



建筑隐含碳减排

低成本、高回报的减排机遇

报告 / 2022



作者&鸣谢

作者

Rebecca Esau

Matt Jungclaus

Victor Olgyay

Audrey Rempher

作者按字母顺序排列。若无特别说明，所有作者来自落基山研究所。

编辑

落基山研究所: 郝一涵, 王萌, 李丹, 王广煦

中建科技集团有限公司: 罗昊

北京市建筑设计研究院有限公司: 国萃

版权与引用

Matt Jungclaus、Rebecca Esau、Victor Olgyay和Audrey Rempher, 《建筑隐含碳减排: 低成本、高回报的减排机遇》, 落基山研究所, 2021年

<http://www.rmi.org/insight/reducing-embodied-carbon-in-buildings>.

落基山研究所重视合作, 致力于通过分享知识和洞见加速能源转型。因此, 我们允许有兴趣的各方通过知识共享许可协议 (CC BY-SA) 4.0版来引用、分享我们的报告。

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

除特别说明外, 所有图片来自iStock.com

鸣谢

感谢Skanska提供的基于匿名项目数据的材料和成本信息, 及其对报告中包含的三个案例进行的建筑隐含碳排放量计算分析。 特别感谢Skanska团队的以下成员与我们分享的关键洞见及对本报告的审阅:

Mark Chen
Steve Clem
Elaine Lai
Tolga Tutar

感谢下列个人对本报告的贡献和审阅:

Monika Henn, Urban Land Institute
Dirk Kestner, Walter P. Moore
Meghan Lewis, Carbon Leadership Forum
Marta Schantz, Urban Land Institute

感谢以下在本报告研究阶段参与访谈的个人和组织:

Arup
Bruce King, PE - Ecological Building Network
Thornton Tomasetti
Kieran Timberlake
Erin McDade, Architecture 2030

感谢Breakthrough Energy, LLC对本报告制作的支持。



关于落基山研究所

落基山研究所是一家于1982年创立的专业、独立的非盈利机构。我们致力于通过提供市场化解决方案推动全球能源系统转型, 以实现1.5°C温升的气候目标, 创造清洁、繁荣的零碳共享未来。我们在全全球开展工作, 与企业、政策制定者、社区和非政府机构合作, 识别并规模化推广能源系统转型解决方案, 旨在大幅降低温室气体排放。落基山研究所在中国北京、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。

目录

5	第一章——隐含碳:隐藏的重大气候挑战
6	执行摘要
7	什么是隐含碳? 隐含碳为什么重要?
7	碳的时间价值
7	减少隐含碳有助于提升价值
9	第二章——造成美国建筑中隐含碳的主要材料
10	行业概述
11	水泥与混凝土
12	钢铁
13	木材
13	保温材料
14	未来发展方向
15	第三章——有效减少隐含碳的解决方案与策略
16	低隐含碳解决方案的特征
17	在设计和建造过程中应用低隐含碳解决方案
19	目前可用的工具
20	第四章——低隐含碳建筑经济性的案例研究
21	概述
22	研究方法
23	本研究的局限性
24	案例研究1: 多层钢结构和混凝土建筑
25	案例研究2: 中层现场构件式建筑
26	案例研究3: 提拔建筑系统
27	在案例研究中发现了更多减少隐含碳的机遇
28	讨论
30	第五章——实现更深度减排的机遇
31	地域差异
33	区域数据差异
34	可带来更大变化的先进材料
38	规范与政策
39	第六章:总结
41	附件:附加案例研究
43	尾注

第一章：

执行摘要



执行摘要

隐含碳：隐藏的气候挑战

每年，建筑碳排放占全球能源相关碳排放总量的39%¹。其中至少1/4的碳排放来源于建筑隐含碳，即与建筑材料和建设过程相关的碳排放。然而，针对建筑中隐含碳的解决方案在美国尚未得到广泛研究，这给工程师、建筑师、承包商、政策制定者和业主们留下了巨大的知识空缺。

其实，只需要极少或甚至不需要额外的前期成本就能够大幅地减少隐含碳。本报告引用的案例分析显示，在成本溢价不到1%的情况下，隐含碳的减排潜力可达到19%-46%。当前，我们可以通过设计和选型过程中使用隐含碳水平更低的替代材料来实现减排。建筑的一体化设计，将是实现更大幅度碳减排的有效途径。

本报告通过研究三种建筑类型，详细解读了在项目设计和施工阶段减少隐含碳的策略，特别是以低成本和零成本为前提的建筑隐含碳减排解决方案。此外，本报告还量化了与低隐含碳解决方案相关的建造成本差异，并指出了未来更大程度碳减排的可行性及发展方向。

主要观点

- 在我们的案例中，仅需不到1%的成本溢价，就可以将前期隐含碳减少最高达46%。
- 优化预拌混凝土工艺、选择低隐含碳的饰面材料、采用低隐含碳或固碳的保温方式，是零成本减少隐含碳最有效的措施。
- 采用材料用量最少的设计方案可以减少隐含碳、降低前期成本，并保持建筑的整体性与建筑美学。
- 采购回收利用率较高的钢筋和结构钢材、选择低隐含碳的玻璃产品，以及减少结构系统的材料用量，是最具影响力的低成本减少隐含碳的措施。
- 目前的一些新兴材料有望进一步显著减少隐含碳。

图1： 隐含碳减排的主要类别



什么是隐含碳? 隐含碳为什么重要?

隐含碳指的是在建筑的全生命周期内, 由于提取、制造和安装材料和产品而产生的温室气体排放², 包括在材料的使用阶段和使用寿命结束后的处理过程(例如: 重复使用、回收利用、填埋等)中产生的温室气体排放。

在对隐含碳的研究中, 了解研究对象正处于生命周期的哪个阶段是至关重要的。最常见的描述包括“从摇篮到大门”(涵盖材料提取、运输和制造)和“从摇篮到坟墓”(还包括对使用阶段和生命周期结束阶段的考虑)。以一种全面且具有连贯性的研究方法研究材料在其废弃或再利用过程的环境影响时, 对生命周期结束阶段的考虑很重要。然而, 由于数据的缺乏、最终处理的不确定性(产品是否会被填埋、回收或再利用?)或其他未知因素, 对生命周期结束阶段的考虑常常被忽视。

本报告仅考虑从“摇篮到大门”生命周期阶段(对应于全生命周期分析中常用的A1-A3生命周期阶段³, 包括原材料供应、运输到制造场所并制造的过程), 即前期隐含碳。也就是说, 前期隐含碳包括与材料的提取、运输(从提取场所到制造场所)和制造相关的排放, 不包括运输到施工现场、施工过程、使用阶段以及生命周期结束阶段相关的排放。本报告的核心结论和案例分析没有涉及对生命周期结束阶段的隐含碳的考虑, 尽管本报告高度重视其影响。

隐含碳占全球碳排放总量的11%以上⁴(有些研究高达23%⁵), 这对应气候变化工作至关重要。但隐含碳的受关注程度远不及运行排放(即与能源消耗相关的排放)。随着全球建筑业的持续增长, 以及现有建筑运行能效的提高, 隐含碳的重要性将愈发凸显——预计从现在到2050年, 隐含碳占全球建筑部门总排放的比例将达到大约50%。要将全球升温幅度控制在1.5摄氏度以下, 日益严重的隐含碳问题将在我们剩余的碳预算中占据相当大的比例, 政策制定者和从业者现在需要解决这个问题, 从而发挥更大的影响。⁶

碳的时间价值

要减少建筑在建造和运行过程中产生的碳排放, 最值得把握的机会在建筑生命周期的初期阶段。隐含碳对应对全球气候变化至关重要, 因为这些排放中的大部分通常都发生在建筑生命周期的初期。“建筑2030”报告称: “运行碳排放可以通过建筑节能改造和使用可再生能源来逐渐减少, 而隐含碳则不同, 建筑物一旦建成, 它就会被锁定。如果我们希望在2050年前逐步消除化石燃料的排放, 那么我们现在就需要开始着手解决隐含碳的问题。”全球建筑业正在蓬勃发展, 这样的情况预计还将持续数十年⁷。因此, 尽快减少隐含碳排放是一个关键任务, 因为今天建造过程产生的排放将在大气中留存数百年。减少和避免建筑隐含碳和运行排放是我们减少大气中二氧化碳总量的最佳策略。

减少隐含碳有助于提高价值

除碳减排以外, 减少隐含碳还可以提供更多价值。

减少隐含碳通常能够降低项目成本。减少项目中所需要的材料用量是建筑师为减少隐含碳所能做的第一步。采购更少的材料将使业主和开发商花费更少的钱。此外, 减少混凝土混合物中水泥含量的碳减排策略也可以降低成本, 因为水泥是混凝土成本和含碳量的主要来源。使用重型木作为结构组件也可以降低项目成本, 因为使用更多的模块化组件和更简单的连接方法可以加快施工速度。

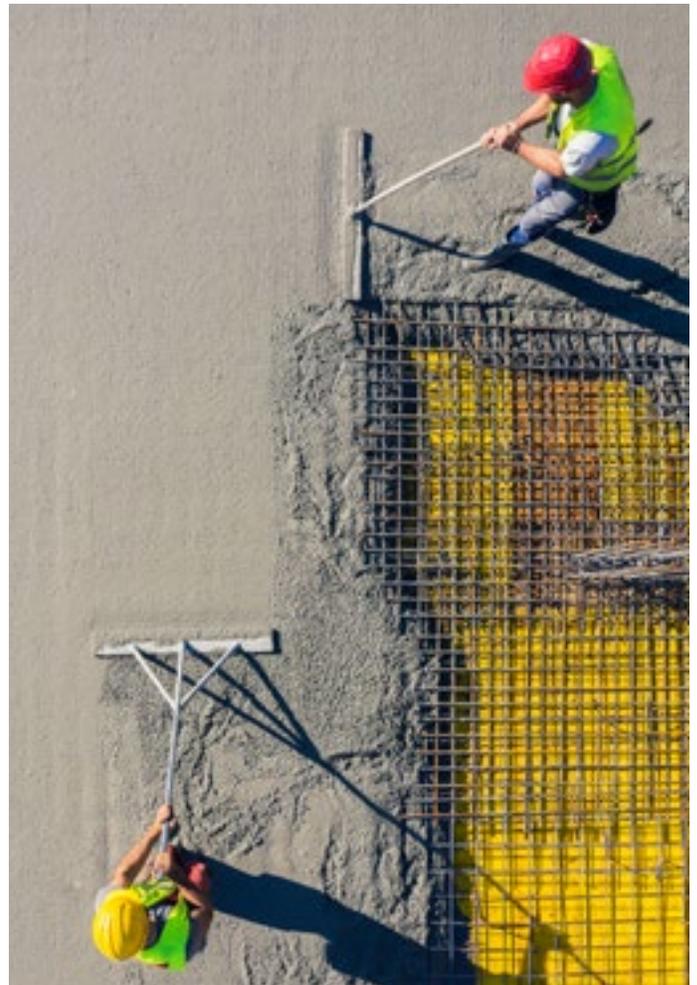
低隐含碳产品通常还能减少提取、制造和运输方面的能源消耗。如果低隐含碳产品的提取、制造流程不是碳密集型的, 那么在该过程中自然就能够实现节能。这些节约通常会帮助材料制造商节约运营成本, 最终消费者也有可能因此受益。

低隐含碳, 且以全生命周期视角评估建筑碳排有助于满足绿色建筑认证的要求。将隐含碳纳入认证的包括英国建筑研究院绿色建筑评估体系(BREEAM)、世界银行的绿色建筑认证体系(EDGE)、美国绿色建筑委员会的LEED v4以及国际未来生活研究院(ILFI)的零碳认证和居住建筑挑战认证⁸。

低隐含碳的建筑设计将更好地为未来鼓励或要求低隐含碳的法规或政策变化做好准备。在短期内，这些变化可能采用的形式包括碳税、建筑规范、采购政策（如“购买清洁能源”政策）、发展激励手段或其他监管机制等。尽管各地方不太可能实施要求低隐含碳建筑设计的追溯性政策，但按照低隐含碳标准建造建筑将帮助开发商、设计师和建筑行业为这些未来可能出现的情景做好准备。

