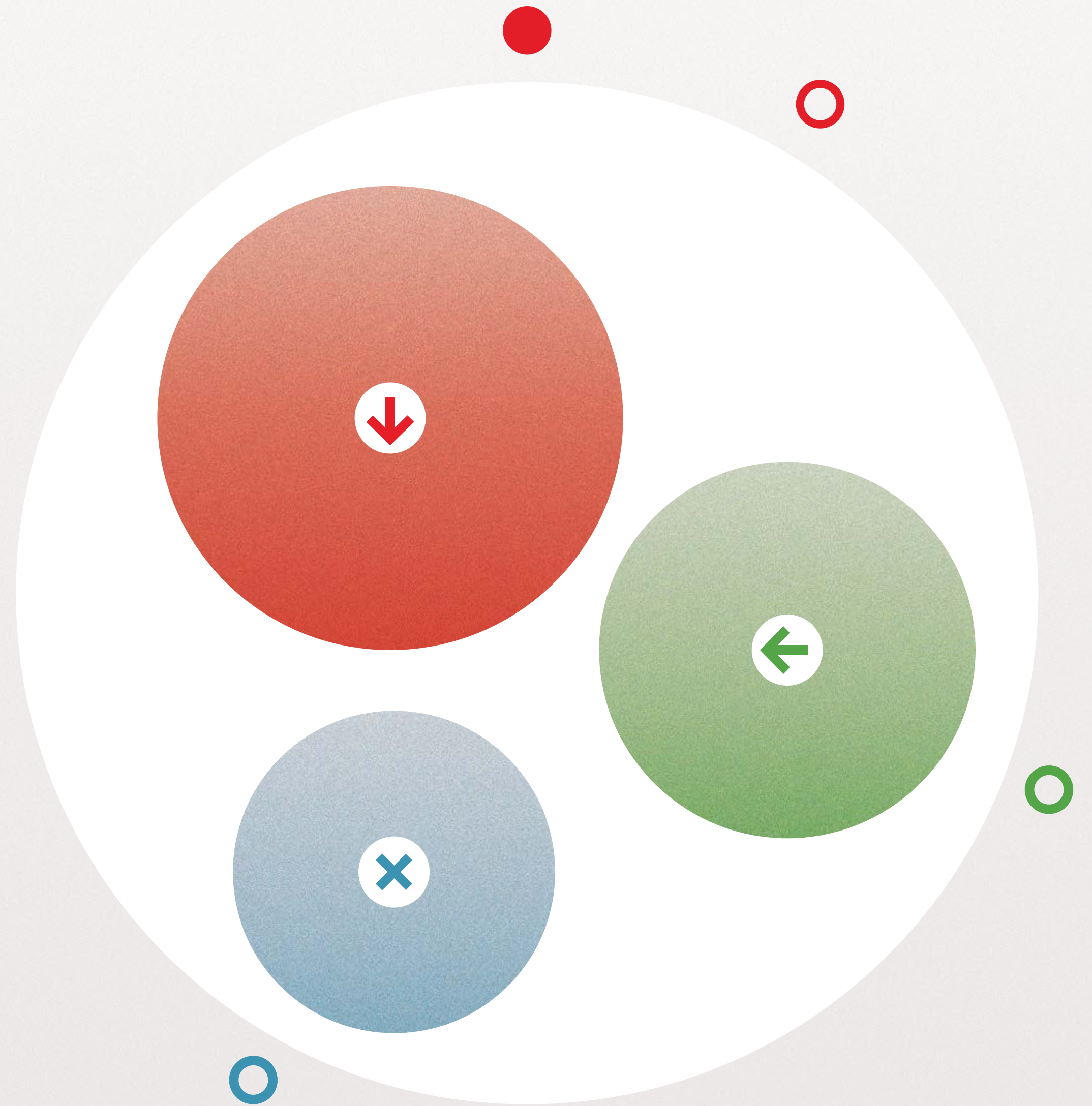


# Reduce, Restore, Remove

减少, 修复, 移除

## 中国建筑与环境 净零技术发展前瞻



# 目录

|            |    |
|------------|----|
| 序言         | 4  |
| 3Rs 路径综述   | 6  |
| 3Rs 技术发展趋势 | 12 |
| 3Rs 未来情景   | 21 |
| 共同行动       | 28 |
| 参考文献       | 30 |
| 致谢名录       | 31 |

## 术语及定义

**Reduce 减少:** 减少碳排放至大气。

**Restore 修复:** 修复生态系统以发掘并加强除碳能力及碳库容量。

**Remove 移除:** 人为工程方式从大气中捕集并去除碳, 将之封存或加以利用。

**碳达峰:** 是指二氧化碳排放总量的增长在某一个时点达到历史最高值, 之后逐步回落。中国承诺在2030年前实现碳达峰。

**碳中和:** 是指国家、企业、产品、活动或个人在一定时间内直接或间接产生的二氧化碳或温室气体排放总量, 通过植树造林、节能减排等形式, 抵消自身产生的二氧化碳或温室气体排放量, 实现正负抵消, 达到相对“零排放”。中国承诺在2060年前实现碳中和。

**净零碳排放Net-zero:** 当一定时期内通过人为二氧化碳移除使得全球人为二氧化碳排放量达到平衡时, 可实现净零二氧化碳排放。

**人为排放:** 人类活动造成的温室气体、温室气体前体和气溶胶的排放。这些活动包括化石燃料的燃烧、毁林、土地利用变化、畜牧生产、施肥、废弃物管理和工业生产过程。

**建筑隐含碳:** 是指建筑开始启用之前及其拆除之后产生的碳排放, 覆盖建筑原材料提取、相关的运输、建筑建造和更新拆除以及最后的废弃物处理等等。

**建筑运营碳:** 建筑运行过程中直接使用燃煤、燃油和燃气等能源排放二氧化碳所导致的直接碳排放, 以及使用电力、热力供应所导致的间接碳排放。

**建筑全生命周期:** 从材料与构建生产、规划与设计、建造与运输、运行与维护直到拆除与处理的全循环过程。

**脱碳:** 国家或其他实体实现低碳经济或个人减少碳消耗的过程。

**碳汇:** 从大气中清除二氧化碳的过程、活动或机制。

**封存:** 陆地库或海洋库吸收(即将有关物质加入库中)含碳物质特别是二氧化碳的过程。

**全球增温趋势 GWP:** 是指在一定时期内, 排放到大气中的1千克温室气体的辐射强迫与1千克二氧化碳的辐射强迫的比值。

**二氧化碳当量:** 指在特定时间范围内, 作为温室气体(GHG)或者温室气体混合体的排放量, 能够产生同样综合辐射强迫的二氧化碳排放量。在特定时间范围内, 用温室气体排放量乘以全球增温趋势(GWP)就可以计算二氧化碳排放当量。

# 促进系统性变革, 共创零碳未来

气候变化是当今社会人类生存与发展面临的最严峻挑战之一。将全球变暖限制在1.5°C的目标几乎遥不可及, 应对气候环境危机, 积极行动才能创造转机。

建筑环境与全球每年至少40%的碳排放量有关<sup>1</sup>。深度、长期的系统性行业变革已刻不容缓: 我们需要在未来十年内从根本上改变我们规划、设计、建造和使用建筑物和基础设施的方式; 同时, 我们必须遏制生物多样性的丧失, 修复已经对生态系统和大气造成的损害。由此, 所需的转型规模是前所未有的——从我们的生活方式、我们的建筑环境, 到我们如何保护和利用自然资源。

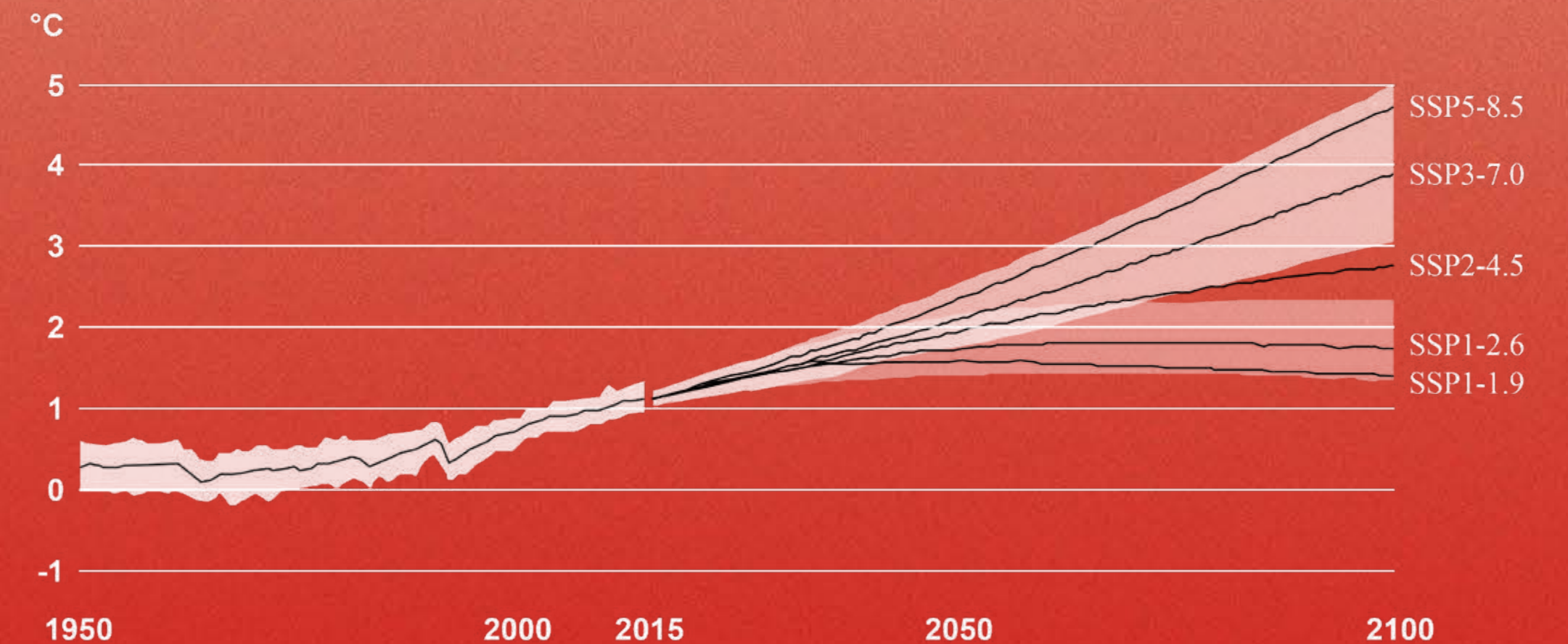
奥雅纳将气候韧性和可持续发展置于战略和目标的核心。我们致力于实现环境影响最小化, 同时, 最大限度发挥自然资源的经济和社会效益。

2022年, 奥雅纳发布Reduce, Restore, Remove: A Call to Action全球报告, 提出遏制和扭转大气碳排放量上升的三种互补策略——Reduce减少排放、

Restore修复生态、Remove工程除碳(3Rs), 为实现净零排放必须采取的行动提供明确路径。基于3Rs框架, 我们开展本次专题研究, 深入探索中国建筑环境实现碳中和目标所需关键措施和技术的发展前景。通过邀请建筑与环境所涉及各领域专家参与研讨和调研, 促进跨领域交流与合作, 为低碳技术的创新和推广提供更广泛的视角和更充分的资源。未来, 奥雅纳将持续践行前瞻性和科学性方法, 与优秀的合作伙伴携手, 借助理念和技术创新, 共同促进中国建筑行业的低碳转型, 为塑造更具气候韧性和可持续发展的未来做出贡献。



徐润昌博士  
奥雅纳创研院东亚区总监



全球增温趋势

五种排放情景下的气候预估结果(相较于1850-1900年), 来自IPCC 2021<sup>2</sup>

# 以创新技术赋能建筑业碳中和

中国作为全球最大温室气体排放国，拥有世界上最大的建筑市场。根据中国建筑节能协会发布的报告，2020年中国建筑全过程碳排放为50.8亿吨，占全国碳排放总量的50.9%。因此，建筑业不但是中国节能降碳的关键，也对全球实现净零排放有着重要影响。

中国建筑业要实现碳中和，需要转变“大量建设、大量消耗、大量排放”的发展方式，向绿色低碳可持续发展全面转型。实现这样的转变，需要创新技术手段和工具的支撑。但目前，中国建筑业实现碳中和的技术路径尚未得到充分研究，业界对于建筑低碳技术的发展状况还不够了解。

