



自然资源保护协会  
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

# 混凝土与水泥制品的减碳 路径与策略研究 执行摘要

---

2023年8月

中建研科技股份有限公司

自然资源保护协会

## 中建研科技股份有限公司

中建研科技股份有限公司成立于 2001 年，隶属于国务院国资委管理的中国建筑科学研究院有限公司（以下简称“中国建研院”），是由中国建研院结构所、抗震所、软件所、建材所改制而成的高新技术企业，以建筑业新技术、新产品研发与应用为主业，业务领域涵盖建筑软件与信息化、建筑设计与工程咨询、建筑改造与城市更新、建筑工业化与建材产品四大业务板块，并提供多种全过程解决方案。

## 自然资源保护协会（NRDC）

自然资源保护协会（NRDC）是一家国际公益环保组织，成立于 1970 年。NRDC 拥有 700 多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为主力。NRDC 自上个世纪九十年代中起在中国开展环保工作，中国项目现有成员 40 多名。NRDC 主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。NRDC 在北京市公安局注册并设立北京代表处，业务主管部门为国家林业和草原局。请访问网站了解更多详情 <http://www.nrdc.cn/>

## 课题编写人员：

<b>曹力强</b>	研究员	中建研科技股份有限公司
<b>叶武平</b>	高级工程师	中建研科技股份有限公司
<b>王小燕</b>	工程师	中建研科技股份有限公司
<b>申和庆</b>	工程师	中建研科技股份有限公司
<b>赵喜龙</b>	城市项目主管 / 高级工程师	自然资源保护协会
<b>潘文明</b>	城市项目主任	自然资源保护协会
<b>钱京京</b>	高级战略顾问	自然资源保护协会

Cover Image by Anna on Pixabay.

© Natural Resources Defense Council 2023

所使用的方正字体由方正电子免费公益授权

根据中国水泥协会统计数据，2021年全国水泥行业碳排放总量约13.45亿吨，占全国碳排放总量的13%左右，是仅次于电力行业（40%）和钢铁行业（14%）的第三大碳排放行业。水泥行业要实现碳达峰碳中和，不仅需要降低水泥生产单位碳排放量，更重要的是从水泥的应用端出发，向上驱动水泥生产端减量生产。

混凝土是水泥产品的主要应用端。水泥作为胶凝材料，配以碎砂石为骨料，与水按一定比例混合搅拌成混凝土，大量和广泛用于建筑物和基础设施建设。根据中国混凝土与水泥制品协会的数据，2022年国内商品混凝土产量达32.9亿立方米，预制混凝土构件PC（墙板、楼板、楼梯等）约2亿立方米。商品混凝土、预制混凝土构件等制品每年至少消纳70%的水泥产量，其中2022年商品混凝土大约排放9亿吨二氧化碳（包括材料隐含碳）。因此，研究混凝土自身的减碳措施以及混凝土减量化使用，可形成有效的减碳动力，促进水泥生产及应用产业链协同减碳。

本报告从混凝土应用端出发，预测了商品混凝土未来市场需求趋势，并以混凝土产品本身为减碳研究对象，以减少水泥使用为目标，提出了混凝土与水泥制品低碳发展的技术路径，对不同技术的减碳潜力进行了预测，并提出了水泥行业应用端低碳发展的政策建议。

根据中国水泥网水泥研究院分析，商品混凝土产量年均复合增长率将达到-3%左右。考虑到我国城镇化的发展阶段，随着建设需求的逐渐回落，行业逐步进入下行周期（见图1），2030年商品混凝土产量预计下降至24亿立方米，2060年预计为16亿立方米。依据GB/T 51366-2019《建筑碳排放计算标准》附录D中C30混凝土碳排放因子 $295\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$ 计算，通过产量缩减，到2030年二氧化碳排放可较2022年减少约1.95亿吨，2060年可减少约4.3亿吨（以下均为与2022年混凝土碳排放数据比较）。

