



加速工业深度脱碳： 中国水泥行业碳中和之路

执行摘要





关于落基山研究所 (RMI)

落基山研究所(RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库。我们与企业、政策制定者、科研机构及创业者协作，识别并规模化推广能源系统转型解决方案，推动全球能源系统转型，践行1.5° C温控气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。落基山研究所在北京、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。



关于中国水泥协会

中国水泥协会(CCA)于1987年在北京成立，是具有独立法人资格的社会团体。中国水泥协会是由全国水泥及相关产品的生产企业、科研工程设计企业、投资咨询企业等单位自愿组成的行业性组织，具有广泛的代表性，是企业与政府联系的桥梁纽带，为企业和政府、社会做好技术与政策咨询服务。我们与企业、政府、科研设计机构及建设者共同协作，促进水泥行业绿色低碳永续发展。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所 (RMI)

李婷
李抒苡
李威
闫榕
张梦露

中国水泥协会

王郁涛
范永斌
张翼
夏凌风
赵峙杰
刘淑娟

其他作者

高旭东 中国水泥协会
郭珍妮 中存大数据
邱林 中存大数据
叶寒韵 中存大数据
贺梦蛟 中存大数据
孙盈盈 中存大数据
李晋 清华大学环境学院

联系方式

李威 wli@rmi.org

引用建议

落基山研究所, 中国水泥协会, 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路, 2022

鸣谢

特别感谢 Angela Wright Bennett Foundation、Bloomberg Philanthropies、ClimateWorks Foundation、Quadrature Climate Foundation 和 The William and Flora Hewlett Foundation 对本报告的支持。

我们也向为本研究提供意见和建议的来自水泥企业和研究机构的专家们表示诚挚的感谢。

前言

水泥行业是中国实现碳中和的关键行业之一。中国的水泥生产与消费占据全球市场的一半以上，碳排放占全国总排放量的13%，仅次于电力与钢铁行业。水泥行业减排的难点一是减少生产过程的排放，这需要能够大规模替换现有原料的工艺技术；二是改变以煤炭为主体的燃料结构。此外，中国水泥企业的资产运行年限较短，快速转型带来的搁浅资产风险较高，同时，较低的行业集中度也对新技术的大规模应用带来一定挑战。

在双碳目标下，中国正在着力构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系，包括制订以水泥为代表的建材等重点行业的碳达峰实施方案。随着以建筑业为代表的下游产业向低碳转型，产业政策如错峰生产和减量置换等常态化，以及碳市场等措施的启动，水泥行业向低碳乃至碳中和转型有望不断取得进展。

本报告《加速工业深度脱碳：中国水泥行业碳中和之路》由RMI与中国水泥协会共同合作，针对水泥行业在碳中和目标下的转型路线图进行深入探讨。我们的分析表明，水泥行业实现碳中和需要在减量、燃料、品种、能效和末端处理各环节共同发力。在城镇化与基建需求放缓、淘汰落后产能以及建筑业提升材料效率等多重因素影响下，中国的水泥需求与产量将呈现明显下降趋势。在此基础上，燃料替代技术将发挥重要减排作用。与此同时，调整水泥品种可以起到降低过程排放的作用，其路径包括调整水泥的熟料系数、生产新型低碳水泥，以及替代原料技术。碳捕集、封存与利用（CCUS）是水泥行业实现碳中和的重点技术之一，能够为水泥工艺中的部分碳排放进行末端处理，对未来水泥产业的布局也将产生影响。

值得指出的是，水泥行业碳中和需要依靠价格机制传递正确的市场信号，以提升低碳水泥的成本优势。同时，水泥低碳转型与上下游产业关系密切，宜打破行业边界、布局综合规划。考虑到供需关系、技术发展速度、成本构成等因素的不确定性，本研究聚焦于在假设时间框架下中国水泥行业的碳中和转型趋势、短中长期安排和技术经济路线图，以为政策制定和行业规划提供参考。

执行摘要

中国是全球最大的水泥生产国和消费国。2021年，中国共生产水泥23.6亿吨，水泥生产占世界的57%；共消费水泥23.8亿吨，也占全球一半以上。从碳排放的角度看，2020年，中国水泥行业CO₂排放量约为13.7亿吨，占全国总碳排放的比例在13%，仅次于电力和钢铁行业。水泥行业脱碳对实现全国的碳中和目标至关重要。