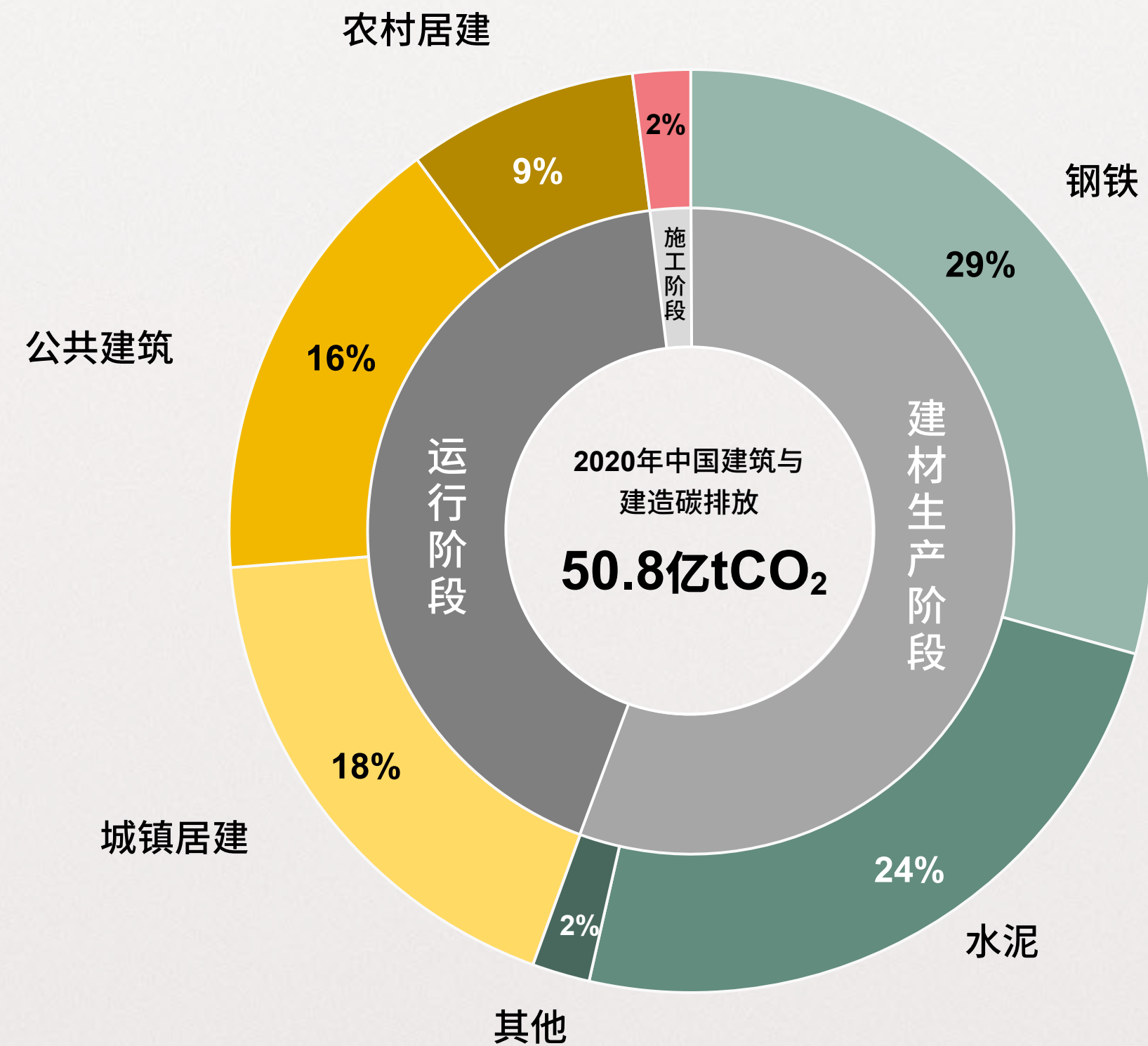
因此，在过去一年中，北京交通大学碳中和科技与战略研究中心与奥雅纳创研院合作开展了“中国建筑环境脱碳路线图和技术准备评估研究”项目，旨在就中国建筑部门实现净零排放的技术路径、建筑的低碳技术发展趋势和驱动力进行深入研究。

该研究首先全面梳理并分析了现有建筑与环境减碳技术，结合国际能源署的研究报告、中国国家发改委、科技部和住建部等部门的绿色低碳技术推广目录等文献，形成包括近百项技术的减碳技术清单。研究依据奥雅纳提出的3Rs框架，对技术清单进行分类和凝聚，帮助业界加深对减碳技术发展状况的认知。在此基础上，为进一步量化技术减排潜力和市场应用，该研究邀请了近百位业界专家参与建筑与环境减碳技术成熟度评价问卷调研，量化评价当前中国减碳技术的成熟度，从而为这些技术的应用推广提供有效参考。

希望这些研究成果为中国建筑与环境减碳技术创新和应用提供助力，为建筑业未来的低碳和可持续发展注入新的思路与活力。



**王元丰教授**  
中国城市科学研究会常务理事兼  
可持续土木工程专委会理事长  
北京交通大学碳中和科技  
与战略研究中心主任



**2020年中国建筑与建造碳排放**  
来源:《中国建筑节能年度发展研究报告2021》

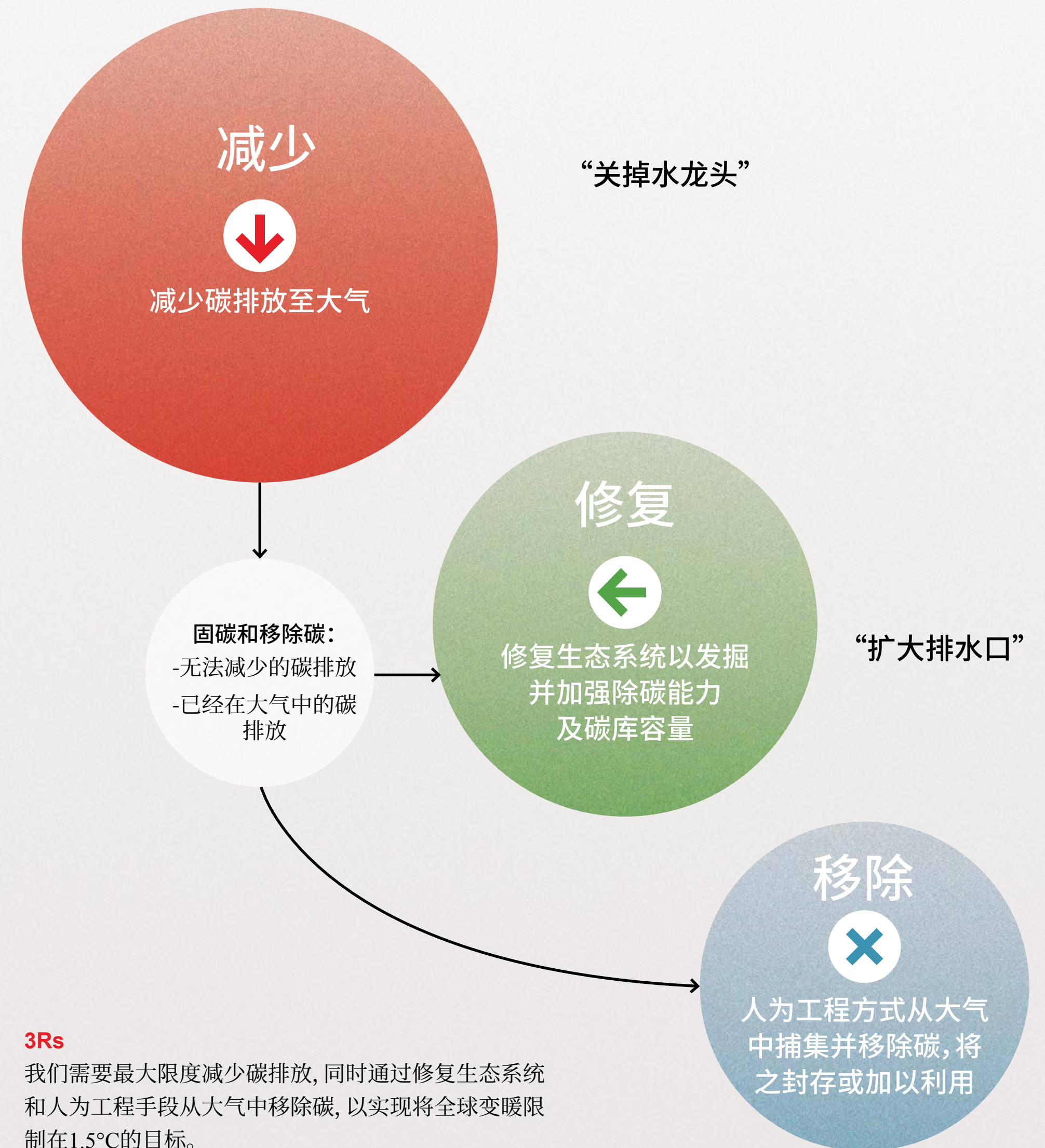
# 3Rs, 实现净零目标的路径

人类活动产生的碳排放是导致当前全球气候变化的主要因素。若要将全球变暖控制在特定限度之内, 必须快速有效地限制碳排放量。

首先, 我们必须“关掉水龙头”——当务之急是通过大幅和快速减少碳排放, 来减缓并最终阻止大气中碳的积累。目标和实施路线很重要: 我们减少排放的速度越慢, 变暖的速度就越快。到2030年, 我们需要实现将全球二氧化碳排放量比2010年的水平减少45%, 到2050年实现二氧化碳的净零排放, 同时大幅减少其他温室气体, 特别是甲烷的排放量<sup>3</sup>。

未来, 我们不可能完全不排放二氧化碳, 且已经排放的碳将继续推动全球变暖。因此, 在减少排放的同时, 我们必须“扩大排水口”, 考虑如何把这些不得不排放的二氧化碳固定下来。

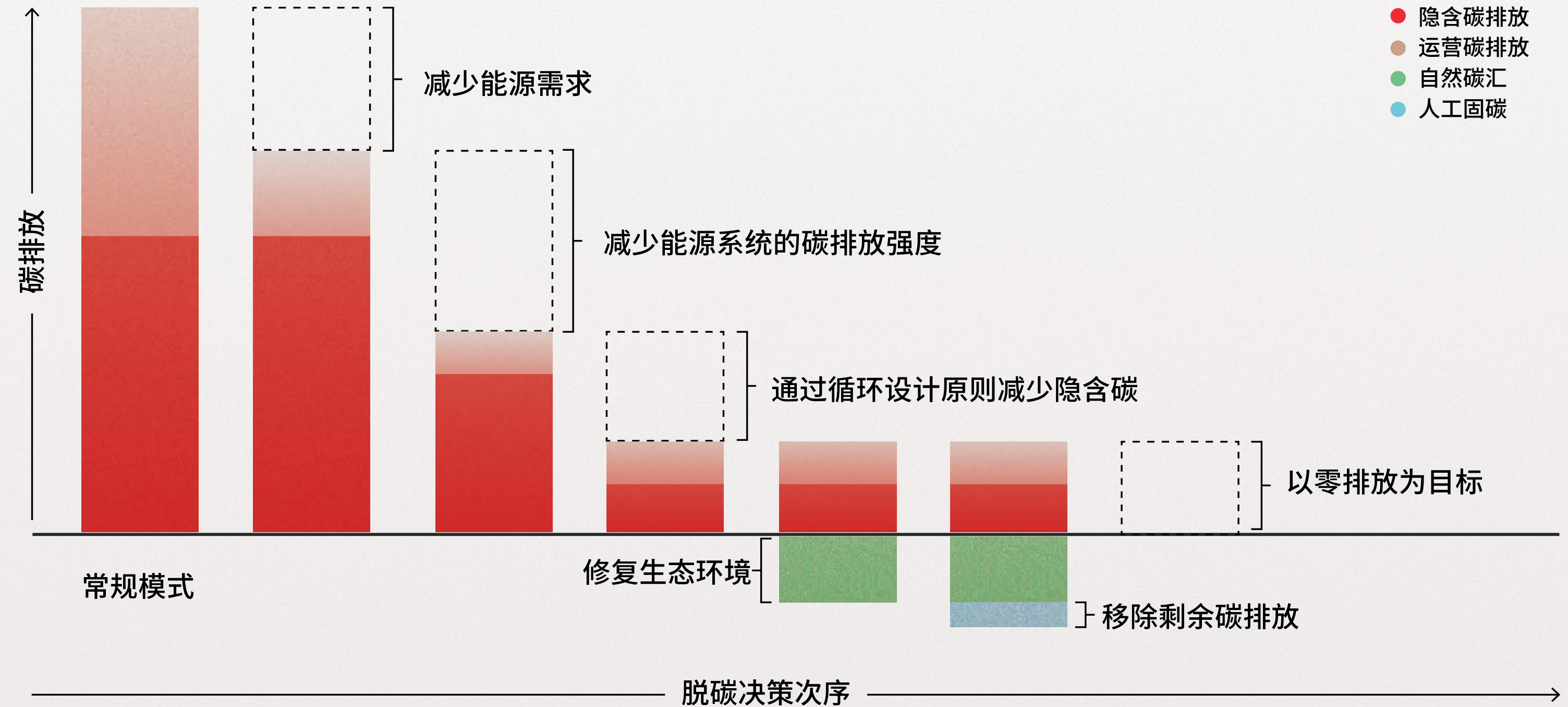
我们需要修复生态系统, 增强森林、湖泊、海洋等自然生态系统的固碳能力。然而, 到2050年, 仅靠深度和快速的减排和生态修复, 不太可能实现大气碳浓度的下降。因此, 我们还需要利用技术和工程开发等创新方法, 从大气中移除碳, 并将其永久封存<sup>4</sup>。