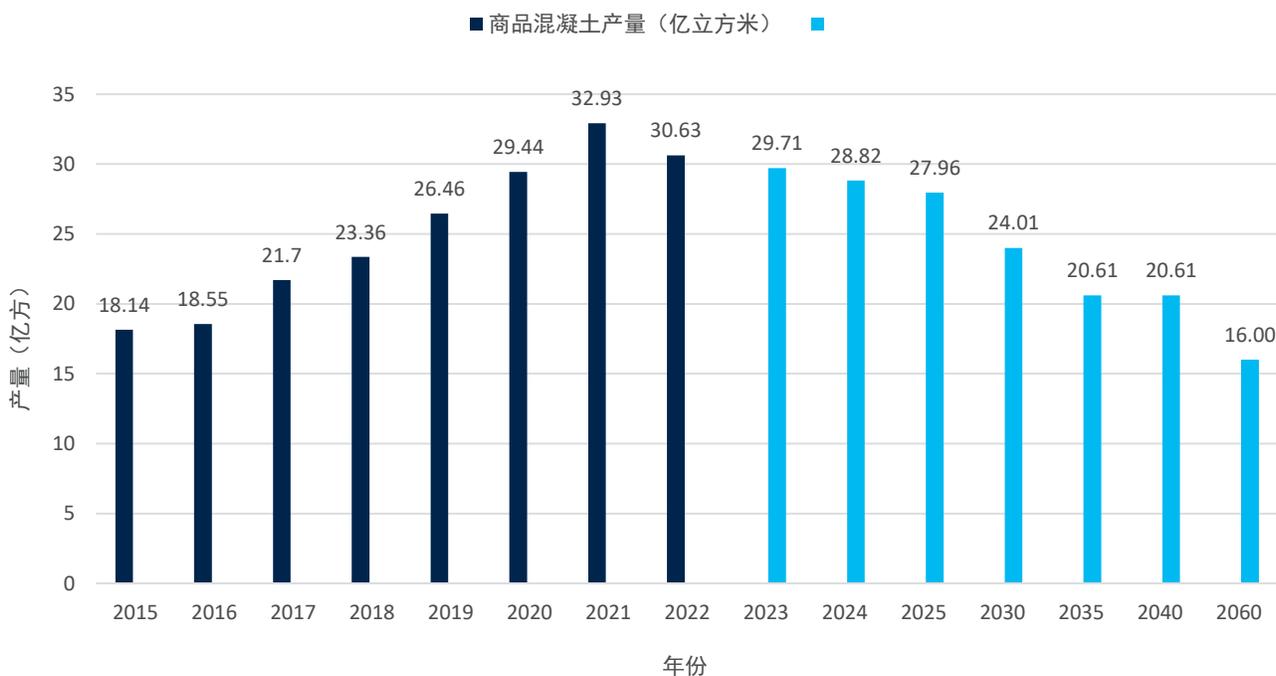


图1 商品混凝土产量预测（2022年之前为发改委公布数据，2022年之后为预测值）

原材料隐含碳排放是混凝土碳排放的最主要组成部分。根据北京地区搅拌站混凝土组成，计算碳排放得出，在混凝土碳排放构成中，原材料隐含碳占87%以上，生产占1%，运输占10%以上。混凝土生产与运输环节所占混凝土碳排放比重较小。PC构件生产碳排放强度

在 $300\sim 400\text{kg}/\text{m}^3$ 左右，原材料隐含碳占80%以上、原材料运输碳排放占1%~10%之间、PC构件的生产阶段占10%左右、PC构件的运输占比较小，6%以下（见图2）。

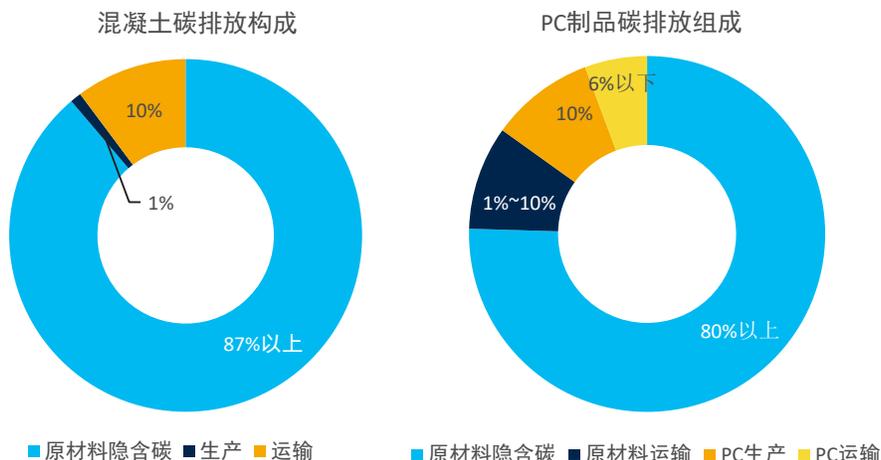


图 2 混凝土与 PC 构件的碳排放组成

本报告根据混凝土产品不同碳排放源，提出相应的减碳技术路径：混凝土生产端减碳包括优化混凝土配合比、混凝土及制品固碳等；运输端采清洁运输代替传统能源汽车；使用端采用延长混凝土使用寿命技术。