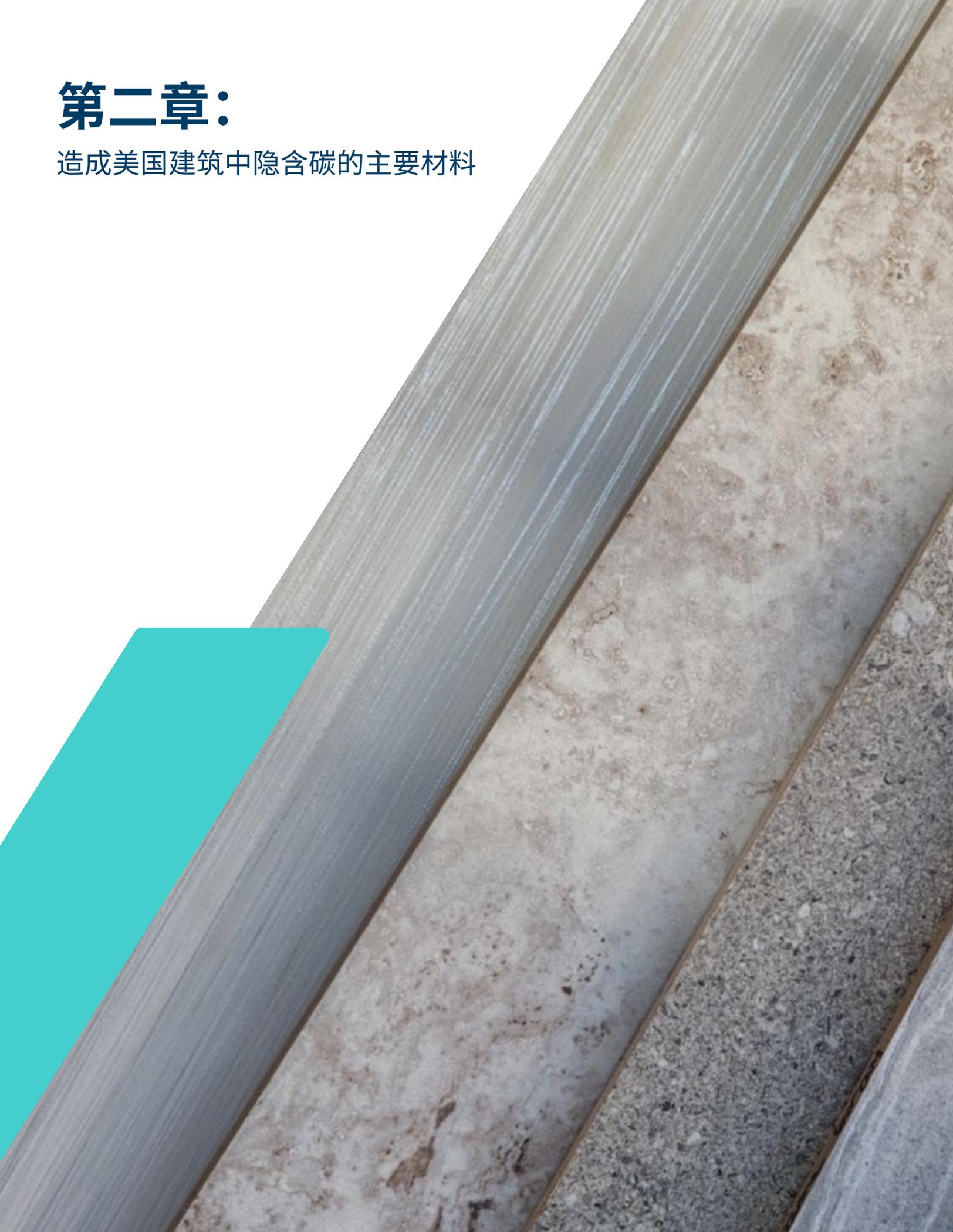
最后，减少低隐含碳材料在提取、制造和运输过程中的碳排放可以改善工业中心附近城区的空气质量与公共健康水平。这些健康和环境效益对于黑人、拉丁裔和土著人聚居区，及低收入人群尤其重要，因为这些人受到工业排放的直接影响最为显著（表现为有较高的哮喘和其他疾病发病率）⁹。

本报告将为减少建筑中的隐含碳列出一个框架，并强调建筑业能够采取具备经济可行性的方法来减少当今美国一些最普遍的建筑类型中的隐含碳。



第二章：

造成美国建筑中隐含碳的主要材料



造成美国建筑中隐含碳的主要材料

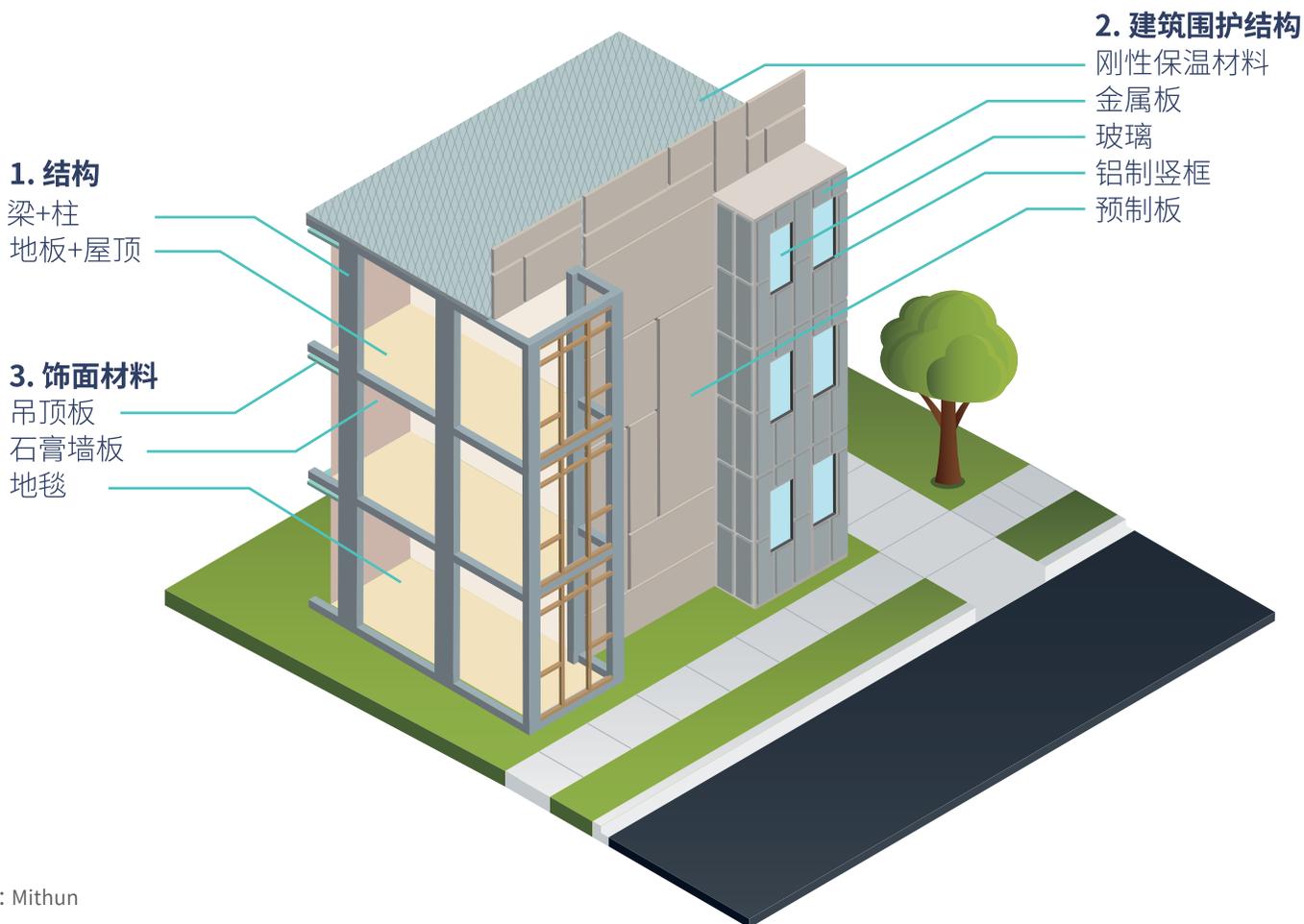
行业概述

为了解决建筑内的隐含碳问题，鼓励全行业开始重视并解决这一问题，我们首先需要了解行业内造成隐含碳排放的碳影响因素。建筑全生命周期评估向我们表明，建筑物的结构通常是其前期隐含碳的最主要来源，根据建筑类型的不同高达 80%¹⁰。然而，由于与租赁和周转相关的建筑物内部改造相对频繁，建筑内部改造造成的隐含碳总量有可能超过前

期隐含碳总量。在本报告中，我们主要关注于金属（包括钢与铝）、水泥、保温材料和木材等。其中每种材料的隐含碳含量各不相同，但对我们在此背景下的研究都至关重要。

通过分别研究以下各种材料：混凝土、钢铁、木材和保温材料，以更好地了解建筑中的隐含碳。

图2: 典型的高隐含碳结构、建筑围护结构材料和饰面材料



来源: Mithun

水泥与混凝土

混凝土是建筑行业应用最广泛的结构材料之一，也是建筑中隐含碳的主要来源。事实上，全球混凝土的使用量超过了除水以外的任何其他材料¹¹。混凝土的每一种组成材料都提供了减少隐含碳的机会，但混凝土中的高隐含碳主要来自一种关键成分的制造——普通波特兰水泥（硅酸盐水泥）。硅酸盐水泥是美国混凝土混合物中最常见的胶凝粘合剂，而美国水泥工业是美国排放的最主要来源之一，每年会排放6830万吨二氧化碳当量¹²。

外行可能会认为“水泥”和“混凝土”是一回事，它们实际上是不同的材料，而了解它们的不同是探讨其隐含碳问题的关键。要建造一座建筑，专业人员购买的是混凝土（含有水泥），而不是水泥本身。水泥与水混合作为粘合剂使用，将砂石颗粒（骨料）粘在一起形成混凝土。水泥的制造一般较为集中，而将水泥、水和骨料拌合成混凝土的工作却高度本地化，这是为了尽量降低运输重骨料的成本。

在水泥生产过程中，近60%的二氧化碳排放来自生产水泥中间成分——熟料时发生的化学反应¹³。由于这些排放是化学反应的结果，它们不能通过提高能源效率或更换燃料来减少或消除。因此，减少水泥隐含碳的一种方法是用粉煤灰和矿渣等辅助胶凝材料（SCM）替代一部分水泥，或使用无熟料水泥替代硅酸盐水泥。

然而，由于辅助胶凝材料能够降低混凝土中的隐含碳，因此其需求量很大¹⁴，而可用的辅助胶凝材料正在减少。例如，因为以煤炭作为燃料的发电厂越来越少，煤炭发电的副产品粉煤灰的供应量正在下降。优质骨料具有更好的附着力和其他性能，因此可以减少生产混凝土所需的水泥用量。在某些情况下，甚至可以选择进口骨料，因为通过骨料的更好特性来实现的减排足以弥补因骨料运输增加的碳排放¹⁵。

水泥生产过程中，剩余40%的二氧化碳排放来自于熟料生产过程中加热窑炉所燃烧的化石燃料。水泥生产电气化，以及使用生物质等其它可再生能源作为替代燃料，可能有助于减少这一阶段的碳排放，但这些手段目前还处于开发和应用的早期阶段。研究人员正在探索碳捕获技术，将捕集和储存水泥窑排放的碳作为一种潜在的解决方案，但这些技术尚未投入市场。由于与水泥相关的碳排放量非常大（每生产1公斤水泥几乎要排放1公斤二氧化碳），许多研究人员正在研究新兴技术来解决这一问题¹⁶。如今的技术可以帮助制造商以具有竞争力的价格生产出排放已大幅减少的水泥产品，新兴技术还可能生产出零隐含碳水泥，甚至是净负碳产品¹⁷。

据估计，建筑建造业对混凝土的需求占美国硅酸盐水泥生产总量的51%¹⁸。鉴于其在建筑施工中的普遍应用，我们必须解决这种材料的高碳强度问题。落基山研究所即将发布的一份指南概述了混凝土预拌料供应商、开发商和承包商如何利用成熟的且具备经济可行性的解决方案来降低混凝土中的隐含碳。

钢铁

美国钢铁业每年排放1.046亿吨二氧化碳，占美国总排放量的2%¹⁹。自1990年以来，钢铁业的排放量已下降约60%，这主要是由于技术的改进和废钢回收率的提升²⁰。即便如此，钢铁仍然是建筑环境中隐含碳排放的重要来源。从理论上讲，材料替代或生产过程中非化石能源的应用，都可以将这些隐含碳排放减少到零。

美国钢铁行业以综合钢厂为主，主要采用氧气高炉炼钢。近几十年来，转向使用更高效的电弧炉（EAF），将废钢作为主要原料。在2016年美国生产的所有钢铁中，70%是使用高效电弧炉制造的²¹，这一转变确实减少了钢铁的碳足迹。然而，钢铁生产仍然是一个能源高度密集的过程，用于建筑部门的钢铁每年要排放4600万吨的二氧化碳²²，因为电弧炉的碳排放直接取决于其电能来源是否清洁。

如今，减少结构钢隐含碳最直接的方法是选择使用清洁能源或非化石能源生产的钢铁，例如使用水电、可再生氢、光伏或风电²³生产的钢铁。尽管零碳钢目前尚未达到能够投入市场的成熟度，但选择高效钢厂生产的钢将确保生产过程中使用更少的能源。如果与更清洁的电力结合起来，这一步骤就可以发挥明显的作用²⁴。

美国建筑主要采用钢结构体系。2017年，钢结构建筑在所有新建建筑中占有46%的市场份额。混凝土和木材的市场份额分别为34%和10%²⁵。通常被嵌入结构混凝土的钢筋或“螺纹钢”也是钢的主要用途。



木材

木材在建筑建造领域已经使用了数千年，至今仍是应用最广泛的建筑材料之一。2017年，美国仍然有62%的木材制品应用于建筑行业。虽然过去木材通常用于建造独栋住宅和低层建筑，但随着木材产品成为更多碳密集型混凝土和钢铁的有效替代品，木材正在被世界各地越来越多的用于建造高层建筑。

随着创新的设计策略和正交胶合木 (CLT) 等工程木材产品的引入，木材正稳步成为低层和多层建筑更可行的结构材料。随着钢铁和混凝土成本的上升，木材产品的成本效益使其吸引了更广泛的兴趣，而且木材产品在设计灵活性、施工速度和减少环境影响方面还具有附加优势。虽然正交胶合木尚未在美国广泛使用，但木结构与混凝土的复合结构体系（即建筑首层或底座几层才用混凝土结构，之上修建木制结构）正越来越受欢迎。