中国水泥行业脱碳面临着诸多挑战与机遇。水泥生产高度依赖化石燃料，目前水泥行业中较有潜力的替代燃料尚处于早期验证阶段，相关产业体系尚未建立。即使燃料完全使用零碳来源，水泥生产的过程排放仍不可避免，需要降低过程排放或固存CO₂的技术。此外，水泥资产运行年限较短，快速转型将带来较大的搁浅资产风险。水泥行业集中度仍不高，一定程度上不利于新技术的大规模推广和市场联动。

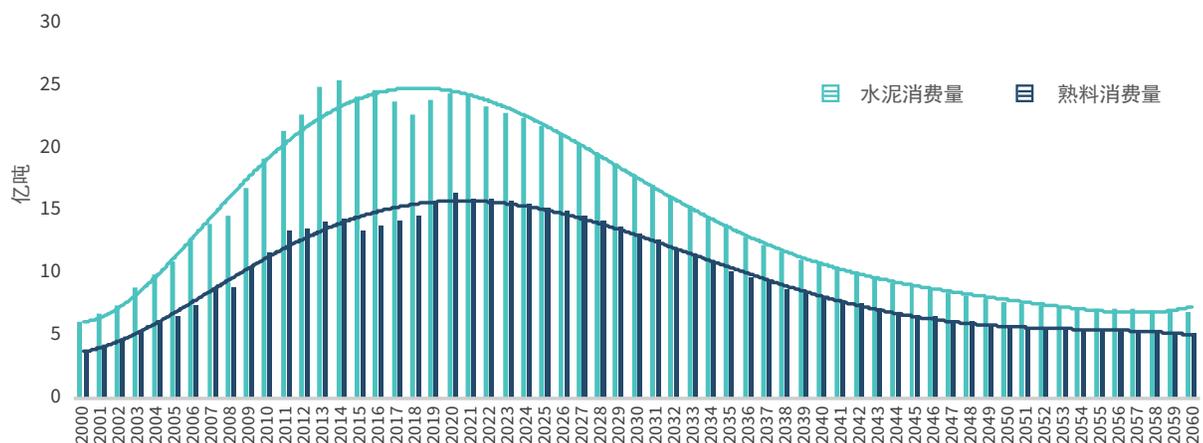
同时，在双碳目标下，供给侧改革和需求侧变化联合发力将为水泥行业低碳转型和碳中和提供推动力、形成新机遇。中国水泥行业应用技术和设备较为先进，拥有广泛的市场基础和创新试验条件，生产能效已经处于国际领先水平，拥有创新的经验和能力。随着中国经济从高速增长阶段转向高质量发展阶段，以建筑业为代表的下游行业不断深化绿色变革、提升低碳标准，将对以水泥为代表的建材行业低碳转型带来利好，并有助培育壮大低碳建材的市场需求。

碳中和图景下水泥行业供需展望

未来，城镇化与基建放缓将主导水泥需求的趋势变化。水泥的主要需求来自以建筑与基础设施为主的建筑业。由于城镇化和住房需求饱和，长期新建房屋开发规模将呈下降趋势；基础设施方面，虽然在较长时期内基建补短板仍是我国的重点任务，但基础设施建设业已经呈现逐步放缓的趋势。在以建筑、公路、铁路等为主体的建设行业发展放缓背景下，水泥需求下降的趋势不可避免。

到2050年，水泥熟料需求相比现有水平或下降三分之二。随着中国经济发展模式的调整，投资构成中建筑工程投资比重将逐渐降低节能环保技术改造及科技等方面的投入不断加大，单位GDP和投资额拉动水泥消费的能力不断降低。熟料需求将从2021年的15.5亿吨减少到2050年的5.6亿吨。水泥需求将从2021年的23.8亿吨减少到2050年的7.5亿吨。需求减少成为水泥行业总体碳排放呈下降趋势的重要因素。

