体角度来说,减碳率由大到小的顺序是居住建筑>教学建筑>办公建筑。

被动式改造策略在建筑运营阶段可以与主动式设备产生较好的协同作用,增强碳减排效益。但是改造措施并非使用得越多越好,因为需要同时关注这些技术策略的隐含碳排放,应该充分考虑材料生产运输、施工安装、建筑运营、废弃回收再利用等全生命周期的碳排放情况,评估改造方案的综合减碳效益。

表 2 常用被动式改造技术减碳效益与改造成本

改造技术	办公建筑 减碳率/%	教学建筑 减碳率/%	居住建筑 减碳率/%	改造成本/ (元·m <sup>-2</sup> )
屋顶保温提升	0.3~9	4~8.9	0.3~10	1 000~1 500
外墙保温提升	4~6.6	4.5~8.9	1.8~16	250~380
提高窗保温性能	1.3~7.5	1.5~2.3	2.3~11	320~3 000
建筑遮阳	2~11	—	4~7	500~2 500
立体绿化	0.5~14	4	—	150~300
屋顶、外墙、窗保 温综合提升	2.8~8	5~12	12~30	—

## 2 主动式技术及其减碳效益

主动式技术旨在提高建筑设备的运行效率、减少能源使用从而减少碳排放,主要包括改善暖通空调系统、热量回收利用、照明优化、改善水系统和建筑智能控制等方面,具体措施见表 3。

一般来说,建筑运营能耗和碳排放主要源自供热和制冷。目前燃料燃烧是重要的供热方式之一,传统的煤炭、焦油锅炉会产生大量能源消耗和碳排

表 3 主动式改造措施

改造技术	设备设施	应用说明
改善供 冷供热	热泵系统	类型多样,使用最多的制冷制热改造措施
	锅炉系统	常用燃气锅炉,或采用更清洁高效的燃料
	室内暖通设备	热泵系统配套的室内机、空调辅助设备、高性能家电等
热量回 收利用	室内热回收设备	减少室内空气冷/热量流失
	热源热回收设备	提高燃料燃烧热利用效率、废热利用
采用建筑 智能控制	可控式外窗遮阳	根据光照控制遮阳帘、遮阳板开或闭
	照明控制	控制照明密度,使用传感器控制开闭、强弱等
	暖通系统控制	设定适宜的暖通系统温度
水系统改造	节水器具	减少水具的超量出水
改善照明	节能灯具	使用发光效率高的灯具

放,改造措施通常是改善燃料类型,如使用新型燃气锅炉,以天然气、绿色天然气(加工后的天然气,热容和沼气相同)、绿色氢气作为燃料<sup>[33]</sup>,但是绿色氢气目前生产成本较高,难以普及,使用天然气是较普遍与可行度较高的改造措施。除了燃烧加热,另外使用频率较高的措施是采用热泵系统,如空气源热泵和地源热泵<sup>[34]</sup>等,它们的热源介质不同,但工作原理基本相同,制热时通过冷凝剂从空气或地下土壤等介质中吸收热量、蒸发,再通过压缩机液化放热,来供暖或加热生活用水,制冷时工作流程相反。相较于电加热,热泵系统具有更高的性能系数(coefficient of performance, COP),一般情况下空气源热泵 COP 为 2~3,地源热泵 COP 为 3~5,在未来一段时间内的应用如果能够显著增长,可对建筑行业减碳约 32%<sup>[35]</sup>。但是热泵系统应用会受到老旧小区场地限制,如空间不足、建筑屋顶承载力不足,难以放置设备等。此外还可以使用更高性能的家电、空调辅助设备减少供暖制冷产生的碳排放,减碳率为 7%~10%<sup>[36-37]</sup>。对于高性能空调,能效比为 2.8~4.2 的三级能效空调价格为 8 000~12 000 元。平均空调能效比每提高 1 个单位,成本增加 2 857 元<sup>[38]</sup>。