木材甚至可以被认为是一种净碳封存材料，因为树木生长过程中吸收的碳会超过砍伐和制造过程中排放的碳。然而，这一计算方法取决于树木种植和砍伐的方法，以及对材料寿命结束后处理方式。将木材视为碳封存材料是业内专家争论的焦点，争论主要围绕不同的林业和采伐做法及其对排放的影响而展开。然而，在作为结构材料使用时，木材通常被视为钢铁和混凝土的一种低碳替代品。

为了充分了解木制材料的影响，环境评估必须首先考虑到森林管理和采伐做法的差异，因为这些做法上的差异会造成

碳固存量的巨大差异。例如，全球森林管理委员会 (FSC) 对以可持续方式生产的木材产品进行认证，选择FSC认证的产品是朝着使用低碳木材产品方向迈出的积极一步²⁶。然而，FSC所认证的产品并不是可持续采伐木材的唯一来源。没有以可持续的方式采伐木材，所造成的生态破坏、土壤退化的加剧以及使用石油基肥料都会大幅增加木材产品的隐含碳含量。

随着对木材产品需求量的增长，确保以可持续的林业管理方式来满足这一需求是至关重要的。否则，更广泛地使用木材作为建筑产品可能会增加碳排放，并破坏生态多样性²⁷。

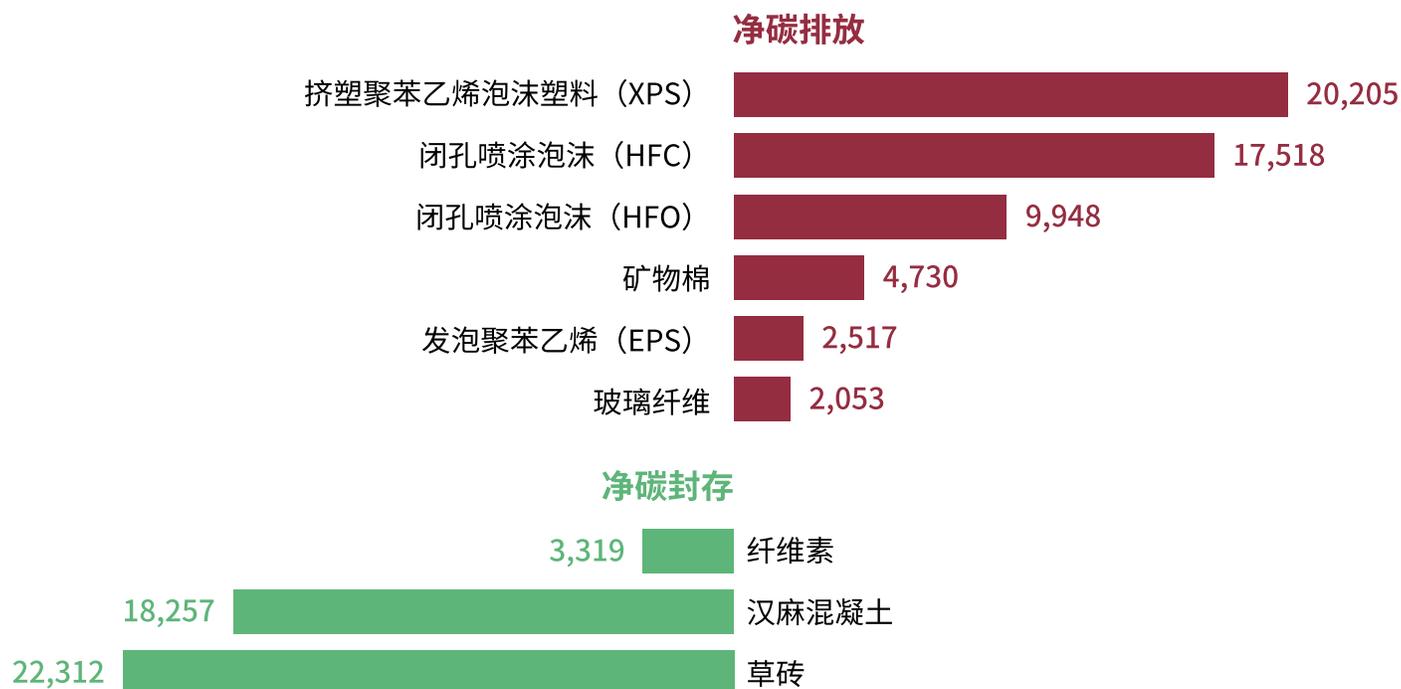
保温材料

保温产品对于建造可高效运行的建筑至关重要。虽然它们可能在整个建筑成本中占比相对较小，但它们可能是造成建筑隐含碳含量高的重要原因。这类材料产品的隐含碳影响跨度范围极大，有基于石油化工的碳密集型产品，也有负碳产品。例如，硬质或喷涂泡沫产品的碳排放最大，而生物基材料ⁱ（如天然纤维隔热层）的隐含碳量很小，甚至被认为是净碳封存产品ⁱⁱ。产品的保温性能以热阻或导热系数来表示，不同材料类型的热阻不同，数值越高表示保温性能越好。与碳密集型材料相比，生物基材料的热阻往往低，需要使用更厚的材料才能达到同等的保温效果。图3展示了与各种保温材料相关的前期隐含碳排放。

i 完全或部分源自生物质（植物）的材料或产品，如纤维素和天然棉纤维绝缘层。

ii 净碳封存产品指的是，其生命周期中碳封存量大于碳排放量产生净碳封存效果的产品。例如生物基材料即为一种典型的净碳封存材料。

图3: 保温材料的隐含碳含量 (千克二氧化碳当量)



注: 排放的二氧化碳当量基于R值为20的材料在234平方米情况下的计算量。

Source: Chris Magwood, Opportunities for CO2 Capture and Storage in Building Materials, 10.13140/RG.2.2.32171.39208, 2019.

未来发展方向

尽管目前已经有了一些具体的隐含碳减排策略, 但要实现这些减排仍要面对很多重大障碍。高成本的负担, 行业对变革的抵制, 都阻碍了此类工作的推进。错误的信息和可用产品的稀缺, 造成了一些误解, 认为低隐含碳产品的使用或采购更为复杂, 或它们的强度或质量较差。此外, 大多数行业决策者和开发商仍然对隐含碳方面的信息不够了解, 因此不知道如何在一开始就要求使用低碳产品, 或者他们可能不了解有什么工具可以帮助他们识别并跟踪项目的排放。但其实结构工程师、建筑师和其他技术人员可以通过使用现有的工具

和资源, 以极低的成本大幅降低新建筑项目中的隐含碳排放 (详见第三章)。

除了本报告所述之外, 还有许多材料和建筑设计方法可以大幅减少建筑中的碳排放。以下章节提供的解决方案和案例研究可以帮助开发商、设计师和建筑从业者在当今最佳实践的基础上实现建筑低隐含碳排放。

第三章：

有效减少隐含碳的解决方案与策略



有效减少隐含碳的解决方案与策略

对减少建筑物内隐含碳的解决方案和策略建立共识，是深挖低隐含碳建筑的经济价值和技术潜力的第一步。

低隐含碳解决方案的特征

如今，有许多解决方案可以用来限制新建筑的隐含碳排放。低隐含碳解决方案包括许多各种复杂的特点。

最简单地讲，建筑的低隐含碳解决方案可以分为三个大类：整体建筑设计、材料替代和低隐含碳材料选型。总的来说，整体建筑设计方案可以带来最多的隐含碳减排。不过，材料替代和材料选型也可以实现显著的隐含碳减排，特别是当这些解决方案的目标是碳密集型材料，如混凝土和钢铁。此外，这些类别并不是相互排斥的——它们可以共同作用，从而推动更深层次的隐含碳减排。

每种策略对应的例子仅仅触及了可能的低隐含碳解决方案的表面。

随着低隐含碳建筑在全球各地普及度的提高，新的设计策略可能会证明其更具影响力。材料的生产过程可能会更加高效，建筑风格可能会发生改变——所有这些改变都会围绕低隐含碳这一主题展开。

整体建筑设计

在建筑设计的最初阶段，要求项目在满足功能性要求的同时减少隐含碳。

这些策略包括对既有建筑的适应性再利用，减少项目的总占地面积，使用更高效的结构体系，使用预制系统或组件，以及在设计上尽量减少浪费。

举例

尽量减少建筑中使用的材料总量，特别是混凝土、钢铁和石化基保温材料等高隐含碳材料，可以显著减少项目的整体隐含碳。

影响

为提高结构效率和节省材料而做的设计可以产生附加效果，即更轻质的结构可减少材料用量和对地基的要求。这可以直接节省材料成本。

关键考虑因素

以单位面积二氧化碳当量千克数为单位来追踪隐含碳，是量化建材隐含碳排放的关键指标。结构工程师通常会自动地根据经济性来进行高效的设计，但由于他们在一个与建筑师共享的框架方案内工作，所以工程师和建筑师需要一种合作的方式来实现更深层次的隐含碳减排。

材料替代

直接将一种材料替换为另一种材料，既能满足原始设计的功能性要求，又能降低其全球变暖潜能值 (GWP)。

举例

选择纤维素化合物作为保温材料来代替石油基保温材料（如挤塑聚苯乙烯泡沫塑料），既可以满足同样的功能需求（保温），还能大幅减少整个项目的隐含碳。

影响

在某些情况下，保温产品可能导致近零或净负（封存）碳排放。

关键考虑因素

选择材料时，重要的是要考虑它们的功能性表现。对保温产品而言，包括它们的隔热性能、物态因子（如吹塑制品、硬板、棉絮）和其他性能质量（例如气密性、防火和驱虫等作用）。

低隐含碳材料的选型

为一种材料特性设定一个值或一个限制，以显著降低隐含碳含量。

举例

设计师可以对给定的混凝土混合料，提出明确的GWP下降比例。为了满足这一需求，制造商可以在满足必要的强度要求的同时，改变混凝土混合比例设计，以减少产品的隐含碳。这些改变可能包括降低硅酸盐水泥的比例，加入辅助胶凝材料（SCM），或使用会降低隐含碳总量的骨料。

影响

水泥往往是构成特定混凝土混合料隐含碳的主要来源，降低其含量将会减少项目的碳排放。

关键考虑因素

降低硅酸盐水泥的含量可能会导致工艺上的显著变化，例如使特定水泥混合料的固化时间增长。要注意的是，对于特定的材料选择，设计团队可以使用开源工具，如建筑隐含碳排放量计算器或其他数据库（有关这些资源的更多信息，请参阅本报告第19页）来确定可使其项目碳排放更低但成本可控的选择。有些供应商可能没有环保产品声明（EPD）所认证的隐含碳数据，以证明其隐含碳含量低于标准产品。不过随着低隐含碳材料需求的增长，这些数据的限制问题有望得到改善。

在设计和建造过程中应用低隐含碳解决方案

在建筑建造或改造过程中，降低成本和碳排放的最有效途径是在设计过程的早期设定隐含碳目标并进行分析。在初期阶段对隐含碳的优先考虑将使设计团队能够基于建筑整体设计的解决方案，以实现显著的隐含碳减排。在项目早期确定设计解决方案十分重要，因为随着项目的各项工作逐步确定，对其进行基础性更改的难度将越来越大，成本也会越来越高。

材料替换和选型等其他干预措施自然而然地会出现在设计过程的后期，即项目更明确的时候。仅替代和指定低隐含碳材料就可以对新建或改造项目的隐含碳产生重大影响。

减少隐含碳的策略存在于设计过程的每个阶段，从预设计、选址到入住（图4）。执行这些策略是众多利益相关方的责任，需要超越标准做法的协同合作。为了培养执行这些策略所需的紧密合作关系，很关键的一点在于项目所有者应将建筑师、工程师、能源或可持续发展顾问、承包商（如果可能的话）及其他主要利益相关方在项目开始时召集在一起，确定各自的角色与责任，并在整个设计和建造过程中定期进行检查。

图4: 在设计和开发过程中减少隐含碳的策略

主要角色

-  建筑师
  承包商
  制造商
  项目业主
  结构工程师
  岩土工程师
  景观设计师

整体建筑设计

材料替代

材料选型 & 采购

- 1**
预设计和选址

 -   在决定设计新建筑之前，考虑重复利用现有建筑。
 -    评估土壤类型并确定建筑地基方案。有些类型的地基会比其他类型使用更多的材料。
 -  考虑从将要拆除的建筑中回收或再利用材料。
 -   根据类似建筑的生命周期评估的计算或案例分析，为项目设定隐含碳目标。

- 2**
概念及方案设计

 -   确保结构系统紧凑，高效，不过度建设。
 -  设计灵活高效的空间，为远期的使用变化留有余地。
 -  在设计中考虑将来的拆卸和回收利用。
 -    考虑与建筑设计决策（如体量、围护结构系统、地基和景观）相关的隐含碳权衡问题。
 -  进行初步整体建筑生命周期评估（建筑全生命周期评估）评估，或对具有较高碳强度的“热点”材料或组件进行生命周期评估。
 -  选择尽可能减少隐含碳的建筑系统和组件。
 -  评估本地重复使用与本地采购材料的可行性。

- 3**
设计开发与施工文件

 -  指定材料特性，以减少隐含碳。
 -  用具备较低全球变暖潜能值的材料替代同类材料。
 -   考虑与建筑学及结构改进与变更相关的隐含碳权衡问题。
 -  根据需要更新建筑全生命周期评估。

- 4**
招标与采购

 -  在所有采购相关文件中纳入明确的隐含碳目标，并设定建筑系统或具体材料目标。
 -  在规范中纳入对产品替换的要求。
 -    要求所有供应商提供隐含碳数据，包括环保产品声明。
 -    在任何采购选择标准中纳入以前有关隐含碳问题的工、经验和提议解决方案的说明。
 -   设计一套能够鼓励投标方提供低隐含碳材料和方案的分包商选择流程。

