中层建筑深度节能改造的生命周期成本分析：了解节能措施的影响

张浩南[1]

不列颠哥伦比亚大学工程学院、应用科学学院，加拿大不列颠哥伦比亚省基洛纳，V1V1V7

摘要

建筑能源改造被视为实现加拿大气候减缓目标的关键。本研究旨在为现有中层建筑改造提供路线图，以了解加拿大中层住宅建筑所需的资本投资、节能量、能源成本节省及碳足迹。

本研究采用 EnergyPlus，考察了加拿大不列颠哥伦比亚省大温哥华地区一栋典型多单元住宅建筑（MURB）的 11 项能源改造措施的能源性能。作者使用能源模拟软件 EnergyPlus，评估所选 MURB 改造前后的运行能源性能。通过 SketchUP 创建了两种基准建筑模型，分别使用天然气（NG-Building）和电力（E-Building）供能。研究将能源模拟结果与成本及排放影响数据相结合，以评估所选节能改造措施的经济与环境绩效。

结果表明，通过实施这些能源改造措施，NG-Building 可大幅减少温室气体排放（从 27.64 tCO_2e 降至 3.77 tCO_2e）。就节能量而言，与其他能源改造措施相比，太阳能光伏、空气源热泵、热水器热泵和热回收通风增强具有很大的节能潜力。此外，从生命周期视角来看，温度回调、照明和气密性增强的经济性能最佳。然而，Windows、空气源热泵和太阳能光伏并不经济，因为其生命周期成本较高。尽管空气源热泵会增加 NG-Building 的生命周期成本，但在政府提供财政激励的情况下，空气源热泵可能是利益相关者决定实施能源改造时减少温室气体排放的最佳选择。

1 引言

化石燃料的大量使用及其相关的温室气体（GHG）排放已被认定为气候变化及相关环境影响的催化因素 [1]。为应对人类活动所致气候变化影响日益引发的担忧，加拿大政府制定了雄心勃勃的减排目标，承诺到2050年将碳排放量较2005年水平减少80% [2]。据估计，固定燃烧、交通运输和逸散源占该国温室气体排放的82% [3]。因此，加拿大旨在减少多个部门的能源使用，以降低相关温室气体排放 [2]。

近年来，加拿大建筑业减少温室气体排放的需求日益受到关注。根据国家温室气体清单，加拿大 建筑物占全国温室气体排放总量的 12%。此外，住宅建筑业占 2017 [2] 年全国能源使用量的 11%。鉴于减少建筑业相关能源使用和排放的重要性，各级政府推出了政策、标准和设计指南，以提升建筑能源性能。例如，不列颠哥伦比亚省能源STEP规范（BCESC）已正式实施，旨在推动不列颠哥伦比亚省（BC）实现省级目标：到 2032 [4] 年，所有新建建筑均达到“净零能耗就绪”水平。然而，目前缺乏促进老旧建筑提高能源效率的政策举措。老旧建筑能源性能不佳，是建筑业相关温室气体排放持续增加的重要原因之一 [9]。

在加拿大，超过 50% 的住宅建筑建成年份已超过 30 年，超过 20% 的建筑建成年份已达 50 年或更久 [5]。老旧建筑大多使用不可再生能源。此外，随着建筑老化，其系统和材料往往也会逐渐劣化 [8], [9]。因此，这些老旧建筑会消耗更多资源，从而造成更大的环境影响和排放足迹 [5]。由于新建建筑取代老旧建筑的年替换率仅为 1.0–3.0% [8], ，为实现加拿大的减排目标，必须通过改造降低老旧建筑存量带来的环境影响 [9,10]。既往研究表明，建筑能源改造在节能和减少温室气体排放方面具有巨大潜力 [11]。此外，改造还可带来其他益处，例如节省成本和提升热舒适性 [12,13]。因此，制定提升加拿大建筑能源性能的方案并探索改造策略，是一项亟待讨论的议题。

尽管各市政当局已制定许多计划，以增强韧性并实现减排目标，但由于建筑存量类型多样、早期采用者处于劣势以及经济障碍，对现有建筑进行改造以实现净零排放或近零排放，仍是实现气候行动目标最具挑战性的环节之一。多单元住宅建筑（MURBs）在加拿大各城市的建筑存量中占有很大且不断增长的份额。

在不列颠哥伦比亚省，里士满市计划对一栋中层建筑实施建筑深度节能改造，以识别并验证一系列节能措施（ECM）对能源消耗和温室气体减排的潜在影响。本研究旨在为现有中层建筑改造提供路线图，以了解中层住宅建筑深度节能改造所需的资本投资、预计节能量、相应的能源成本节省以及碳足迹。

2 能源改造措施

一般而言，建筑改造措施可分为三类：需求侧解决方案、供给侧解决方案，以及能源消费模式的转变（即人为因素）[12]。需求侧解决方案包括通过能源改造和升级来降低建筑供暖和制冷负荷及其他终端用途的策略。建筑围护结构的绝缘升级、提高气密性、窗户保温、供暖、通风与空调（HVAC）系统、热水设备及家用电器，都是需求侧管理中常见的重点领域[15,16]。供给侧解决方案包括可再生能源解决方案，例如太阳能光伏（PV）和风能，这些被视为为建筑物发电的替代能源系统[17]。近年来，随着降低能源使用相关环境影响的压力日益增加，供给侧解决方案受到了广泛关注 [15,16]。能源消费模式的转变，是指应用先进控制技术或向家庭用户提供建筑运行策略，通过行为改变促进能源效率[18]。本节将探讨可能的改造选项，包括改善建筑围护结构部件、暖通空调系统、居住者行为和照明系统，以及可再生能源系统。

2.1 建筑围护结构升级

在现有建筑中，通过建筑围护结构产生的热损失或热增益会影响能源使用和室内环境，并造成大量能源耗损。因此，改造外墙和屋顶对降低建筑能耗具有显著影响。这类改造措施应提升建筑的热性能 [19]。建筑围护结构部件的常见升级措施包括墙体保温、屋顶保温和 Windows[20]。

2.2 暖通空调系统升级

先前的研究表明，改善建筑的供暖、通风与空调系统可实现最大的节能潜力 [19]。现有老旧建筑通常配备效率较低的供暖、通风与空调系统，尤其是由天然气驱动的系统。近年来，热泵的发展为现有老旧建筑带来了巨大的节能潜力。此外，暖通空调控制对能源管理有重要影响 [21]。暖通空调控制旨在优化运行系统，避免系统部件过度循环及其相互冲突。调整暖通空调控制策略对于降低建筑能耗至关重要 [12]。

2.3 建筑使用者行为与照明系统

未安装电力分表的多单元住宅建筑（MURB）住户通常比安装了分表的住户使用更多电力 [12]。电费往往隐藏在固定费用中，而每户实际电费则随能源使用量的波动而变化。安装独立分表可让住户了解自己的能源消耗。为了控制能源成本，住户可以减少套内电器的使用和照明用电。与传统照明灯具相比，发光二极管（LED）照明具有更大的节能潜力 [10]。

2.4 可再生能源系统

除了需求侧改造措施外，供给侧改造措施（例如建筑一体化太阳能光伏系统）在加拿大也日益普及。太阳能光伏系统可在白天发电并储存电力，以供用电时使用。大多数已安装的太阳能光伏板都配有逆变器，可将直流电转换为交流电，使家庭用户能够使用所发的电力[22]。此外，太阳能光伏系统还可接入电网。如果输送至电网的电量多于用电量，电量抵扣额度会结转至下一张公用事业账单 [23]。

3 建筑能耗建模

本研究选取了位于加拿大不列颠哥伦比亚省里士满市的一栋典型中层多单元住宅建筑作为案例研究。作者使用能源模拟软件（EnergyPlus）评估所选多单元住宅建筑改造前后的运行能源性能。EnergyPlus（由劳伦斯伯克利国家实验室开发）是全球最受欢迎的建筑能耗模拟与设计工具。它采用分箱法，利用长期月度气象数据分析特定建筑的能源性能。