热量回收包括 2 种类型,一种是对热源热量进行回收,一种是建筑室内空间的热量回收。在热源方面,传统锅炉的热气体会被排出,但若将这部分热气的热量再次利用,则可以提高锅炉效率,如燃气热冷凝锅炉的效率可达到 85%~95%<sup>[39]</sup>。非常规热源是指一些产业在运营时会产生大量废热,以往这部分热量会被人们忽略而直接逸散,但是使用特殊的集热设备可以将它们回收利用,如废料燃烧热利用、工业余热利用、热电联产等为建筑供热<sup>[33]</sup>。在室内空间热量回收方面,建筑的主动式通风会将室内的冷/热空气排到室外,从而增加空调负荷,因此在通风设备上增加冷/热量回收装置,将冷/热量送回室内,可以减少空调的运转能耗。在国内,大部分住宅采取自然通风,因此在夏热冬冷或气候温和地区一般不具备推广条件,仅在严寒、寒冷等供暖为主的地区冬季适用热回收通风设备,然而应用的地区仍然较少,相比之下欧美地区家庭应用较多,如加拿大安大略省的低层单户住宅,使用该设备后减碳率为 1%~3%<sup>[40]</sup>。

建筑智能控制是对网络控制和楼宇自动化控制技术的集成,可以根据建筑设备的实际使用需求进行参数调节,从而减少不必要的能耗。但是该措

施更多应用在新建建筑中,在既有建筑改造中增设的难度与成本较大。使用日光、运动传感器调节照明的开闭、功率<sup>[10]</sup>,光照密度的控制在办公建筑中可产生 5%~15%的减碳率<sup>[10]</sup>,在高层居住小区中节能照明改造的增量成本约 3.5 元/m<sup>2</sup>;设定不同的供暖供冷控制温度以及暖通系统的开闭时间等。

水系统改造主要包括给排水改造和非传统水源利用<sup>[41]</sup>,如使用节水器具、使用变速泵以满足不同供水压力和流速<sup>[10]</sup>,避免超压出流。节水产生的减碳率在住宅中约为 1%<sup>[37]</sup>。非传统水源利用包括雨水收集利用和中水回收利用,这些水源可用于保洁与绿化维护,在住宅和教学楼建筑中减碳率为 0.7%~1.7%<sup>[36-37]</sup>,值得注意的是在天津某办公建筑中应用时增加了 0.12%碳排放<sup>[42]</sup>。因此虽然该措施有利于减少使用市政供水,但可能无法减碳。成本方面,在传统一字型教学楼,标准层面积 1 300~2 900 m<sup>2</sup>时,雨水回收增量投资约 7.3 元/m<sup>2</sup><sup>[36]</sup>,在高层住宅中,增量投资约 16 元/m<sup>2</sup><sup>[43]</sup>。

针对不同建筑类型,主动式技术可产生的减碳率见表 4,从整体角度来说,减碳率由大到小的顺序是居住建筑>办公建筑>教学建筑。

主动式改造技术应用的初期投入成本普遍较高,因此在实际改造项目中应用困难,暖通系统设备型号需要根据具体建筑类型、面积与需求进行定制设计,难以用单位价格统一衡量。采用热泵系统是具有较明显减碳效益和成本效益的空间供暖改造策略。其中地源热泵性能系数较高但价格也高,当用于居住小区规模化改造时,成本约 20 元/m<sup>2</sup><sup>[43]</sup>。空气源热泵是改造中应用最多的热泵类型,该设备应用成本相对较低但性能系数也较低,在中小学教学建筑中应用于空调设备时,成本为 43~

表 4 主动式改造策略减碳效益与改造成本

改造技术	办公建筑 减碳率/%	教学建筑 减碳率/%	居住建筑 减碳率/%	改造成本
采用节能灯具	3~15.8	9~12	4~14.4	15~80 元/只
采用热回收通风	2~5	—	1~3	具体建筑具体分析
增加热泵系统	6.5~20	6.6~20	5~44	具体建筑具体分析
采用高性能空调	3.8~12	7~10	7~10	具体建筑具体分析
雨水回收利用	—	0.8~1.3	0.7~1.7	具体建筑具体分析
采用节水洁具	—	1.7~3.5	0.6~0.9	110~350 元/个