图表 A 中国水泥、熟料消费历史和未来趋势预测

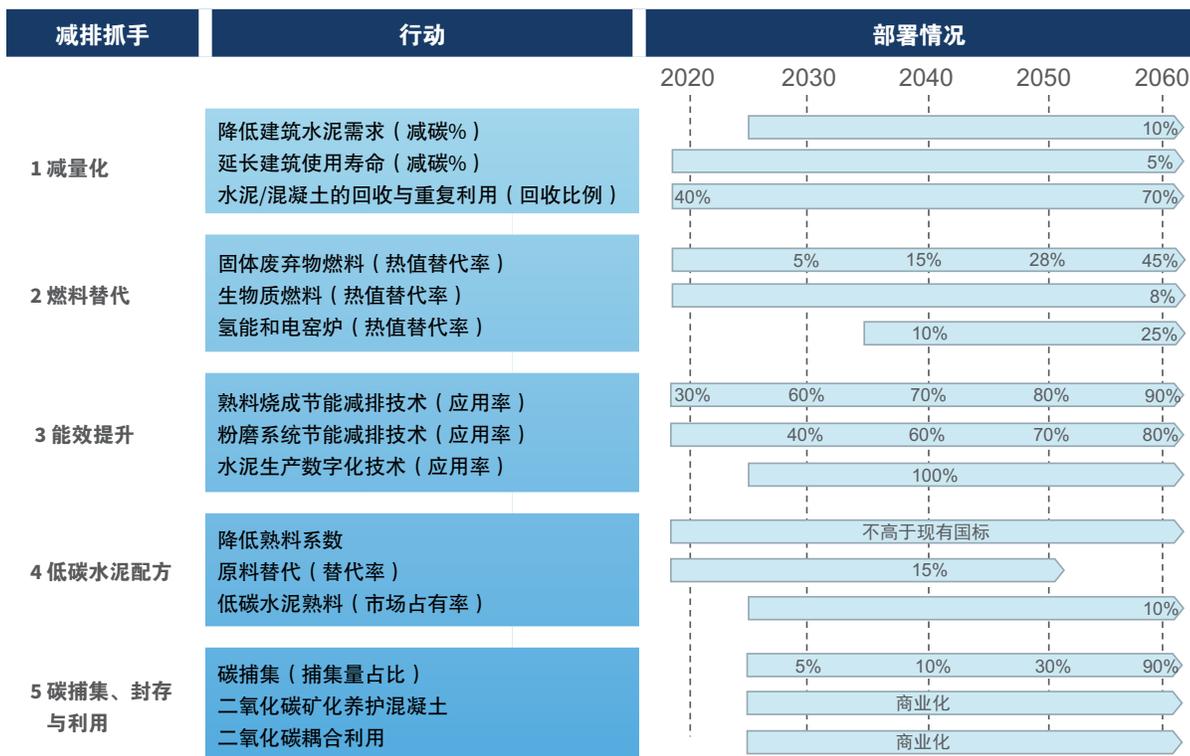


来源：本研究课题组

水泥行业脱碳的技术路径

水泥行业要实现完全脱碳，必须采用变革式方法，包括从需求端降低水泥消耗、创新低碳水泥品种、加大低碳能源在燃料及电力中的替代率，以及推广碳捕集与封存利用技术以抵消难以消除的过程排放。现阶段，我国水泥的低碳生产主要通过改善原材料易烧性和易磨性、改进生产工艺及装备和降低能耗等手段，这些措施虽然近期内仍能发挥减排作用，但长期来看，仅依赖现有技术路径较难实现水泥行业完全脱碳的净零排放愿景。