3.1 基准建筑定义

所选建筑是一栋三层多单元住宅建筑。该建筑的平面图如图1所示。

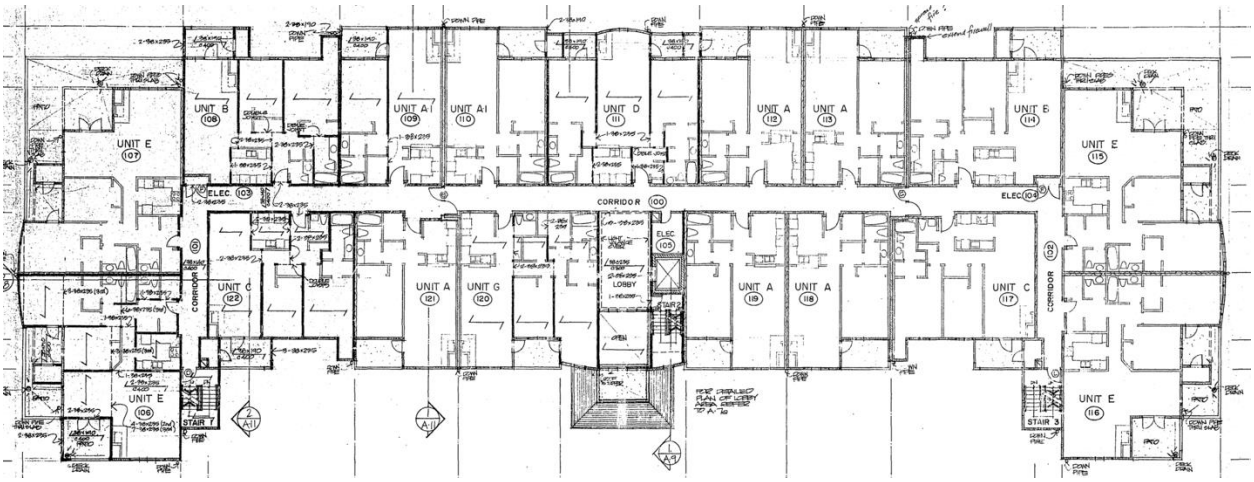


图1. 案例建筑的平面图

3.2 考虑的能源改造措施

3.2.1 围护结构

增加屋顶保温：R16。这些基准案例以及一系列屋顶保温改造措施，厚度从 2-英寸（R-8）到最多 4-英寸（R-16）不等

增加墙体保温：R16。这些基准案例以及一系列屋顶保温改造措施，厚度从 2-英寸（R-8）到最多 4-英寸（R-16）不等

窗户改造：三层玻璃，U 值：1.044 W/m2 K，太阳得热系数：0.615

气密性改进：0.001024 m3/s-m2

3.2.2 暖通空调系统：

空间供暖 ting：空气源热泵（ASHO）：性能系数：COP~2.75

热水供应：热水器热泵（水热泵）：COP~3.0

热回收通风机（热回收通风）：显热效率 0.65

3.2.3 可再生能源：

太阳能光伏：可在屋顶安装太阳能光伏，在白天发电并储存电力，并在有需求时使用这些电力。

3.2.4 居住者行为及其他：

供暖温度设定点下调：这是一项低成本或零成本措施，可在室内温度不一定需要达到设计温度的时段节省大量能源。在有人使用时段，设定温度仍保持在 22；采用该措施后，供暖下调温度调整为 18 °C。

照明：将传统照明设备替换为 LED灯。

家用电器：将家用电器替换为电器（能源效率提高 15%）

3.3 能源建模过程

BC 的典型多户住宅建筑可根据其能源来源分为两类：电力供能建筑和天然气供能建筑。为代表 BC 现有多户住宅建筑中的大多数，并制定全面的改造计划，作者根据能源来源开发了两个建筑能耗模型。

作者使用 Google SketchUP，并将 OpenStudio 作为插件，创建了物理基准建筑模型，如图2所示。随后，将建筑模型导入 EnergyPlus，以评估不同改造措施的能源性能。

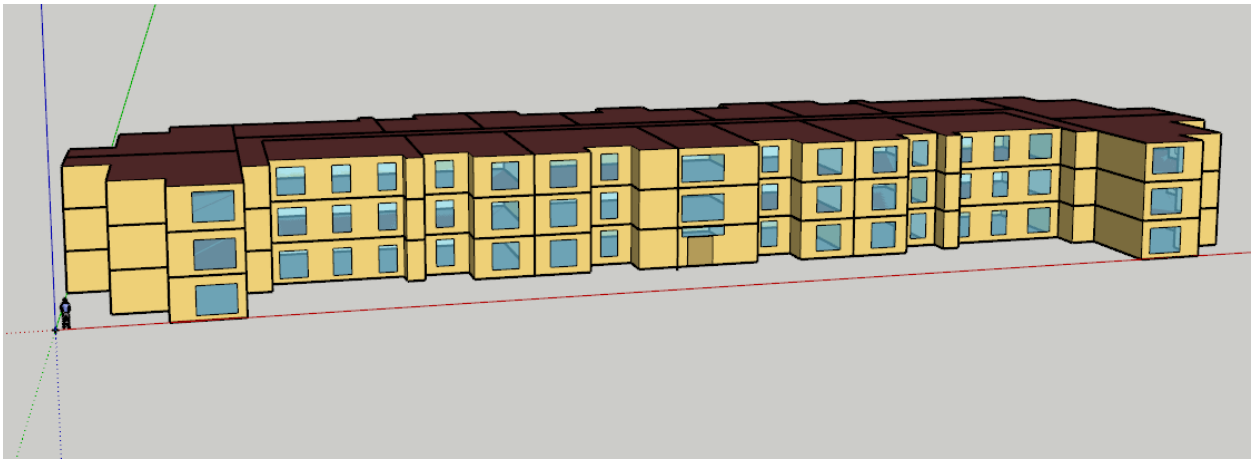


图2。SketchUP 中的物理基准建筑模型

将物理建筑模型导入 EnergyPlus 后，作者必须输入与建筑围护结构材料、供暖、通风与空调系统、照明和电气设备相关的更多信息。建筑特征见表1。所建立的建筑能耗

模型见图3和图4。为了评估不同改造措施的有效性，有必要将特定建筑改造后的性能与原始性能进行比较。因此，创建基准建筑模型后，作者必须将选定的能源改造措施输入基准建筑能耗模型，并评估改造后的建筑能源性能。改造前后的能源性能将在第5节讨论。

表1. 基准建筑模型

建筑特征		
规格数据		
HVAC 系统	风机盘管、水冷冷水机组、锅炉和冷水机组；供暖 系统季节性天然气性能系数：0.8，电力性能系数：1.0，	
生活热水	电力、专用热水锅炉、供水温度： 60°C，CoP：0.85	
恒温器	供暖：22°C，制冷：26°C	
Air 渗透	0.001314 m3 /s-m2	
外墙	灰泥、建筑纸上的钢丝网、9.5 胶合板、38*89 墙骨柱，R-14 毡状保温材料、12 干式墙	
地板热阻	RSI=0.66 地毯、胶合板、搁栅、干式墙	
屋顶热阻	天花板阁楼下方	屋面、38*235 搁栅、R-28 棉毡保温材料、16 干式墙
Windows 和 WWR%	U 值	3.57 W/m2 K
	SHGC	双层玻璃铝框 - 0.760
照明密度	8.5250 W/m2	
插头负荷	8.0729 W/m2	