57 元/m<sup>2</sup><sup>[36]</sup>;热源热量回收技术本身难度较高,需要从国家或地方层面采取科技支持与政策激励来促进应用,对于独立型的室内热量回收设备则需要充分考察多维因素,如高效、大排风量的设备也可能意味着更高的功率,气候条件影响下该设备应用的必要性,选择技术成熟、维护费用低的产品等,都需要合理权衡;在既有建筑中新增智能控制系统时也需要同时增加一系列的设备控制器,投资较大,实施后对于建筑的节能减碳效益也不及围护结构的优化提升<sup>[39]</sup>,所以在改造中应用较少;高效照明改造是成本效益、减碳效益较高的策略;节水系统改造的成本回收期长,经济性较低。因此,在选用主动式改造技术时,尤其是涉及暖通系统改造时,不能盲目追求设备效率提升,其中的经济性分析和节能减碳效益分析是一个较为复杂的验证过程。

### 3 可再生能源技术及其减碳效益

可再生能源技术旨在减少对有限化石能源的依赖,利用自然界中不断生成的资源,通过各种技术手段将其转化为可供人类使用的能源形式,减少对环境的负面影响。在建筑改造中应用的可再生能源技术主要有光伏、光热、风力发电等(表 5),应用最多的是光伏发电和太阳能集热。

光伏发电系统可分为独立光伏发电系统和并网光伏发电系统,前者需要蓄电池储存电能备用,一般用于个体对象,后者经逆变器处理后接入电网,一般是集中式的国家级大型电站。光伏板除了在建筑体外单独铺设,还可以集成于围护结构中,常用于建筑立面与屋顶,形成建筑集成光伏(building-integrated photovoltaic, BIPV)<sup>[39]</sup>,融入热能利用后可形成建筑集成光伏光热(building-integrated photovoltaic/thermal, BIPV/T),该技术在减排能力上要优于单一光伏板发电。在加拿大,若对所有适用 BIPV/T 的存量住房进行屋顶改造,每年可产生的减碳率约 17%<sup>[44]</sup>。成本方面,薄膜类光伏幕墙综合单价约为 2 044 元/m<sup>2</sup>,晶硅类光伏幕墙综合单价约为 1 888 元/m<sup>2</sup>,薄膜类光伏采光顶综合单价约为 1 950 元/m<sup>2</sup><sup>[45]</sup>。在城市建筑改造中应用时,仍

然存在一些困难,如寒冷地区太阳辐射不足、季节更替导致太阳高度角变化、房屋管理限制、屋顶面积限制、相邻建筑遮挡阳光等<sup>[46]</sup>,需要额外的工作确定光伏板使用方案,如采光模拟、光伏板铺设角度对比实验<sup>[12]</sup>等,以达到最佳发电效率。较大的屋顶面积有利于光伏板应用,如中小学教学建筑,减碳率约 30%<sup>[36]</sup>,在高层办公建筑中为 24%~27%<sup>[47-48]</sup>。当建筑用能面积较大,如超高层办公建筑,光伏发电量占总用电量的比值则较小,减碳率约 5%<sup>[49]</sup>。

光热技术通常是太阳能集热器,广泛用于居住建筑加热生活用水,但是在公共建筑中的应用形式不像居住建筑那么明确,相关数据较少且不具代表性。例如在天津某 5 层办公建筑中,太阳能热水可产生约 15%的减碳率<sup>[42]</sup>,在浙江某中小学教学建筑中,太阳能热水则产生约 7%的减碳率<sup>[49]</sup>。在太阳辐射较弱地区,也会采用电加热辅助太阳能集热的方法<sup>[50]</sup>。光伏光热一体化板既可以发电也可以生产一部分生活热水,其优势是利用水的吸热降温,缓解光伏板因升温造成的发电效率削减,但是目前生产成本还较高,每平方米售价约 2 500 元<sup>[51]</sup>。

