



北京大学国家发展研究院
National School of Development

MGF MACRO AND
GREEN
FINANCE LAB
宏观与绿色金融实验室



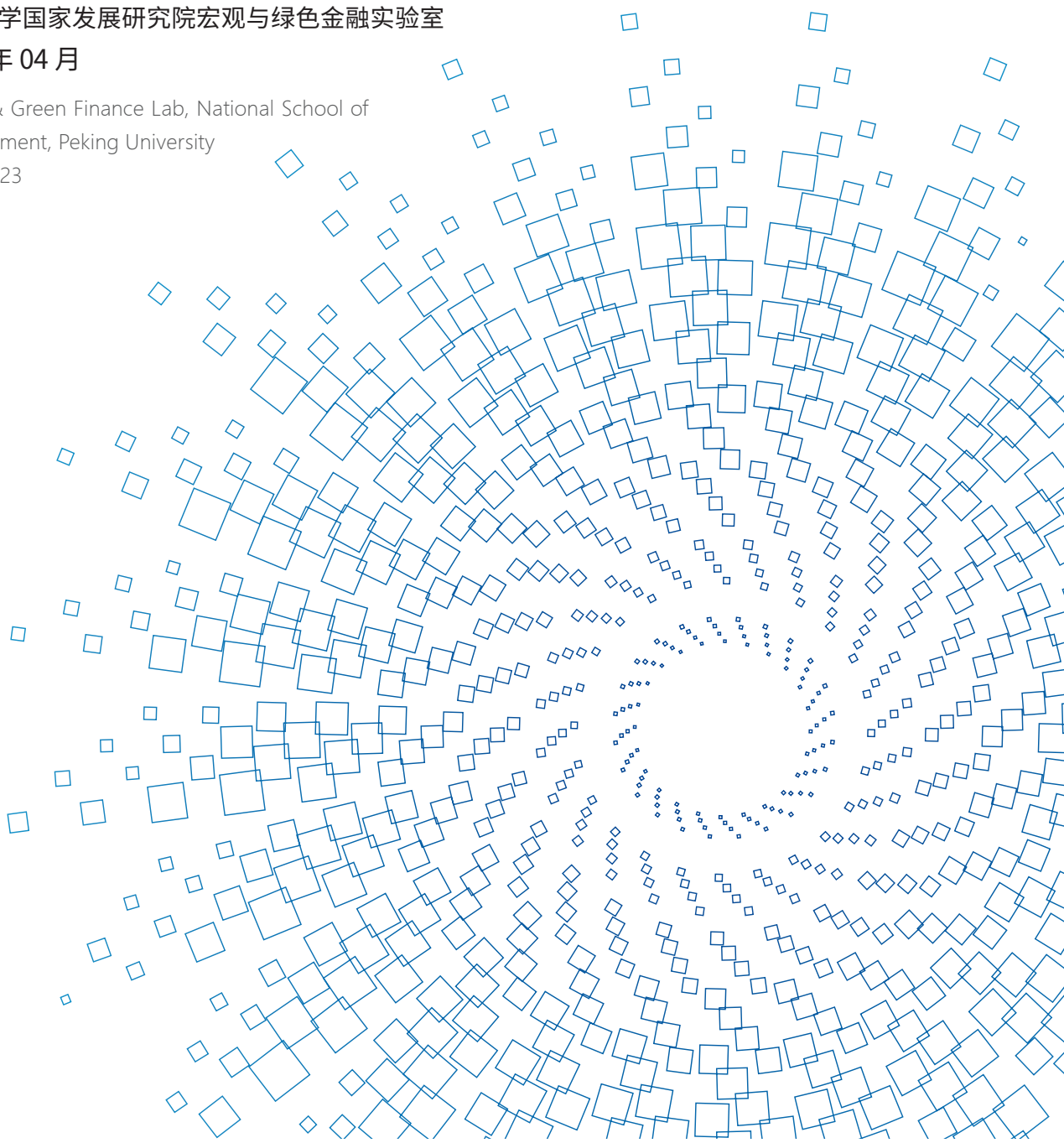
水泥行业气候转型风险分析 及金融支持

Low-carbon transition of China's cement industry:
climate scenario analysis and policy implications