(1) 在混凝土生产端减碳方面，优化混凝土配合比是技术路径中较为成熟的手段。本报告从增加矿物掺合料比例、科学合理设计颗粒级配、增加再生骨料使用比例三个方面按照时间梯度分别进行了减碳分析，预计到 2030 年通过优化混凝土配合比可减少碳排放 7617 万吨/年，2060 年可减少碳排放 8971 万吨/年。

根据北京市搅拌站矿物掺合料的调研，目前矿物掺合料平均替代水平是 36%，随着矿物掺合料粉磨技术的提高、掺合料品质的提升，到 2030 年矿物掺合料替代水泥掺量比例可整体提升至 50%。根据行业企业技术水平推算，到 2030 年，将有 60% 混凝土生产企业可实现矿物掺合料 50% 水平替代，可减少碳排放 3811.2 万吨，2060 年可实现 100% 混凝土生产企业矿物掺合料 50% 替代，减少碳排放 4233.6 万吨（见图 3）。

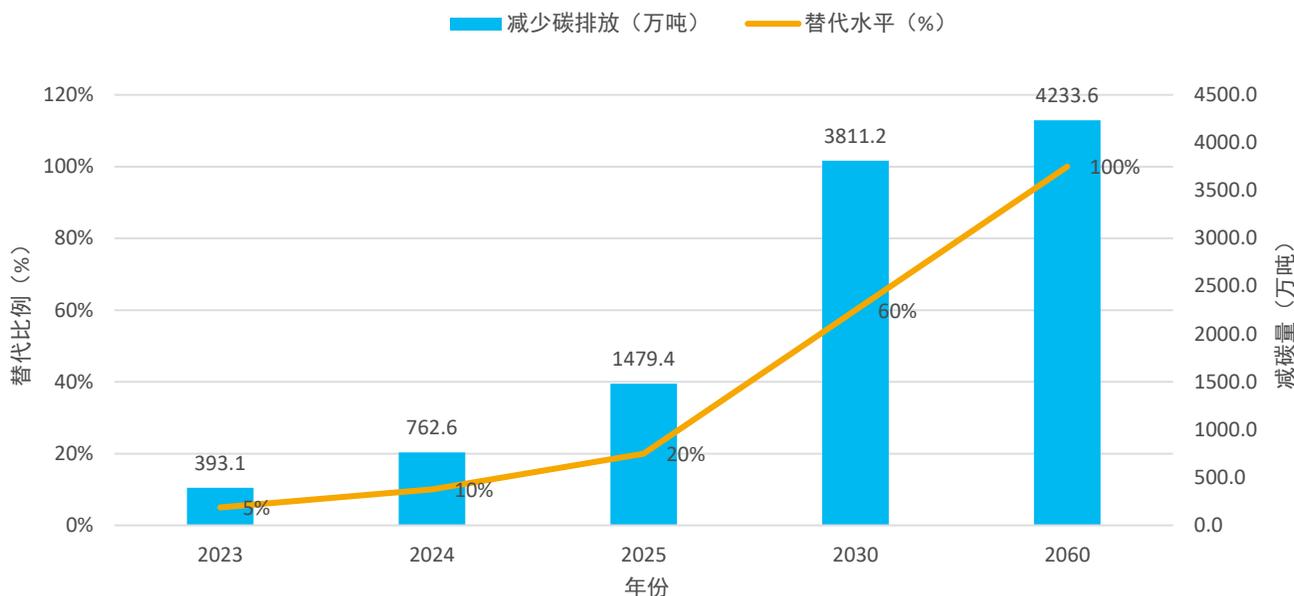


图 3 矿物掺合料逐年替代比例和减少碳排放量

混凝土原材料颗粒级配技术的提升，从原来的双掺粉煤灰、矿粉到掺粉煤灰、矿粉、石灰石粉的三掺技术，可以实现颗粒的更紧密堆积。通过三掺技术实现颗粒的紧密堆积，从而减少胶凝材料的使用。通过混凝土配合