- 5**
建设

 -   制定明确的指导方案与目标来减少建筑垃圾。
 -   要求承包商负责提供先前阶段所承诺的低隐含碳设计。
 -  考虑为在施工过程中确定并执行的额外的隐含碳减排提供财务绩效奖励。
 -  记录建筑的竣工后的隐含碳含量并公布数据。
 -  根据需要更新建筑全生命周期评估。

- 6**
使用：
维护，改造和
租户装修

 -    总结经验教训并应用到未来的项目中。
 -    为未来的改造和租户装修确立隐含碳减排目标。

来源: 部分改编自《隐含碳快速指南: 团队减少项目隐含碳的快速参考指南》，国际未来生活研究院，2020。

目前可用的工具

有多种开源工具可用于支持低隐含碳计算和建造策略评估。

以下工具可用于评估和减少项目的环境影响：

- 建筑雅典娜影响评估器 (Athena Impact Estimator for Buildings) 是一款免费的软件工具，用于对建筑物进行全面的生命周期评估。它利用一个嵌入式数据库，包含了各地区特定材料的生命周期数据。该工具允许用户进行对照比较，可以清楚的显示各种设计选择的影响的对比。
- 碳智能材料调色板 (Carbon Smart Materials Palette) 是一个“建筑2030”项目，提供“基于属性的设计和材料规范指导”，旨在为设计师和规范制定者提供关键材料的信息以及在设计和施工过程中如何减少隐含碳的可操作信息²⁸。
- 建筑隐含碳排放量计算器 (Embodied Carbon in Construction Calculator, EC3) 是一个开源数据库，包含了数千份数字化的、第三方验证的环保产品声明 (EPD)。该工具在提供信息透明度和比较相似材料类型中不同产品选择的碳影响方面作用最大。建筑隐含碳排放量计算器还允许用户对给定项目的不同建筑材料的前期 (A1-A3) 隐含碳影响进行比较，但它并非一种建筑全生命周期评估工具。
- 一键LCA (One Click LCA) 是一款订阅的软件产品，集成了建筑信息建模 (BIM) 和广泛的材料环保产品声明数据库，在项目的任何设计阶段生成生命周期评估。
- Tally是一款允许建筑师和工程师直接在Revit设计平台中对项目进行高度细节化的建筑全生命周期评估的应用程序。

再开发与再利用

在着手一个建筑项目时，首先要考虑的是我们是否需要新建一栋建筑²⁹。既有建筑改造的隐含碳影响比建造新建筑的影响低50%至75%³⁰。通过重新利用现有资产，可以避免与新建筑材料相关的成本和碳排放。即使地基和结构是仅有的保留元素，它们的重复使用也会对项目的隐含碳产生重大影响，因为这些元素通常占建筑碳足迹的很大一部分。

如果重建现有建筑不可行，应尽可能在设计中加入循环利用材料。同样重要的是，在设计时需要考虑到建筑寿命结束后的处理，确保系统可以被很容易地分解和再利用，或者确保建筑可以很容易地重新配置以满足其他用途。

在下一章中，我们将介绍一些应用了低隐含碳解决方案，并以低于1%的额外成本实现实质性的隐含碳减排的案例研究。

第四章：

低隐含碳建筑经济性的案例研究



低隐含碳建筑经济性的案例研究

概述

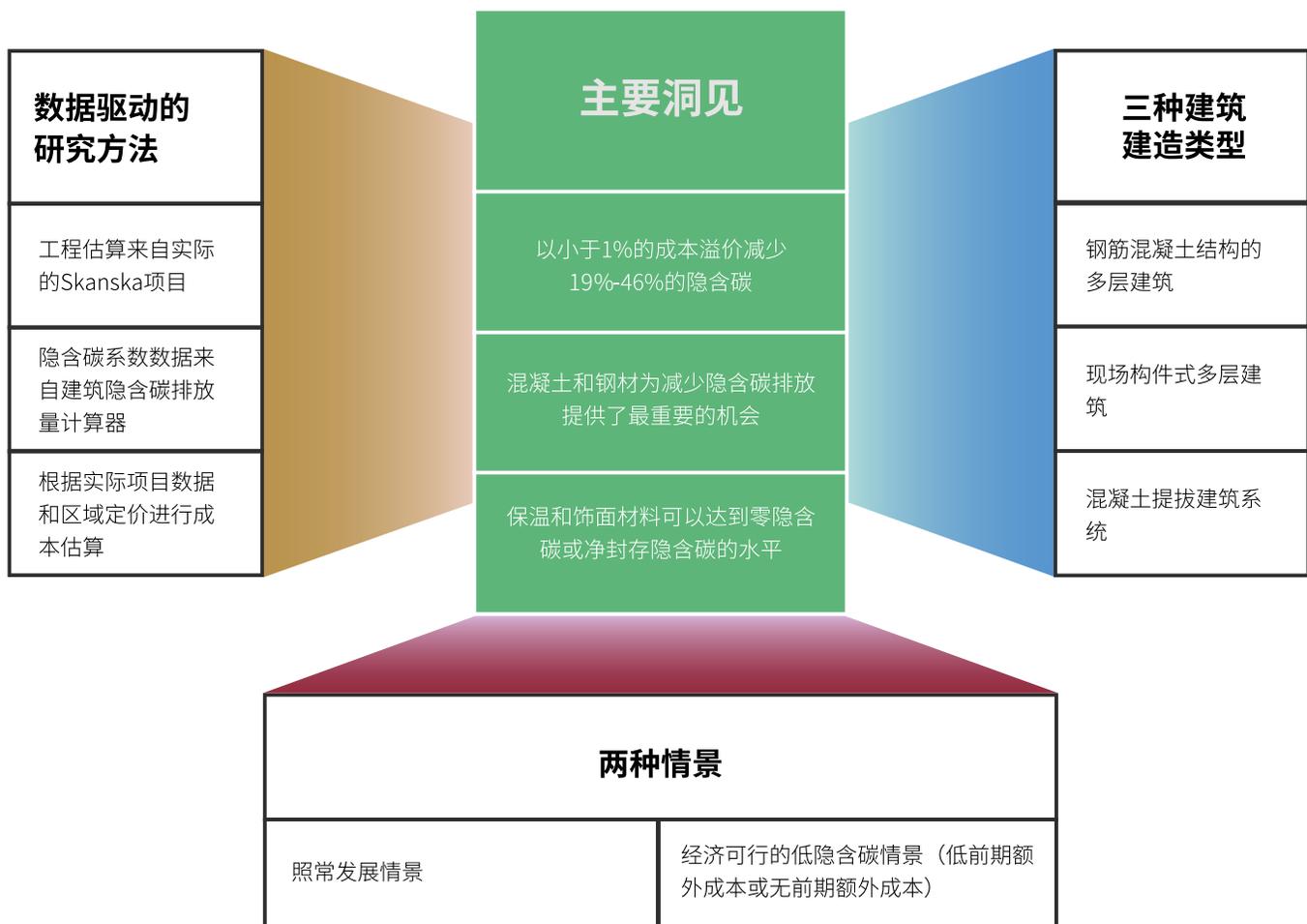
本报告的核心目标之一是回答这样一个问题: 在不增加额外成本的情况下, 我们能在多大程度上减少新建建筑中的隐含碳?

简而言之, 本研究表明, 通过采用低成本和零成本措施, 可将中高层商业建筑、办公建筑、多层住宅建筑和提拔式建

筑的隐含碳减少19%-46%。总的来说, 这些措施对项目总成本的增加量不到1%, 在大多数建设项目的预算误差范围内。

Skanska是世界领先的可持续建筑公司之一, 提供了太平洋西北地区三个实际项目的成本数据, 并在落基山研究所的指导下进行了分析, 得出了本研究的结果。

图5: 本报告案例研究模型的方法与假设



研究方法

按照现有面积统计美国现存的最常用的建筑建造类型，Skanska和落基山研究所选择了本研究涉及的三种建筑建造类型³¹。这包括钢筋混凝土结构的建筑（案例研究1），钢筋混凝土基础、上部木构架的建筑（案例研究2）和提拔建筑系统（案例研究3）。案例研究1和2代表了传统的中高层办公和多户住宅建筑，而案例研究3代表了一种通常用于大型零售、仓库和数据中心的建筑方法。

Skanska从其近期的工程项目实践中选择了三个具有代表性的项目。作为一家可提供全方位设计、成本咨询服务的建筑公司，Skanska能够为每一座建筑提供经济评估与算量。Skanska将这三个项目的工程估算信息与建筑隐含碳计算器（EC3）工具的环境绩效数据相结合，对每个现有建筑设计中与结构体系、保温材料、玻璃以及室内饰面材料相关的前期隐含碳进行了精细估算。我们利用原始成本和工程估算信息，结合来自建筑隐含碳排放量计算器的前期（A1-A3）隐含碳数据，建立了研究的基准情景。

随后，Skanska修改了每一个基准建筑，开发了“经济可行的隐含碳减排”情景。该情景的主要方法是在建材的可用环保产品声明（EPD）中，选择二氧化碳当量含量小的替代材料。环保产品声明本质上是独立验证的产品标签，可大致体现产品的隐含碳和其他环境影响。Skanska使用的方法专注于一对一材料替代和低隐含碳材料选型的策略，因为进行整体建筑设计的改变将很难在模型中反映。随后，Skanska通过进行成本分析以确认所选材料不会造成可归属成本增加，或计算所选材料的成本溢价。为这个“经济可行”的情景所选择的材料不会使项目总成本增加超过1%。保证这个经济可行情景，不会为整个项目带来1%以上的成本增量。

落基山研究所和Skanska还希望加入更多的隐含碳减排措施，以推动更深入的整体建筑隐含碳减排。这一类型中的多数措施都还在制定过程当中，或者在美国还未得到广泛使用；其他的措施则无法准确计算成本。因此，这些先进技术的解决方案没有被包括在研究的场景中，而是在第五章中进行定性讨论。



本研究的局限性

理想情况下，此项研究应收录美国各地数千个项目的数据。这样的样本将能够提供建筑公司的各种成本估算，对定价和可用性的区域差异性的理解，以及具有统计学意义的工程数量估算样本。

本研究中的数据基于落基山研究所和Skanska研究的情景。然而，这些结论不能推广到所有的建筑类型，或应用于每个建筑项目，因为它们不是从统计显著性样本中提取的，并且这些建造应用类型也不能完全代表它们各自的建造类型。

此外，这些案例研究只涉及前期隐含碳，即生命周期A1-A3阶段（提取、制造和这些过程之间的运输）的隐含碳。这些案例研究不考虑与建造、使用或产品寿命结束的相关排放（包括生命周期阶段A4-A5、B、C或D中的任何考虑因素）。

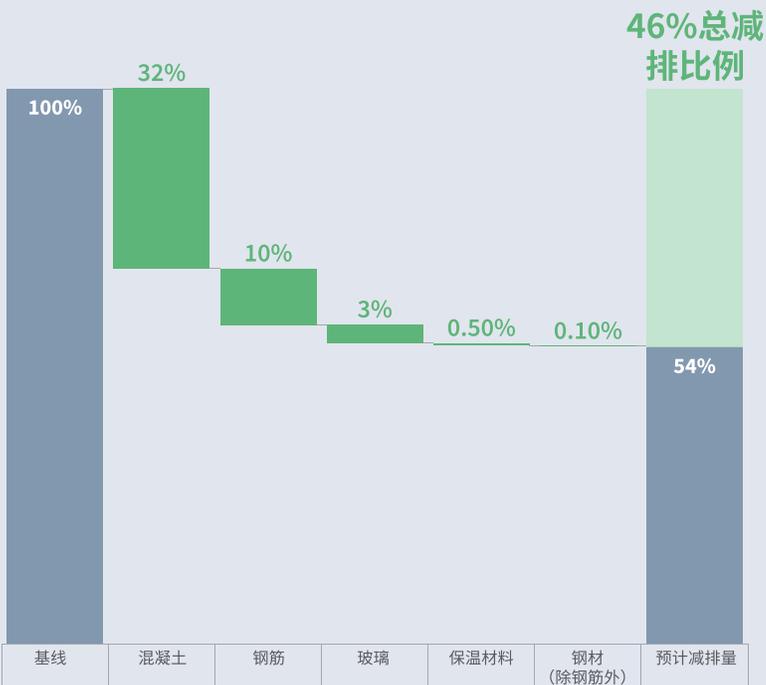
最后，本研究不包括任何整体建筑设计策略的改变。尽管这些策略（例如，彻底改变建筑设计的结构体系），通常以低成本实现显著的减排。在此限制下，我们的分析工作仅使用了建筑隐含碳排放量计算器。建筑隐含碳排放量计算器可以很容易地进行低隐含碳材料选型和一对一材料替代比较，但它无法对整体建筑设计进行改变。

下面的案例研究详细说明了我们对每种构造使用类型的关键发现结论。

案例研究1: 多层钢筋混凝土建筑

在一座5层、2万平方米建筑面积，钢筋混凝土建筑的混合用途办公大楼中，我们通过关注一系列的建筑构件，发现其前期隐含碳含量具有24%的减排潜力。这些隐含碳的减排成本溢价不到项目总成本的0.5%。

各材料类别的隐含碳减排



在基准情景基础上的前期隐含碳减排比例:

46%

低隐含碳措施的成本溢价

< 0.5%
总预算

二氧化碳当量减排量 (公吨):