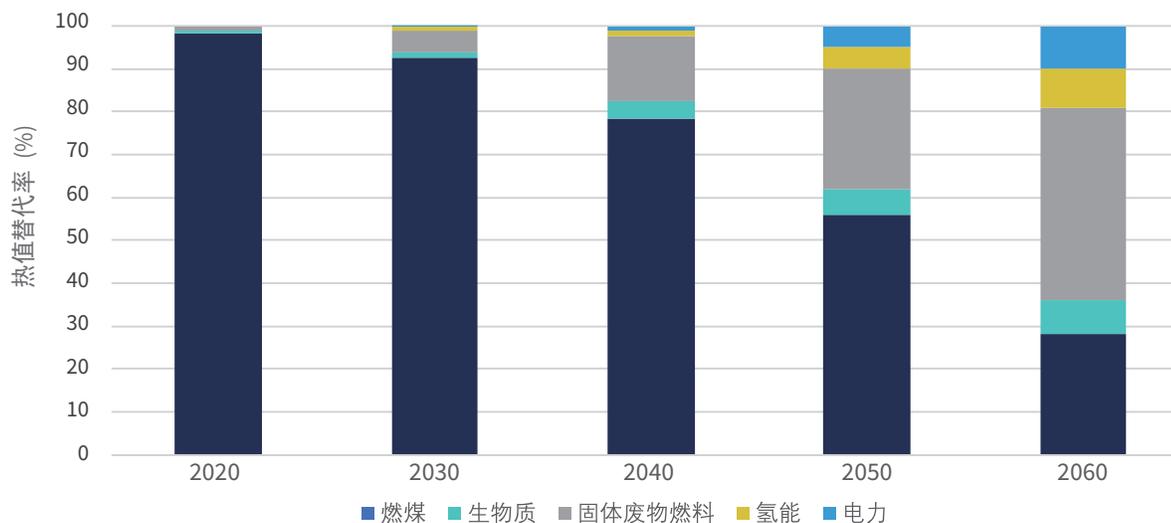
图表 B 水泥碳中和之路关键技术部署路线



来源：本研究课题组

- 水泥减量生产是推动水泥行业碳减排的最重要抓手：**到 2050 年，水泥熟料产量将下降至每年 5.6 亿吨，减少约 67% 的碳排放。短期内，淘汰落后和过剩产能是降低水泥行业碳排放的主要手段，也能推动水泥行业尽早实现碳达峰。长期来看，城市化进程减缓和建设量减少是水泥需求下降的主要因素。在此过程中，应从避免建材浪费、创新建筑结构、开发新型胶凝材料等方面进一步降低水泥需求。
- 燃料替代发展尚处初级阶段，但提升空间巨大：**从燃料替代技术路径看，近期可使用固体废弃物燃料、生物质燃料，远期可考虑其他新型燃料，如氢能、电力等。固体废弃物燃料是较适合水泥行业的燃料替代方案，未来可替代量约为 0.2~0.6 亿 tce。但我国水泥工业的替代燃料发展较晚，现有技术主要是水泥窑协同处置，属于固体废物利用的初级阶段，废弃物定位、燃料产业欠发展等问题急需解决。总体看，我国水泥生产的热替代率不到 2%，相比其他国家水泥行业 50% 以上的比率，有较大提升空间。

图表 C 碳中和情景下中国水泥熟料的燃料替代路线



来源：本研究课题组

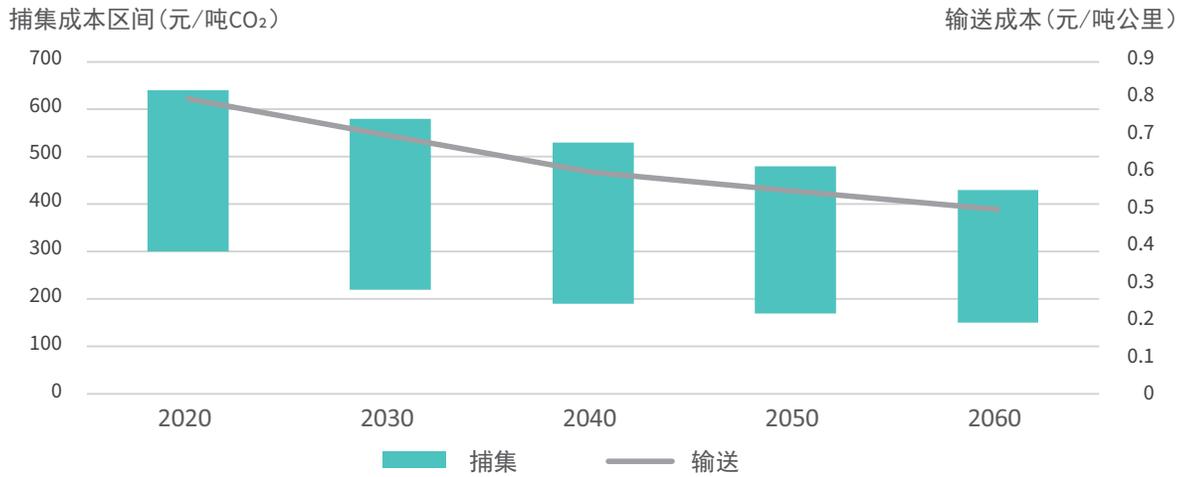
- 能效水平已优于世界平均水平，但还有进一步提升空间：**目前常用的水泥节能技术有熟料烧成节能减排技术、粉磨系统节能减排技术、水泥生产数字化技术三种。基于这些技术应用，我国目前水泥熟料单位产品综合能耗在 98~136kgce/t (2.9~4.0GJ/t) 之间，与欧美水平持平或更优。然而，仍有部分能耗较高的企业达不到国家标准的限定值，急需技术改造。如果全国水泥生产线能从目前的熟料综合能耗 3 级标准提升为 1 级，相当于能减少约 14% 的能耗与排放。
- 调整水泥品种结构可进一步创造减碳价值：**在此方面主要有 3 条策略。熟料替代，即控制水泥中的熟料用量，降低单位水泥碳强度；原料替代，即替换原料中的部分石灰石，降低过程排放；新品种低碳水泥，即生产不基于硅酸钙的新型熟料体系。适当控制水泥的熟料系数可以起到降碳作用，可出台更具体的标准来适配市场需求，针对应用场景细化水泥产品的标准，在确保水泥质量与适用性的同时保留部分低熟料系数的水泥标号。原料替代技术是指利用工业废渣替代一部分石灰石原料，适合作为降低熟料碳强度的短期措施。新型低碳熟料体系不基于硅酸钙熟料，具有所需 CaO 含量低、烧成温度低、碳排放低的特点，未来有望占更高的市场份额。
- 碳捕集、封存与利用是水泥碳中和的必要技术：**碳捕集技术中的液体化学吸收技术、钙循环技术、第二代富氧燃烧和 LEILAC 技术在水泥行业中有较好的推广价值。但目前大规模采用 CCUS 还存在不少挑战。一方面水泥厂地理分布较分散，不利于集中建设 CCUS 设施，且增加了 CO₂ 运输成本；另一方面，水泥窑烟气中的 CO₂ 浓度通常低于 30%，捕集能耗与成本较高。未来，随着技术成熟与规模化效应展现，CCUS 有可能成为水泥行业实现碳中和的核心技术之一。CO₂ 还可以与下游混凝土结合生产建筑材料，并在地质封存、化工合成等场景中得以应用。