右图展示了实现净零排放的3Rs路线图。我们必须在全生命周期和全系统基础上开展行动,尤其需要尽一切努力减少运营碳排放和隐含碳排放,避免过度依赖碳汇和碳捕集。只有这样,才能利用修复自然环境和人为工程技术从大气中去除碳,以抵消残余排放。

一些全球最大的公司和国家已经做出了“净零”承诺,政策和金融市场亦开始为促进脱碳创造必要条件。各国政府正在通过发布减排目标和政策,推动全国范围内的行动。2020年9月,中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标,将在包括能源、工业、交通、基建、经济、技术等十个领域采取加速转型和创新的政策措施和行动<sup>5</sup>。

气候变化在带来严峻危机的同时,也蕴含着全球经济发展的机遇。如果全球共同开展加速减缓气候变化的行动,必将会在技术、理念上带动新一轮的创新、发展和增长。





# Reduce 减少碳排放至大气

在1.5°C的温控目标下, 未来十年全球建筑业脱碳首要任务是迅速地、  
从根本上扭转传统工业过程, 把温室气体排放减少到最低限度。

减少碳排放需要在建成环境全生命周期、全系统层面上进行, 从能源  
电气化、网络化、智能化, 到改善材料循环性和废弃物处理等各方面  
形成有效的脱碳方案。首先, 减少建筑碳排放需要从减少能源消耗开  
始, 例如被动式设计、提高系统运行效率; 其次应减少所用能源的碳排  
放量, 例如电力脱碳化、供热制冷脱碳化等; 最后, 应该通过“少建、  
巧建”, 例如延长既有建筑使用寿命等方法<sup>6</sup>, 最大限度减少隐含碳  
排放。

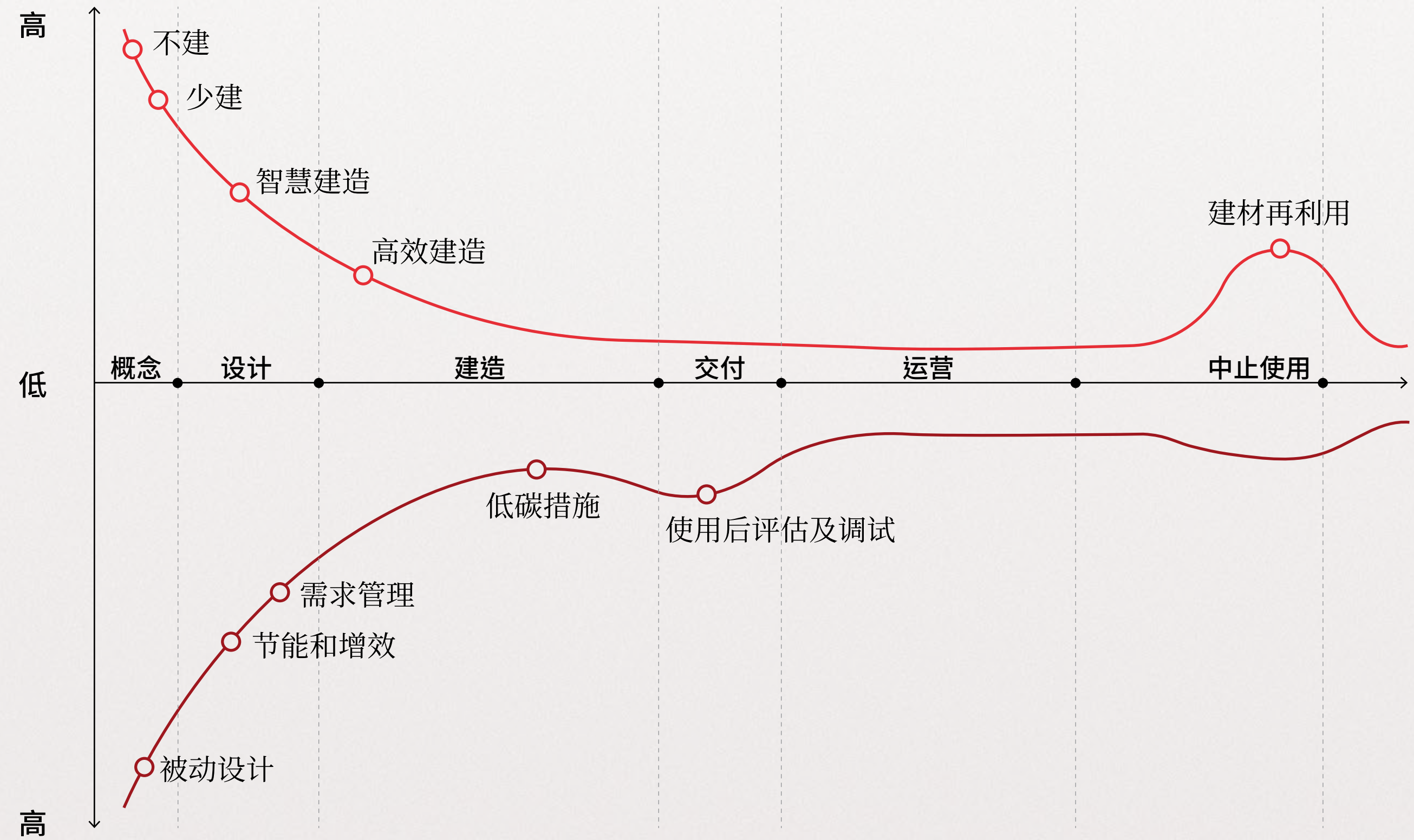
## 减少运营碳排放

运营碳问题必须从减少能源需求开始, 而无法减少的能源需求则需要  
通过选择清洁的产能方式来满足。

## 减少隐含碳排放

降低隐含碳需要结合优化设计、使用低碳材料、采用循环经济理念<sup>7</sup>、促  
进模块化组件化建设等方式来实现。

减少**隐含碳**的潜力



减少**运营碳**的潜力

在建筑单体或系统的整个生命周期内减少隐含碳和运营碳的潜力  
在生命周期的早期存在更多的减排机会<sup>8</sup>



# Restore

## 修复生态系统以发掘并加强除碳能力及碳库容量

气候变化和生物多样性丧失是我们这个时代最紧迫的两个挑战。进入本世纪后,气候变化对生物多样性丧失的影响变得越来越大。通过恢复自然生态系统,我们可以同时减缓和适应气候变化。

在健康的生态系统中,其生物质和土壤可以捕集和储存碳,因此,遏制对自然栖息地的破坏和恢复自然在限制气候变化方面发挥着至关重要的作用。

### 修复陆地生态系统

通过重新造林、泥炭地恢复、土壤碳封存和再生农业来修复陆地生态系统。其中,土壤储存的碳是植物的三倍多<sup>9</sup>,在全球碳循环中起着关键作用。

### 修复海岸线和海洋生态系统

包括红树林、潮汐沼泽和海草草甸。虽然沿海生态系统占海洋总面积的比例不到2%,但它们约占海洋沉积物中固存碳总量的一半<sup>10</sup>。

### 修复城市中的生态系统

包括蓝色和绿色基础设施,以及栖息地恢复,它们可以封存和储存碳,同时储存雨水径流,促进地下水补给并减轻城市热岛效应。







# Remove

## 从大气中捕集并移除碳，将之封存或加以利用

移除大气中的碳对于实现净零排放是必要的，但当前起到的脱碳作用可能有限，因为至今没有一种方法在其整个生命周期中得到充分评估，也没有形成大规模应用。

目前的当务之急是通过投资与研发，评估碳捕集和利用技术的应用性、规模化发展途径，测试成本效益并了解潜在的意外后果<sup>11</sup>。一系列方法正在被开发，每种方法都结合了自然和人为工程过程<sup>12</sup>。

### 提高陆地碳捕集和固碳能力

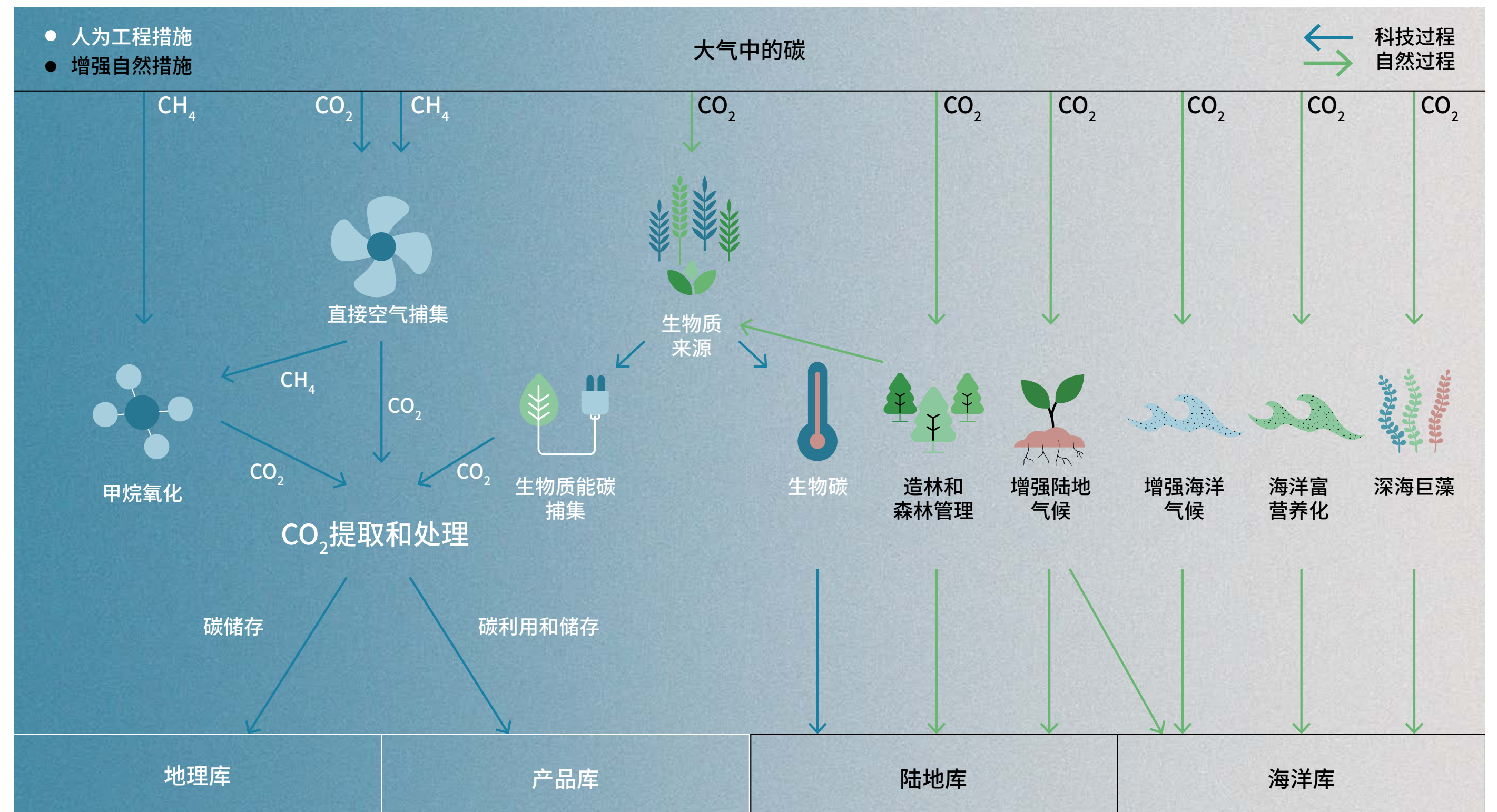
利用土地进行碳捕集和封存需要考虑其与粮食生产和发展的权衡，以及土地利用变化对生态系统、生计和应对气候变化影响的潜在影响。