2,228

项目包含的建筑构件

结构系统
玻璃
屋顶
内墙材料 (未完成)
保温材料

主要零成本措施 (不增加项目总成本的措施)

选择隐含碳含量更低的产品:

- 预拌混凝土: 优化预拌混凝土供应商选择条件, 采购水泥含量较低的混凝土, 并允许获取56天抗压强度
- 金属饰面板
- 屋面

一对一材料替代:

- 石膏衬板
- 保温材料: 采购聚异氰脲酸酯或矿棉等隐含碳含量较低的保温产品替代XPS等GWP值较高的材料

主要低成本措施 (因选择隐含碳含量更低的替代品造成少量成本溢价的措施)

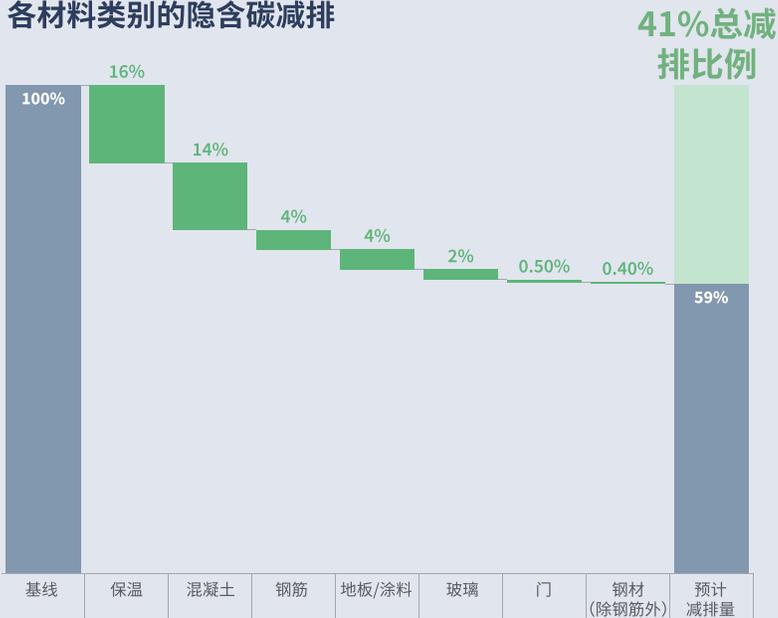
选择隐含碳含量更低的产品:

- 玻璃: 采购隐含碳含量更低的玻璃产品
- 结构钢和钢筋: 战略性地从采用高回收率钢材、使用电弧炉技术和使用清洁电力供应的钢厂采购钢材

案例研究2: 多层木制框架结构建筑

在一座6层、12500平方米、基座为钢筋混凝土、上部为木制框架结构的混合用途居住建筑中, 我们通过关注一系列的建筑组件, 发现其前期隐含碳含量具有41%的减排潜力。与案例研究1的结果一致, 这些隐含碳的减排成本溢价不到项目总成本的0.5%。

各材料类别的隐含碳减排



在基准情景基础上的前期隐含碳减排比例: <h1>41%</h1>	低隐含碳措施的成本溢价 <h1>< 0.5%</h1> <p>总预算</p>	二氧化碳当量减排量 (公吨): <h1>1,482</h1>	项目包含的建筑构件 结构系统 玻璃 屋顶 内墙材料 保温材料 墙面/地板饰面材料
--	---	--	---

主要零成本措施 (不增加项目总成本的措施)

选择隐含碳含量更低的产品:

- 预拌混凝土: 优化预拌混凝土供应商选择条件, 为地基和地下室采购水泥含量较低的混凝土, 并允许获取56天抗压强度
- 防潮: 选用隐含碳含量更低的产品
- 木材: 采购本地生产的和可持续来源的木材产品, 包括结构木材和面板产品

一对一材料替代:

- 石膏衬板: 采购隐含碳含量更低的石膏面板产品
- 保温材料: 采购聚异氰脲酸酯或矿棉等隐含碳含量较低的保温产品替代XPS等GWP值较高的材料
- 室内装修: 选择隐含碳含量较低的室内装修产品, 包括室内和室外的门、地毯砖、涂料和内墙

主要低成本措施 (因选择隐含碳含量更低的替代品造成少量成本溢价的措施)

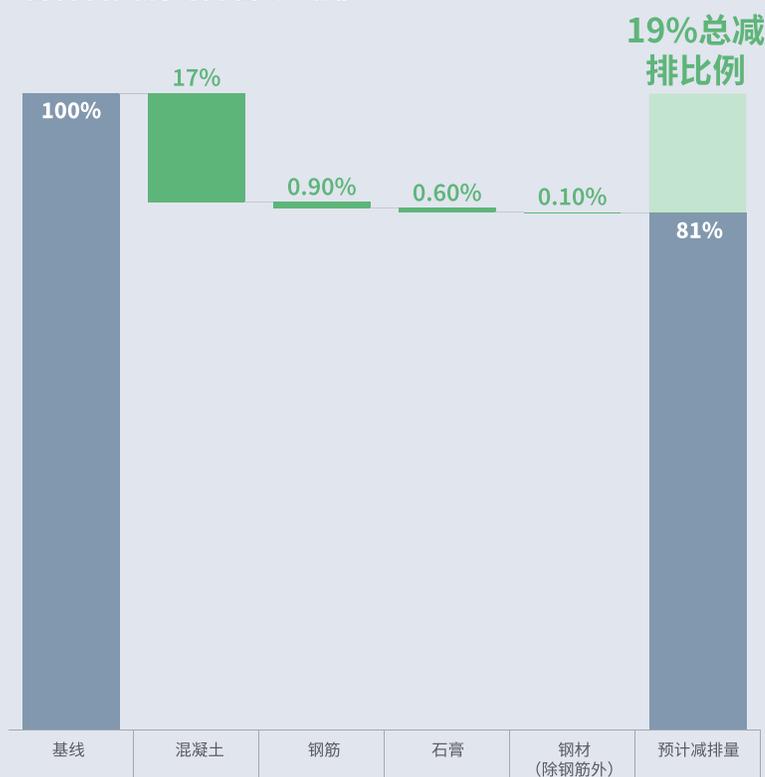
选择隐含碳含量更低的产品:

- 玻璃: 采购隐含碳含量更低的玻璃产品
- 结构钢和钢筋: 战略性地从采用高回收率钢材、使用电弧炉技术和使用清洁电力供应的钢厂采购钢材

案例研究3: 提拔建筑系统ⁱⁱⁱ

在一个3.6万平方米的提拔式混凝土仓库，我们发现，仅通过关注外壳和芯材，前期隐含碳减排潜力为19%。这种减少隐含碳的成本溢价不到项目成本的1%——与案例研究1和2相比，溢价略高，但仍在大多数建设项目的误差范围内。

各材料类别的隐含碳减排



在基准情景基础上的前期隐含碳减排比例:

19%

低隐含碳措施的成本溢价

< 1%
总预算

二氧化碳当量减排量 (公吨):

2,501

项目包含的建筑构件

仅外壳和芯材:
混凝土
钢筋
结构钢
金属面板
玻璃
金属板
屋顶
石膏面板
硬质保温

主要零成本措施 (不增加项目总成本的措施)

指定隐含碳含量更低的产品:

- 保温材料: 采购聚异氰脲酸酯或矿棉等隐含碳含量较低的保温产品替代XPS等GWP值较高的材料
- 预拌混凝土: 优化预拌混凝土供应商选择条件, 为地基和地下室采购水泥含量较低的混凝土设计, 并允许获取56天抗压强度

主要低成本措施 (因选择隐含碳含量更低的替代品造成少量成本溢价的措施)

选择隐含碳含量更低的产品:

- 玻璃: 采购隐含碳含量更低的玻璃产品
- 结构钢和钢筋: 战略性地从采用高回收率钢材、使用电弧炉技术和使用清洁电力供应的钢厂采购钢材

ⁱⁱⁱ 提拔建筑系统, 是一种现场预制混凝土墙面或其它构件然后通过提升、安装到其最终的位置, 并与其它结构连接, 共同组合完成的建筑体系, 它是一种特殊的设计和施工方法。

在案例研究中发现了更多减少隐含碳的机遇

除了在我们的分析中提到的低隐含碳材料选型和一对一材料替代措施之外，还存在一些其他的隐含碳减排机遇，包括：

- 室内饰面和装修隐含碳减排^{iv}，包括：
 - 用轻质或其它（植物基）石膏板材料替代传统石膏板
 - 选用由替代材料制成的低隐含碳地毯砖
 - 选择隐含碳含量更低的吊顶板和涂料产品
- 更换或重新设计外墙和结构^v，如：
 - 用木制替代品替代金属面板或轻钢龙骨
 - 重新设计整个结构系统，以利用更轻的材料（如木材），并重新计算楼板和其他基础结构元素的尺寸和材料含量
- 对整体建筑设计的考虑^{vi}，包括：
 - 现有建筑的适应性再利用
 - 减少占地面积，提高居住密度或面积利用效率

内部装修

尽管人们普遍认为建筑的结构一般占据着建筑前期隐含碳足迹的大部分，但对建筑生命周期中重复出现的周期性改造进行研究发现，室内装饰材料对建筑的隐含碳影响也很重要。

在某些情况下，多次周期性改造的累积影响可能超过建筑建造过程中累积的前期隐含碳³²。霍利·彼得森·斯奈德（Hawley Peterson Snyder）建筑设计公司最近的一份报告保守地估计，建筑内部的改造或更换周期为15年，每次改造都会增加建筑的隐含碳总量³³。在租户装修频率高的城市，这个周期可能会短得多。建筑类型在室内装修的相对影响中也起着关键作用。例如，商业和住宅建筑的改造频率要高于其他建筑，导致其累计隐含碳的影响更大。

在2019年的一项研究中，碳领导论坛按照每隔15年更新一次水电暖安装以及室内装修的频率，并考虑建筑寿命为60年，衡量了建筑初始建设结合水电暖安装以及室内装修对建筑隐含碳的影响。结果表明，在某些情况下，水电暖和室内装修累积的综合影响可能会超过初始建设的影响³⁴。

用于内部装修的材料通常由具有高度可调整产品线的公司生产，因此，为每个产品提供环保产品声明可能会耗费大量的时间和财务成本³⁵。碳领导论坛在其一项研究中发现，在室内装修中具有最高全球变暖潜能值（GWP）的材料类别——如铝框店面、暖通空调组件、室内隔断、木地板和衬垫等——缺乏必要的生命周期评估数据³⁶。随着低碳装修材料需求的增长，这些现有数据的局限性有望得到改善。如果在本地没有隐含碳影响更低的替代材料，设计从业者应该尽可能减少高隐含碳材料的用量。

iv 案例研究2在有限的范围内考虑了室内饰面和装修的隐含碳减排机遇；而另外两个案例研究未考虑这方面因素，因为两个项目的原始材料清单中未包括室内装修和饰面材料。

v 案例研究中没有考虑这些变化，因为它们需要重新进行结构设计，超出了项目的范围。

vi 因为此分析是基于已有设计和确定的建筑，所以这些变化不在项目的范围之内。

讨论

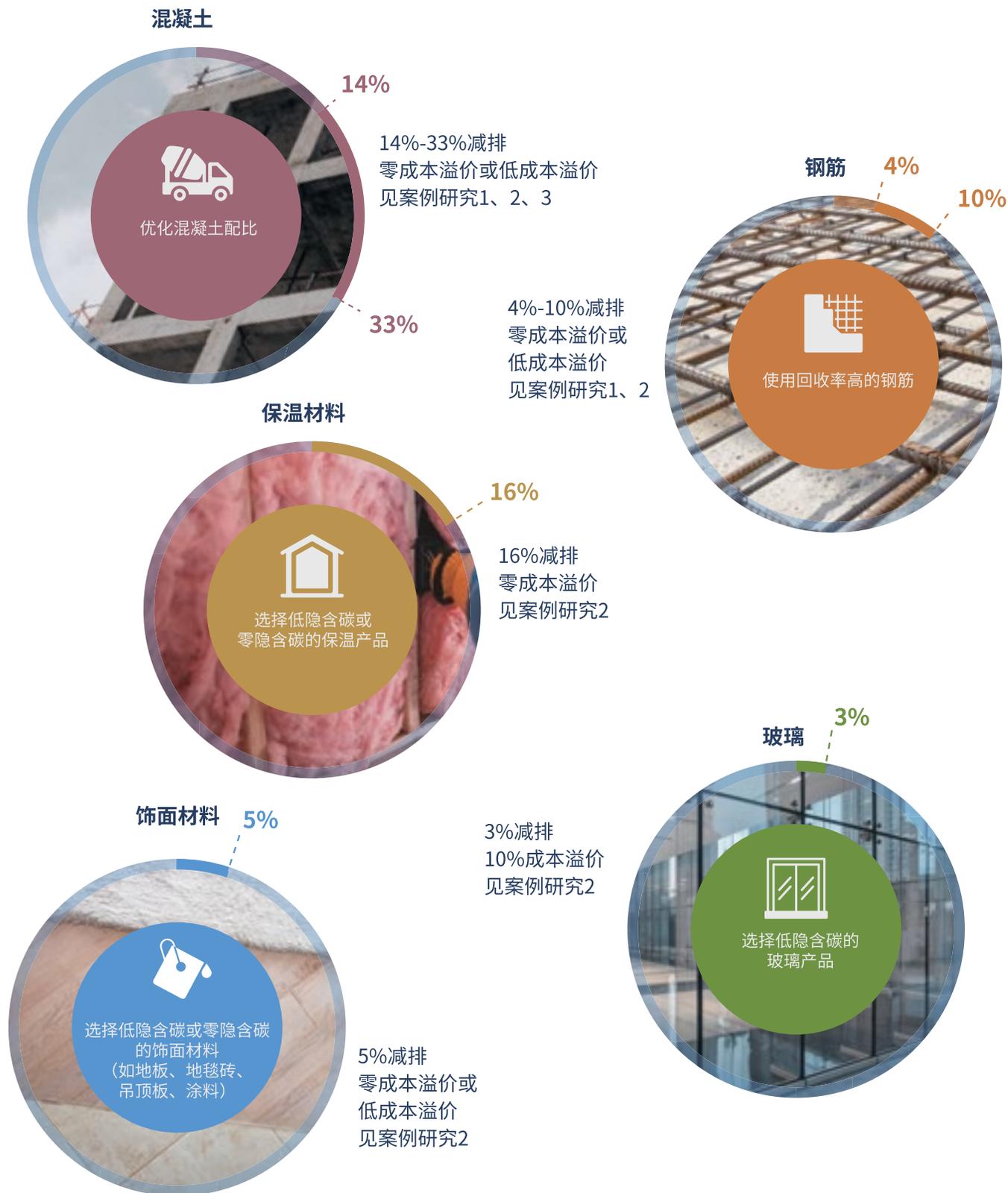
这些结果给我们带来了一些重大发现。尽管项目所采用的策略不包括全面的整体建筑设计，但它们仍然通过规范和材料替代措施减少了19%-46%的前期隐含碳。鉴于这些结论是基于太平洋西北地区的三个案例研究，我们可以将其视为有力的轶事证据，而不是广泛适用的结论。