目前阶段，由于替代燃料及 CCUS 技术成本高昂，生产零碳水泥¹ 将可能导致约 90%-480% 的溢价。随着替代燃料与 CCUS 规模化发展和成本下降，以及 CO₂ 就地利用的可能性，零碳水泥的溢价有望不断下降。初步预测，在未来 30 年，吨 CO₂ 捕集封存成本将下降 40% 左右，绿氢成本下降约 65%，绿色电力成本下降约 60%，这使得 2050 年的低碳水泥溢价可能降至 70%~240%。

零碳水泥的不同生产路径之成本差距将随着技术进步而缩小，直到基本降到同一区间。当绿氢或绿电成本足够低时，氢气和电力路径将逐步显现出优势。我们推算，当绿氢价格低于 5300 元 / 吨时，氢气制水泥的路径和固废燃料路径能够平价；而当绿电价格低于 0.13 元 / 千瓦时，电气化生产水泥和固废路径能够平价。

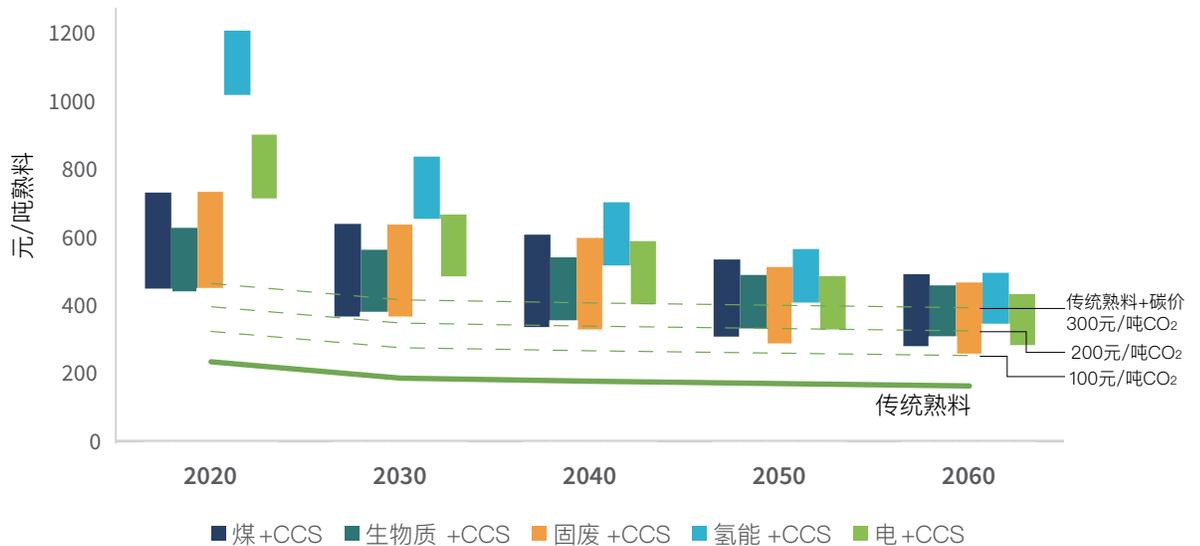
¹ 本文使用“零碳水泥”指代碳强度接近为零的水泥。这里的碳强度指净排放，即原始排放减掉固存的碳。本文考虑水泥生产碳排放时，主要考虑范围一和范围二排放，即水泥生产的直接排放和电力排放。因核算边界尚不清晰，本文没有考虑使用 CCS 技术的排放。

