



迈向零碳 建筑制冷的可持续转型

执行摘要

2021.06

A low-angle photograph of several modern skyscrapers with glass facades, reaching towards a blue sky with light clouds. Green trees are visible in the foreground and to the right, partially obscuring the buildings. A large, dark blue and teal geometric shape is overlaid on the left side of the image.

KIGALI
COOLING EFFICIENCY PROGRAM

作者与鸣谢

主要作者

落基山研究所: **Iain Campbell, Sneha Sachar, Elizabeth O' Grady, Ankit Kalanki, Rushad Nanavatty, Radhika Lalit**

报告监制

世界银行: **Martina Bosi, Samira El Khamlichi, Daron Bedrosyan**

编辑

落基山研究所: **李婷, 郝一涵, 王萌, 李丹, 周吴雪涵**

致谢

感谢下列个人及单位对本报告的支持。

Defne Gencer, 世界银行

Ashok Sarkar, 世界银行

Johannes Heister, 世界银行

Thanavat Junchaya, 世界银行

Ian Crosby, 世界银行

Jas Singh, 世界银行

Rohit Khanna, 世界银行

Gabrielle Dreyfus, 治理与可持续发展研究所&气候工作基金会

Nihar Shah, 劳伦斯伯克利国家实验室

特别鸣谢基加利制冷能效计划 (K-CEP) 通过能源部门管理援助计划 (ESMAP) 对本报告提供的资金支持, 以及可持续城市全球平台 (GPSC) 为本报告提供的资金支持支持。

序

在全球变暖的大背景下，建筑制冷需求快速增长，制冷越来越被视为与发展权及社会公平息息相关的重要事项。制冷需求的激增将给热带地区众多发展中国家的能源系统带来巨大的压力，造成高昂的建筑制冷经济成本，同时产生大量直接及间接的温室气体排放。到2100年，仅住宅建筑的空调制冷就有可能造成全球气温升高0.5摄氏度。因此，在面向碳中和的可持续转型过程中，制冷行业的零碳转型蕴含着极大的机遇，值得各方广泛关注。

在过去的4年中，落基山研究所成立了全球制冷技术创新工作组，陆续发布了《解决全球制冷挑战：如何应对房间空气调节器带来的气候威胁》和《改变全球空调市场格局：中国的机遇与挑战》等一系列报告、文章和博客，并与合作方联合成功举办了全球制冷技术创新大奖赛。为更好地为市场及政策制定者提供全面的制冷零碳转型解决方案，落基山研究所于近期发布了《迈向零碳——建筑制冷的可持续转型》报告。

本报告为《迈向零碳——建筑制冷的可持续转型》的执行摘要，按照原报告总体框架简要分析了制冷需求增长对能源和环境的影响，并介绍了一系列综合性的建筑制冷手段，以及有效推进建筑制冷可持续转型的措施。本报告提出应统筹考虑影响建筑制冷排放的所有相关因素，突出了综合性建筑制冷手段的重要性，不仅考虑空调系统的节能减排，也考虑如被动式制冷策略、风扇/冷风机、建筑自动化控制系统等手段，利用综合手段以最佳方式解决建筑制冷问题，降低建筑制冷的整体成本并推动建筑制冷零碳转型。

迈向零碳的建筑制冷可持续转型需要政策制定者、行业相关方、研究机构等多方合作。落基山研究所诚邀各方与我们一起共同努力，推动综合性制冷解决方案的应用及规模化，实现建筑制冷的可持续转型！



前言

当下，全球范围内对于建筑制冷的需求正在快速提升。据估计，全球建筑制冷所需的能源用量将在2016-2050年间增长两倍，其中的大部分增幅将发生在发展中国家。人类急需经济可行且可持续的建筑制冷解决方案，既要能够满足日益增长的制冷需求，又要尽量减少给能源系统带来的压力以及可能产生的温室气体排放。对于发展中国家来说，这样的解决方案尤其重要。

虽然现有的一些建筑制冷技术手段可以节能50%以上，并且可以降低消费者的全生命周期成本，但这些技术目前仍不够成熟，无法实现大规模推向市场。既然过去这些制冷技术的机会成本已经无法收回，那么如果从现在开始着手推动建筑制冷向可持续性的方向转型，我们将有机会避免未来机会成本的升高。

本文对建筑制冷及其关键考虑因素进行了介绍，旨在助力发展中国家将可持续建筑制冷纳入其政策讨论和投资考虑范围。报告讨论了建筑制冷需求与发展的一致性，分析了这种需求增长对能源和环境的影响，并介绍了一系列综合性的建筑制冷手段，以及影响这些技术实施的关键因素和潜在成本。针对可持续建筑制冷应用的市场障碍，该报告还提供了多种具体措施和解决方案供读者参考。