风力发电由于其较高的初期成本和较长的成本回收期,不适宜单体建筑和个别家庭的使用。成本较低的小型的风力发电机发电效率较低,且会产生噪声等不利影响,在实际工程中,一般使用规格较大的风力发电机并同时为多户家庭供电<sup>[39]</sup>。

针对不同建筑类型,可再生能源技术可产生的减碳率见表 6,从整体角度来说,减碳率由大到小的顺序是办公建筑>居住建筑>教学建筑。

使用数量最多的光伏、光热技术产品大多是早前就开始应用的小型太阳能设备,适用单体建筑和分布式布局,当下大型、区域化的太阳能集热供热和光伏光热综合利用等技术已成为新的技术应用热点。在光伏技术中,其原料如晶硅的生产是高能耗高碳排的过程,因此该技术实现减碳效益可能需要更长的时间周期。在太阳能热利用方面,太阳能集热技术已从低温向中高温方向发展,技术研发与推广应用的焦点已逐步从太阳能热水转向太阳能供

表 5 可再生能源改造措施

能源类型	改造技术	应用说明
太阳能	使用光伏发电板	城市中使用时受限,如屋顶面积、阳光遮挡等
	使用太阳能集热器	常用于制备生活热水
	使用光伏光热一体化板	既可发电也可生产热水
风能	使用风力发电机	成本较高,应用不够普及

表 6 可再生能源改造策略减碳效益与改造成本

改造技术	减碳率/%			改造成本
	办公建筑	教学建筑	居住建筑	
光伏发电	1.6~27	25~34	4~27	约 700 元/m <sup>2</sup>
太阳能集热	15	7	7~19	1 000~5 000 元/户

热采暖及太阳能空调,但是这些新的热点技术相对来说还不够成熟,尚未在市场推广。风力发电主要依赖国家政策扶持,对所处位置也有一定要求,一般需要考虑区域化规模化应用,才能形成规模效益。虽然可再生能源技术在建筑运营阶段几乎实现了“近零能耗”,但是不能忽略设备生产阶段碳排放对环境产生的重大影响。

#### 4 结论

本文分析并总结了被动式、主动式、可再生能源 3 种类型策略的单个技术减碳效益,取表 2、表 4、表 6 中各技术减碳率最低值进行累加,结合其他相关综合统计数据,给出 3 种类型策略的综合减碳效益参考值(表 7)。除了 3 种类型技术的单独使用,改造技术耦合也是重要措施。比如主动式技术与被动式技术耦合,将建筑智能控制与建筑遮阳结合,使用可控的外窗遮阳帘,在窗户接收到太阳热辐射达到特定功率值时进行开闭<sup>[9]</sup>;根据光照情况调整遮阳板角度等。被动式技术与可再生能源技术耦合,将光伏板集成到遮阳板、电动车雨棚中,既可遮阳也可发电;蓄热材料与太阳能集热结合,延长热量保存时间。主动式技术与可再生能源技术耦合,电加热辅助太阳能集热、热泵辅助太阳能集热,以此解决太阳能不稳定问题;此外还可以进行天然气、清洁电力、地热、工业余热、太阳能等多种能源配合互补。

总体来说,在办公和教学建筑中,主动式技术减碳率明显高于被动式技术,但是居住建筑的主、被动式技术减碳率相近,可再生能源技术在每种建筑类型中都具有较高的减碳潜力。在进一步提高减碳作用方面,被动式技术可以注重提升材料与构件的创新与可持续的循环利用,主动式技术与可再生能源技术的重点发展方向是降低成本和提高设备效率。此外,现有的建筑减碳改造技术策略仍存在以下问题。

表 7 3 种类型策略综合减碳效益

策略类型	改造技术	效益/%		
		办公建筑	居住建筑	教学楼建筑
被动式	墙体、屋顶保温隔热;窗框玻璃保温隔热;窗口遮阳等	2.8~12	12~33.5	7~13
主动式	应用空气源热泵、地源热泵、高性能空调通风等	15~25	16~40	15~23
可再生能源	光伏发电、太阳能热水等	4~45	11~40	25~30