图表 D 水泥行业中碳捕集与输送成本



来源：本研究课题组

图表 E 不同技术路径生产水泥熟料的成本ⁱⁱ



来源：本研究课题组

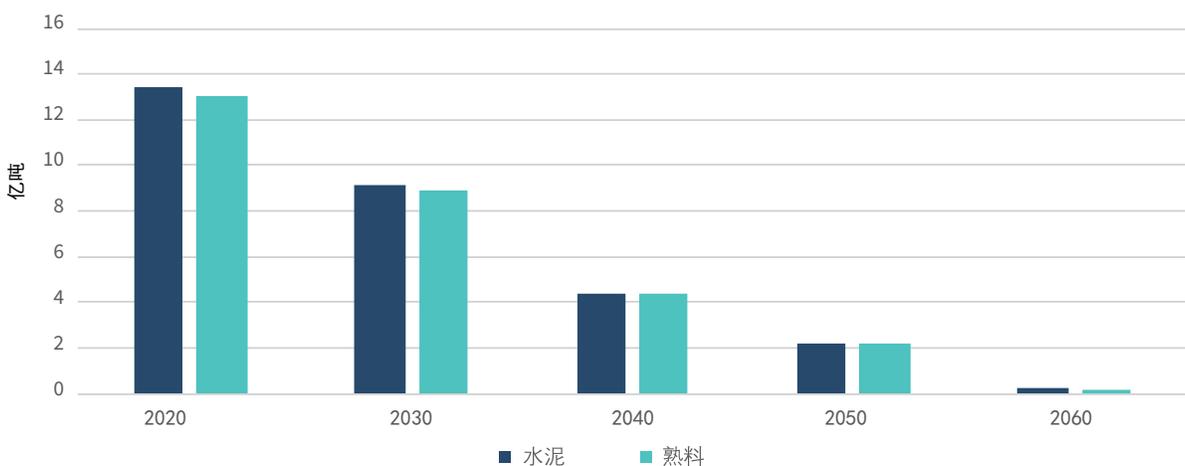
未来，零碳水泥生产成本可能接近传统水泥，但仍较难实现平价，有赖于通过碳市场与碳价等市场手段调节溢价。根据全国碳市场总体设计，水泥行业由于具有较好的数据基础，具有优先纳入全国碳交易市场的条件。有效的碳价将使零碳水泥的相对成本降低甚至形成优势，对水泥行业的减排和转型将起到重要推动作用。

ⁱⁱ 本图的成本预测假设燃煤及原料成本不变，熟料基本成分不变。本文对熟料成本的预测包含了熟料主要的成本因素，未包含所有成本因素，仅用于比较。实际情况中，熟料成本因生产线不同而有差异。

中国水泥碳中和之路：时间、空间演变和转型模式

- 近期(2020-2030), 水泥行业脱碳的主要抓手是减产和能效提升, 努力实现水泥行业碳排放尽早实现高质量达峰。固废技术逐步完善与标准化。水泥生产使用的电力中清洁电力占比约达到 40%。到 2030 年, 约 5% 的水泥碳排放可使用 CCUS 捕集。
- 中期(2030-2040), 产量控制、替代燃料和 CCUS 将共同推动水泥行业减排。水泥生产使用的电力中清洁电力占比上升到 55%。固废燃料生产实现标准化和商业化。到 2040 年 CCUS 技术能捕集约 10% 的碳排放。
- 远期(2040-2050), 替代燃料和 CCUS 将在减排中发挥更大作用。结合碳价机制, 零碳水泥将初步显示成本优势。水泥行业 30% 的 CO₂ 排放将通过 CCUS 实现捕获。约 50% 的燃烧热将被可持续能源替代。吨水泥与吨熟料的碳强度将下降到目前的一半左右。
- 2050-2060 年, 随着我国碳中和目标接近实现, 新型替代燃料技术如氢能与电力将实现商业化。水泥行业燃料替代率可达 70%。水泥行业产生的 90% 的 CO₂ 可以被捕集。水泥行业的 CO₂ 排放以及水泥产品的碳强度将接近净零水平。