1. 建筑制冷对发展的重要意义

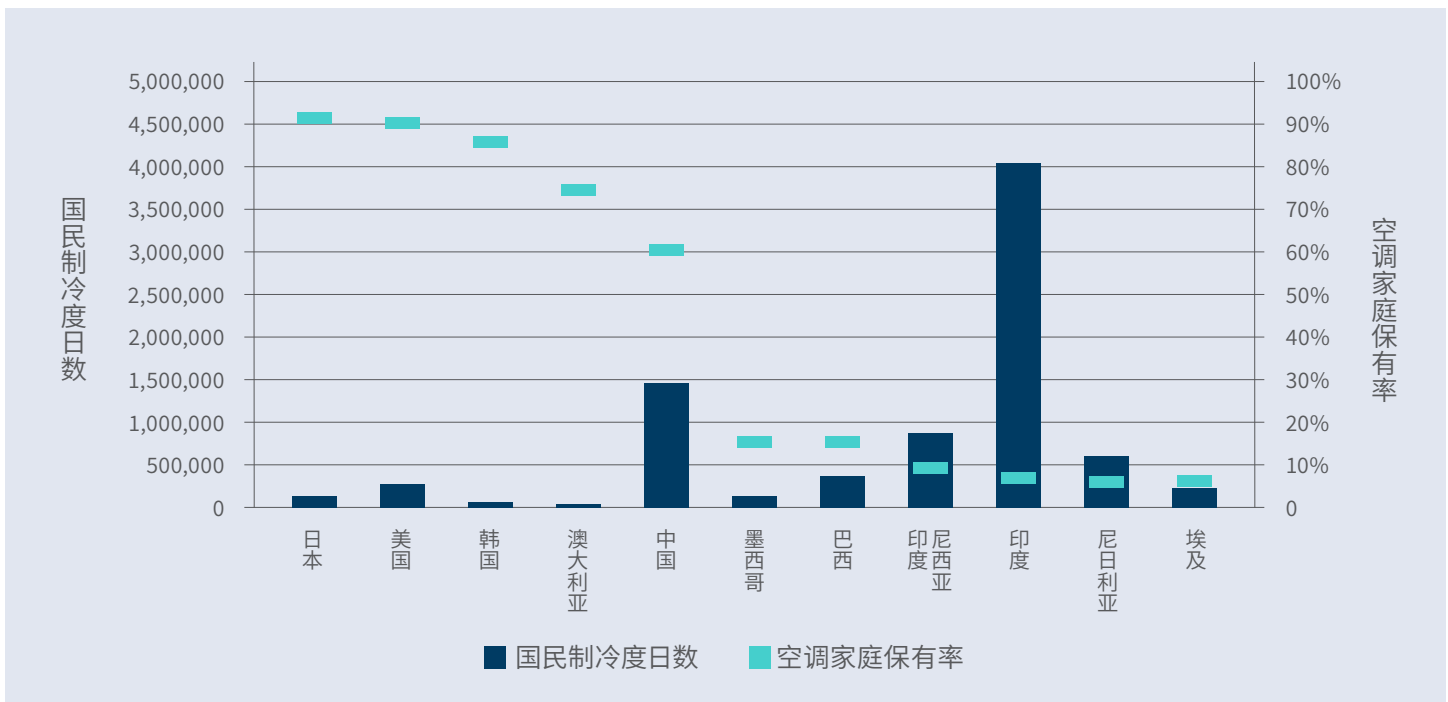
建筑制冷，也被称为“舒适性制冷”，指的是通过调节建筑内环境的温度、湿度和通风到最佳状态来为人们提供热舒适环境的方法。

在全球变暖的大背景下，建筑制冷越来越被视为是平等的重要问题和发展的优先事项。建筑制冷与可持续发展目标（SDGs）的三个方向直接相关，分别是改善各年龄段所有人的健康生活与福祉，正常工作与经济增长，以及可持续发展的城市与社区¹。同时建筑制冷也有益于多项其他可持续发展目标的实现。越来越多的证据表明，气温的升高和制冷

措施的缺乏会对各国人民的健康、教育、生产力和经济发展造成影响，特别是对在热带地区的发展中国家。

目前，全球40%的人都居住在热带地区，到2050年这一数字预计会增长到50%，而建筑制冷在这些人口中的普及却远远无法满足其对应的需求。目前全球不同地区的家用空调保有率与制冷需求（使用国民制冷度日数来表示）之间的差距可以直观地展示这一亟待解决的问题。如图1所示，对建筑制冷的需求在印度、印度尼西亚和尼日利亚等位于热带气候地区人口众多的发展中国家最为迫切。

图 1 全球不同地区的制冷需求与当前空调保有率的对比



来源：落基山研究所2020

注：国民制冷度日数由一个国家每年平均制冷天数乘以该国人口数量得到，代表该国人民的制冷需求。

2019年，政府间气候变化专门委员会（IPCC）报道称，若全球温度上升1.5摄氏度，23亿人口将受到高温热浪的影响和侵害，而这一临界值最早可能在2030年就会到来。有效、经

济可行且能够被普及的建筑制冷技术是克服这一发展挑战的关键解决方案之一。

¹ 联合国人人享有可持续能源组织2018年的《全球可持续制冷普惠的风险与机遇》报告认为建筑制冷与SDG 3、SDG 8和SDG 11相关。

2. 建筑制冷需求增长对能源和气候的影响

建筑制冷需求的增长由多种因素导致，如人口增长、全球变暖以及国民收入的增加。据估计，全球建筑制冷的能源用量将从2016年的2020太瓦时 (TWh) 增长至2050年的6200太瓦时，其中印度尼西亚、印度、墨西哥、巴西和非洲的许多发展中国家将面临制冷能源需求的大幅增长。如果不采取积极的应对措施，这种增长可能会带来一系列负面影响，进而使建筑制冷的效益大打折扣。这些负面影响包括：高昂的运行成本，大规模新增电网基础设施的成本，以及温室气体 (GHG) 排放的增加——越多的制冷应用会造成越严重的温室效应，产生恶性循环。