我们曾希望从这些案例研究中得出更多有关使用木材替代结构钢和混凝土对成本、碳及材料的影响，但由于此研究的局限性（即我们无法重新设计建筑结构系统），我们无法得出这样的结论。

主要发现

1. 优化预拌混凝土设计可以在不增加成本的情况下实现显著的隐含碳减排。与三种情景下的基准建筑相比，预拌混凝土优化设计可以在整个项目范围内实现14%-33%的隐含碳减排。根据对混凝土配合比设计的改变，这种措施不但不增加成本，甚至还可以降低成本。
2. 利用高效轧机、电弧炉和清洁电力制造，且回收率高的钢筋，可以以很小的成本溢价产生显著的减排影响。在案例研究1和2的建筑中，钢筋对整个项目隐含碳含量的贡献最高可达10%。在太平洋西北地区的这些项目中，钢筋的前期隐含碳量可以减少一半，而对整个项目预算的影响却很小，尽管在其他地区，以较低成本溢价可能很难获得高回收率的钢筋材料。
3. 保温材料的选择对项目整体的隐含碳水平有重要影响，但这取决于选定的基准材料类型和保温材料的用量。案例研究2显示，保温材料使用的是传统的泡沫制保温板，约占建筑基准隐含碳含量的20%。使用HFO或其他低GWP材料发泡剂的硬质和喷涂泡沫保温产品可以显著降低隐含碳的影响。一些新兴产品还可以利用植物材料，其封存碳量有可能会超过生产过程中排放的碳。
4. 由于生产玻璃的过程需要大量的热量，制造框架需要高隐含碳材料，因此玻璃仍然是减少隐含碳排放方面的一大关键挑战。目前市面上的产品可以将玻璃的隐含碳含量减少约25%，但其成本溢价达到了10%。
5. 饰面材料可以成为关键的碳减排或碳储存机会。案例研究2表明，预先使用的饰面材料（如地板、地毯砖、吊顶板和涂料）约占项目层面“从摇篮到大门”隐含碳含量的10%。其中一些元素可以在不造成前期成本溢价的情况下减少50%以上的隐含碳，在某些地区甚至可以使用碳封存材料³⁷。

图6: 可以以极小成本或零成本减少项目隐含碳的类型



第五章：

实现更深度减排的机遇



实现更深度减排的机遇

第四章中讨论的案例研究表明，目前可用的技术和解决方案可以经济地减少建筑中的隐含碳。虽然不是此研究的目的，但还有一些额外的金融杠杆可以进一步提高低隐含碳建筑的经济效益：

- **内部碳定价：**通过碳税或企业内部制定碳定价的方式，对碳排放应用货币成本，可以显著增加低隐含碳设计对开发商的价值。微软等公司已经实施了内部碳成本政策，用于影响碳减排相关决策，其中就包括建筑减排。
- **消费者节约：**低隐含碳材料的规模化生产可以将成本节约进一步转移给消费者。例如，在混凝土混合物中减少硅酸盐水泥所节约的费用，目前可能只有预拌料供应商能够受益，但随着透明度的提高和对水泥含量较低的混凝土需求的增长，最终的购买者可能也可以受益于这些费用上的节约。
- **市场竞争：**低隐含碳材料产量的增加可能会降低材料的成本。优先采购政策造成的需求的增加可能会加速这一趋势。
- **制定越来越严格的隐含碳减排目标：**仅靠要求对新建建筑和改造项目的隐含碳进行测量，就能提高对低隐含碳材料和建筑技术的需求。一旦隐含碳得到定期测量，规范、政策和标准将成为制定严格目标更有力的工具。这将反过来通过关键产品的更高水平市场渗透率、熟悉程度和产量推动成本的下降。

随着低隐含碳建筑的商业可行性持续增长，以及越来越多的从业者将减排策略作为标准实践方法，认识到如何利用低隐含碳机会的关键因素将是非常重要的。

地域差异和数据差异可能有利于某些低隐含碳解决方案，而妨碍其他解决方案。随着新兴低隐含碳材料和技术的出现，它们可能会以更简单的方式、更低的成本或更大的影响

力来推动隐含碳减排。最后，低隐含碳建筑规范和政策在美国各地的发展正在加快，并将增加市场对低隐含碳材料和建筑方式的需求。

地域差异

劳动力、材料供应可用性、能源网的碳强度和其他因素的地域差异可以显著改变特定的低隐含碳解决方案的经济可行性、可用性和劳动力能力。

制造过程中使用的电力供应可能来自不同地区，其碳强度各不相同。例如，如果电网电力来自水电或其他零碳来源，使用电弧炉的工厂生产的一些钢铁产品的隐含碳含量可能非常低。在使用煤炭和其他碳密集型燃料发电的地区，这些钢铁产品的隐含碳含量将会高得多。

材料在某些地理区域内或不同地理区域间的运输可能显著影响产品的隐含碳。尽管在特定产品的生命周期中，制造阶段通常是碳排放量最大的阶段，但运输过程中的碳排放也可能很高，特别是当大量材料经过长途运输时。在评估低隐含碳材料时，与将材料运输到施工现场相关的排放（生命周期阶段A4）应与给定材料的隐含碳（生命周期阶段A1-A3）一起考虑。值得注意的是，包括本研究在内的许多研究没有纳入生命周期阶段A4，因为其信息不能通过建筑隐含碳排放量计算器等工具轻易获得。此外，此类排放还需要根据材料来源对每种材料进行额外计算。在某些情况下，选择运输排放较低的本地材料可能是更好的选择，而在另外一些情况下，从更远的地方运输隐含碳含量更低的材料也许是更好的选择。

各地劳动力使用低隐含碳产品的能力各不相同，这会影响到设计和施工团队实施某些低隐含碳解决方案的能力。许多产品（如低隐含碳地毯砖、更薄的石膏墙板和通过可持续方式获得的衬板产品）外观、触感和安装方式都与传统产品相似。然而，在特定地区，建造重型木结构系统或使用新的水

泥化学材料可能是一种不常见的技能，如果没有接受过培训和具备相关知识的劳动力，就可能导致项目额外的时间和费用。

随着低隐含碳产品需求量的增长，劳动力在新技能和施工方法方面经验的增加，以及使用这些材料和解决方案的培训的推广，区域差异的负面影响将会越来越小。



区域数据差异

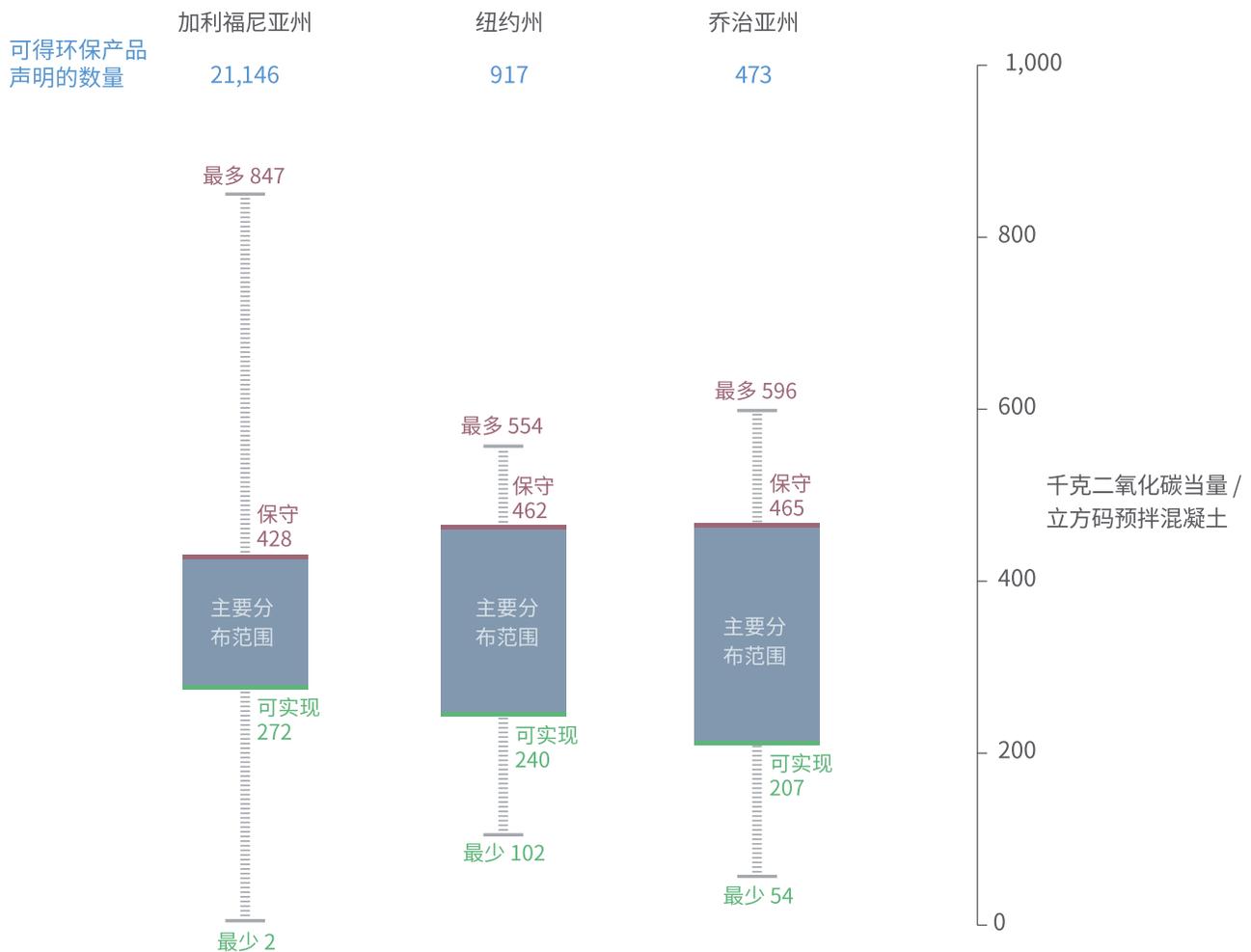
环保产品声明 (EPD) 是选择低隐含碳产品的重要工具。由于制造商根据当地公立和私立部门的需求提供数据, 因此其可用性因地区而异。

下图 (图7) 显示了加利福尼亚州、纽约州和乔治亚州环保产品声明包含的预制混凝土隐含碳含量的范围。在彩色区域

内的最大值表明, 80%的产品的隐含碳量低于所列值, 表明了一个保守的减排目标。彩色区域内的最小值是一个更严格但仍然可以实现的目标, 表明只有20%的产品的隐含碳量低于所列值。三个地区内的该范围区间是相似的, 但极端最小值和最大值却存在显著差异, 这反映出一些地区 (如加州) 的环保产品声明数量更多, 涉及产品范围更广。

图7: 加利福尼亚州、纽约州和乔治亚州可用的预拌混凝土的隐含碳含量范围

在各个地点, “保守” 值表示80%可用环保产品声明的单位混凝土隐含碳含量低于该值, “可实现” 值表示20%的环保产品声明的单位混凝土隐含碳含量低于该值, “主要分布范围” 则表示60%可用环保产品声明的单位混凝土隐含碳含量位于该区间内。