### 增强海洋碳捕集和固碳能力

海洋吸收了至少四分之一的二氧化碳年排放量<sup>13</sup>，但它们进一步吸收排放的能力有限。同时，需要评估增加海洋碳消耗的方法，解决因改变海洋化学成分和初级生产力而可能产生的负外部性<sup>14</sup>。

### 科技方式进行碳捕集、利用与封存

利用已经或正在开发一系列技术从大气中捕获碳，同时使用或储存碳。这些过程的组合需要在全系统和全生命周期尺度上进行评估，特别是需要考虑到长期封存二氧化碳的风险，包括二氧化碳泄漏到大气中可能导致的气候变化。



### 移除碳的方法

包括从“人为工程”到“增强自然”方法的整个范围

# 中国“碳达峰、碳中和”目标下的3Rs路线图

碳达峰和碳中和策略, 不仅要有技术路线图以解决个别排放源的问题, 同时也需要通过了解各要素的相互关系, 找出各种要素增长和发展的联动性, 制定和实现不同规模的时序及量化目标。2021年中国科学院学部第七届学术年会上, 丁仲礼院士发表题为《中国“碳中和”框架路线图研究》专题报告<sup>15</sup>, 围绕“三端发力”, 设定研究专题。可以看出, 目前(碳达峰之前) Reduce (减少排放) 依然是框架路线图中最重要的环节, 而从碳达峰到碳中和, 则需要尽早在固碳端开展系统研究。

## 发电端

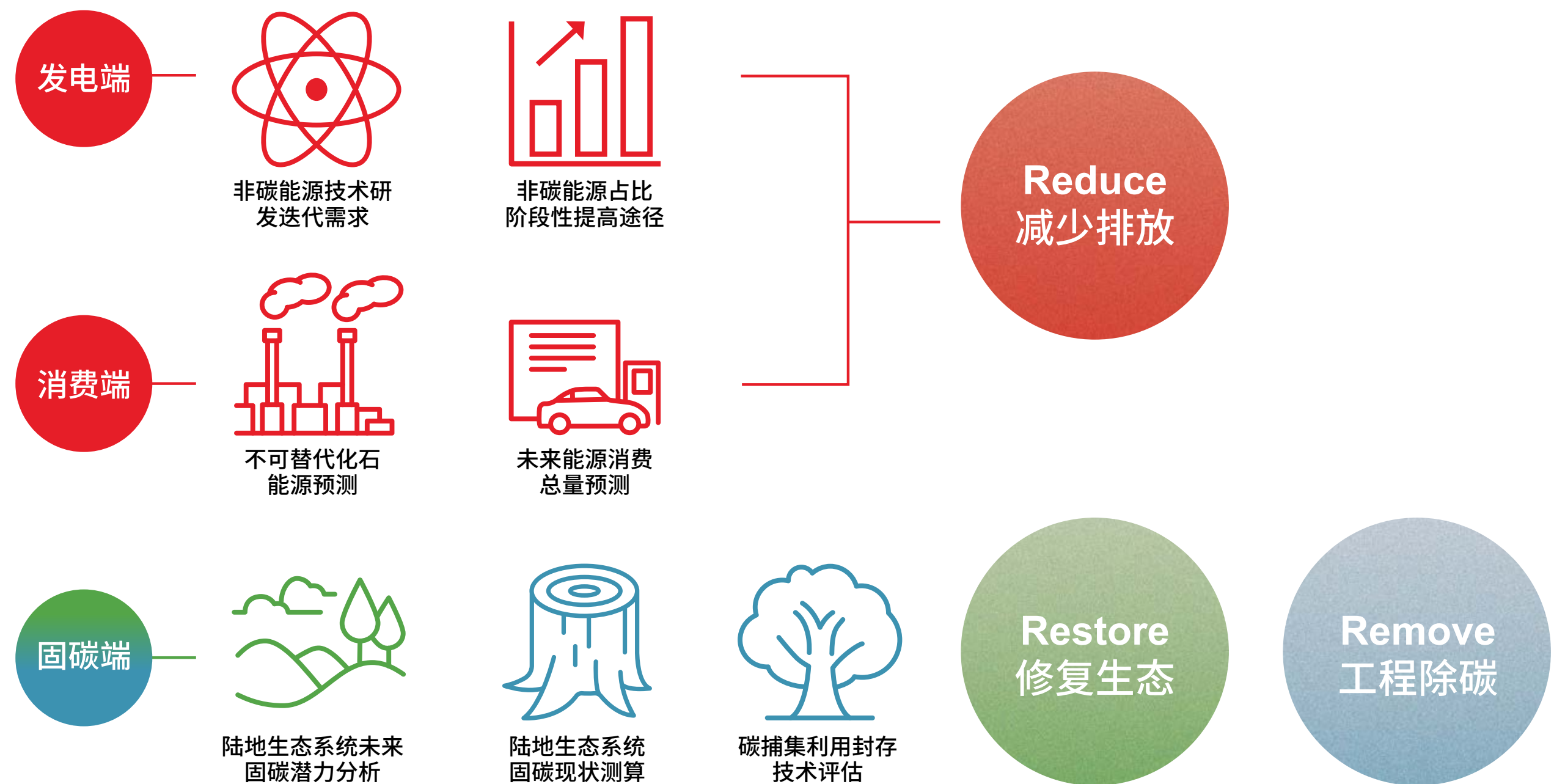
核心在于增加非碳能源和减少火电, 这是“碳中和”路线图中最重要的一条主线, 也是能源结构转型最终要回答一个问题: 我们应该如何走向低碳、甚至无碳的电力系统?

## 消费端

逐渐实现电力替代、氢能替代涉及到居民生活、交通、农业、工业等各领域。2019年我国化石能源利用排放的二氧化碳之中, 发电端排放占了47%, 消费端排放占了53%。发电和消费这两端必须共同“发力”, 才能真正实现降碳。

## 固碳端

即使到了2060年, 我们也不可能完全不排放二氧化碳。所以, 必须要考虑如何把这些不得不排放的二氧化碳固定下来: 包括如何通过生态建设让陆地生态系统增加碳汇, 如何实现工程封存固碳等。这是一个很大的系统工程。



# 中国建筑与环境

## 3Rs技术发展趋势分析

实现碳中和目标的关键是科技创新,未来10年是低碳技术发展的重要机遇期。以往低碳技术推广中,容易忽视净零行动的全生命周期和全系统性。因此,在构建技术评估体系时,进行综合、多维度评估,对低碳技术发展至关重要。

奥雅纳与北京交通大学碳中和科技与战略中心发起联合调研,旨在研究中国建筑与环境净零技术的发展趋势和驱动力。本次调研以“Reduce 减少排放, Restore修复生态, Remove工程除碳(3Rs)”为框架,进行政策报告、学术文献和实践案例的全面调研分析,制定一份中国建筑与环境净零重点措施技术清单。通过问卷调研和访谈,我们邀请建筑与环境各领域专家对技术的成熟度和影响进行评估,并分析驱动和阻碍技术应用推广的关键因素。参与本次调研的81位专家来自建筑行业、建材行业、环保行业等领域。

### 成熟度分析

科技成果的成熟度问题是制约成果转移转化的最重要因素之一。本报告对中国建筑行业减碳技术中32项技术进行技术成熟度评估,有利于综合考察科技成果的技术实用性程度、在技术生命周期中所处的位置,以及实施该成果的工艺流程与所需配套资源的完善程度等。

本次调研中的技术成熟度评估,主要参考相关国家标准《新材料技术成熟度等级划分及定义(GB/T37264-2018)》<sup>16</sup>,该标准将技术成熟度划分为9个等级。我们将其归纳为“未来技术、需求技术、推广技术”三个阶段,对技术成熟度进行评估。

### 未来技术

- 依据基本原理提出了该技术的基本组分、结构,并预测了基本性能及使用性能
- 完成了技术原理验证,明确了关键技术指标和主要使用性能
- 完成了结构和主要性能的实验室测试

### 需求技术

- 技术试验的结构和性能通过实验室验证
- 技术通过了模拟环境测试
- 完成了技术在使用环境中的测试,并通过应用评价

### 推广技术

- 完成了技术使用环境中的全面测试和鉴定,完成了规模生产装备的建设,生产线完整,掌握了产业化制备工艺技术
- 技术经验证满足使用要求,具备稳定生产的能力
- 产品技术性能全部满足使用需求,技术具备稳定的市场

# 3Rs重点技术清单

调研中的技术来源为国际能源机构 (IEA)、国家绿色技术推广目录2020、上海市绿色技术推广目录2022等报告。

我们最终确定了32个重点技术领域。本报告对这些技术的调研结果进行了系统性分析。

## Reduce 减少排放

|                      |                |
|----------------------|----------------|
| A1 装配式建造技术           | A11 智能照明节能技术   |
| A2 建材行业减碳技术          | A12 热电联产技术     |
| A3 低碳零碳钢铁生产技术        | A13 节能暖通和空调技术  |
| A4 低碳零碳水泥生产技术        | A14 热泵技术       |
| A5 绿色运输技术            | A15 清洁供热技术     |
| A6 新能源施工机械技术         | A16 综合能源系统技术   |
| A7 绿色施工技术            | A17 建筑节能智能控制技术 |
| A8 智能建造技术            | A18 高效节能装备技术   |
| A9 可再生能源技术           | A19 电气化技术      |
| A10 建筑围护结构保温隔热性能提升技术 | A20 储能技术       |
|                      | A21 资源循环利用技术   |
|                      | A22 废弃物处理技术    |

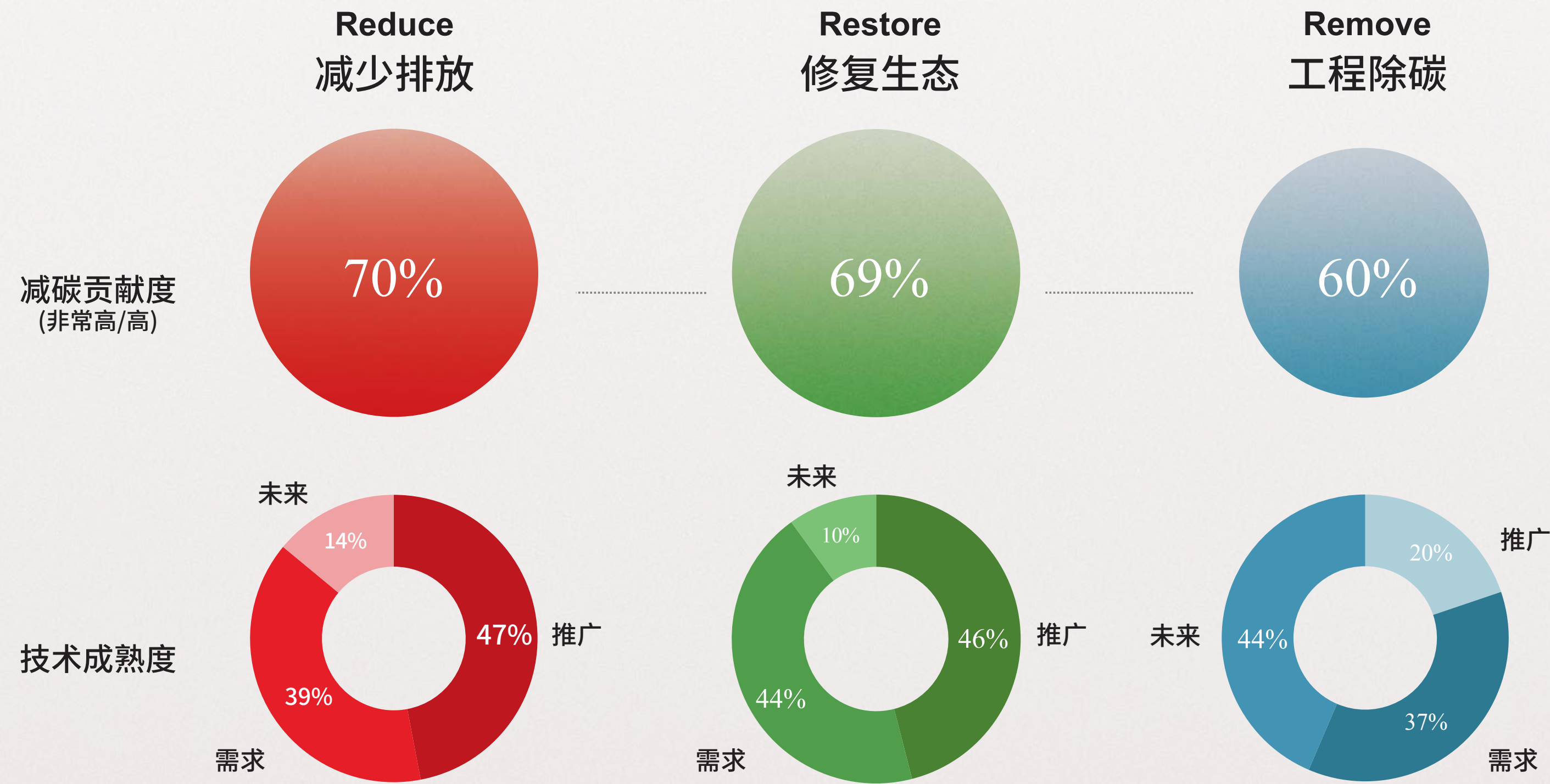
## Restore 修复生态

|               |
|---------------|
| B1 森林生态系统修复技术 |
| B2 草地生态系统修复技术 |
| B3 农田生态系统修复技术 |
| B4 湿地生态系统修复技术 |
| B5 河流生态系统修复技术 |