为了满足不断增长的建筑制冷需求，全球范围内的总发电装机容量需要提高295%，从2016年的850吉瓦 (GW) 增加到2050年的3350吉瓦。这增加的2500吉瓦相当于目前美国、欧洲和印度发电装机容量的总和。即使这样，这一发电装机容量的巨大增幅依然不足以让全人类获得建筑制冷，

许多城市和农村地区的贫困家庭的建筑制冷需求仍无法得到满足。

建筑制冷需求的激增将会给热带地区许多发展中国家已经相当紧张的能源系统带来更为巨大的压力。据估计到2050年，建筑制冷的用电需求将占到许多国家峰值用电负荷的30-50%，并且这部分用电负荷基本都是成本最高的，其中最大的增幅将发生在印度。

虽然电网清洁化水平正在不断提高，但建筑制冷耗电带来的温室气体排放 (间接排放) 仍将在2050年翻一番，这意味着可再生能源发电的转型速度将无法与制冷负荷增长保持同步。除了这些间接排放，当今大多数空调使用的高全球变暖潜能值 (GWP) 制冷剂还会造成直接的温室气体排放，使建筑制冷的整体排放影响进一步放大。



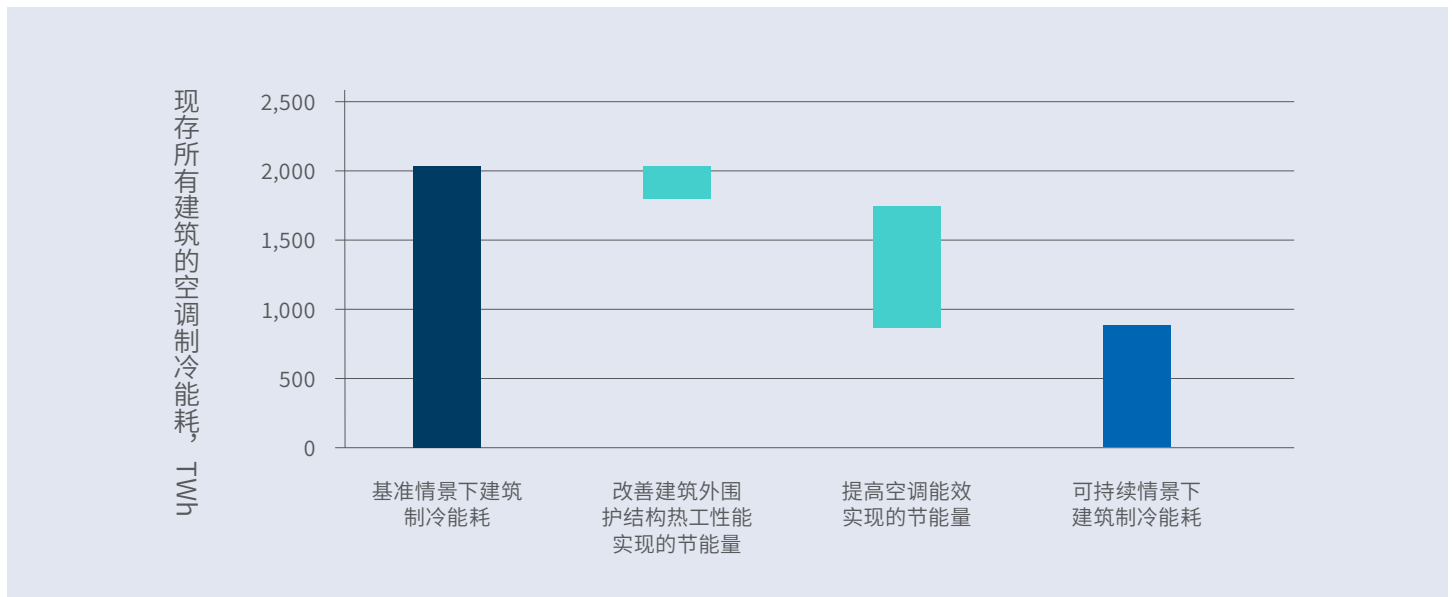
3. 建筑制冷可持续转型的重要性

国家的发展会带来建筑制冷需求的不断增长，想要避免这种增长对经济、电力系统和环境造成严重影响，就必须设计完善的策略和解决方案来应对。虽然现在有技术能够以50%以下的能源消耗来满足当今的建筑制冷需求，同时为消费者提供更低的全生命周期成本，然而这些技术的潜在效益在很大程度上还有待开发。例如，当前市场上出售的房间空气调节器的平均能效还不到商业可行最佳水平（即能效最高机型）的一半；在大部分发展中国家，建筑高性能隔热的潜在效益和制冷负荷的降低潜力仍未得到开发。