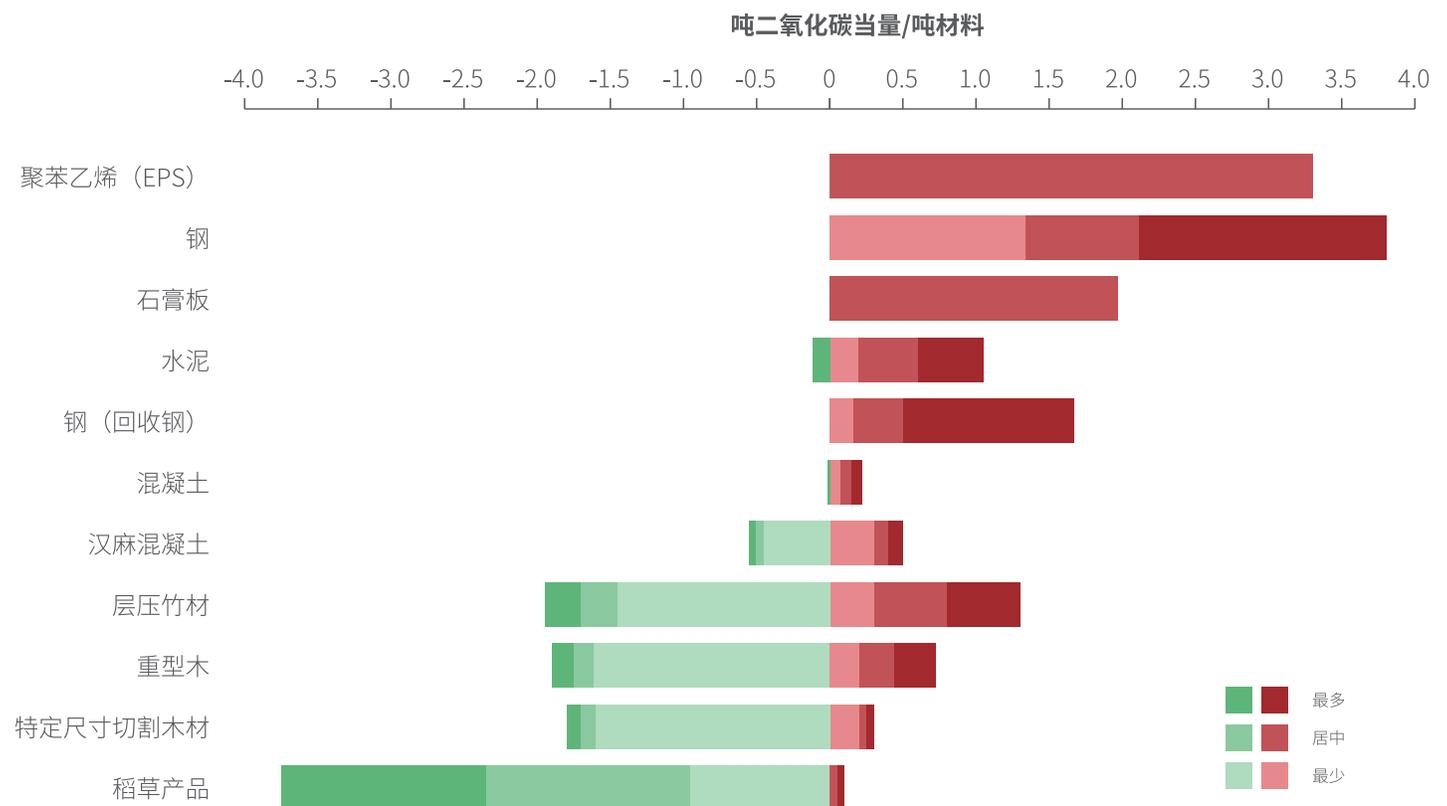
来源: 建筑隐含碳排放量计算器

可带来更大变化的先进材料

随着新兴低隐含碳材料和技术的出现，它们可能会以更简单的方式、更低的成本或更大的影响力来推动隐含碳减排。尽管使用已广泛可用的产品可以大幅减少隐含碳，但新兴材料和其他技术在大规模推广、优势被认可或降低价格后，仍可以进一步降低隐含碳含量。图8展示了一系列广泛的建筑材料（其中大多数今天已经很容易获得），包括高隐含碳材料和高净隐含碳存储潜力的材料。提高人们对现有材料的认识，了解哪些材料能够减少或（净）储存隐含碳，就能显著控制与建筑相关的碳排放。

图9-11中描述的材料展示了各种隐含碳减排措施，并提供了隐含碳含量较高的传统建筑材料的替代品。其中的一些材料在美国广泛可用，但也有些材料刚刚出现，还需要进一步测试。在选择先进材料时，研究特定材料可实现的隐含碳减排以及特定的可施工性、耐久性、成本和其他因素都是至关重要的。

图8: 建筑材料的二氧化碳当量排放和存储容量



来源: Table S6, Galina Churkina et al., "Buildings as a Global Carbon Sink," Nature Sustainability, 2020

图9: 已市场成熟的材料
市场已成熟, 但市场渗透率仍然不高的材料

隐含碳减排措施	描述	市场成熟度
负碳地毯衬垫	通过增加消费前和消费后的回收材料、生物聚合物和其他生物基材料的用量, 地毯制造商可以生产从摇篮到大门阶段碳排放为负值的产品。	此类产品当今已具备市场成熟度。
植物基保温材料	市场上以植物为基础的保温材料越来越多。在建筑中, 这些材料通常被认为是低隐含碳产品, 或可以提供碳的净封存。在美国, 纤维素的使用已经有几十年的历史, 但是其形式正在被改变, 即以不同的形状因子来发挥作用。汉麻混凝土是另一种高度可持续的材料, 可作为一种优秀的保温材料使用。这两种材料在住宅市场上都有应用, 但在商业建筑市场上却不多见。	当今市场上已存在多种稻草产品、汉麻混凝土和纤维素产品。
新一代低GWP值的 XPS保温材料	低GWP值的挤塑聚苯乙烯泡沫塑料 (XPS) 保温材料是用其他低GWP值的发泡剂混合剂取代高GWP值的氢氟碳化物发泡剂 HFC-134a 制作而成的。这种混合剂并未完全消除GWP, 但提供了一个该值较低的替代品, 来替代GWP值非常高的传统XPS产品 ³⁸ 。	多种产品已在美国市场得到应用。
石墨烯碳封存涂料	石墨烯涂料是为了增加强度和耐久性而在石灰基产品中增加了石墨烯的产品。在涂料干燥后, 其石灰成分可以从周围空气中吸收二氧化碳。	多种产品已在美国市场得到应用, 但它们所声称的碳减排作用还没有经过测试。
轻质墙板产品	轻质墙板产品减少了运输排放, 在安装现场也更容易操作。比如, 一种轻质石膏板可以通过减少干燥混合料所需的热量和相关排放, 来减少隐含碳含量。这种产品还比传统的石膏墙板耗水更少 ³⁹ 。	多种产品已在美国市场得到应用。
硅酸盐石灰岩水泥产品	使用石灰石作为辅助胶凝材料 (SCM) 是减少混凝土隐含碳排放的重要的第一步, 且成本低廉、可用性高。由于石灰石已经存在于水泥中, 且沉积物应用非常广泛, 这使石灰石成为了最容易得到的辅助胶凝材料。石灰石的总减排潜力受到替代比例 (美国材料与试验协会规定为15%) 的限制, 这是由于使用石灰石作为辅助胶凝材料时会带来强度的降低。	多种产品已在美国市场得到应用。

图10: 接近市场成熟的材料
已经用于小型或试点项目, 但尚未被市场广泛应用的材料

隐含碳减排措施	描述	市场成熟度
其它水泥化学和工艺	<p>目前多种新兴的水泥化学和生产方法正在推广当中。这些水泥生产方式需要更少的燃料, 并能减少化学反应产生的排放。</p> <p>其中的一些技术目前在少数预拌混凝土生产设施中已有应用, 其他技术目前仅用于制作预制铺路材料, 还有一些技术还处于早期开发阶段。</p>	<p>市场成熟程度因技术和生产商而异。大多数产品都已经过了测试, 目前已得到一家或多家预拌混凝土供应商的使用。</p>
高比例SCM混凝土	<p>用更高比例的飞灰、矿渣或火山灰质材料等辅助胶凝材料 (SCM) 替代水泥可以实现更多的碳减排。而非化石燃料来源 (如玻璃火山灰或稻壳) 的辅助胶凝材料还可以进一步促进碳减排。这种替代可以降低混凝土混合料中的水泥需求, 但这取决于辅助胶凝材料的供应、高比例辅助胶凝材料混合料设计性能数据的可用性以及建筑/结构设计要求。相对于目前业界普遍接受的辅助胶凝材料比例, 较高的辅助胶凝材料比例会增加达到指定抗压强度的时间, 因此, 这种策略的应用通常有限, 或根本不可用于时间较短的快速垂直建设项目。</p>	<p>生产商一直在寻找通过增加辅助胶凝材料的用量来降低混凝土混合料中水泥含量的方法, 但目前大多数地区的市场还没有验证高比例 (50%以上) 辅助胶凝材料混合料的有效性。</p>
二氧化碳注入水泥产品	<p>这些产品声称可以通过直接向混凝土中注入二氧化碳来减少隐含碳。在这种混凝土中, 二氧化碳被矿化并永久嵌入。由于水泥随着时间的推移会自然碳化, 目前还不清楚这一过程是否具有长期的碳减排优势, 特别是考虑到对高品质二氧化碳的需求。一些公司也在研究如何从水泥窑中捕获二氧化碳。</p>	<p>这些产品在某些地区已有应用, 但它们所声称的隐含碳减排能力还没有经过测试。</p>
植物基墙板	<p>SIP (结构保温板) 和其他外墙板可以使用植物材料制成。一些碳核算系统可能将这些材料认定为净碳封存材料, 而另一些系统则认为它们是低隐含碳材料 (与它们所替代的以石油或石膏为基础的传统材料相比)。</p>	<p>草砖结构保温板和预制草砖墙板已在个别住宅市场项目中得到成功应用; 然而, 这些应用在商业市场上还不常见。</p>
用于混凝土的二氧化碳封存骨料	<p>这项新技术使用二氧化碳作为制造碳酸盐岩的原料。生产的碳酸盐岩可代替从采石场开采的天然石灰石作为混凝土的主要成分。</p>	<p>数家初创企业正在积极开发这项新技术。</p>
氧化镁墙板	<p>氧化镁墙板可被用来代替传统的石膏板或其他衬板。与传统的硅酸盐水泥或氧化钙相比, 制造这种产品所需的煅烧过程可在更低的温度下进行, 从而减少了制造过程中的排放。</p>	<p>一些美国制造商提供具有多种应用和用途的此类产品, 但有些研究强调, 该产品的吸湿特性不佳, 在某些情况下会导致发霉和因潮湿造成的损坏⁴⁰。</p>
层压竹材和结构竹	<p>竹材产品是木材的可行替代品。与典型的木材产品相比, 竹子在强度特性上具有一些优势, 但竹材产品在使用寿命和总体弹性方面存在突出的问题⁴¹。</p>	<p>此类产品在美国尚未得到测试或规模化生产。</p>

图11: 开发中的材料

仍在开发当中,可能显著减少关键建筑材料中隐含碳含量的材料。

隐含碳减排措施	描述	市场成熟度
零碳钢	利用熔融氧化物电解或可再生能源生产的氢气来生产钢铁,并通过再利用或回收来减少原钢的用量,可以实现零碳钢产品。目前,低隐含碳钢已经出现,但市场上还没有成熟的零碳钢产品 ⁴² 。	此类产品尚未进入市场,但许多生产商正在逐年改善现有钢材的隐含碳含量,美国和欧洲也在积极努力生产零碳钢。
玻璃火山灰辅助胶凝材料	辅助胶凝材料可以由回收的玻璃产品制成,支持者声称这可以提高最终混凝土混合料的性能。	多家新兴企业正与当地回收中心合作,将玻璃火山灰辅助胶凝材料推向市场。这种产品最大的限制来自于经济限制和辅助胶凝材料的可用性。
使用替代燃料生产水泥	在普通硅酸盐水泥熟料的生产过程中使用替代燃料供热将减少目前水泥生产中约40%的前期隐含碳。这在技术上是可以实现,但尚未进行大规模测试。该工艺无法解决与化学工艺相关的排放。	此项技术仍处于开发的早期阶段。
自修复材料和生物材料	一些材料的使用寿命会受到材料失效的限制,而包括混凝土在内的自修复材料可以通过延长这些材料的使用寿命来减少隐含碳。一些生物材料在形成过程中可将大气中的二氧化碳封存,从而进一步减少隐含碳 ⁴³ 。	多数自修复或生物材料都还处于实验室开发的早期阶段。

规范与政策

越来越多的规范和政策都在瞄准城市、州和联邦层面的隐含碳减排工作。规范、标准、法规和激励计划都可以成为推动变革的有效工具，通过推广和确立最佳实践来推动变革，以减少建筑中的隐含碳。

一些低隐含碳政策已经在美国得到了实施，包括《购买清洁加州法案 (Buy Clean California Act)》。该政策要求投标州基础设施和建设项目的承包商披露特定材料的环保产品声明 (EPD)，并要求优先选择低隐含碳产品，从而推动低隐含碳产品的采购。在《购买清洁加州法案》计划的激励下，其他多个州的立法机构也开始追求类似的政策。

此外，2021年，美国总务管理局批准了一封建议信，建议信向联邦政府提出了两项限制隐含碳的关键策略⁴⁴：

1. 第一种策略是一种适用于所有项目的材料处理手段。这种手段要求项目中使用的75%的材料都要提供环保产品声明，并要求其排放的全球变暖潜能值在同等功能产品中排名前80%。
2. 第二种策略是建筑全生命周期评估 (WBLCA) 手段，适用于造价超过309.5万美元的大型项目。建筑全生命周期评估手段要求建筑设计的生命周期评估显示项目的碳排放至少要比基准建筑低20%。

这些政策旨在通过优先采购碳影响较低的材料来减少对高隐含碳产品的需求。雅典娜可持续材料研究所 (Athena Sustainable Materials Institute) 强调了其它一些通过规范和政策限制隐含碳的手段⁴⁵，包括：