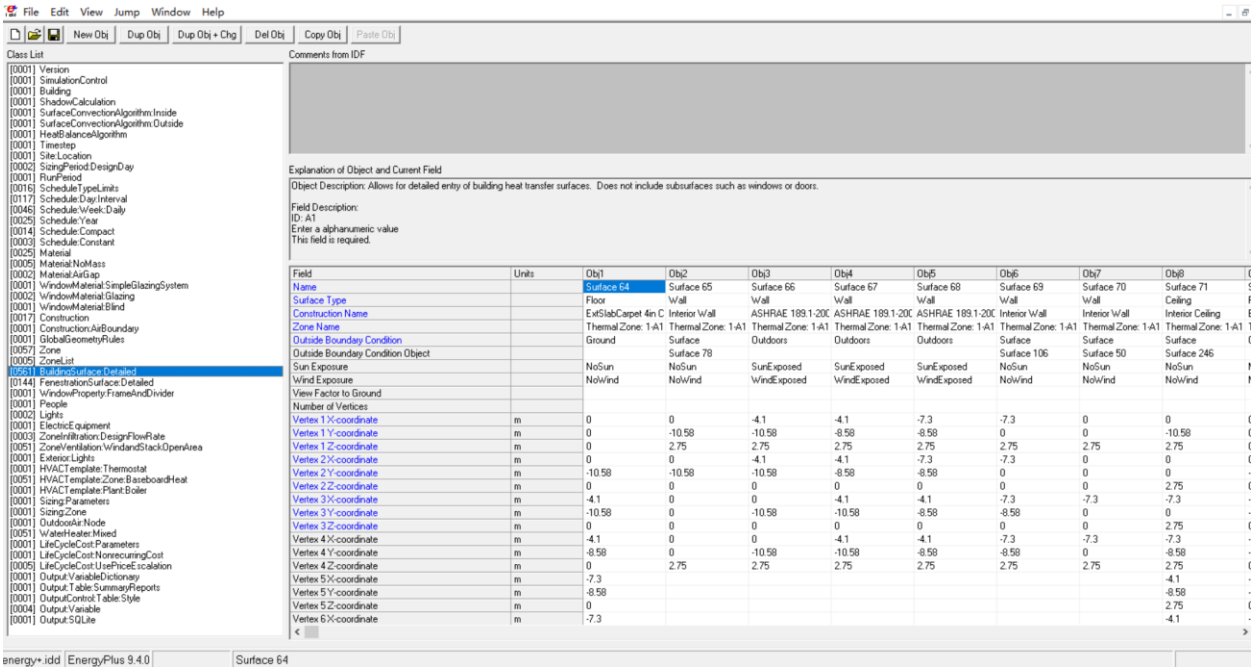


图3. 电供暖建筑能源模型

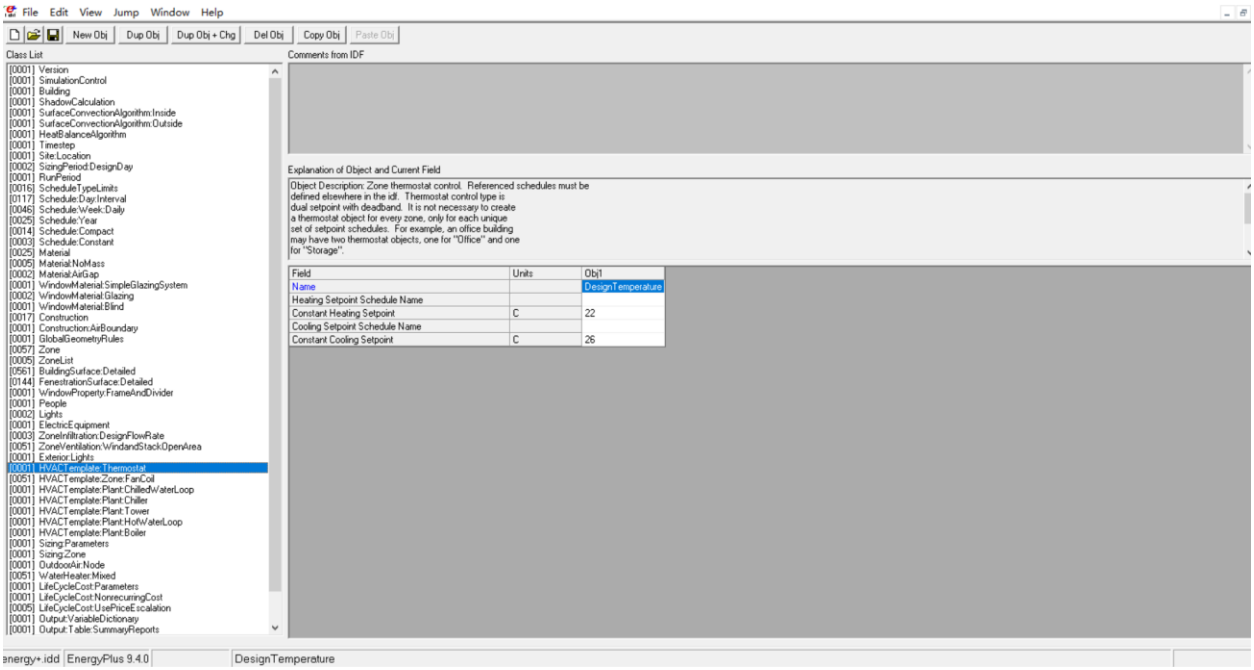


图4. 天然气供暖建筑能源模型

4 生命周期成本计算

改造项目的前期成本是建筑业主必须考虑的重要因素。根据在加拿大开展的一项改造调查，房主倾向于选择更便宜的设备或材料，以降低前期成本 [24]。然而，在未考虑运营性能的情况下购买市场价格较低的设备或材料，可能会提高全生命周期成本。全生命周期成本涵盖与改造项目相关的所有成本要素。根据具体情况，前期成本较高的改造方案可能由于节省了更多成本而实现更优的全生命周期成本性能 [25]。

全生命周期成本分析（LCCA）通常被视为对现有资产或潜在投资进行经济评价的方法。全生命周期成本分析涵盖即时费用和长期支出。全生命周期成本是“资产或其组成部分在整个生命周期内满足性能要求所产生的成本”。在建筑与施工行业，ISO 15686–5 已针对“建筑物和建成资产”的财务评价发布。在本研究中，所考虑的生命周期成本包括前期成本、运营成本和处置成本。

4.1 前期成本

前期成本由设备成本和安装成本构成。本研究参考了 RSMeans 建筑施工成本数据库及相关文献，以确定所选改造措施的资本成本。对于给定的改造情景，围护结构和能源系统升级所涉及的前期成本（UC）可通过以下公式计算。

$$UC = cc_{envelope,i} \times A_{envelope,i} + CC_{system,j}$$

其中，

- $cc_{envelope,\ i} = i$th 建筑围护结构材料的单位资本成本• $A_{envelope,\ i} = i$th 建筑围护结构组件的面积• $CC_{system,\ j} = j$th 能源系统的资本成本

4.2 碳税

该建筑的能源成本费率分别为每千瓦时电力15美分和天然气3.2美分。除能源成本外，还需考虑碳税成本。目前加拿大的碳税为每吨二氧化碳当量50美元。根据政府公告，预计碳税每年增加15美元，到2030年达到每吨170美元。虽然碳税可能在2030年达到每吨170美元后停止上涨，但假设碳价继续上涨也是合理的。截至目前，尚未正式公布2030年之后的碳税调整方案。不过，有消息称，到2050年碳税可能升至300美元。本研究假设，2030年之后碳税将线性增长，至2050年达到300美元。

$$\Delta CTS = \left[\left(EE_{base} - EE_{retrofitted}\right) * EF + \left(NE_{base} - NE_{retrofitted}\right) * NF\right] * CT$$

其中，

- $\Delta CTS =$ 基准建筑模型的年度碳税成本节省额（加元）• EE_{base} = 基准建筑模型的年度电力消耗量（吉焦）

- NE_{base} = 基准建筑模型的年度天然气消耗量（吉焦）• $EE_{retrofitted}$ = 改造后建筑模型的年度电力消耗量（吉焦）• $NE_{retrofitted}$ = 改造后建筑模型的年度天然气消耗量（吉焦）

- EF = 当地电网电力排放因子（tCO_2e/GJ）
- NF = 当地电网天然气价格（tCO_2e/GJ）• CT = 碳税（加元/tCO_2e）

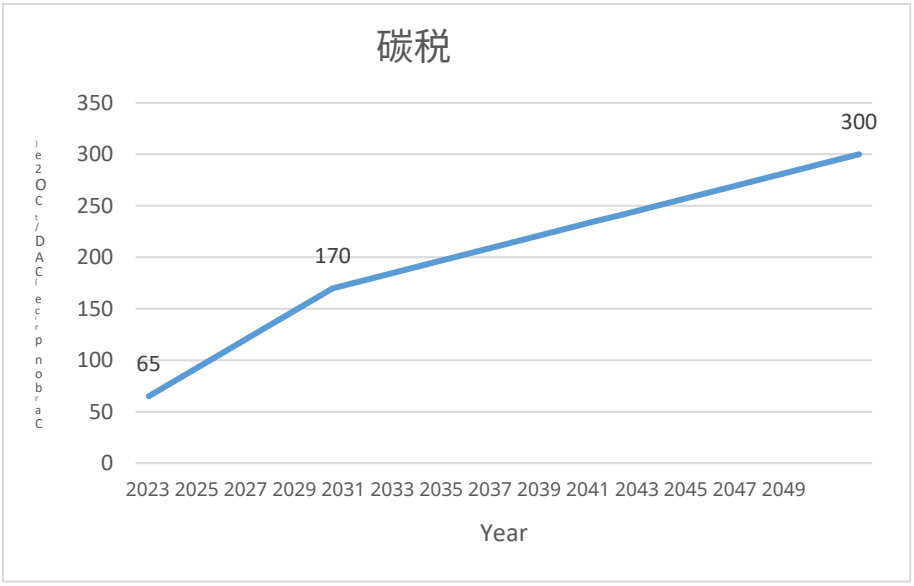


图 5. 碳税成本

4.3 运营成本

一项改造的运营成本主要包括三个组成部分：运营能源成本、维护成本和更换成本。文献中未找到与不同改造措施相关的可靠维护成本数据。另一方面，由于能源使用，住宅能源系统组件的维护成本显著低于与能源系统相关的运营能源成本。因此，在运营成本中仅考虑了能源成本节省。通过建筑能耗模拟，与基准（现状）建筑相比，计算了能源成本节省和更换成本。能源模拟结果可用于确定给定改造策略的年度运营成本节约。

$$\Delta AOCS = \left(EE_{base} - EE_{retrofitted}\right) * EP + \left(NE_{base} - NE_{retrofitted}\right) * NP + \Delta CTS$$

其中，

- $\Delta AOCS$ = 年度运营成本节约（加元）
- EP = 当地电网电价（加元/kWh）
- NP = 当地电网天然气价格（加元/吉焦）

在生命周期成本计算中，考虑了运营成本节约的净现值（NPV），以体现货币时间价值。运营成本节约的净现值可使用以下公式计算。

$$\Delta OCS = \sum_{t=0}^{T} \frac{\Delta AOCS}{(1+r)^t}$$

其中,

- $\Delta OCS =$ 运营成本节约的净现值
- $r =$ 折现率（%）
- $T =$ 项目寿命

改造措施的生命周期总成本可通过以下公式确定。

$$LCC = UC - \Delta OCS$$

5 结果

5.1 能源模拟结果

本节介绍案例建筑改造前后的能源性能。

5.1.1 基准建筑模型的性能

表 2. 基准建筑模型的年度能源、成本和排放影响 s

参数	E-Building	NG-Building
总能耗（吉焦）	2125.11	2212.47
能源成本（加元）	56.08K	52.20K
温室气体排放（吨二氧化碳当量）[2]	6.79	27.64

5.1.2 所选节能改造措施的性能

本节介绍所选节能改造措施的能源性能。图6展示了两栋建筑中各项改造措施的年度节能量。与电力建筑相比，天然气建筑的节约成本潜力要大得多。太阳能光伏的节能潜力最大（约410吉焦），其次是空气源热泵（320吉焦）。Windows和水热泵的能源性能相近，能源削减量约为170吉焦。在围护结构保温升级方面，增强墙体保温比屋顶保温能节省更多能源使用。家用电器和照明提升在所选节能改造措施中的节能潜力最低。