• 不同建筑制冷方式的机会成本

本文分析计算了不采用现有最佳制冷技术可能对社会造成的机会成本。这一分析考虑了将现有建筑制冷设备存量（16亿台家用和商用空调机）从常规基准技术能效水平升级到商业可行的较高能效水平（IEA高效制冷情景）所能带来的影响，以及建筑外围护结构热工性能改进的影响ⁱⁱ（图2）。

图2 不采用现有最佳技术可能对社会造成的机会成本



来源: 落基山研究所《解决全球制冷挑战》(2019) 和国际能源署《制冷的未来》(2018年)

ⁱⁱ 该分析并未考虑系统整体解决方案（如区域供冷），尚未完全商业化的早期创新阶段技术，或任何新兴革命性技术解决方案的积极影响。

对能耗的影响

通过采用商业可行的高能效制冷技术，结合建筑外围护结构热工性能改进，可以将建筑制冷所需的能耗减少约58%（即1177太瓦时）。

对电力系统的影响

可以避免近500吉瓦的发电装机来满足建筑制冷需求，相当于节省大约3450亿美元投资（不包括与之相关的输电配电成本），这些投资可以用于其他更优先的领域。

对温室气体排放的影响

建筑制冷的间接排放总量（11.35亿吨二氧化碳）可以减少到当前水平的一半以下（5.4亿吨二氧化碳）。此外，建筑制冷容量的降低还会减少制冷剂的使用，从而减少直接排放。

对消费者的影响

高效制冷设备的使用可以在设备的全生命周期内为消费者节约大量成本。例如，在印度市场，一台平均水平入门级房间空调器在其全生命周期（一般为10-12年）内给消费者带来的成本几乎是商业可行的高能效房间空调器机型的两倍（如果没有用电补贴或用电补贴降低，其成本将会更高）。

当前建筑制冷方式的机会成本已经过高，如果各国继续按照基准情景发展，未来的建筑制冷需求增长只会让这种成本进一步增加。虽然过去产生的机会成本已经无法收回，但可以从现在开始着手推动建筑制冷向可持续性的方向转型，避免未来机会成本的升高。

到2050年预期建成的建筑目前约一半都尚未建成，这其中大部分都将来自发展中国家。因此，我们在考虑未来的制冷需求时应通过经济可行的方式实现建筑外围护结构热工性能的改善和能源效率的深度提高，从而进一步挖掘节能潜力。

• 什么是可持续建筑制冷？

可持续建筑制冷，也称清洁高效制冷，指的是综合利用一系列手段来实现人类在建筑内的热舒适，包括高能效建筑设计、高效制冷技术以及应用气候友好型制冷剂（符合或超过《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》及其《基加利修正案》规定的标准）。这些手段共同发挥作用可以降低当前制冷方式的环境影响，达到各国经国际认可的温室气体减排目标。

建筑制冷是建筑能耗的重要组成部分，尤其是在热带气候地区。例如，在新加坡，制冷能耗占建筑总能耗的比例高达70%。因此，建筑可持续制冷解决方案可能与提高整体建筑能效的措施面临同样的障碍。此外，建筑制冷还具有一些独特的因素和属性，包括在拉高用电峰值负荷方面对电力系统的影响，制冷剂的作用及其对排放的影响，以及在城市或社区层面设计区域供冷解决方案的影响（可以通过同时为多个建筑制冷而提高能效并降低温室气体排放）。



4. 综合性建筑制冷手段

不同于单一的建筑制冷技术，综合性的建筑制冷手段将影响建筑制冷能耗的相关因素都考虑进去，从而发挥最大化的潜在效益。具体来说包括：提高建筑能效来降低制冷负荷，

提高制冷设备的能源效率，以及运行优化提高设备的制冷性能表现，如图3所示。

图3 综合性建筑制冷手段



来源：落基山研究所《Integrative Design》

• 降低制冷负荷：被动式制冷

被动式制冷指的是高效建筑设计方法，利用建筑朝向、隔热和通风等非消耗能量的方式达到阻隔外部热量和自然制冷的效果。被动式制冷主要通过强制性建筑能效标准和自愿采取的建筑能效措施实现，即使是在炎热气候地区，也能够降低建筑制冷负荷达25%以上。建筑能效标准在发达国家很普遍，但在发展中国家的采用率仍然较低，其原因主要是在实施和执行方面受到阻力。

被动式制冷既能应用于新建建筑，也能应用于既有建筑改造。被动式制冷通过提高建筑热工性能来降低建筑制冷需

求，是实现建筑制冷可持续转型的首选措施。由于在新建建筑中采用被动式制冷相对容易，正在大规模新建建筑的发展中国家尤其需要关注此类技术。

• 采用高能效和气候友好的制冷技术

蒸汽压缩制冷系统是目前最主要的主动式制冷技术。此类系统利用制冷剂的相变性能提供制冷，不仅可以在所有气候条件下发挥作用，灵活调整规模，还能同时调节室内温度和湿度。蒸汽压缩制冷系统被广泛应用于多种设备，例如房间