## Remove 工程除碳

|              |
|--------------|
| C1 碳汇类技术     |
| C2 碳汇核算与监测技术 |
| C3 碳捕获技术     |
| C4 碳储存技术     |
| C5 自然及生物固碳   |

# 3Rs技术的减碳贡献度及技术成熟度分析



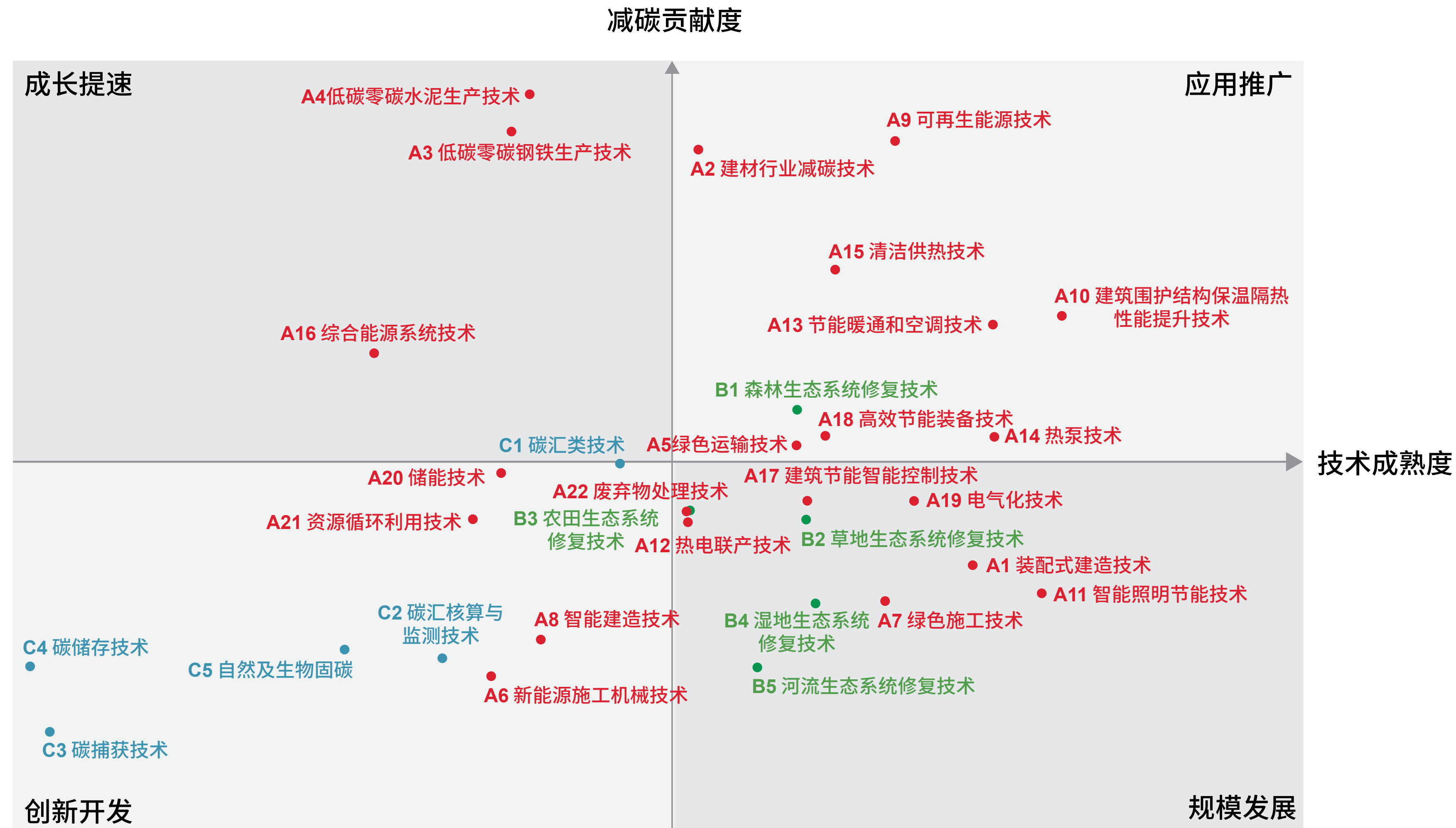
本次调研中, 70%的专家认为Reduce (减少排放) 技术对减碳有高度贡献; 69%的专家认为Restore (修复生态) 技术对减碳有高度贡献; 60%的专家认为Remove (工程除碳) 技术对减碳有高度贡献。同时, 调研结果显示Reduce及Restore相关技术渐趋成熟, 有望加强应用推广的力度; 而Remove相关技术较多处于研究试验阶段, 仍需更多应用实证。

调研要求专家对32项技术的减碳贡献度和技术成熟度分别进行评价。

问题1: 该项技术对减碳的贡献度如何? 1. 非常高 2. 高 3. 一般 4. 低 5. 非常低 6. 难以判断

问题2: 请评价该双碳技术的技术成熟度: 1. 推广技术 2. 需求技术 3. 未来技术 (具体划分标准请见第12页说明)

# 3Rs技术矩阵



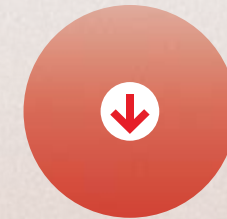
左图为根据本次调研中减碳贡献度及技术成熟度分析, 32项3Rs技术的影响力分布, 技术矩阵凸显出不同的技术需要相应的策略支持以促进技术发展和双碳目标的实现。



# 3Rs重点技术发展驱动因素分析

本次调研邀请专家就市场需求、推广应用、成本下降、政府扶持对具体技术发展的驱动力度进行评价。  
本报告将以四项需求技术为例，具体分析当前显著影响该技术发展的驱动因素和技术发展趋势。

## Reduce 减少排放



### 减少隐含碳排放

- 推广采用低碳建材及建造技术  
建材行业减碳技术

### 减少运营碳排放

- 以高效的能源管理系统促进系统推动减碳  
综合能源系统技术

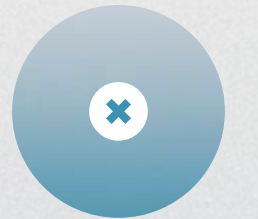
## Restore 修复生态



### 修复城市中的生态系统

- 可配合城市中的蓝绿建设加强河流生态系统修复力度  
河流生态系统修复技术

## Remove 工程除碳



### 提高陆地碳捕集和固碳能力

- 陆地碳汇为当下碳汇类技术中最成熟及最有影响力的途径  
碳汇类技术

Reduce | 减少隐含碳排放

# 建材行业减碳技术

建材行业减碳技术主要是指在生产、使用和回收过程中减少全生命周期碳排放的技术, 包括:

1. 节能生产技术: 提高生产设备效率, 减少能源浪费;
2. 再生材料技术: 使用回收材料, 减少原材料消耗;
3. 生产工艺技术: 优化生产流程, 降低碳排放;
4. 智能化技术: 应用智能化技术监测和控制碳排放。

## 重点技术领域

### 固废制备绿色新型建筑材料技术

新型低碳建筑材料如固废制备装配式建筑绿色轻质墙材, 利用废旧物资作为原料, 经过研发和技术改造, 生产出具有高强度、隔热、保温、环保等特点的装配式墙材, 并通过智能化设备对生产过程进行监控和控制。

技术发展驱动  
因素分析

市场需求性

易被推广应用

成本下降趋势较快

政府政策及  
经费扶持

- 显著\*
- 非显著



\* 基于本次调研中, 专家对驱动技术发展四大因素的相关性评价, 该因素对被评价技术的驱动力度相较其它技术位列前五。

### 推广使用受制于应用场景

### 市场需求及政策支持推动成本下调

绿色建造虽然已取得长足发展, 但是目前仍处在起步阶段, 尚存在绿色建造意识薄弱、激励政策不够完善等问题。再生物料等低碳建材仍需进一步推广, 使市场广泛认知接受, 以市场为导向推动规模化发展。



Reduce | 减少运营碳排放

# 综合能源系统技术

综合能源系统是指一定区域内利用先进的物理信息技术和创新管理模式，整合区域内煤炭、石油、天然气、电能、热能等多种能源，实现多种异质能源子系统之间的协调规划、优化运行、协同管理、交互响应和互补互济。该系统是在满足系统内多元化用能需求的同时，有效提升能源利用效率，促进能源可持续发展的新型一体化能源系统。

## 重点技术领域

### 智慧能源管理系统技术

智慧能源系统是一种以冷热量平衡为核心，整合多种可再生能源，运用冷热回收、蓄能、热平衡、智能控制等新技术对各种能量流进行智能平衡控制，达到能源的循环往复利用，一体化满足多种需求功能的系统设备。

技术发展驱动因素分析

市场需求性

易被推广应用

成本下降趋势较快

政府政策及经费扶持

- 显著\*
- 非显著



\* 基于本次调研中，专家对驱动技术发展四大因素的相关性评价，该因素对被评价技术的驱动力度相较其它技术位列前五。

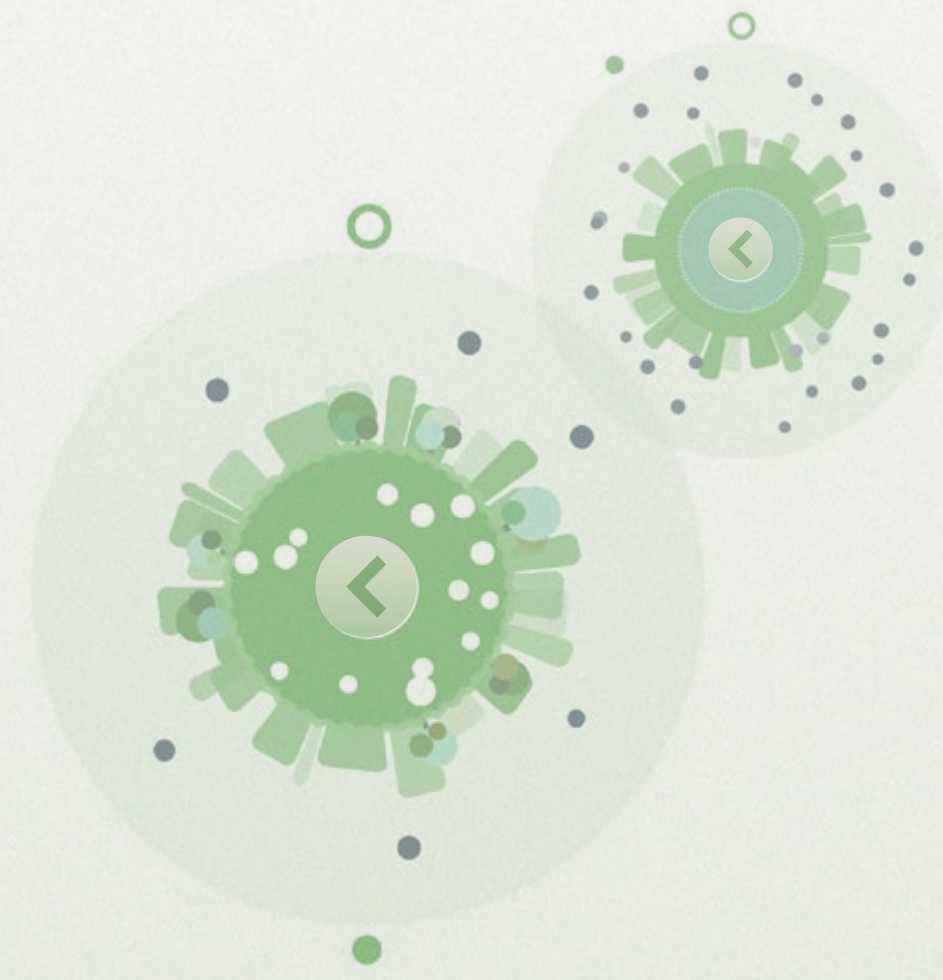
### 运行及管理环境规范出台促进加强市场需求 综合能源系统因长产业链特征，受多方驱动