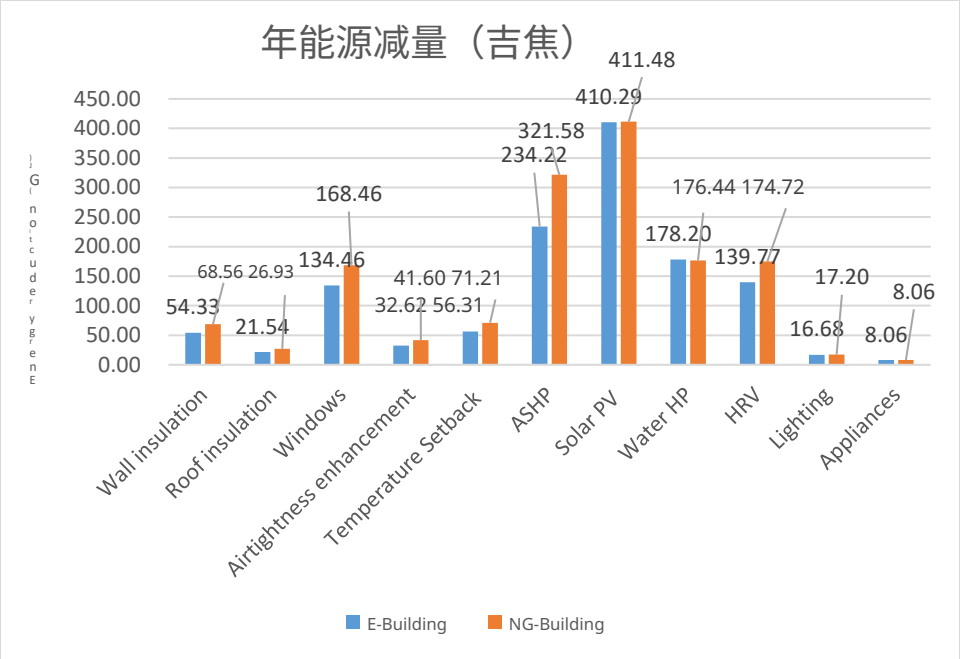


图6. 各项改造措施的年度节能量

如图7所示，与天然气建筑相比，电力建筑的节约成本潜力要大得多。与节能潜力类似，安装太阳能光伏是最具成本效益的节能改造措施，可节省约10千加元的能源成本。此外，空气源热泵对天然气建筑具有显著的年度能源成本节省潜力（6.18千加元）。然而，天然气建筑的能源成本节省并不显著。这是因为空间供暖的能源来源从天然气转为电力，而电价高于天然气价格。

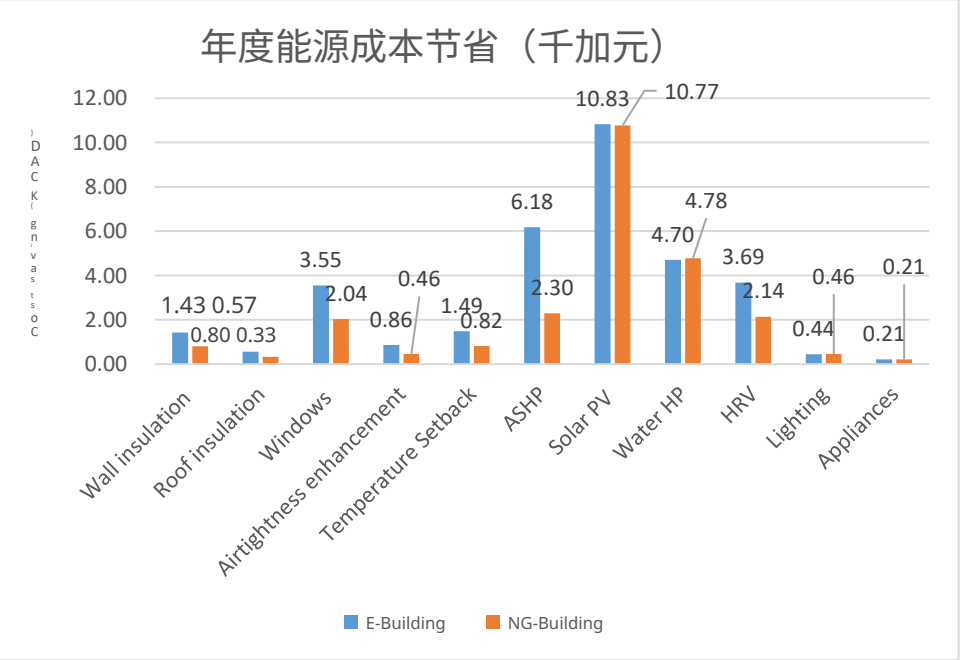


图7. 各项改造措施的年度能源成本节省

图8展示了所选能源改造措施的年度减排量。与电力建筑相比，天然气建筑的减排潜力更大，这是因为天然气的排放因子较高。在天然气建筑中安装空气源热泵可显著减少温室气体排放（21.60 吨二氧化碳当量），其次是热回收通风（8.79 吨二氧化碳当量）和窗户（8.55 吨二氧化碳当量）。改善墙体保温和实施温度回调，可使天然气建筑的温室气体排放减少约 5 吨二氧化碳当量。其他能源改造措施对减排的作用并不显著。

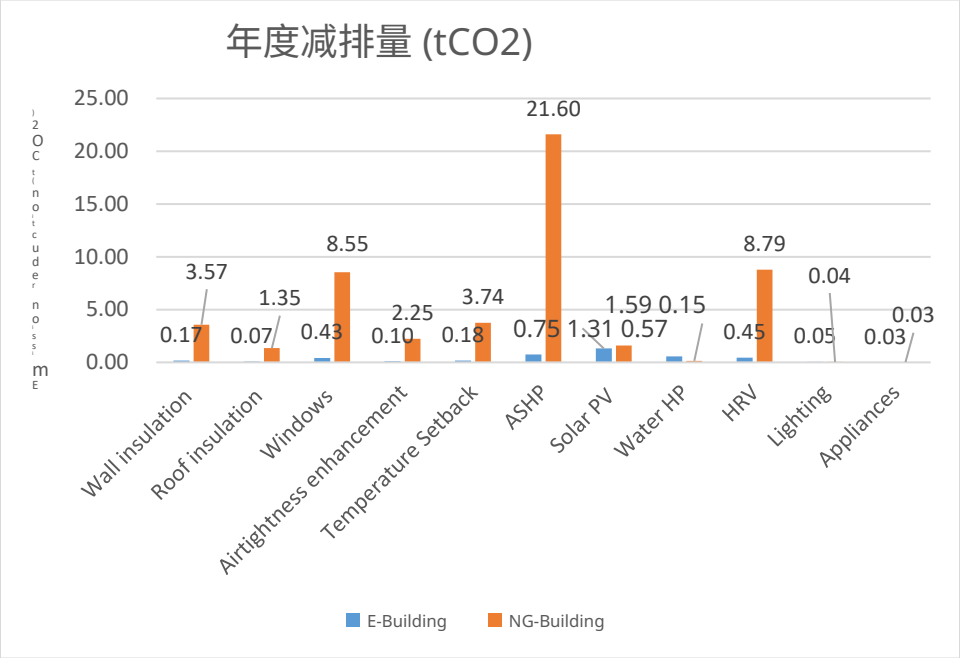


图8. 各项改造措施的年度温室气体排放量

以下图表展示了所研究建筑年度能源消耗、能源成本和温室气体排放的累积效应。能源消耗可从约 2200 吉焦降至 1200 吉焦，降幅为 44%。在能源成本方面，电力建筑的节约成本潜力高于天然气建筑，前者可减少 3.5 万加元，后者可减少 2.7 万加元。然而，与电力建筑相比，天然气建筑可实现更多温室气体减排。实施这些改造措施后，天然气建筑的年度温室气体排放量可从 27.64 吨二氧化碳当量降至 3.77 吨二氧化碳当量。因此，政府和利益相关者应更加重视天然气建筑，以实现减排目标。