空气调节器、中央空调系统、可变冷媒流量空调系统和冷水机组等。然而，蒸汽压缩制冷系统的能耗较高，还会由于制冷剂 and 电力的使用产生直接和间接的温室气体排放。

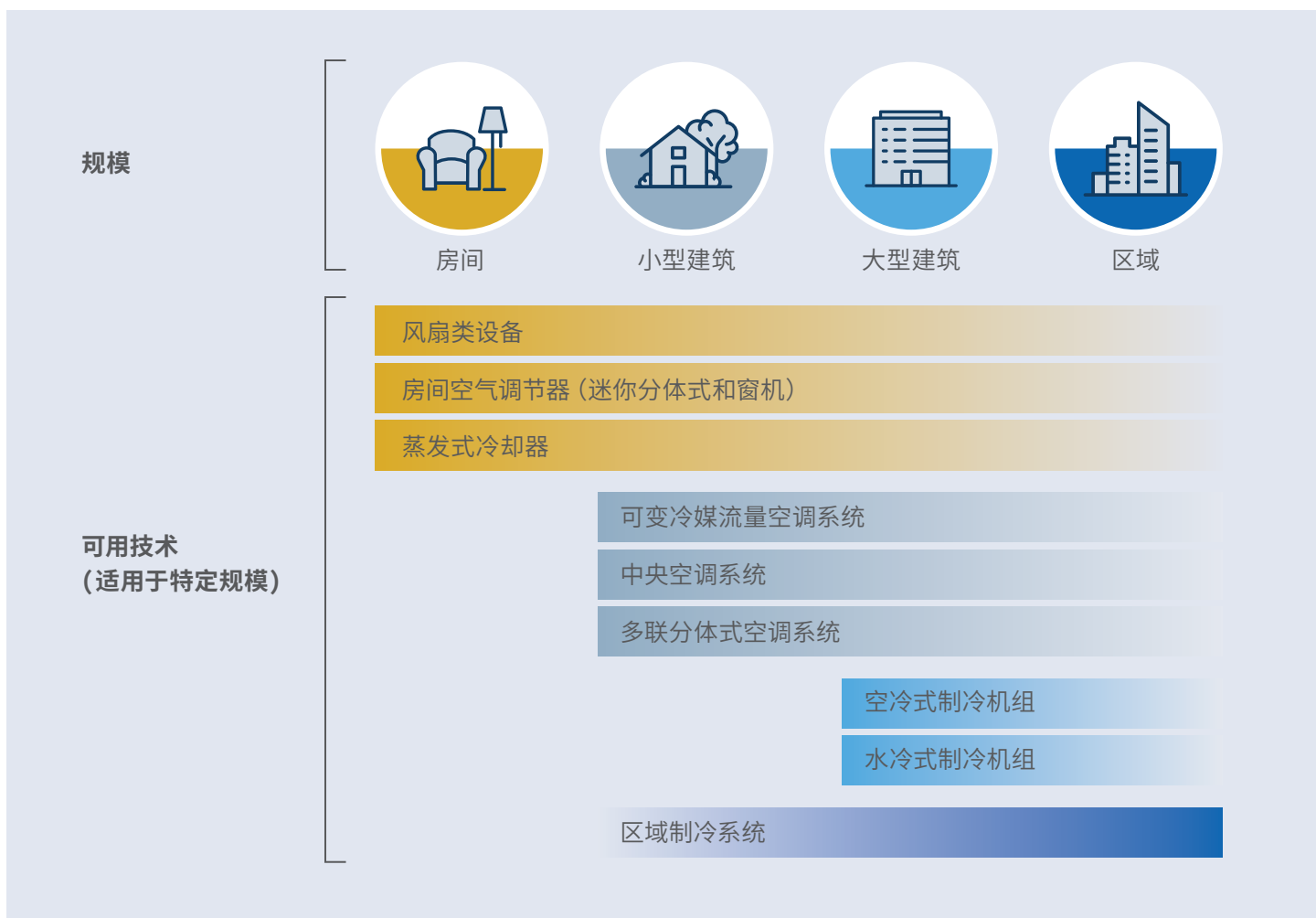
风扇和冷风机也具有巨大的市场，提高这些设备的能源效率同样重要。这类低端制冷设备不使用制冷剂，且成本和能耗较低。尽管在极端高温和潮湿的环境下的制冷效果有限，它们仍在发展中国家得到普遍应用，特别是在低收入人群中。随着许多亚洲和非洲国家农村家庭电气化的普及，预计对风扇和冷风机的需求还将会继续增大。

近年来，一些优化传统制冷系统的创新制冷技术也应运而生，如替代传统空调对使用气态制冷剂的蒸汽压缩制冷循

环的依赖，以及通过蒸汽压缩技术和蒸发冷却技术的集成来提供混合解决方案。这些技术或是应用较为局限，或是还处于技术验证的早期阶段。这些创新的替代制冷解决方案可以先从符合条件的领域开始应用，并很可能在气候友好型和无氢氟碳化合物 (free of HFCs) 制冷领域发挥越来越大的作用。

在寻找建筑制冷的最优解决方案时，需要考虑多方面的因素，包括建筑规模、建设类型（新建或改建）、建筑产权特点、气候区域、所处环境特点和特定国家国情（如劳动力成本、电费和电网因数等）。其中最需要注意的是技术应用的建筑规模，如需要提供制冷的是一间房间、一幢建筑还是一个园区（详见图4）。