比的优化，使混凝土结构更为致密，耐久性提升。预测到 2030 年将有 50% 的混凝土生产企业可实现三掺技术，可减少碳排放 2293 万吨；到 2060 年三掺技术实现行业 100% 全覆盖，可减少碳排放 3057 万吨(见图 4)。

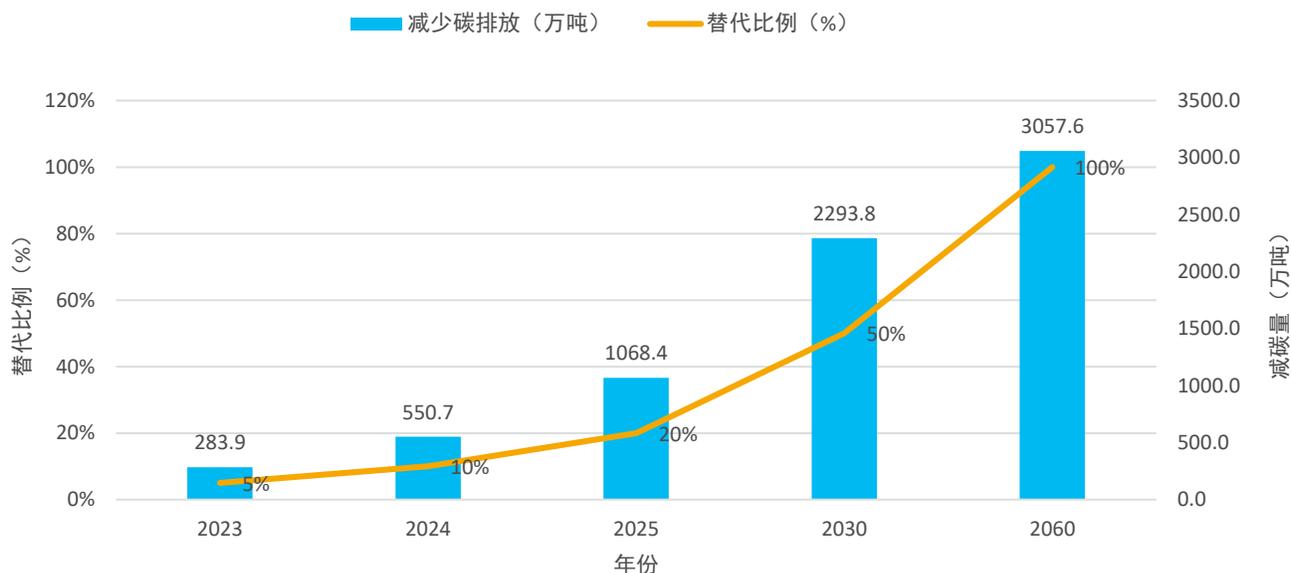


图 4 原材料颗粒级配技术对减碳量的影响

再生骨料是未来砂石骨料的发展方向，将和机制砂石共同占有市场份额。根据研究，以 1m<sup>3</sup> C30 再生混凝土减少约 21kg 二氧化碳（再生骨料 100% 替代），以此为基准按时间梯度计算混凝土企业使用再生混凝土

减少的碳排放。到 2030 年，预测将有 30% 的混凝土企业使用再生骨料，可减少二氧化碳排放约 1512 万吨；2060 年预测 50% 的混凝土企业使用再生骨料，减少二氧化碳排放 1680 万吨（当年）（见图 5）。