北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室

2023年04月

Macro & Green Finance Lab, National School of
Development, Peking University
April, 2023



课题组

课题负责人

马 骏 北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室 联席主任

课题组成员

何晓贝 北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室 副主任
祝 韵 北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室 研究专员
张静依 北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室 研究专员
邵丹青 北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室 研究专员

致谢

本研究由北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室课题组统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。课题组感谢孙星寿（中国建筑材料联合会）、李琛（中国水泥协会）、王虔虔（合肥水泥设计研究院）、王建强（溧水天山水泥有限公司）等专家的指导和建议；课题组同时感谢程琳（北京绿色金融与可持续发展研究院）、刘薇（北京绿色金融与可持续发展研究院）、张馨方、沈子添的支持工作。文责自负。

About Authors:

Project Lead

MA Jun, Co-Director, Macro & Green Finance Lab, National School of Development, Peking University

Team Members

HE Xiaobei, Deputy Director, Macro & Green Finance Lab, National School of Development, Peking University

ZHU Yun, Researcher, Macro & Green Finance Lab, National School of Development, Peking University

ZHANG Jingyi, Researcher, Macro & Green Finance Lab, National School of Development, Peking University

SHAO Danqing, Researcher, Macro & Green Finance Lab, National School of Development, Peking University

Acknowledgement:

This report is a product of Macro & Green Finance Lab, National School of Development, Peking University and is funded by Energy Foundation China. The team would like to thank the following experts for their valuable insights and suggestions for this research:

SUN Xingshou, China Building Materials Federation

LI Chen, China Cement Association

WANG Qianqian, Hefei Cement Research & Design Institute Corporation Ltd.

WANG Jianqiang, Lishui Tianshan Cement Ltd.

The team also thank Cheng Lin, Liu Wei from Institute of Finance and Sustainability for their administrative support, as well as Zhang Xinfang and Shen Zitian for their excellent research assistance.



北京大学国家发展研究院宏观与绿色金融实验室成立于2021年，致力于宏观金融与绿色金融的政策研究，努力成为相关领域的世界一流智库，为国内政府部门与监管机构提供高水平的政策研究成果及建议，同时积极推动相关领域的国际合作与交流。本实验室长期开展宏观金融与绿色金融的自主研究，同时接受各级政府、金融监管部门和金融机构的课题委托。实验室积极参与和支持人民银行和监管机构在宏观金融和绿色金融方面的研究，近年的研究重点包括宏观经济、金融风险、转型金融、绿色金融、绿色金融科技、气候政策、货币政策等。

<http://mgflab.nsd.pku.edu.cn>



能源基金会是在美国加利福尼亚州注册的专业性非营利公益慈善组织，于1999年开始在中国开展工作，致力于中国可持续能源发展。基金会在北京依法登记设立代表机构，由北京市公安局颁发登记证书，业务主管单位为国家发展和改革委员会。

能源基金会的愿景是通过推进可持续能源促进中国和世界的繁荣发展和气候安全。我们的使命是通过推动能源转型和优化经济结构，促进中国和世界完成气候中和，达到世界领先标准的空气质量，落实人人享有用能权利，实现绿色经济增长。我们致力于打造一个具有战略眼光的专业基金会，作为再捐资者、协调推进者和战略建议者，高效推进使命的达成。

目 录

01 水泥行业的碳排放与减排路径 03

1.1 水泥行业碳排放现状	04
1.2 水泥企业的主要低碳转型路径	06
1.2.1 能效工艺提升	07
1.2.2 能源结构调整	08
1.2.3 原料和产品替代	09
1.2.4 碳捕集和利用	10
案例	12