图4 主动式建筑制冷技术



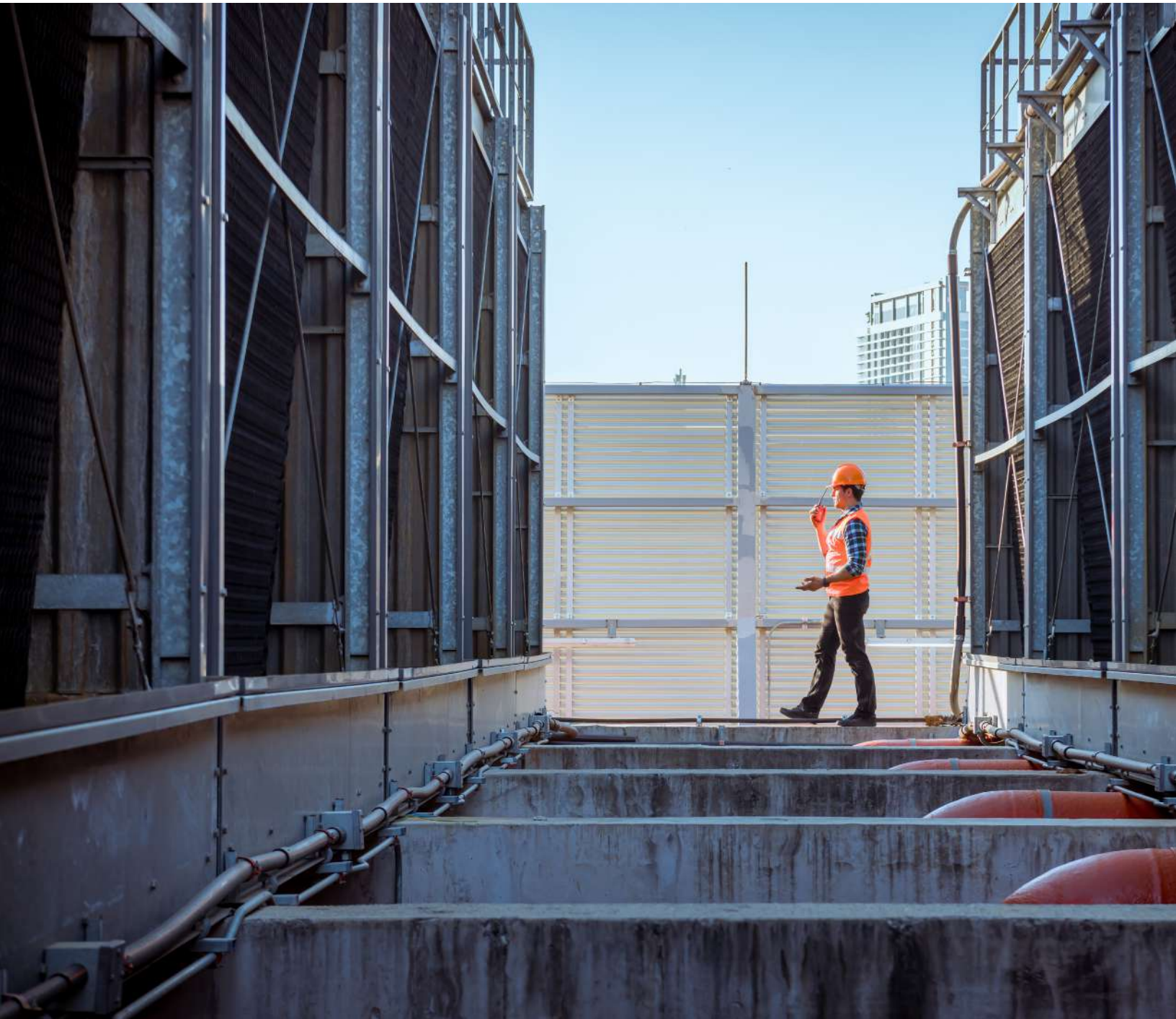
来源：落基山研究所作者

注：底色表示各种制冷设备对相应建筑规模的适用性

• 优化和控制制冷需求：按需提供制冷

建筑使用者的行为和使用方式是影响建筑制冷能耗的重要因素。可以采用多种策略来确保仅在需要的时间和空间提供制冷，并监控和维护系统性能，从而避免任何浪费的制

冷。广义上说，这些策略包括采用自动化楼宇控制和传感器以确保只在需要时提供制冷（基本上实现部分时间和部分空间运行）、负载转移策略、用户适应和行为改变、良好的运行维护、以及服务部门的能力建设等。