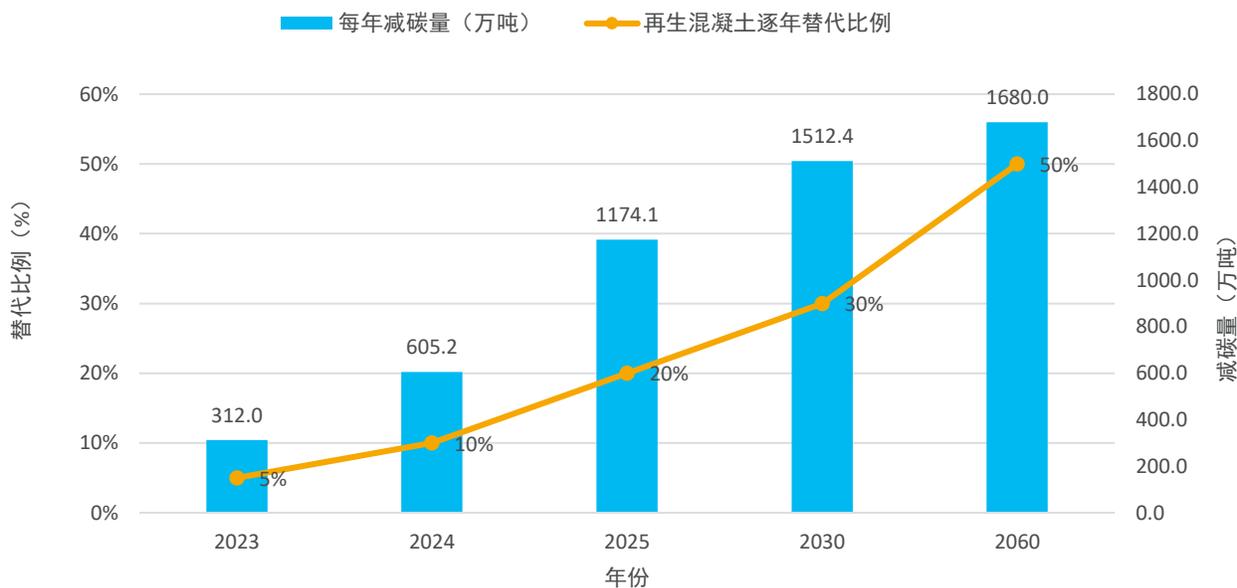


图 5 再生混凝土替代比例和减少碳排放量

(2) 混凝土及水泥制品 CCUS 技术是水泥混凝土行业脱碳的兜底技术，包括二氧化碳矿化养护和混凝土固碳两种技术。调研国内二氧化碳矿化养护制备建材产品示范案例的减碳效果：1 亿块固碳砖可减少 1.9 万吨二氧化碳。以此为基准，按时间梯度代替 3000 亿块砖

(全国年产量) 进行减碳分析。到 2030 年固碳砖替代总量的 30% 可减少碳排放 1710 万吨(当年); 2060 年, 技术全面推广后 100% 替代后可减少碳排放达 3800 万吨(当年)(见图 6)。