能源价格及不稳定性加速市场的接受程度，多类相关技术也不断突破，成本有望进一步下调。通过嫁接数字技术重塑价值链和产业链，在设计前期和运营期间通过大数据结合人工智能、智慧管理等方式，可以推动更积极、更有效的建筑减碳。

Restore | 修复城市中的生态系统

# 河流生态系统修复技术

通过河流工程修复技术手段, 改善河道河岸带连通性, 丰富河流底栖生境多样性, 减少河流碳排放的一系列技术。绿色基础设施在管理洪水风险和改善水质方面具有优势, 基于自然的绿色基础设施解决方案, 也可以在运行中封存碳并减少能源使用。



重点技术领域

基于分散面源污染梯级阻控的河岸带重建与生态修复技术

利用河岸带改造实现原位处理, 能有效解决城市黑臭河道的点源氨氮污染和径流面源污染问题。该技术适用于污染负荷高、自净能力差、黑臭严重的城市河道。



\* 基于本次调研中, 专家对驱动技术发展四大因素的相关性评价, 该因素对被评价技术的驱动力度相较其它技术位列前五。

集成城市支流河入浑河干流河口区多塘与湿地耦合水质保障与生态修复技术

针对河口区域生态空间条件, 优化设计塘-湿地生态处理技术系统, 利用不同类型塘和湿地对污染物的去除能力优势, 研发类虹吸流人工湿地、循环流人工湿地及水平潜流人工湿地等生态恢复工程建设。



河流脆弱生境生物多样性保护关键技术

通过工程技术手段, 提高底质异质性、改善河道河岸带连通性、丰富河流底栖生境多样性, 进而提高河流生境生物多样性。



工程修复技术发展主要由政策带动  
提升宜居性和增进健康福祉, 推动亲自然方法在城市规划设计中运用  
城市生态修复不仅能带来巨大的环境效益, 还将带来显著的社会与经济效益。

# Remove | 增强陆地碳汇

## 碳汇类技术

开展耕作制度变革及耕地质量提升行动, 实施黑土、黄土和红壤的保护工程, 提升土壤碳库及其稳定性。



### 重点技术领域

#### 农作物秸秆热压制板技术

以农作物秸秆为原料, 以异氰酸脂(MDI)为胶粘剂, 将原料破碎、施胶并进行铺装, 在高温高压条件下压制成板材。



\* 基于本次调研中, 专家对驱动技术发展四大因素的相关性评价, 该因素对被评价技术的驱动力度相较其它技术位列前五。

#### 竹林固碳减排综合经营技术

通过综合采用竹林养分调控技术、竹林结构优化技术、竹林土壤稳碳减排技术和竹产品延缓释放技术等, 实现竹林低碳高效经营。



#### 油料植物能源化利用过程的二氧化碳减排技术

选育高产、高含油、高光效、高抗逆和土地适应性强的良种推广种植, 实现储碳功能。采用生物质气化、液化、成型固化及热电联产技术等, 替代部分燃煤, 实现减排。



### 政策补助带动成本下调 需更多应用场景以增加市场需求

目前碳捕集与封存规模不大的原因之一是缺乏有效的二氧化碳利用市场来拉动。通过发展二氧化碳的利用技术, 使其成为真正的资源, 形成效益, 可以促进碳捕集与封存的推广。

# 3Rs协同发展未来情景

减少排放或移除大气中碳的方法需要产生根本性效果，并且不得导致未来排放量再增加；不得通过增加另一个部门的排放量，来减少一个部门或地区的排放量。

**Reduce 减少排放**  
集中减少现时能耗及相关的碳排放，以对问题的根源产生直接影响，也能直观反应在减排账单中。在生命周期中，部分措施或互为影响，如减少建材中的隐含碳，会涉及生产制作的能耗及效率。

**Restore 修复生态**  
针对自然系统中的碳循环及生态服务，生态修复可以，且必须在当下扩大规模，以便大自然在十年内恢复其吸收碳的潜力，为未来做准备，减少气候剧变将带来的影响。

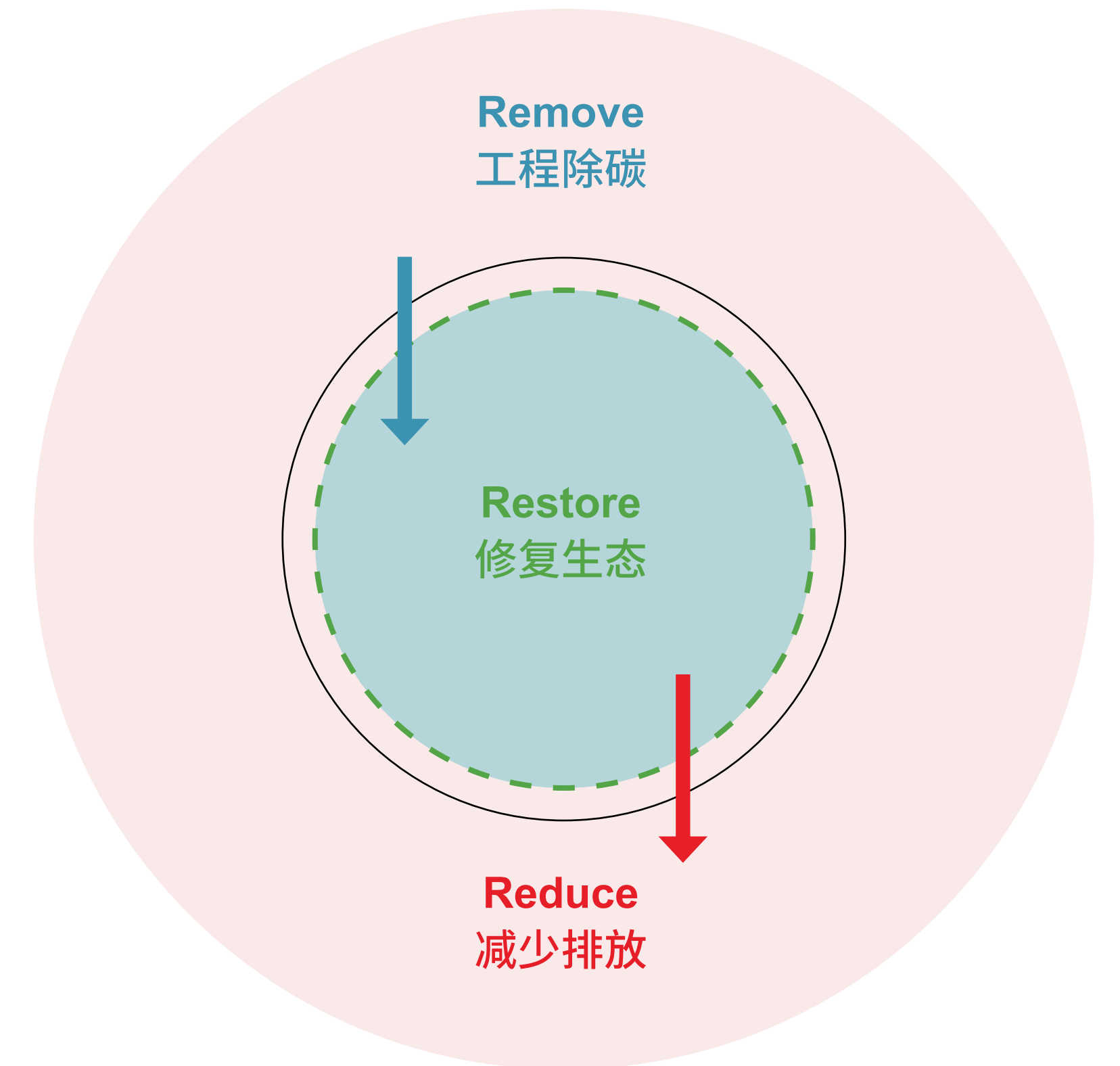
**Remove 工程除碳**  
移除已排放在大气中的碳，减少大气中的碳浓度，处理过去积累的碳排放影响及脱碳过程中难以完全脱碳的运营。必须仔细考虑移除的技术手段，并与“减少排放”和“修复生态”同时开发，部署最合适的方法，并在十年内取得收效。

## 可能的未来情景

建筑用能淘汰煤炭、天然气等化石能源，更广泛地应用洁净和可再生能源，实现全面电气化，汇入智慧管理，可最大限度减少运营能耗。采用光储直柔技术的建筑，可以实现24小时按照可再生能源发电规律或电网调节指令进行连续调节。充分利用核电、工业和火电余热，建立余热共享系统，经过热泵变换，满足中国北方建筑供热需求，从而实现零碳供热。减碳力度更多集中在建材的生产过程中，转向再生利用，进行更新设计而不是重建。将更多在地资源及可再生的生物质材料用于建筑，建造过程亦形成标准化及工业化。

自然生态融入城市及建筑设计，蓝绿建设普遍化，生态海岸比例增加，旧有建筑及材料被活化成生态建设的一环，如人工珊瑚礁鱼礁等。在城市中建设有生态走廊，连接生活环境与自然保护地，亦有持续发展的物料供应规划，如为植林作木构建筑的修缮准备。

碳捕集技术开始在固定的点源排放上应用，包括电力及钢材等相关重工业，海边出现微藻固碳及封存的实验设施。再利用技术在更多场景进行试验应用，尤其是结合在建材之中，包括如矿化，及通过电化学转化生产甲烷、甲醇和一氧化碳等化学原材料。碳捕捉技术也试验应用于都市中，走向小型化。



# 加速净零技术应用场景创新落地



## 持续吸收碳的材料及建筑

碳捕集及储存的建筑

在可见的未来，3Rs技术将融入各类已建及新建的项目，亦将触及生活的各个层面，牵动整个城市：为包括能源结构、交通出行、及居住模式等带来影响。建筑在设计及运营阶段都要考虑净零理念。科技的应用推广，亦需考虑社会需求及政策环境。因此，不能仅把碳达峰、碳中和理解为完成数字指标，它更是一种发展模式，一种生活方式，一种对环境责任、社会责任的担当，贯穿在人民生活的方方面面。

成功案例之一——碳普惠<sup>17</sup>，它将生活各环节与节能减碳相结合，我们可以看到越来越多的产品上已提供碳标签。“碳”成为另



## 再生建筑

模仿自然的生物技术，可净化空气的建筑表层，水净化的结构

一种能力指标，从个人到企业，以至国家、城市内的种种经济行为，都可以进行碳减排量化。

减碳措施将打破城市建筑环境与温室气体排放的必然关联。若把 Restore（修复生态）及 Remove（工程除碳）策略和措施纳入城市规划及设计中，可以在不同建筑环境尺度上探索并实践可能的创新解决方案。

新的应用场景和领域包括：与当地气候相适应、形式和品种多样的持续吸收碳的材料及建筑，以及再生建筑、基于自然的解决方案、无废循环性、经济可负担性、集群脱碳性等。



## 基于自然的解决方案 (NbS)

依靠自然的力量和基于生态系统的设计

其他未来值得进一步关注的技术包括：

光催化制太阳能燃料，人工光合作用，及生物质能热电联供等。

创新应用场景和案例

## Reduce 减少排放 零碳建筑

### 实践案例：香港零碳天地

香港建造业议会 (CIC) 的“零碳天地” (ZCB) 直接连通至当地电网，利用光伏板和生物柴油推动的三联供系统，现场生产可再生能源，以抵消每年运营所消耗的能源。剩余能源输送至公共电网，以抵消建造过程及建筑材料本身在制造和运输过程中所使用的能源。

“零碳天地”大规模使用由厨余用油炼制的生物柴油发电，这在香港尚属首次。转废为能的技术可同时解决废料处理和能源生产两个问题。

“零碳天地”还拥有香港首个都市原生林地，其中包括40多个品种，220棵原生树木以及多种灌木。林地营造了一个高质量的生态系统，为环境和人们的生活带来裨益<sup>18</sup>。