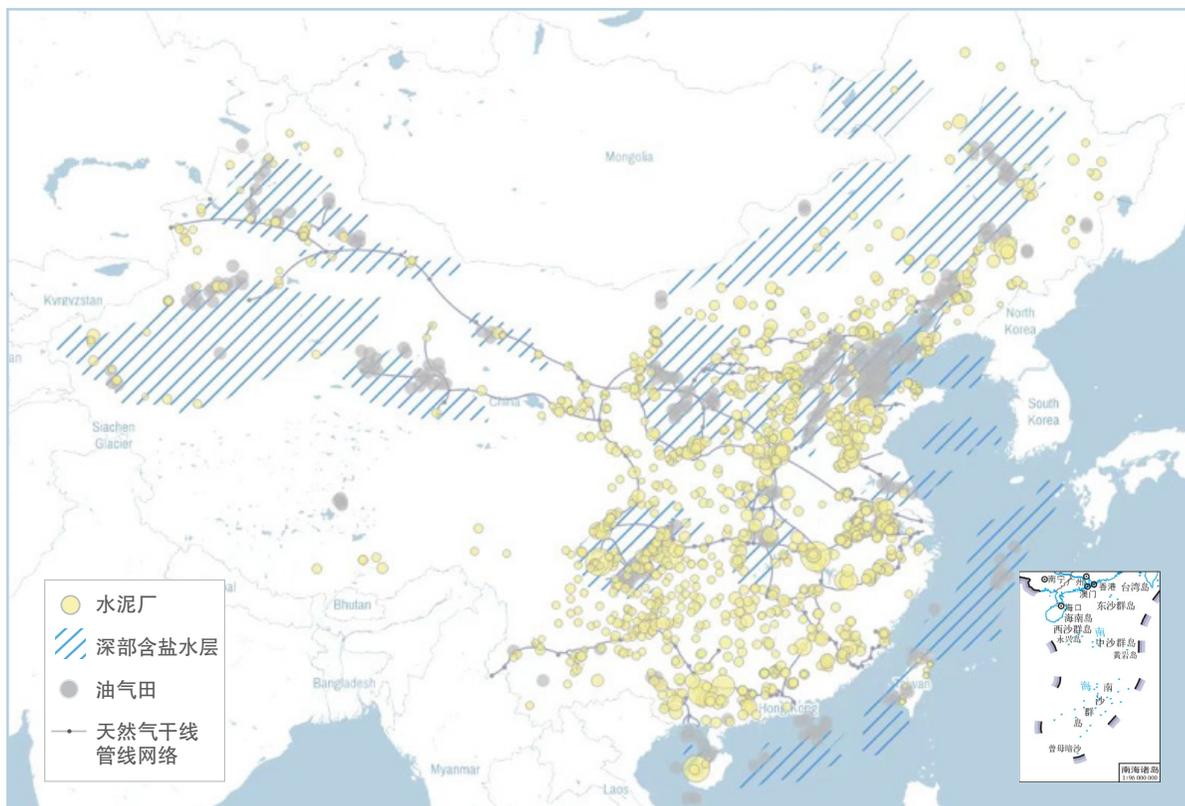
图表 F 全国水泥与熟料生产碳排放趋势



来源：本研究课题组

未来, 全国分布的水泥产能宜结合资源优势选择最优的转型路线。位于华北、东北、西北的水泥生产线近期可积极发展基于固废、生物质等的燃料替换路线和 CCS 技术, 远期可利用风电光伏发展绿氢或绿电制水泥的清洁化生产路线。位于西南、华中的水泥生产线则可积极发展固废或生物质路线, 或利用水电发展绿氢或绿电制水泥, 并利用盐水层封存 CO₂。位于华东、东南、中南的水泥生产线因为相对缺少有利的 CCS 资源, 在考虑生物质、风电制氢等路径的同时, 可以利用天然气管线进行远距离 CO₂ 输送或实现海上封存, 也可与其他产业开展 CO₂ 就地耦合利用。

图表 G 我国主要区域水泥厂分布及其与碳封存地及可利用设施的关系



来源：本研究课题组

推动中国水泥碳中和发展：行动建议

推动水泥行业纳入全国碳交易市场，发挥碳价机制促进水泥行业向碳中和转型

目前看低碳水泥生产技术很可能导致水泥生产成本上升，绿色溢价问题在近中期较为突出。因此，碳定价与碳交易机制将是推动水泥行业低碳转型的重要保障机制，相关政策措施应继续推动合理碳价的形成，而水泥企业应做好纳入碳市场的准备。

通过与碳挂钩的绿色采购政策，促进需求方的转型

水泥行业碳中和转型的重要抓手之一来自需求侧，主要体现在提高建筑工程结构效率、节省建筑材料、回收利用建筑垃圾、采购绿色低碳建材等方面。我国的建筑垃圾回收率较低，绿色建材采购体系尚未与碳排放挂钩，因此，与水泥行业减碳相关的需求侧转型还有很大完善空间。可考虑从政府采购项目与头部地产企业开始，鼓励低碳水泥产品采购，培育低碳水泥与建材市场，打通低碳建材产业链。