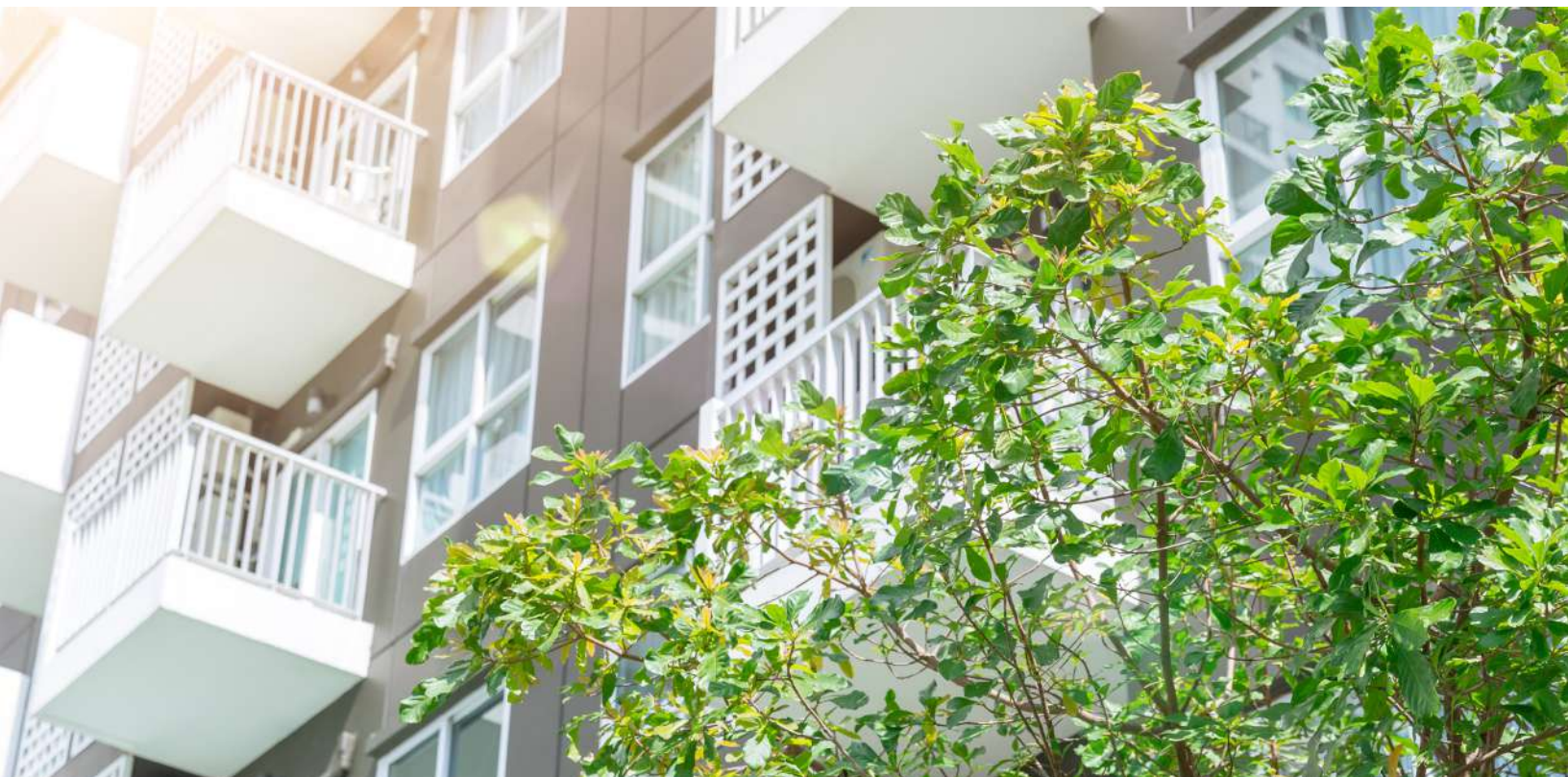


5. 可持续建筑制冷实践的潜在市场阻碍

投资或推广可持续建筑制冷实践的阻力主要来自于市场需求的缺乏。这是由多个相互关联的潜在市场阻碍造成的，因此需要市场解决方案和促进手段（例如金融工具和政策措施）ⁱⁱⁱ 的介入。这些市场阻碍包括：

通常情况下，这些市场阻碍不会单独存在，而是共同发挥作用并产生相互关联的影响。因此，有效应对建筑制冷挑战需要多管齐下的努力，并根据特定国家的具体市场情况采取综合性的措施。

- 对可持续建筑制冷实践的优势了解不足
- 可持续制冷技术带来的成本节约不够透明
- 前期成本偏见
- 成本与效益的分离问题
- 对能效价值缺乏评估
- 制冷技术和制冷剂的选择过多
- 政策不匹配



ⁱⁱⁱ 一般来说，对可持续制冷或整体能效障碍的讨论包括政策和金融工具的缺乏，但我们认为，政策、规范、机构能力和金融工具可以成为问题的解决方案。它们的缺乏并不是问题本身的根本原因，即为什么市场不存在对可持续制冷措施的需求。同样，对能力的缺乏可能是阻碍充分满足建筑制冷需求的一个障碍，但不是市场不存在建筑制冷需求的原因。以上讨论集中在对可持续建筑制冷缺乏市场需求的潜在障碍上。