(1)改造技术策略的减碳效益不明确。当前较多数据仍然是改造措施的节能率或节能量,减碳率数据相对较少,为减碳改造决策提供的参考不足。比如在新材料应用、太阳辐射利用的相关改造措施、风力发电等方面技术策略的隐含碳、减碳率数据相对较少。由于中国地域辽阔、气候类型丰富,相同改造措施在不同区域以及不同建筑类型中产生的减碳效果往往不同,在同类型建筑中由于建筑个体的体形、层数等差异也会使减碳率产生较大差别,因此难以用单一数据概括改造措施的减碳率,本文列出的改造措施减碳率只涉及部分建筑类型,且参考值为了具有普适性,在某些情况下可能偏低。此外,一些减碳率数据在计算时并未考虑设备生产的隐含碳排放。

(2)改造技术策略应用不均衡。广泛使用的被动式技术措施集中于增加保温板、更换高性能窗户和建筑遮阳;主动式改造技术主要集中于热泵系统和节能照明改造;可再生能源技术以早前就开始使用的小型独立式的光伏发电和太阳能集热器为主。而文中介绍的其他改造技术应用则相对较少,应当从多个角度促进改造技术的综合利用,如政策支持、相关技术和产品的国家和行业标准完善、提高人们对新技术的接受度等。

(3)改造技术策略综合效益需要进一步研判。在实际工程中,改造成本始终是制约改造方案的重要因素,应当进一步增加改造措施的经济性分析以辅助决策者在有限的成本下制定更优的减碳改造方案,同时既有建筑改造还需要考虑人体舒适度、社会文化等多个方面因素的影响。针对既有建筑改造的综合效益,制定更加全面的评估和优化方法具有重要的意义,从而进一步审查改造技术带来的碳减排、性能改善、舒适度提升等综合效益。

(4)多类型改造策略的耦合有待进一步发展。被动式、主动式、可再生能源技术三者并非各自独立,可以通过功能融合实现一物多用,提高效率,但是这些组合可产生的具体效益还有待研究。

#### 参考文献

- [1] HUANG H, WANG H, HU Y J, et al. The development trends of existing building energy conservation and emission reduction: a comprehensive review[J]. Energy Reports, 2022, 8: 13170-13188.
- [2] 郭虹宇.《联合国气候变化框架公约》第 25 次缔约方大会观察[J].世界环境,2020(1):46-49.
- [3] 王俐.中国提出双碳目标的历史背景、重大意义和实现路