- 其他财务激励措施，如投标激励或税收抵免
- 透明度倡议，如要求或激励建筑项目测量和披露其隐含碳数据

- 性能化指标，如要求或激励建筑项目根据以下指标减少隐含碳：
 - 根据基准体系定义的定制性能指标
 - 与建筑或材料的GWP值相关的固定性能指标
- 规范性手段，如要求或激励使用特定材料或设计措施

虽然这些规范和政策解决方案在某些情况下是可行的，但这并非一个详尽的列表。碳中和城市联盟在其报告《显著减少隐含碳的城市政策框架》中展示了隐含碳减排政策的广泛范围，概述涵盖五个类别的52项政策。这五个类别包括：分区与土地使用、建筑法规、采购、垃圾与循环以及金融政策⁴⁶。此类立法的新建议以及类似C40城市“清洁建筑宣言”这样的政府承诺，正在美国各地快速发展。除政府政策外，各企业每月也都在发布限制隐含碳的政策。

第六章：

总结



总结

目前，隐含碳领域的发展轨迹与全球气候目标并不一致，所以，减少隐含碳已成为了一个紧迫而关键的问题。自2010年以来，尽管全球建筑运行领域的排放略有下降，但与建筑建造相关的排放实际上增加了1.5%⁴⁷。从业者必须采用现有的策略和解决方案，加快低隐含碳建造方案的广泛应用。为了实现《巴黎气候协定》的目标，并将全球温升幅度限制在1.5°C以内，我们必需做出这些改变，采取前所未有的行动。

本报告表明，中型商业建筑项目使用当今已广泛应用的材料，可以以不到1%的成本溢价实现46%的隐含碳减排。文中三个案例研究强调的减排可以通过广泛可用且易于实施的方法和材料实现。通过考虑整体建筑的设计策略，增加成本溢

价，或者利用一些正在通过研发过程走向市场的先进材料，隐含碳减排的潜力可以远超50%。实现低隐含碳建筑的技术将继续发展，地区差异也将继续影响个别产品或解决方案的减排效果。但这份报告中强调的设计方法和整体考虑可以被应用到当今的任何项目中，为消除和封存建筑中的碳排放提供持久性的解决方案。



附件：

附加案例研究



附件：附加案例研究

以下案例研究是在为本报告进行研究时编制的。在附件中包括这些案例是为了进一步了解降低中低层建筑隐含碳含量的各种手段的影响。

表A1: 附加案例研究

构造类型	研究名称	地点	建筑类型	面积 (平方米)	链接
中层钢+混凝土结构	Tally案例研究	华盛顿州西雅图	华盛顿大学学生宿舍	面积未透露	https://choosetally.com/casestudy/
中层钢+混凝土结构	“重型木优化与生命周期评估” 案例研究1, 碳领导论坛 (CLF)	华盛顿州	9层商业建筑	面积未透露	https://carbonleadershipforum.org/mass-timber-optimization-and-lca/
混凝土提拔建筑系统	板式屋顶系统, 木制品	加利福尼亚、华盛顿、俄勒冈、夏威夷	商业建筑	多样	https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/IS-Panelized-Roofs.pdf
中层重型木结构 (正交胶合木)	Katerra公司正交胶合木和Catalyst建筑的生命周期评估, 碳领导论坛	华盛顿州斯波坎	5层办公建筑	16880	https://carbonleadershipforum.org/katerra/
中层重型木结构 (正交胶合木和胶合板)	重型木建筑和混凝土替代品的生命周期评估比较	俄勒冈州波特兰	12层多功能公寓/办公建筑	8340	https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2020/fpl_2020_liang001.pdf
中层木制框架	豪华木质结构公寓社区完成的密集、多功能城市开发项目, 木制品	乔治亚州亚特兰大	5层木制框架公寓建筑 (3栋建筑)	27500	https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/CrescentTerminus_CaseStudy.pdf

尾注



尾注

1. *Bringing Embodied Carbon Upfront: Coordinated Action for the Building and Construction Sector to Tackle Embodied Carbon*, World Green Building Council, 2019, https://www.worldgbc.org/sites/default/files/WorldGBC_Bringing_Embodied_Carbon_Upfront.pdf; and Robert James Pratt, "A Common Ask: Collecting ESG Data on Building Materials, Starting with Embodied Carbon," *Urban Land*, January 31, 2021, <https://urbanland.uli.org/sustainability/a-common-ask-collecting-esg-data-on-building-materials-starting-with-embodied-carbon/>.
2. Kathrina Simonen, Barbara X. Rodriguez, and Catherine De Wolf, "Benchmarking the Embodied Carbon of Buildings," *Technology | Architecture + Design 1*, no. 2 (2017): 208–218, <https://doi.org/10.1080/24751448.2017.1354623>.
3. *Sustainability of Construction Works—Assessment of Buildings, Part 2: Framework for the Assessment of Environmental Performance*, European Committee for Standardization, 2011.
4. "New Buildings: Embodied Carbon," Architecture 2030, accessed April 1, 2021, <https://architecture2030.org/new-buildings-embodied/>.
5. Lizhen Huang et al., "Carbon Emission of Global Construction Sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews 81* (January 2018): 1906–1916, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>.
6. *Bringing Embodied Carbon Upfront*, World Green Building Council, 2019.
7. *The Critical Role of Buildings*, IEA, 2019, <https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings#highlights>.
8. *Embodied Carbon in Building Materials for Real Estate*, Urban Land Institute, 2019, https://americas.uli.org/wp-content/uploads/ULI-Documents/Greenprint-Embodied-Carbon-Report_FINAL.pdf.
9. *Centering Equity in the Sustainable Building Sector: Comprehensive Summary: CESBS Launch Summit* NAACP, 2018, https://naacp.org/wp-content/uploads/2020/04/CESBS-Summit-Comprehensive-Summary_July-2019.pdf.
10. Paula Melton, "The Urgency of Embodied Carbon and What You Can Do about It," *BuildingGreen*, September 10, 2018, <https://www.buildinggreen.com/feature/urgency-embodied-carbon-and-what-you-can-do-about-it>.
11. Colin R. Gagg, "Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis," *Engineering Failure Analysis 40* (May 1, 2014): 114–140, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>.
12. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2018*, US Environmental Protection Agency, 2020, <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-04/documents/us-ghg-inventory-2020-main-text.pdf>; and "Manufacturing Energy and Carbon Footprint," US Department of Energy, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/2014_mecs_cement_energy_footprint.pdf.
13. Gagg, "Cement and Concrete as an Engineering Material," 2014; and *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks*, US Environmental Protection Agency, 2020.
14. "Supplementary Cementitious Material: An Overview," *ScienceDirect*, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/supplementary-cementitious-material>.
15. *Embodied Carbon: A Clearer View of Carbon Emissions*, Walter P. Moore, 2020, https://www.walterpmoore.com/sites/default/files/wpm_embodied_carbon_report_2020.pdf.

16. "Supplementary Cementitious Material," *ScienceDirect*.
17. Thomas Czigler et al., "Laying the Foundation for Zero-Carbon Cement," McKinsey & Company, May 14, 2020, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/laying-the-foundation-for-zero-carbon-cement>.
18. *2019 U.S. Cement Industry Annual Yearbook*, Portland Cement Association, 2019, <https://www.cement.org/morereports/2018-us-cement-industry-annual-yearbook>.
19. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks*, US Environmental Protection Agency, 2020.
20. "Manufacturing Energy and Carbon Footprint," US Department of Energy; and *ibid*.
21. Ali Hasanbeigi and Cecilia Springer, *How Clean Is the U.S. Steel Industry?* Global Efficiency Intelligence, 2019, <https://www.globalefficiencyintel.com/us-steel-industry-benchmarking-energy-co2-intensities>.
22. *Profile of the American Iron and Steel Institute*, American Iron and Steel Institute, 2019, <https://www.steel.org/industry-data/reports/>; *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks*, US Environmental Protection Agency, 2020; and "Manufacturing Energy and Carbon Footprint," US Department of Energy.
23. Jeffrey Tomich, "U.S. Readies First Wind-Powered Steel Plant," *E&E News*, November 15, 2019, <https://www.eenews.net/stories/1061552453>.
24. "ENERGY STAR Focus on Energy Efficiency in Iron and Steel Manufacturing," Energy Star, https://www.energystar.gov/industrial_plants/measure-track-and-benchmark/energy-star-energy-5.
25. *Structural Steel: An Industry Overview*, American Institute of Steel Construction, August 2018, https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/white-papers/structural_steel_industry_overview_2018.pdf.
26. "Forest Management Certification," Forest Stewardship Council, <https://fsc.org/en/forest-management-certification>.
27. James L. Howard and Shaobo Liang, "United States Forest Products Annual Market Review and Prospects, 2015–2019," US Department of Agriculture, <https://unece.org/fileadmin/DAM/timber/country-info/statements/usa2018.pdf>.
28. "About – Carbon Smart Materials Palette," Architecture 2030, accessed March 30, 2021, <https://materialpalette.org/about/>.
29. *The Greenest Building: Quantifying the Environmental Value of Building Reuse*, National Trust for Historic Preservation, 2011, <https://forum.savingplaces.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=5119e24d-ae4c-3402-7c8e-38a11a4fca12&forceDialog=0>.
30. Larry Strain, "10 Steps to Reducing Embodied Carbon," AIA, <https://www.aia.org/articles/70446-ten-steps-to-reducing-embodied-carbon>.
31. Data from *2018 Commercial Buildings Energy Consumption Survey*, US Energy Information Administration, 2020, <https://www.eia.gov/consumption/commercial/data/2018/index.php>.
32. *Estimates of Embodied Carbon for Mechanical, Electrical, Plumbing and Tenant Improvements: Summary Document*, Carbon Leadership Forum, April 2019, <https://carbonleadershipforum.org/lca-of-mep-systems-and-tenant-improvements/>.

33. *Designing for the Future: Interior Life Cycle Analysis*, Hawley Peterson Snyder, February 7, 2020, <https://www.oneworkplace.com/assets/files/HPS-ONEder-Grant.pdf>.
34. *Estimates of Embodied Carbon for Mechanical, Electrical, Plumbing and Tenant Improvements: Summary Document*, Carbon Leadership Forum, April 2019.
35. *Designing for the Future*, Hawley Peterson Snyder, 2020.
36. *Life Cycle Assessment of a Commercial Tenant Improvement Project: Summary Document*, WeWork and Carbon Leadership Forum, October 2019, <https://carbonleadershipforum.org/lca-of-a-wework-tenant-improvement-project/>.
37. "Carbon Storing Carpet. It's a Thing," Interface, accessed March 17, 2021, https://www.interface.com/US/en-US/sustainability/climate-take-back/carbon-storing-carpet-en_US.
38. "Transitioning to Low-GWP Alternatives in Building/Construction Foams," US Environmental Protection Agency, 2011, https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/transitioning_to_low-gwp_alternatives_in_building_and_construction_foams.pdf.
39. "Gypsum Board – Carbon Smart Materials Palette," Architecture 2030, accessed March 30, 2021, <https://materialpalette.org/gypsum-board/>.
40. Marina Gravit et al., "Problems of Magnesium Oxide Wallboard Usage in Construction," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 90 (2017): 012103, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/90/1/012103/pdf>.
41. Lilly Cao, "How Effective is Laminated Bamboo for Structural Applications?" *ArchDaily*, February 29, 2020, <https://www.archdaily.com/934274/how-effective-is-bamboo-for-structural-applications>.
42. "MOE Technology," Boston Metal, accessed March 30, 2021, <https://www.bostonmetal.com/moe-technology/>; and Frédéric Simon, "Swedish Steel Boss: 'Our Pilot Plant Will Only Emit Water Vapour,'" *EURACTIV*, May 10, 2018, <https://www.euractiv.com/section/energy/interview/hybrid-ceo-our-pilot-steel-plant-will-only-emit-water-vapour/>.
43. Amos Zeeberg, "Bricks Alive! Scientists Create Living Concrete," *New York Times*, January 15, 2020, <https://www.nytimes.com/2020/01/15/science/construction-concrete-bacteria-photosynthesis.html>.
44. "GSA Green Building Advisory Committee Advice Letter: Policy Recommendations for Procurement of Low Embodied Energy and Carbon Materials by Federal Agencies," US General Services Administration, February 17, 2021, <https://www.gsa.gov/governmentwide-initiatives/federal-highperformance-buildings/policy/green-building-advisory-committee/advice-letters-and-resolutions>.
45. Jennifer O'Connor and Matt Bowick, "Reducing Embodied Environmental Impacts of Buildings: Policy Options and Technical Infrastructure," Athena Sustainable Materials Institute, December 2019, http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2019/12/Policy_white_paper_December_2019.pdf.
46. *City Policy Framework for Dramatically Reducing Embodied Carbon: 52 Detailed Policies to Reduce Embodied Carbon*, Carbon Neutral Cities Alliance, One Click LCA, and Architecture 2030, 2019, <https://www.embodiedcarbonpolicies.com>.
47. "Delivering the Paris Agreement: The Role of the Built Environment," World Green Building Council, <https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2050%20Letter%20Final.pdf>.

Matt Jungclaus, Rebecca Esau, Victor Olgyay, and Audrey Rempher, Reducing Embodied Carbon in Buildings: Low-Cost, High-Value Opportunities, **RMI, 2021**,
<http://www.rmi.org/insight/reducing-embodied-carbon-in-buildings>.

RMI values collaboration and aims to accelerate the energy transition through sharing knowledge and insights. We therefore allow interested parties to reference, share, and cite our work through the Creative Commons CC BY-SA 4.0 license.
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



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

© November 2022 RMI. 版权所有。Rocky Mountain Institute® 和 RMI® 都是注册商标