## 创新应用场景和案例

# Reduce 减少排放



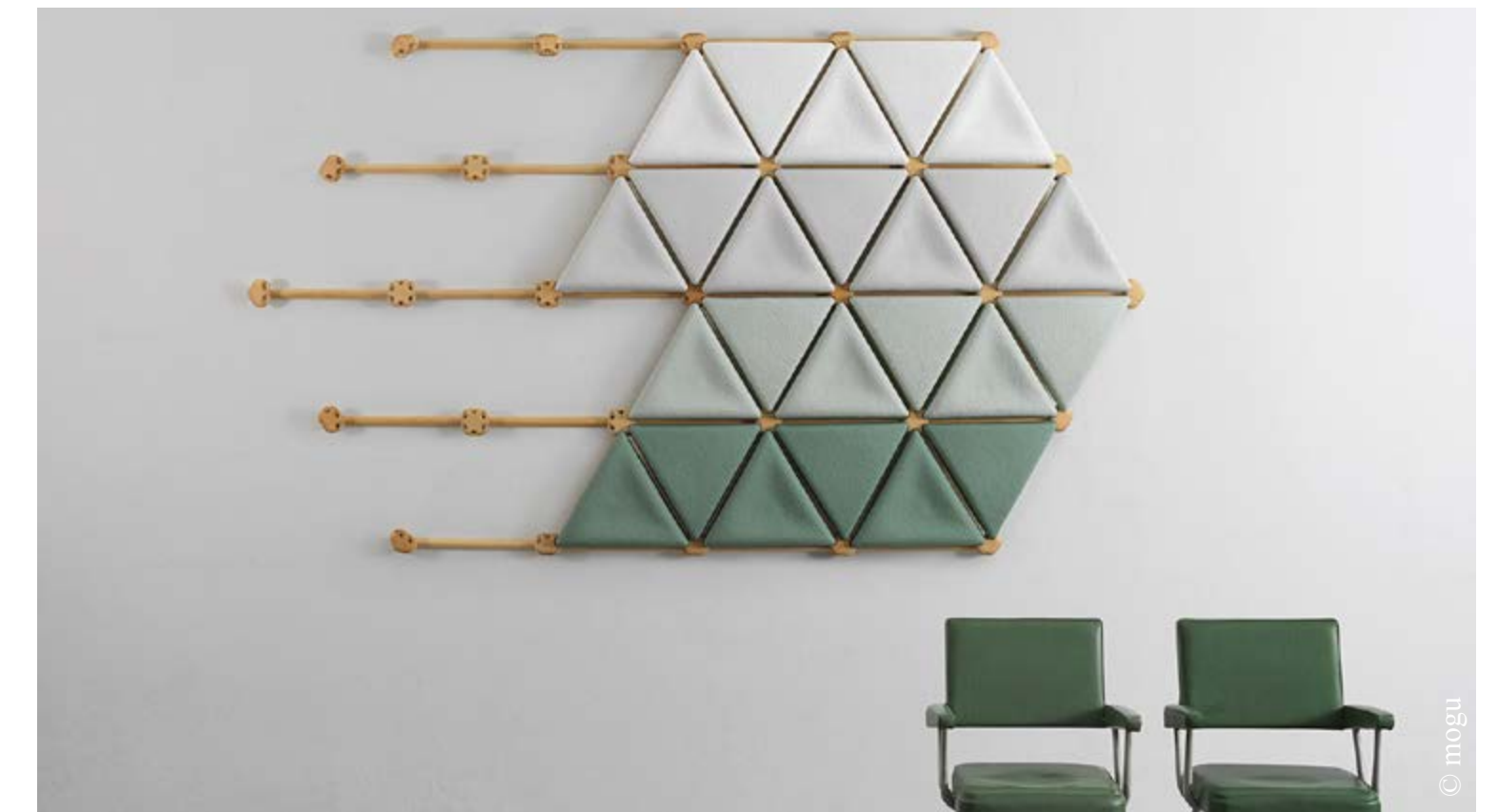
### 实践案例: Neuron智慧能源管理系统

Neuron (奥智元) 利用智慧能源管理系统技术及数字孪生技术进行建筑能耗预测和监测, 提供数据整合、处理和中央数据池的大数据平台。它抓取整个建筑生态系统排放的完整记录, 包括直接和间接碳排放源, 如制冷系统到公司车辆, 采购能源、水、材料, 和废弃物循环。这些Neuron算法提供的分析, 帮助企业设立目标及减排执行计划, 优化资产管理。



### 实践案例: 低碳材料

日本阿波银行大楼内部结构利用木材混凝土复合板, 以胶合层压木板及混凝土复合而成, 减轻用材重量。木质材料提供美观的天花设计, 模块化亦加快施工速度, 减少建筑隐含碳排放。



### 实践案例: 再生材料

奥雅纳与MOGU合作开发FORESTA模块化吸音板。吸音板由真菌菌丝体和升级再造纺织材料的独特混合物制成, 柔软表面和多孔结构使其具有良好吸音性能, 模块亦便于拆卸和组装。这些原材料在其生命周期结束时可以重复使用或堆肥, 从而帮助企业从“获取-制造-浪费”系统转向循环经济模式。

创新应用场景和案例

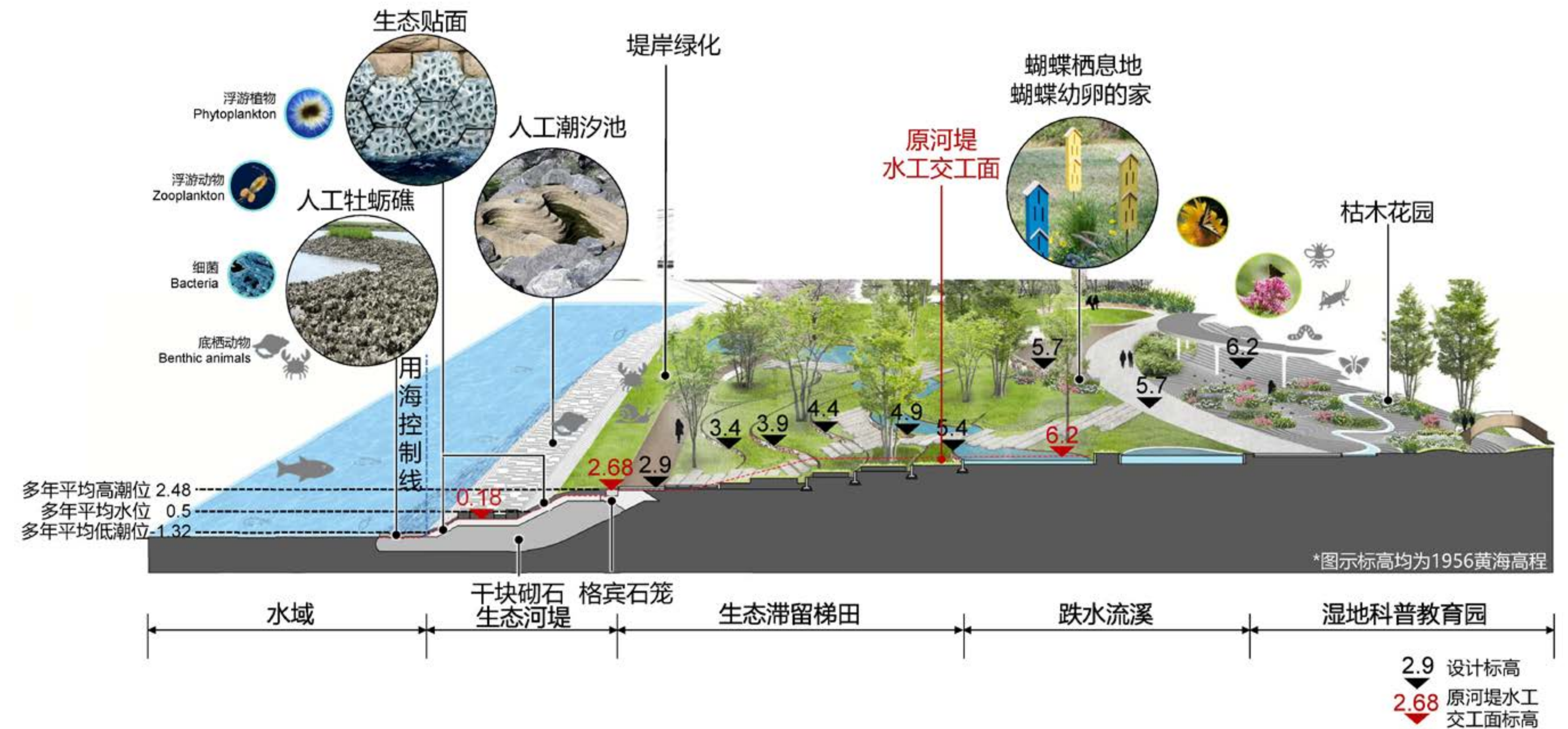
# Restore 修复生态 海洋新城



## 实践案例: 深圳海洋新兴产业基地生态修复工程

海岸带生态系统是山水林田湖草海生命共同体的重要组成部分。深圳市海洋新兴产业基地生态修复工程项目应用“基于自然的解决方案”，通过一系列滨水生态工具和公共活动空间统筹设计，打造会呼吸的海堤、自然生长的湿地和弹性多元的绿地景观，塑造健康韧性的海陆生态本底，实现人、海、城的自然共生<sup>19</sup>。

海洋生态修复工程有利于改善生物栖息生境，提升海岸带水生物多样性，有助于构建完整的滨海湿地生态系统。修复和保育后的滨海湿地生态系统将大大增强城市碳汇能力。





## 创新应用场景和案例

# Restore 修复生态



### 实践案例：香港东涌河畔公园

东涌河被视为香港最后一条大型完整天然河流，具有丰富的天然生态环境。香港特区政府未来会修复超过600米已被“渠道化”的东涌河，恢复其天然河道面貌，并计划将其中415米的东涌河段发展为河畔公园<sup>20</sup>。公园将划分为三部分：静态康乐及保育区、动态康乐区，以及河道活化区。



### 实践案例：肯尼亚加济湾红树林修复

肯尼亚加济湾“Mikoko Pamoja”是一个由社区主导的生态保护和修复项目，通过社区参与和受益为可持续红树林管理提供长期激励。

由于对建筑材料的需求，加齐湾红树林生态系统已经严重退化。这种过度开发破坏了周围生态系统的稳定，包括鱼类资源减少、海岸侵蚀和对极端天气抵御能力的下降。

Mikoko Pamoja社区组织通过增加森林资源收入来激励管理的改善，包括碳信用额、养蜂和生态旅游。保守估计，该行动实现的避免退化和新种植的碳效益为2500吨二氧化碳/年<sup>21</sup>。

## 创新应用场景和案例

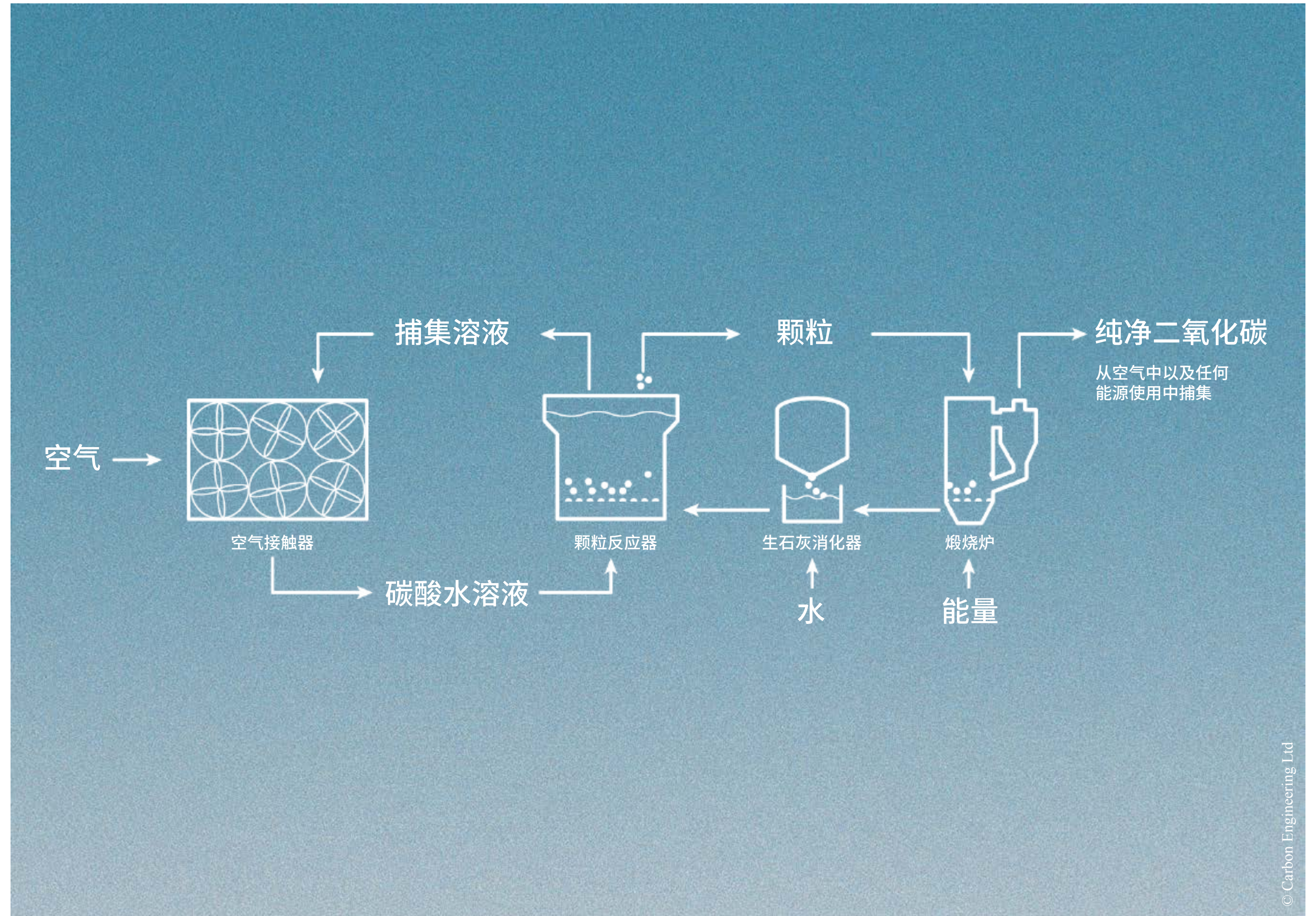
# Remove 工程除碳 除碳工厂

### 实践案例: 加拿大碳工程直接空气捕集工厂

加拿大碳工程公司 (Carbon Engineering) 开发出一种从空气中直接捕集二氧化碳 (DAC) 的方法, 并以纯净的压缩形式输送二氧化碳, 然后可以将其储存在地下或用于合成产品。