- 径[J]. 哈尔滨师范大学社会科学学报, 2023, 14(3): 41-45.
- [4] 黄海静, 林犀. 既有建筑节能改造中的类型学方法: 欧洲经验及对我国的启示[J]. 建筑学报, 2020(S1): 164-170.
- [5] LIU C, SHARPLES S, MOHAMMADPOURKARBASI H. A review of building energy retrofit measures, passive design strategies and building regulation for the low carbon development of existing dwellings in the hot summer-cold winter region of China[J]. *Energies*, 2023, 16(10): 4115.
- [6] 苏聪, 郭汉丁, 贺雨桐, 等. 既有建筑节能改造项目政府决策机制研究综述[J]. 科技和产业, 2022, 22(3): 207-214.
- [7] 王文强, 郭汉丁, 郝海. 既有工业建筑绿色改造业主内源动力研究综述[J]. 科技和产业, 2021, 21(7): 245-252.
- [8] TAHSILDOOST M, ZOMORODIAN Z. Energy, carbon, and cost analysis of rural housing retrofit in different climates[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 30: 101277.
- [9] XU Y, YAN C, WANG G, et al. Optimization research on energy-saving and life-cycle decarbonization retrofitting of existing school buildings: a case study of a school in Nanjing[J]. *Solar Energy*, 2023, 254: 54-66.
- [10] LIANG Y, PAN Y, YUAN X, et al. Assessment of operational carbon emission reduction of energy conservation measures for commercial buildings: model development[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 268: 112189.
- [11] YANG H, KIKUTA K, HAYASHI M. Research on carbon reduction of residential buildings in severe cold regions based on renovation of envelopes[J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1873.
- [12] ROSSO F, CIANCIO V, DELL'OLMO J, et al. Multi-objective optimization of building retrofit in the Mediterranean climate by means of genetic algorithm application[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 216: 109945.
- [13] 宋玉东. 低碳思维导向下徐州地区既有多层住宅改造研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2024.
- [14] LIU Y, CHEN D, WANG J, et al. Energy-saving and ecological renovation of existing urban buildings in severe cold areas: a case study[J]. *Sustainability*, 2023, 15(17): 12985.
- [15] GANGOLELLS M, GASPAR K, CASALS M, et al. Life-cycle environmental and cost-effective energy retrofitting solutions for office stock[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102319.
- [16] 姜灿坤, 罗智星. 基于生态经济效益评价的西安市不同年代既有住宅节能改造技术适度性选优[J]. 室内设计与装修, 2021(12): 120-121.
- [17] KAMEL E, MEMARI A. Residential building envelope energy retrofit methods, simulation tools, and example projects: a review of the literature[J]. *Buildings*, 2022, 12(7): 954.
- [18] DARDOURI S, TUNÇBILEK E, KHALDI O, et al. Optimizing PCM integrated wall and roof for energy saving in building under various climatic conditions of Mediterranean Region[J]. *Buildings*, 2023, 13(3): 806.
- [19] 黄金玉. 寒冷地区外墙外保温系统全生命周期碳排放比较研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [20] NIEMELÄ T, KOSONEN R, JOKISALO J. Energy performance and environmental impact analysis of cost-optimal renovation solutions of large panel apartment buildings in Finland[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 9-30.
- [21] 杨心悦. 基于成本效益的寒冷地区村镇住宅围护结构节能技术评价[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [22] MADUSHIKA U G D, RAMACHANDRA T, KARUNASENA G, et al. Energy retrofitting technologies of buildings: a review-based assessment[J]. *Energies*, 2023, 16(13): 4924.
- [23] 周庆松. 提高建筑外窗保温隔热性能研究[J]. 安徽建筑, 2013, 20(4): 212-213.
- [24] 张策. 中空玻璃遮阳系数及其应用[J]. 门窗, 2017(7): 21, 23.
- [25] YANG H, KIKUTA K, HAYASHI M. Research on carbon reduction of residential buildings in severe cold regions based on renovation of envelopes[J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1873.
- [26] GAO Y, LUO S, JIANG J, et al. Environmental-thermal-economic performance trade-off for rural residence retrofitting in the Beijing-Tianjin-Hebei region, Northern China: a multi-objective optimisation framework under different scenarios[J]. *Energy and Buildings*, 2023, 286: 112910.
- [27] 李虎. 被动式节能技术对中小学教学楼生命周期能耗和碳排放影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [28] 杨晓静. 西部地区城镇太阳能住宅全生命周期碳排放研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [29] KOROXENIDIS E, THEODOSIOU T. Comparative environmental and economic evaluation of green roofs under Mediterranean climate conditions: extensive green roofs a potentially preferable solution[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311: 127563.
- [30] 张梓钰. 西安地区立体绿化对公共建筑碳排放影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [31] 陈康康. 绿化屋顶热工特性及建筑节能性分析[D]. 上海: 东华大学, 2024.
- [32] 柳宾津. 减碳效果导向下寒冷地区既有多层住区改造设计研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- [33] KAANDORP C, MIEDEMA T, VERHAGEN J, et al. Reducing committed emissions of heating towards 2050: Analysis of scenarios for the insulation of buildings and the decarbonisation of electricity generation[J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119759.