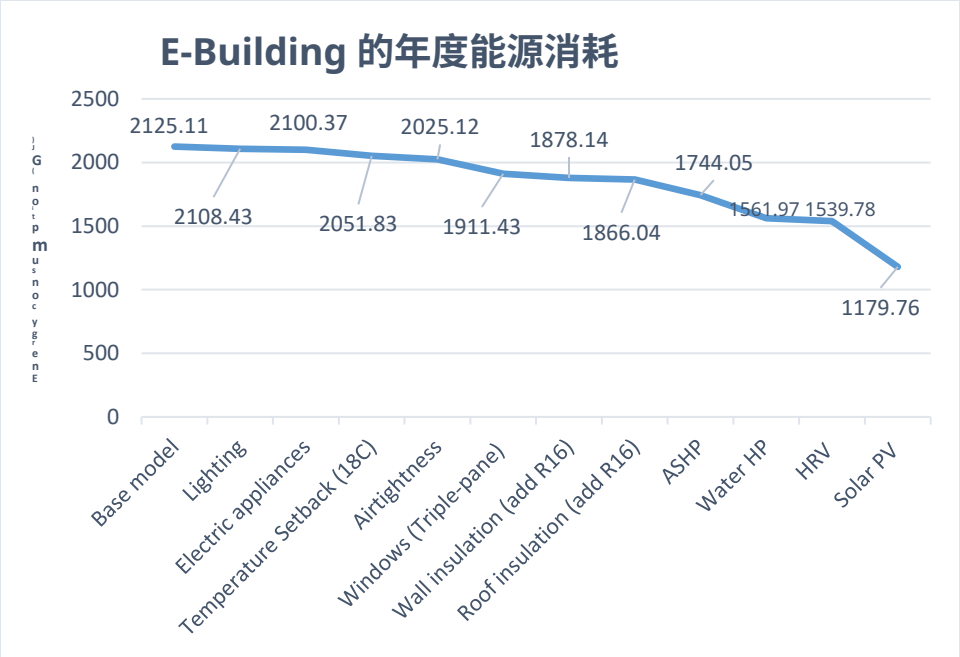


图 9. E-Building 的能源消耗累积效应

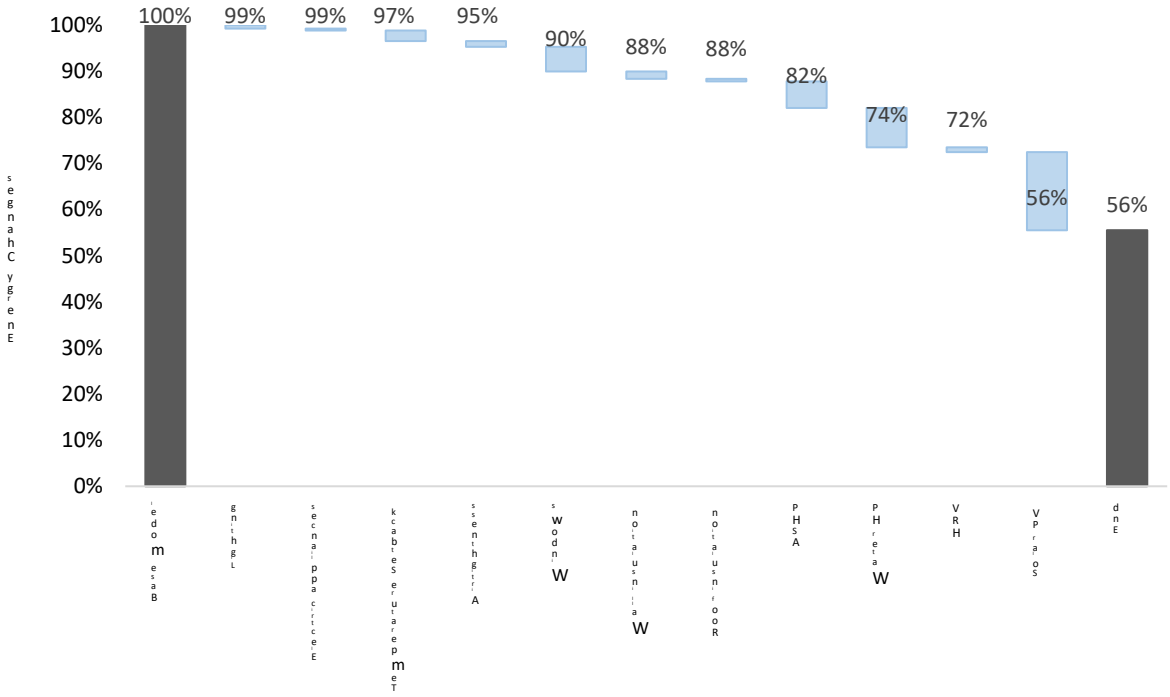


图 10. E-Building 的能源消耗累积效应（%）

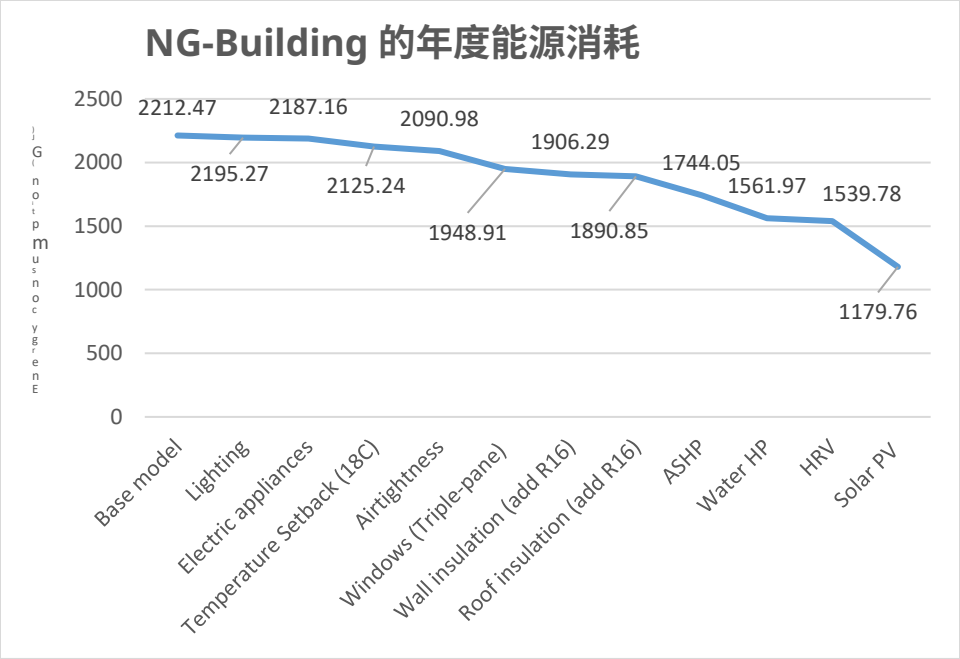


图 11. NG-Building 的能源消耗累积效应

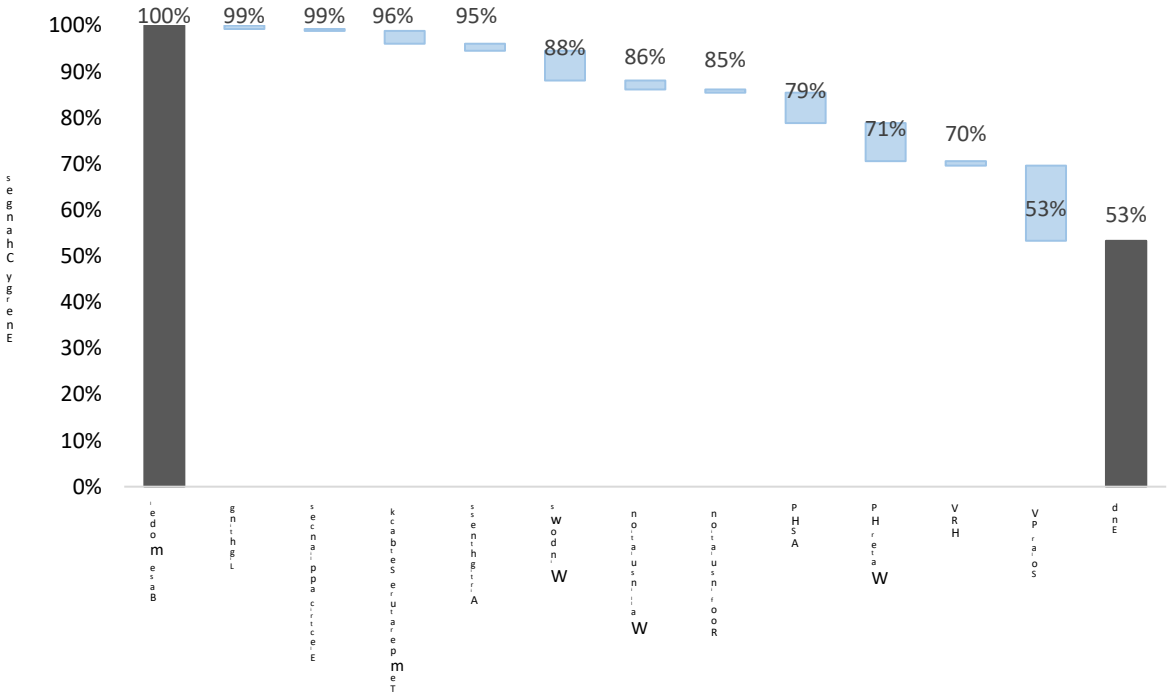


图 12. NG-Building 的能源消耗累积效应（%）

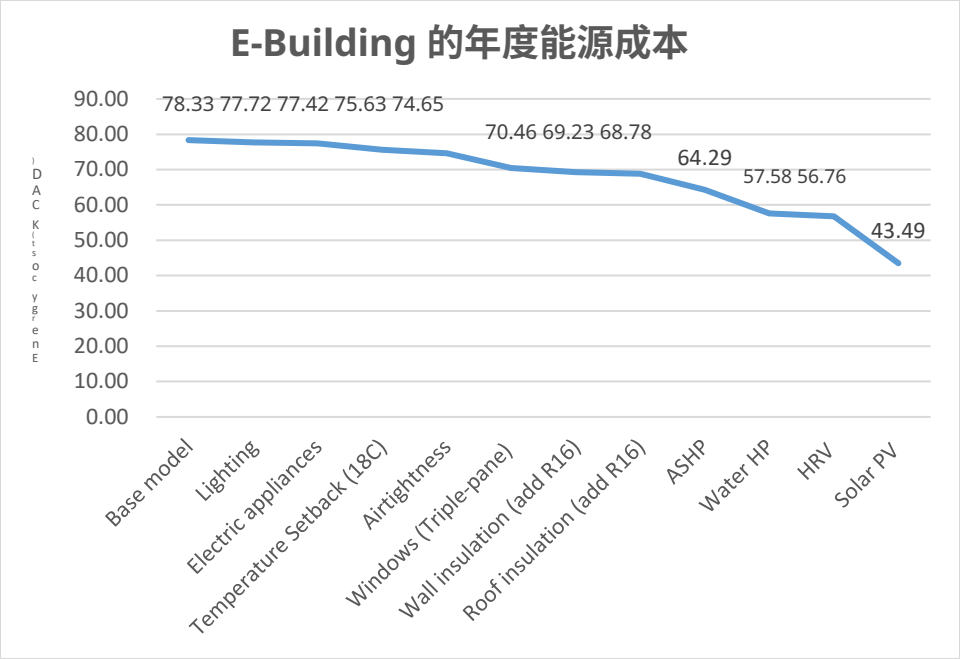


图13：E-Building 能源成本的累积效应

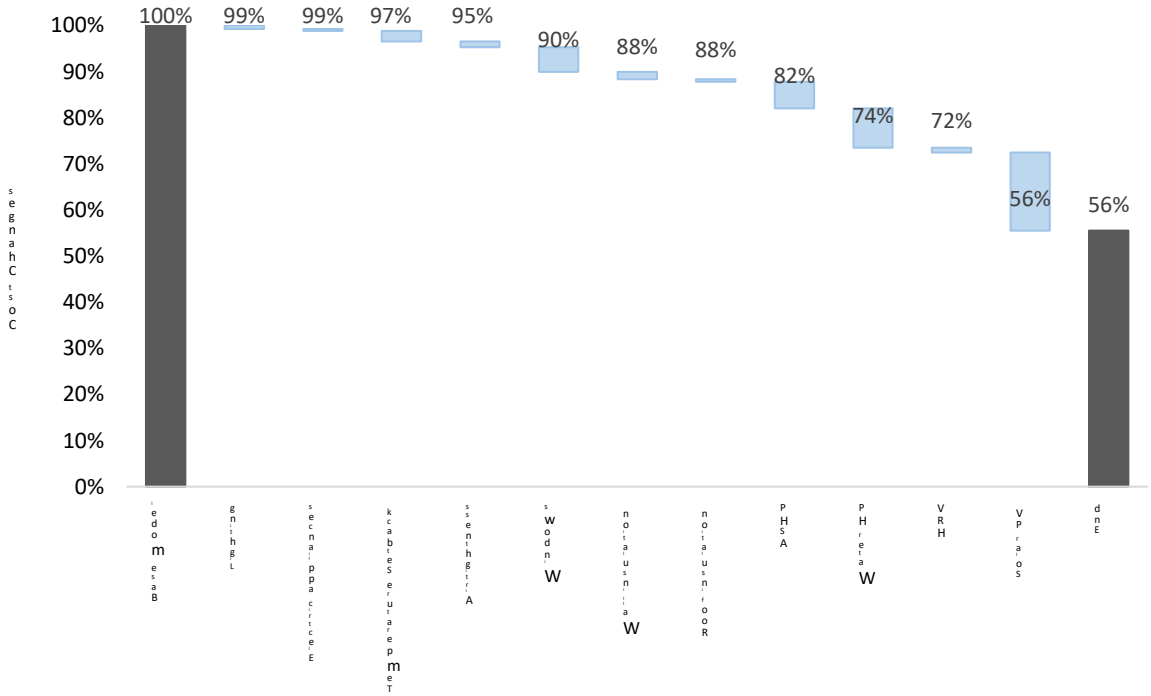


图13：E-Building 能源成本的累积效应（%）