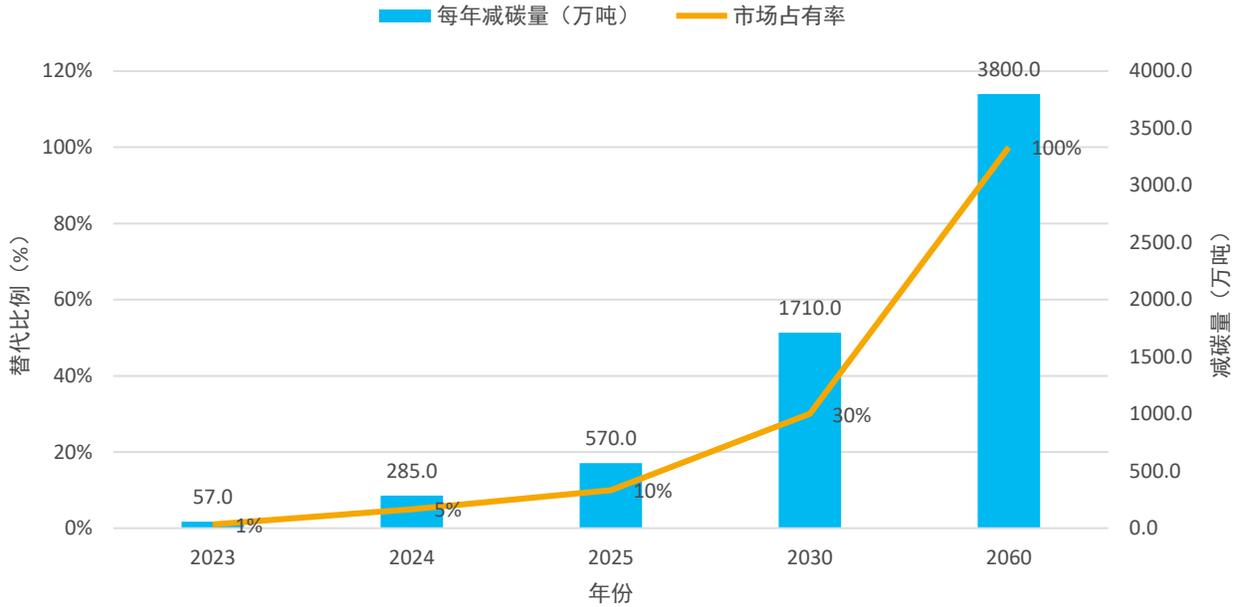


图 6 固碳生态砖的减碳分析

(3) 在混凝土使用端减碳方面，延长混凝土的使用寿命是基于混凝土全寿命周期进行减碳的技术手段。为延长混凝土使用寿命、减少二氧化碳排放量，一方面通过刘加平院士的“隔、阻、缓、延”等防护技术提高钢筋混凝土的耐久性，提升桥梁、海港工程等工程的使用寿命。另一方面，还可以通过混凝土高性能化来达到减排目的。通过对钢-UHPC 和钢-混凝土两种类型的桥面板进行减碳分析发现，虽然钢-UHPC 桥面板生产阶段的碳排放量是常规钢-混桥面板生产阶段的 1.55 倍，但是在成品维护阶段钢-UHPC 桥面板碳排放量降低了 76.38%，年均碳排放量下降了 35.76%。相比之下，钢-UHPC 桥面板具有更大的碳减排潜力。

在总结不同技术路径减碳潜力的基础上，混凝土与水泥制品领域到 2030 年通过优化混凝土配合比、二氧化碳养护技术、低碳水泥等技术措施预计可减少碳排放约 2.32 亿吨(当年)，占当年碳排总量的 32%；到 2060 年通过各种技术手段可实现减碳约 2.27 亿吨(当年)，占当年碳排总量的 48% (见图 7)。