- [34] HIRVONEN J, JOKISALO J, HELJO J, et al. Towards the EU emissions targets of 2050: optimal energy renovation measures of Finnish apartment buildings[J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2019, 38(7): 649-672.
- [35] 倪龙, 董世豪, 郑渊博, 等. 热泵技术在中低温热能生产中的减碳效益[J]. *暖通空调*, 2022, 52(11): 23-34.
- [36] 马聪. 浙江省中小学教学建筑减碳技术综合评估与选用策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [37] 陈海燕. 株洲市城市住宅建筑减碳技术综合评估与选用策略研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2023.
- [38] 孙雪兵. 基于减碳技术敏感性分析的建筑碳排放和成本研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [39] FELIUS L C, DESSEN F, HRYNYSZYN B D. Retrofitting towards energy-efficient homes in European cold climates: a review[J]. *Energy Efficiency*, 2020, 13(1): 101-125.
- [40] ISMAILOS C, TOUCHIE M F. Achieving a low carbon housing stock: an analysis of low-rise residential carbon reduction measures for new construction in Ontario[J]. *Building and Environment*, 2017, 126: 176-183.
- [41] 王振东, 李俊杰, 周磊, 等. 既有公共建筑绿色节能改造技术应用研究[J]. *建筑经济*, 2023, 44(11): 40-44.
- [42] 彭卓, 郭春梅, 汪磊磊, 等. 绿色建筑全生命周期 CO<sub>2</sub> 排放敏感性与减碳潜力研究[J]. *天津城建大学学报*, 2021, 27(6): 436-441.
- [43] 刘柏利. 碳排放视角下的绿色住宅项目成本效益评价研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [44] ASAAEE S R, NIKOOFARD S, UGURSAL V I, et al. Techno-economic assessment of photovoltaic (PV) and building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system retrofits in the Canadian housing stock[J]. *Energy & Buildings*, 2017, 152: 667-679.
- [45] 弋理, 袁春林, 张国昊, 等. 光伏建筑一体化光伏幕墙体系与经济研究[J]. *工程造价管理*, 2024, 35(3): 28-33.
- [46] 房建军. 光伏建筑一体化融合理念和光伏系统设计要点[J]. *科技和产业*, 2021, 21(5): 251-254.
- [47] 杨夏冰. 西安地区高层办公建筑节能减碳设计策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [48] 黄碧, 林辉, 屈国伦. 夏热冬暖地区典型办公建筑低碳化技术及减碳量评估[J]. *暖通空调*, 2022, 52(12): 19-24, 65.
- [49] WANG J, CHEN J, FANG Y, et al. Adaptability assessment of CO<sub>2</sub> emission reduction technologies for school buildings: a case study of hot-summer and cold-winter areas in China[C]//2022 International Conference on Computational Infrastructure and Urban Planning. Nanchang: ACM, 2022: 75-84.
- [50] DALLA MORA T, PERON F, ROMAGNONI P, et al. Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 167: 200-215.
- [51] 路绍琰, 吴丹, 马来波, 等. 中国太阳能利用技术发展概况及趋势[J]. *科技导报*, 2021, 39(19): 66-73.

## Carbon Reduction Technology and Benefits of Existing Building Renovation Design in the Context of Carbon Neutrality

HUANG Jie<sup>1,2</sup>, YUAN Zewei<sup>2</sup>, WANG Decai<sup>2</sup>, GAO Song<sup>1</sup>

(1. Anhui Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Hefei 230091, China;

2. College of Architecture & Art, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** With the increase of existing buildings, the comprehensive renovation of existing buildings plays an increasingly important role in reducing global energy consumption and carbon emissions. By analyzing the passive technology, active technology and renewable energy technology of the existing carbon reduction renovation, the application forms of the three types of technology strategies were summarized, and their differences in carbon reduction benefits in different types of renovation such as office buildings, teaching buildings and residential buildings were compared and analyzed. On this basis, the problems existing in the current low-carbon renovation technology strategies are put forward, which will provide theoretical reference for carbon reduction renovation of existing buildings and related research.

**Keywords:** existing building renovation; building carbon emission; carbon reduction measures; carbon reduction benefits