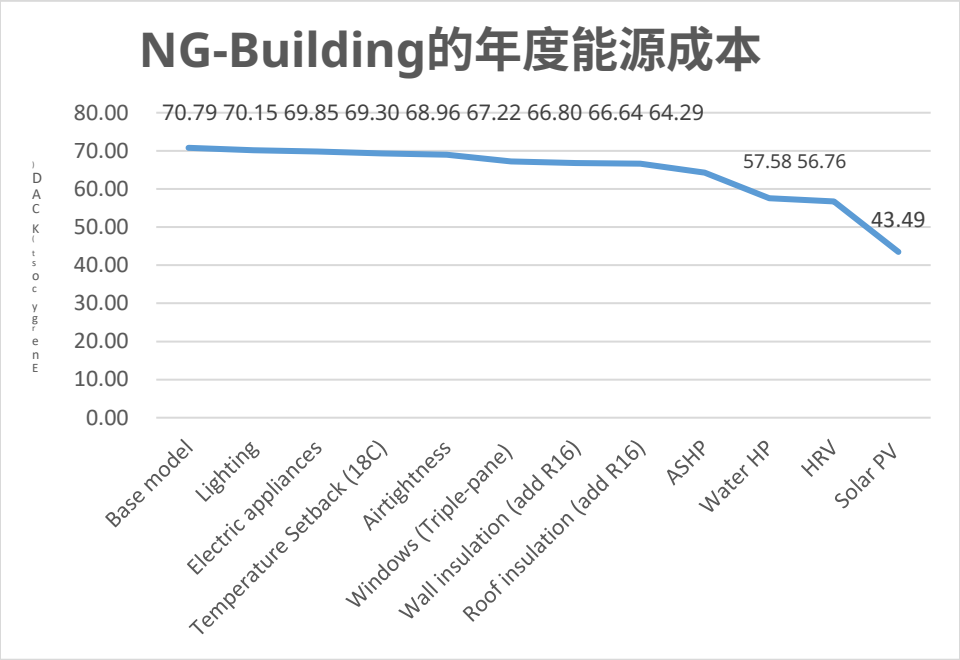


图14. NG-Building能源成本的累积效应

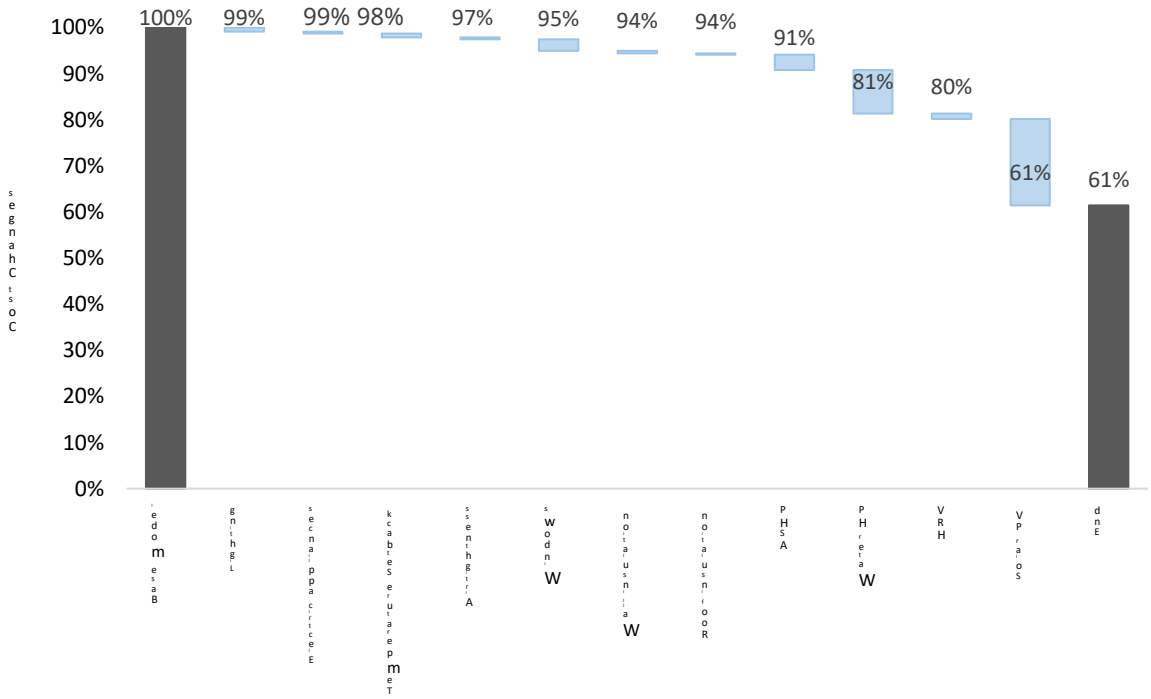


图14. NG-Building能源成本的累积效应（%）

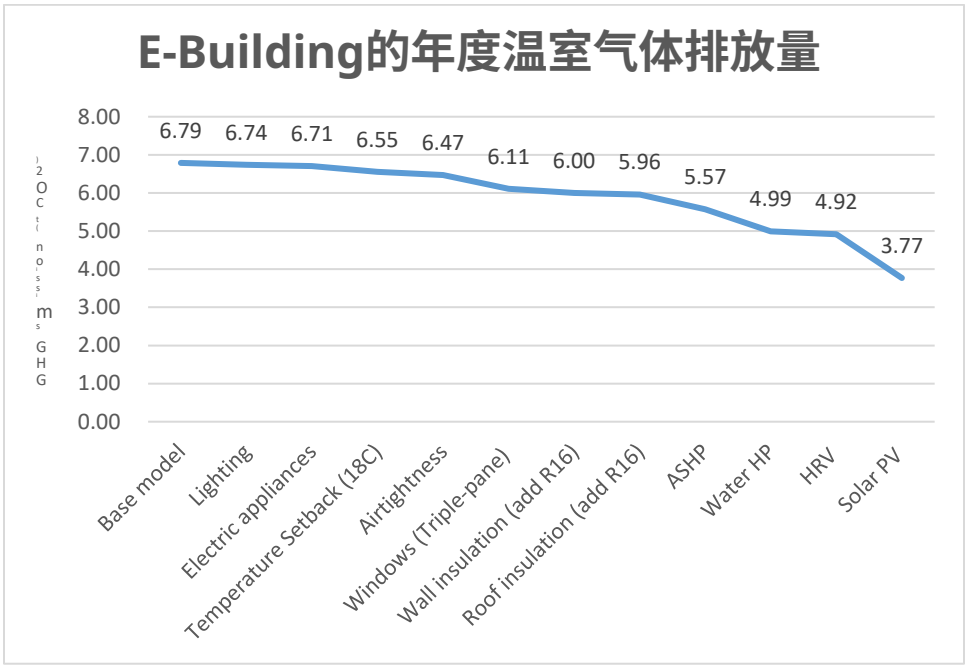


图15. E-Building的温室气体排放累积效应

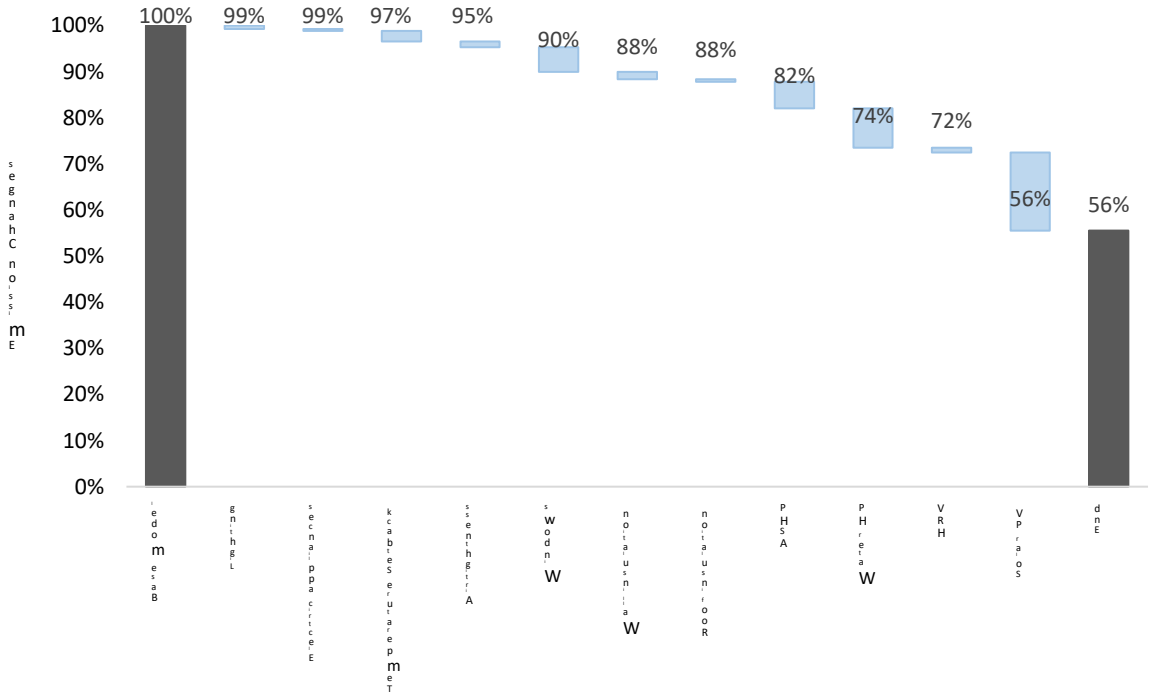


图15. E-Building的温室气体排放累积效应（%）

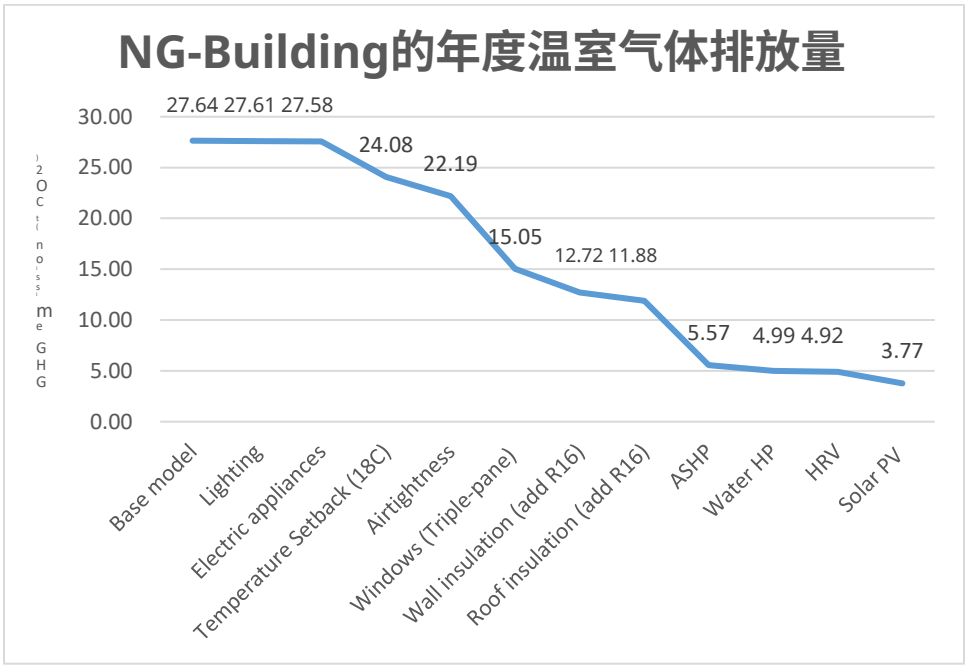


图16. NG-Building的温室气体排放累积效应

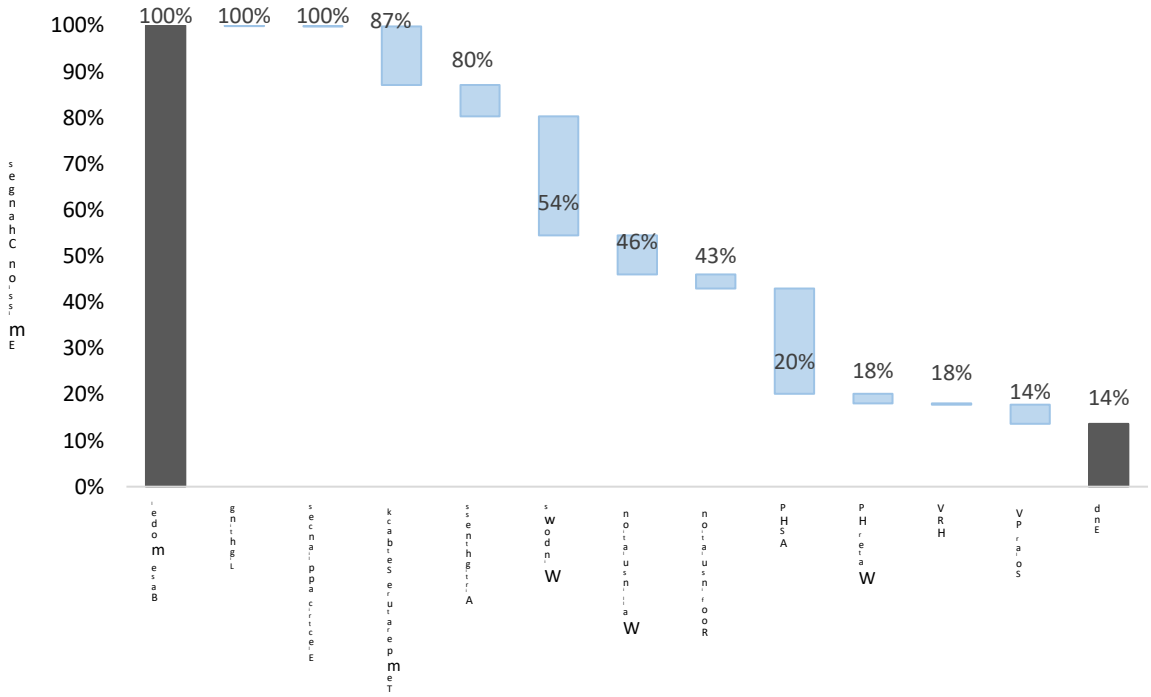


图17. NG-Building的温室气体排放累积效应（%）