6. 有效克服市场阻碍的措施

总的来说，解决市场阻碍和推进可持续建筑制冷实践的措施可以归结为以下三种：

- 制定一套支持性的政策和监管环境。支持性的政策和监管环境是扩大可持续建筑制冷实践规模的关键因素。积极的政府政策导向可以保证市场合理地运行，从而降低全生命周期成本和系统成本，并向行业发出必要的信号，鼓励可持续建筑制冷应用的创新。
- 建立可持续的融资和促成机制。可持续制冷设备或节能建筑的前期成本通常较高，大多数市场，特别是在发展中国家，都缺乏合适的融资资源，主要原因是存在市场阻碍。有效的政策和监管体系可以减小这些阻碍，降低可持续制冷相关融资的风险，进而创造一个有利于融资和促成机制的环境。有了合适的融资资源，就可以满足可持续建筑制冷解决方案的市场需求，进而推动可持续建筑制冷解决方案的创新和应用。
- 提高消费者和利益相关方对可持续建筑制冷的认识，加强机构的专业能力，促进技术进步。在本报告中，这些促成因素被统称为“补充性措施”，这些措施与政策措施、融资资源和促成机制同时应用时，可以最大限度地影响和潜在效益。

针对以上每一项总体策略，本文都提供了相应的具体建议措施，旨在帮助各国制定可持续制冷转型的策略、计划和路线图。由于各国的条件和需求不同，这里不存在某一种特定的“正确”解决方案。例如，许多发展中国家可能面临来自体制能力、监管框架和支助性金融机制的更大阻碍，如果不首先解决这些问题，本文提出的干预措施可能无法立即适用。因此，每个国家都需要根据其发展需求和制约因素来制定自己的解决方案。

表1分三大总体类别列举了各种推进可持续建筑制冷的有效手段。不同国家可以根据自身情况对不同措施进行排序或组

合，以更好地满足需要。在探索可持续建筑制冷发展路径的同时，各国还应该对正在实施的措施进行定期评估以确保其有效性，并不断探索需要改进的领域，加速建筑制冷的可持续转型。

通常情况下，这些市场阻碍不会单独存在，而是共同发挥作用并产生相互关联的影响。因此，有效应对建筑制冷挑战需要多管齐下的努力，并根据特定国家的具体市场情况采取综合性的措施，包括全面的信息、明确的领导、政策和监管措施、融资和促成机制、培训和研发（R&D）。其中的关键在于现在就采取行动，开展可持续建筑制冷实践，并锁定低能耗和低气候影响的途径，使所有人都能够享受建筑制冷的好处。



表1 有效克服市场阻碍和推广可持续建筑制冷的手段

<p>政策干预措施</p>	<p>P1.评估国家建筑制冷领域概况，确定可持续建筑制冷的可行性，并评估将其提升为政府优先事项的需求</p> <p>P2.利用能效标识来有效引导消费者购买可持续商品</p> <p>P3.为制冷设备制定最低能效性能标准并建立逐步提升标准的相关机制</p> <p>P4.为高效建筑和可持续制冷设备提供资金支持并制定采购策略，以身作则促进市场的发展</p> <p>P5.建立一套全国性的制冷行动计划或路线图，确立有意义的目标和预期影响</p> <p>P6.提高建筑能效指标的普及度，培育高效建筑的市场需求</p> <p>P7.规范健全国家层面的建筑能源法规，加速被动式制冷的应用</p>
<p>财政干预措施</p>	<p>F1.建立激励机制，推动市场向可持续的建筑制冷转变</p> <p>F2.聚集需求，降低可持续制冷设备的采购成本，打造市场信心，刺激更大范围的应用</p> <p>F3.通过债务补贴和风险缓解手段，降低可持续建筑制冷的前期投资成本</p> <p>F4.在区域及更大范围的建筑制冷领域应用“制冷即服务”的概念</p> <p>F5.通过提高能源服务公司的能力，促进对可持续建筑制冷领域的投资</p> <p>F6.通过制定能源服务协议和管理能源服务协议，扩大可持续建筑制冷的融资渠道</p> <p>F7.利用资产评估性清洁能源或环境升级融资方式来降低高效建筑的前期成本</p> <p>F8.通过电力公司牵头的需求侧管理措施，管理峰值制冷负荷和制冷能源需求</p>
<p>补充性措施</p>	<p>S1.提高对可持续建筑制冷实践的重要性和效益的认识，鼓励个人行动和行为改变</p> <p>S2.加强对关键机构、贸易专业人士、建筑以及供暖、通风及空调服务部门的能力建设</p> <p>S3.利用《基加利修正案》要求的制冷剂技术转型提高制冷设备能效，并实现效益最大化</p> <p>S4.利用研发和创新生态系统推动技术的进步</p> <p>S5.多种方式配合以满足电网设施缺乏地区的制冷需求</p>



该执行摘要为Primer For Space Cooling Report的中文翻译版本，中文版未经Energy Sector Management Assistance Program(ESMAP)审核。前往以下链接，下载英文报告：<https://www.esmap.org/primer-for-space-cooling-report>

Iain Campbell, Sneha Sachar, Elizabeth O' Grady, Ankit Kalanki, Rushad Nanavatty, and Radhika Lalit, 迈向零碳, 建筑制冷的可持续转型, RMI, 2021.



除特别标注, 图片均来自istock.



北京市朝阳区景华南街5号
远洋光华国际C座16层 06、07、08A单元

www.rmi.org

© June 2021 RMI. 版权所有。
Rocky Mountain Institute 和 RMI
均为注册商标。