发挥绿色金融作用，为水泥企业绿色转型提供金融支持

水泥行业的技术升级改造、商业转型亟需大量资金支持，现有绿色金融工具无法有效覆盖高碳排放产业的转型需求。因此，设计和完善针对水泥行业在内的高排放工业的金融支持体系尤为重要。应进一步出台和完善转型金融的制度、标准以及工具体系，为企业低碳转型提供更多支持。

促进循环经济，实现固体废物燃料的大规模生产和应用

固废燃料很有潜力成为水泥减排路径中的重要替代燃料，固体废物的收集、分类、预处理及加工产业亟需建立和完善。建议完善固体废物收集分类体系，鼓励固废燃料产业的建立与标准化，设置合理的激励措施。从企业角度，可推动相关标准和产业的建立，发展可燃废弃物深加工行业，生产标准化的替代燃料制品。

参考文献

- 1 US Geological Survey, Cement Statistics and Information, 2022
- 2 中国水泥协会, 2021 年中国水泥行业经济运行报告, 2022, <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/tzgg/202205/W020220511403031688059.pdf>
- 3 陈柏林, 2021 年中国水泥经济运行及 2022 年展望, 数字水泥网, <https://www.dcement.com/article/202201/187042.html>
- 4 CN Cement, The global cement industry: Pandemic impact and outlook to 2022, <https://www.cemnet.com/News/story/171359/the-global-cement-industry-pandemic-impact-and-outlook-to-2022.html>
- 5 中国建材报, 工业固废替代原料与水泥行业可持续发展, https://m.thepaper.cn/baijiahao_8903842
- 6 IEA, Driving energy efficiency in heavy industries, 2021, <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>
- 7 GNR PROJECT Reporting CO₂, <https://gccassociation.org/gnr/>
- 8 IEA, An energy sector roadmap to carbon neutrality in China, 2021, <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>
- 9 国家能源局, 国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》, 2022, http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm
- 10 住房和城乡建设部, 住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑碳排放计算标准》的公告, 2019
- 11 中国城镇供水排水协会, 住建部: 建筑碳排放计算作为强制要求, 2022 年 4 月 1 日起实施, <https://www.cuwa.org.cn/ziyuanzongheliyong/11703.html>
- 12 新浪地产, 2050 年实现“碳中和”! 远洋集团将这份承诺写进可持续发展报告, <http://news.dichan.sina.com.cn/2021/04/21/1277854.html>
- 13 华夏时报, “排碳”发力, 10 房企承诺“全绿建”, 近年房企绿建面积大幅增加, <https://www.chinatimes.net.cn/article/105414.html>
- 14 发展改革委, 交通运输部, 《国家公路网规划(2013年-2030年)》, 2013
- 15 中国国家铁路集团有限公司, 新时代交通强国铁路先行规划纲要, 2020
- 16 中国国家发展和改革委员会能源研究所, 美国劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所, 重塑能源: 中国, 2016
- 17 RMI, Profitably Decarbonizing Heavy Transport and Industrial Heat, 2021
- 18 孙振平教授课题组, 建筑废弃混凝土回收再利用技术现状与展望, <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20171114/861389-1.shtml>
- 19 武永兰, 废弃混凝土的回收再利用及主要用途, 2020
- 20 韦伯咨询, 2021 年中国建筑垃圾处理行业专题调研与深度分析报告, 2021
- 21 中国产业发展促进会生物质能产业分会、德国国际合作机构(GIZ)、生态环境部环境工程评估中心和北京松杉低碳技术研究院, 3060 零碳生物质能潜力蓝皮书, 2021
- 22 IFC, Increasing the use of alternative fuels at cement plants: International best practice, 2017
- 23 IEA, Cement, <https://www.iea.org/reports/cement>
- 24 Antunes, M. et al, Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review, 2022
- 25 Bloomberg NEF, Locking CO₂ in Concrete Is a Key Step to Greener Buildings, 2021
- 26 边文强, 水泥窑协同处置废弃物的现状分析, <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20191114/1021024.shtml>

落基山研究所, 中国水泥协会, 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路, 2022

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



封面图片由中国水泥协会提供



RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org



中国水泥协会
北京市丰台区西三环南路
乙6号东侧

www.ccawz.com

© 2022年9月, 落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的
注册商标。