5.2 全生命周期成本计算结果

本节讨论了所研究的各项节能改造措施的全生命周期成本计算结果。对于电力建筑，图18显示，温度回调升级的生命周期成本为负值，这意味着这些改造措施节省的运营能源成本高于其前期成本。在这些改造措施中，温度回调的节约成本潜力最大，其次是照明和气密性增强。另一方面，升级Windows、空气源热泵和太阳能光伏并不经济。

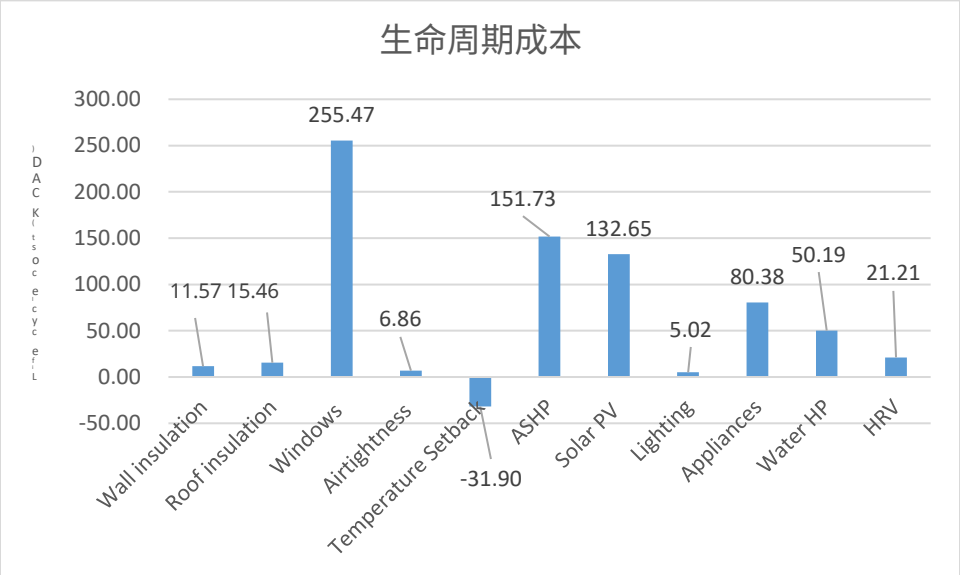


图18. E-Building各项改造措施的生命周期成本

NG-buildings 的改造措施生命周期成本如图19所示。温度回调和照明提升是最具成本效益的节能改造措施。此外，气密性增强、墙体保温和屋顶保温也是经济可行的改造措施。然而，更换窗户会显著增加生命周期成本（约270 KCAD）。此外，ASHP 和太阳能光伏并非经济可行的节能改造措施，分别会使生命周期成本增加220K CAD和120K CAD。