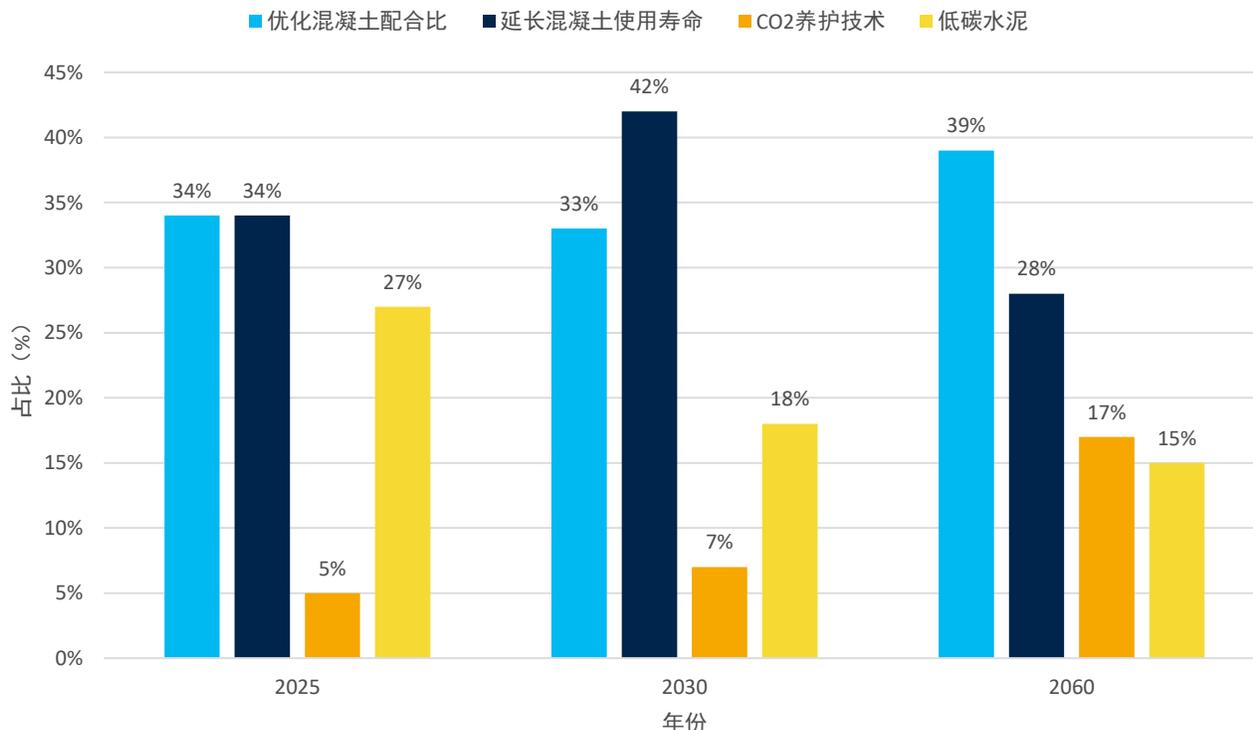


图 7 各技术路径减碳贡献图

根据以上研究发现，本报告针对混凝土与水泥制品的低碳发展路径，提出了以提质增效、精细化利用为总体指导思想的政策建议。

**第一，进一步提高混凝土生产端矿物掺合料使用比例。**一方面鼓励以高炉矿渣、粉煤灰等对产品性能无害的工业固体废弃物为主要原料的超细粉生产利用，提高矿物掺合料产品质量。另一方面，在掺合料质量提升前提下逐步提高混凝土与水泥制品的矿物掺合料利用水平。对于大体积混凝土，建议采用大掺量矿物掺合料混凝土。

**第二，扩大建筑垃圾再生骨料在非主体结构中的使用比例，扩大再生骨料及制品使用范围。**鼓励建筑垃圾再生骨料及制品在建筑工程和道路工程中的应用，将再生产品应用要求纳入工程项目设计标准、工程验收条件，推动在土方平衡、林业用土、环境治理、烧结制品及回填等领域大量利用处理后的建筑垃圾。在标准制定方面，将替代原材料、再生混凝土纳入“低碳混凝土”体系，在有关混凝土材料生产碳排放计算和评价方法中予以明确，以鼓励和推进相关碳减排技术的应用。

**第三，从生产端加快低碳水泥品种的研发和推广应用。**国内高贝利特水泥已经具备工业化生产条件，碱激发胶凝材料在学术界也取得了较大进步。建议形成一条以硅酸盐水泥为主，低碳水泥/胶凝材料为辅的路线。扩大新品种高贝利特水泥在非结构部位的应用场景示范，在政府投资的公共建筑、道路工程中的开展高贝利特水泥制备混凝土的示范应用，同步制定高贝利特水泥的产品标准等。

**第四，推广二氧化碳养护制备砖/砌块市场应用，鼓励发展CCUS技术。**考虑将二氧化碳养护砖列入国家绿色建筑、低碳建筑招投标要求。通过市场选购、政府税收减免等手段，扶持二氧化碳固碳技术公司创新投入，加大技术攻关资金支持，同时政府应加大对固碳产品的宣传力度，提高市场认可度。

**第五，大力发展清洁运输。**鼓励新能源运输车代替传统柴油车辆。汽车运输应全部采取新能源或国六排放标准的车辆。开放新能源混凝土运输车路权、减少禁行区域，并增加可作业时间。在环保管控期间，准许新能源混凝土运输车全天候运行。对于财政投资的工程项目应全部使用新能源混凝土运输车。对申请商品混凝土行

业环保标杆示范企业的单位，新能源混凝土运输车应达到企业混凝土运输车辆总数的 50% 以上，未达到的不予通过环保标杆示范企业评选。

**第六，从混凝土应用端出发实现混凝土总量控制。**目前我国的城市更新以转变为存量房提质改造阶段，要严格控制大修大建。建议政府继续保持城市更新中“控制大修大建”的方针，尤其出台二三线城市在城市更新中强化“保留利用提升为主，加强修缮改造”的原则，严苛制定大修大建地块审批手续，实现城市更新的精细化管理和建设。目前我国房地产增量建设减少、基础设施建设提升，未来的混凝土总量必然是下降的。

**第七，根据混凝土不同应用场景，提出混凝土耐久性，使用寿命新要求。**国家在“十三五”期间大力推广高性能混凝土，高性能混凝土已普遍应用。在“十四五”期间，建议扩大超高性能混凝土的应用场景，以大型桥梁、市政基础设施、大型公共建筑等工程为主，优选推广应用 UHPC。尤其是水利、海工等对混凝土耐久性要求较高的桥梁等建议使用 UHPC。标准主管部门应牵头制（修）订超高性能混凝土相关标准，编制超高性能混凝土评价标准，适时修订混凝土结构设计、施工及验收等相关规范，完善水泥、砂石、掺合料等原材料标准，制定超高性能混凝土生产和应用技术要求。



**NRDC**北京代表处

地址：中国北京市朝阳区东三环北路38号泰康金融大厦1706

邮编：100026

电话：+86 (10) 5927-0688