一个巨大的风扇将空气吸入捕集装置, 在大量空气通过接触器的过程中, 涂在扇叶表面的吸附剂会经过化学反应吸附二氧化碳, 二氧化碳与氢氧化物溶液反应产生碳酸盐, 随后, 碳酸水溶液中沉淀出的碳酸钙物质会在干燥后, 通过高温加热被分解为二氧化碳及氧化钙, 由此获得纯净的二氧化碳气体。碳工程公司计划建造世界最大的DAC工厂。若按计划进行, 当2024年设备投入使用时, 该工厂预计每年可捕获100万吨二氧化碳<sup>22</sup>。

DAC设施具有高度灵活性, 由此可以构建模块、分布式的除碳工厂, 降低基础设施项目的技术放大风险, 并且可以通过灵活选址降低运输成本。



# 共同行动, 塑造可持续未来

中国建筑业实现净零需要政府、企业和社会各方共同努力, 加强合作与协调, 推进技术研发和产业升级, 打造绿色低碳的建筑和城市新生态, 合力为推动全球低碳发展、应对气候变化做出积极贡献。

包括政策、资金支持, 技术创新和教育宣传等, 一系列其他因素也可促进实现减排潜力:

**综合考虑环境、经济、社会效益:** 净零技术的创新与实施, 离不开法律法规、政府政策、企业响应和公众参与等多方面、多层次机制体制的变革与完善。政府可出台政策和标准, 企业可开展技术研发和应用, 公众则可增强意识和支持。同时, 建筑环境设计、施工和运行技术的研发都要注重“三尊重”原则, 即尊重自然环境、尊重本地传统文化, 和尊重普通民众的长远利益。

**数据共享与治理:** 信息共享是推动减排潜力实现的重要手段, 建筑环境碳排放计算和计量工作的重要性会愈加凸显。奥雅纳在2022年举行的第27届联合国气候变化大会 (COP27) 上提出建议, 并发布数据平台ZERO, 使用统一的方法和开源的数据共享, 对设计中的建筑项目进行全生命周期的碳排放评估, 帮助建筑业形成更有效的减碳策略<sup>23</sup>。

**跨领域协作创新:** 减少碳排放需要跨专业、跨学科干预, 例如建筑、能源、交通、农业、环保等领域需要协同合作。目前, 尚未成熟的双碳关键技术, 贯穿建筑全生命周期, 凸显了各领域共同努力, 以实现技术突破和应用的必要性和紧迫性。



使用3Rs路线图可帮助您发展和加速有效的脱碳行动, 全面评估您的战略、计划和政策。

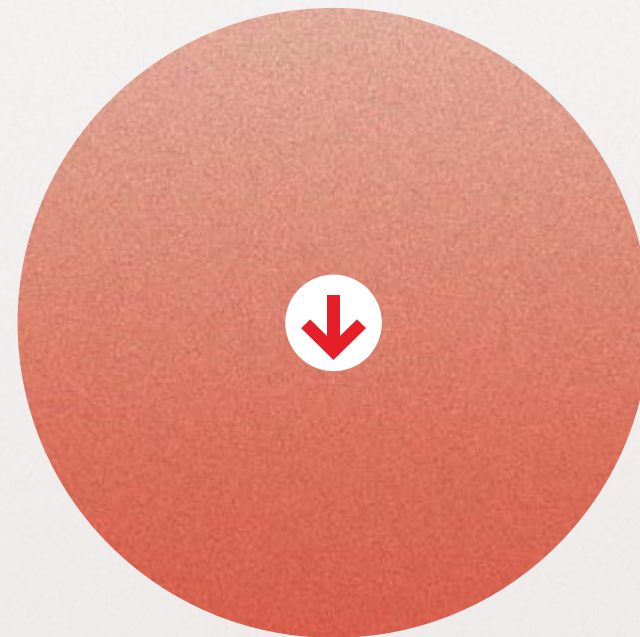
我们的专家可以帮助您在Reduce (减少排放), Restore (修复生态) 和Remove (工程除碳) 方面明确所有可行的措施, 形成科学的、可执行的策略和行动方案, 共同实现可持续低碳发展目标。

### 影响、加速, 最大化行动效果

您的组织领导者和利益相关者是否了解应对挑战的规模和要采取的行动?

您了解可用或潜在的解决方案和工具吗?

Reduce  
减少排放



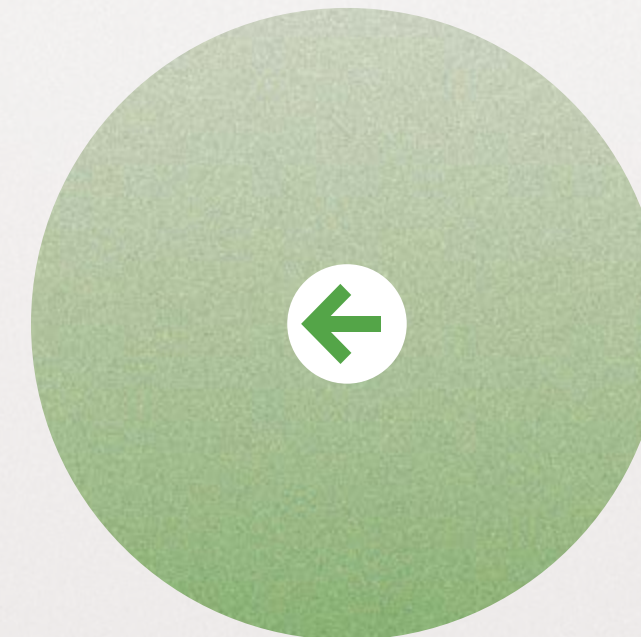
您是否对建设的必要性做了全面的评估? 您能否以较少的隐含碳和运营碳实现预期结果?

在考虑碳抵消之前, 您是否最大限度, 且大幅快速地减少碳排放?

### 考虑全系统和全生命周期

您的项目是否会尽快对大气含碳量产生净零或气候正效益影响?

Restore  
修复生态



您是否最大限度地利用了机会, 以修复生态系统?

您的项目会对自然碳汇产生正效益影响吗?

### 协作开发并制定解决方案

您是否参与了学术界和产业界合作, 以最大限度地提高项目的贡献?

您是否参与了跨技能、部门和行业协作, 以最大限度地发挥您的积极影响?

Remove  
工程除碳



您准备投入资金或技能, 支持碳移除技术的开发吗?

您能否将试验技术整合到您的流程或解决方案中?

## 参考文献

1. UNEP (2020) 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. 文件链接: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR\\_ES.pdf?sequence=3](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR_ES.pdf?sequence=3)
2. IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. 文件链接: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
3. UNFCCC (2021) Glasgow Climate Pact. 文章链接: <https://unfccc.int/documents/460954>
4. IPCC (2022) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. 文件链接: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
5. 习近平:中国将构建起碳达峰、碳中和“1+N”政策体系。文章链接: [http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/12/content\\_5642050.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/12/content_5642050.htm)
6. Corfe, C. (2013) Implementing Lean in construction: Lean and sustainability. London, CIRIA. 文件链接: <https://leanconstruction.org.uk/wp-content/uploads/2018/09/C726-Lean-sustainability-hi.pdf>
7. Arup and Ellen Macarthur Foundation (2022) Circular Buildings Toolkit. 文章链接: <https://ce-toolkit.dhub.arup.com/framework>
8. HM Treasury (2013) Infrastructure Carbon Review. 文件链接: <https://www.gov.uk/government/publications/infrastructure-carbon-review>
9. Smith, P. et al. (2020) How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. In: Global Change Biology, 26(1), 219-241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
10. IUCN (2017) Blue carbon. 文章链接: <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/blue-carbon>
11. IPCC (2018) Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 文章链接: <https://www.ipcc.ch/sr15>
12. IPCC (2022) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. 文件链接: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
13. Watson, A.J., Schuster, U., Shutler, J.D. et al. (2020) Revised estimates of ocean-atmosphere CO<sub>2</sub> flux are consistent with ocean carbon inventory. In: Nature Communications, 11, 4422. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>
14. IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. 文章链接: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)
15. 中科院公布“碳中和”框架路线图研究进展。文章链接: [https://www.cas.cn/zt/hyzt/ysdh20th/cmsm/202105/t20210530\\_4790470.shtml](https://www.cas.cn/zt/hyzt/ysdh20th/cmsm/202105/t20210530_4790470.shtml)
16. 《新材料技术成熟度等级划分及定义(GB/T 37264-2018)》, <https://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057497/n3057502/c5963530/part/5963535.pdf>
17. 《中国碳普惠发展与实践案例研究报告》, 文件下载链接: <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-comms-20230227-zh>
18. Arup (2012) Hong Kong's first Zero Carbon Building. 文章链接: <https://www.arup.com/projects/cic-zcb>
19. 深圳市海洋发展规划(2022-2035年), 文件链接: <http://www.sz.gov.cn/attachment/1/1197/1197152/10151687.pdf>
20. 渠务署可持续发展报告 2015-2016, 文件链接: [https://www.dsd.gov.hk/Documents/SustainabilityReports/1516/sc/text/environmental\\_management.html](https://www.dsd.gov.hk/Documents/SustainabilityReports/1516/sc/text/environmental_management.html)
21. Plan Vivo (2021) Mikoko Pamoja – Kenya. 文章链接: <https://www.planvivo.org/mikoko-pamoja>
22. Carbon Engineering (2022) Direct Air Capture Technology. 文章链接: <https://carbonengineering.com/our-technology/>
23. 奥雅纳发布全生命周期碳排放数据平台“Zero”, 文章链接: <https://www.prnasia.com/story/385903-1.shtml>

## 中文版作者

邓焯楠  
谢丹  
陈珮婷  
王静懿

## Reduce, Restore, Remove 奥雅纳全球报告作者

Lola Bushnell  
Owen Jones

## 专家团队

徐润昌  
Yannick Lenormand  
刘鹏  
卢诺宁  
张志强  
张帆  
赵志勇  
文惠珍  
金欣

北京交通大学  
王元丰教授团队:  
郭晓辉, 张渤群, 王丽苹,  
张倩倩, 孙雪兵

## 编辑和设计

林月  
Bird Wong  
叶铂莲

## 更多咨询, 请电邮垂询

**谢丹**  
奥雅纳高级前瞻咨询顾问  
e: [eva-d.xie@arup.com](mailto:eva-d.xie@arup.com)

**徐润昌**  
奥雅纳创研院东亚区总监  
e: [ricky.tsui@arup.com](mailto:ricky.tsui@arup.com)

**贺雪梅**  
奥雅纳创研院中国区经理  
e: [xue-mei.he@arup.com](mailto:xue-mei.he@arup.com)

## 关于奥雅纳

奥雅纳致力于可持续发展, 由来自世界各地的设计师、顾问和专家组成, 项目遍布全球。我们以人为本, 追求卓越, 与客户和伙伴携手共建, 以非凡创意、先进技术和严谨务实塑造更美好的世界。

## 关于奥雅纳创研院

奥雅纳创研院通过前瞻洞察、研究开发、创新以及知识和信息管理, 推动公司的卓越发展。奥雅纳创研院的前瞻和研究团队助力各类企业理解趋势, 探索新想法并从根本上重新思考各个产业的未来, 并反馈到我们对建筑环境的设计之中, 与客户共同塑造更成功、更可持续的未来。

## 出品人