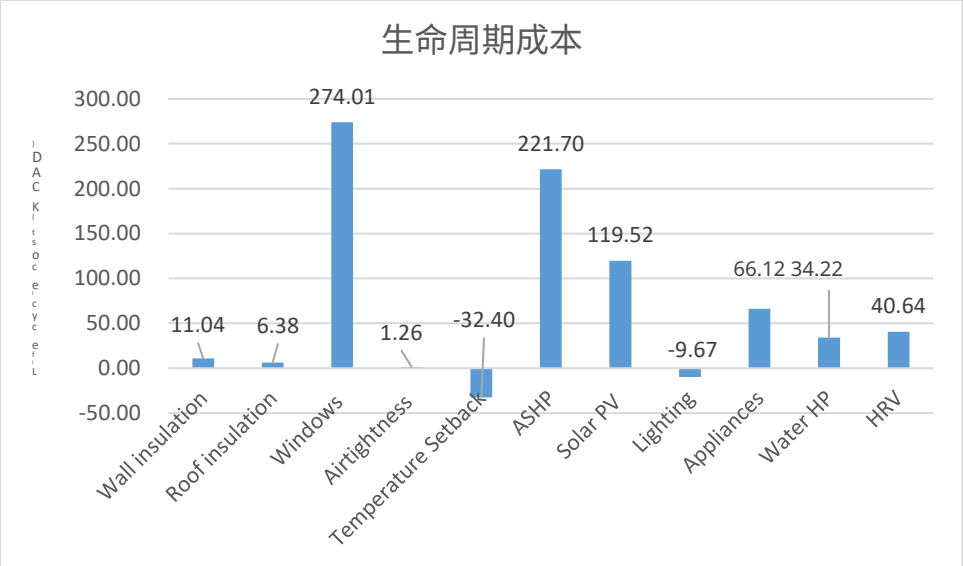


图19. NG-Building各项改造措施的生命周期成本

6 结论

能源改造在减少建筑能耗及相关温室气体排放方面发挥着重要作用。本研究采用EnergyPlus，对位于加拿大不列颠哥伦比亚省里士满市的典型多单元住宅建筑的11项节能改造措施的能源性能进行了评估。研究将能源模拟结果与成本和排放影响数据相结合，以计算建筑物的经济与环境绩效。结果表明，通过实施这些节能改造措施，NG-buildings 可实现显著的温室气体减排（从27.64 tCO_2e降至3.77 tCO_2e）。在节能方面，与其他节能改造措施相比，太阳能光伏、ASHP、热水器热泵和热回收通风增强具有较大的节能潜力。此外，从生命周期视角来看，温度回调、照明和气密性增强表现出最佳的经济绩效。然而，由于生命周期成本较高，窗户、ASHP 和太阳能光伏并非经济可行的选择。尽管 ASHP 会增加 NG-buildings 的生命周期成本，但在政府提供财政激励的情况下，当利益相关者决定实施能源改造时，ASHP 可能是减少温室气体排放的最佳选择。

参考文献

[1] L. Shen、B. He、L. Jiao、X. Song 和 X. Zhang，《改善建筑能效的主要政策工具发展研究》，《清洁生产》，第 112 卷，2016 年，第 1789–1803 页，2016 年。[2] 加拿大政府，《加拿大政府为联邦运营制定雄心勃勃的温室气体减排目标》，2017 年。[3] 《加拿大官方温室气体清单——Canada.ca》。[4] 《能源阶梯规范——不列颠哥伦比亚省政府》。[5] 《能源与温室气体排放（GHG）| 加拿大自然资源部》。[6] A. Charles、W. Maref 和 C. M. Ouellet-Plamondon，《既有办公楼升级改造以实现低能耗和低碳排放的案例研究》，《能源与建筑》，第 183 卷，第 151–160 页，2019 年 1 月。[7] B. Palacios-Munoz、B. Peuportier、L. Gracia-Villa 和 B. López-Mesa，《通过生命周期评价和基于耐久性的建筑寿命估算评估翻新与新建的可持续性：一种新方法》，《建筑与环境》，第 160 卷，文章编号 106203，2019 年 8 月。[8] Z. J. Ma、P. Cooper、D. Daly 和 L. Ledo，《既有建筑改造：方法论与最新进展》，《能源与建筑》，第 55 卷，第 889–902 页，2012 年。[9] R. Ruparathna、K. Hewage 和 R. Sadiq，《建筑能源改造的经济评估：一种基于模糊理论的方法》，《能源与建筑》，第 139 卷，第 395–406 页，2017 年。[10] H. Feng、D. R. Liyanage、H. Karunathilake、R. Sadiq 和 K. Hewage，《基于建筑信息模型的独栋住宅生命周期环境绩效评估：不列颠哥伦比亚省老化建筑存量的翻新与重建策略》，《清洁生产》，第 250 卷，文章编号 119543，2020 年 12 月。[11] J. Weiss、E. Dunkelberg 和 T. Vogelpohl，《改进政策工具，更充分地挖掘房主翻新潜力：来自德国案例研究的经验》，《能源政策》，第 44 卷，第 406–415 页，2012 年 5 月。[12] Z. Ma、P. Cooper、D. Daly 和 L. Ledo，《既有建筑改造：方法论与最新进展》，《能源与建筑》，第 55 卷，第 889–902 页，2012 年。[13] H. Karunathilake、T. Prabatha、K. Hewage 和 R. Sadiq，《加拿大绿色住宅的成本：可再生能源供能建筑群开发的经济与环境分析》，载于《加拿大土木工程学会年度会议论文集》，2019 年。[14] P. Penna、A. Prada、F. Cappelletti 和 A. Gasparella，《既有建筑能效措施的多目标优化》，《能源与建筑》，第 95 卷，第 57–69 页，2015 年。[15] Y. Shao、P. Geyer 和 W. Lang，《将需求分析与多目标优化相结合以制定办公楼节能改造策略》，《能源与建筑》，第 82 卷，第 356–368 页，2014 年。[16] H. Karunathilake、K. Hewage 和 R. Sadiq，《能源

需求削减在加拿大住宅部门中的机遇与挑战：综述》，《可再生与可持续能源评论》，2017 年。[17] S. Finnegan、C. Jones 和 S. Sharples，《建筑中所用可持续能源技术的隐含二氧化碳当量：综述文章》，《能源与建筑》，第 181 卷，第 50–61 页，2018 年。[18] H. Karunathilake、K. Hewage 和 R. Sadiq，《加拿大住宅部门能源需求削减的机遇与挑战：综述》，《可再生与可持续能源评论》，第 82 卷，第 2017 年 2 月号，第 2005–2016 页，2018 年。[19] T. Prabatha、K. Hewage、H. Karunathilake 和 R. Sadiq，《是否进行改造？通过生命周期思维为加拿大住宅制定能源改造决策》，《能源与建筑》，第 226 卷，2020 年。[20] H. Zhang、K. Hewage、T. Prabatha 和 R. Sadiq，《基于生命周期思维的加拿大住宅能源改造评估框架：帕累托优化方法》，《建筑与环境》，第 204 卷，第 2021 年 4 月号，文章编号 108115，2021 年。[21] H. Zhang、H. Feng、K. Hewage 和 M. Arashpour，《用于预测建筑能源性能的人工神经网络：替代模型能源改造决策支持框架》，《建筑物》，第 12 卷，第 6 期，文章编号 829，2022 年。[22] S. A. Sharif 和 A. Hammad，《考虑能源消耗、生命周期成本和生命周期评价的机构建筑翻新基于仿真的多目标优化》，建筑工程杂志，第 21 卷，第 2018 年 6 月号，第 429–445 页，2019 年。[23] M. Heidari、M. H. Rahdar、A. Dutta 和 F. Nasiri，《加拿大独栋住宅实现净零能耗和净零碳足迹的能源改造路线图》，建筑工程杂志，第 60 卷，第 2022 年 5 月号，文章编号 105141，2022 年。[24] H. Zhang、K. Hewage、H. Karunathilake、H. Feng 和 R. Sadiq，《住宅建筑实施能源改造的政策策略研究》，建筑工程杂志，第 43 卷，第 2021 年 8 月号，文章编号 103161，2021 年。[25] H. Feng、J. Zhao、H. Zhang、S. Zhu 和 D. Li，《全建筑生命周期评价中的不确定性：系统性综述》，建筑工程杂志，第 50 卷，第 2022 年 2 月号，文章编号 104191，2022 年。