02 水泥行业气候风险情景分析 15

2.1 分析方法与模型	15
2.1.1 气候风险因素及传导路径	15
(1) 资本支出项	17
(2) 碳排放权支出	21
(3) 营业收入	23
2.1.2 气候情景设置	24
2.1.3 水泥行业违约率分析	27
2.2 气候风险情景分析结果	30
2.3 银行的水泥资产风险敞口	31

03 结论与建议 33

附录 1 减排技术路径树	35
附录 2 代表性企业水泥生产环节的碳排放构成	36
参考文献	37

图表目录

表 01	实现减排目标的措施（生态环境部规划院）	18
表 02	华新水泥减碳目标时间表	19
表 03	水泥行业边际减排成本	21
表 04	资本支出项计算方法	21
表 05	碳排放权支出项计算方法	22
表 06	营业收入项计算方法	23
表 07	情景假设	24
表 08	情景设置的相关参数	26
表 09	模型变量和参数	29
图 01	过去三十年中国和全球水泥产量	04
图 02	2020 年各国水泥单位产量碳强度	05
图 03	水泥生产工艺流程和碳排放来源	05
图 04	水泥企业四大类转型技术路径潜力示意图	07
图 05	能效工艺提升的关键生产环节（左）及技术路径（右）	07
图 06	能源结构调整的关键生产环节（左）及技术路径（右）	08
图 07	原料产品替代的关键生产环节（左）及技术路径（右）	10
图 08	CCUS 技术路径	11
图 09	气候相关风险与金融风险之间的传导机制	16
图 10	水泥企业转型风险到金融风险的传导机制	16
图 11	华新水泥减碳路线图	19
图 12	水泥行业各碳减排技术的减排潜力和成本	20
图 13	我国水泥行业的减排成本曲线	20

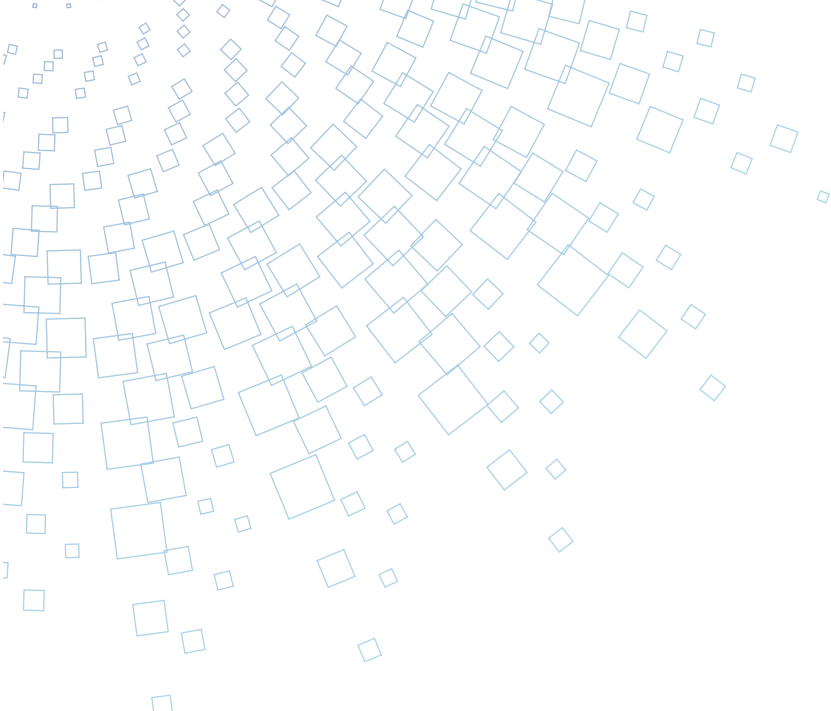


图 14	碳价格预测情景	22
图 15	水泥需求情景	23
图 16	八类气候情景示意图	24
图 17	不同减排力度下的碳排放（高需求）	25
图 18	不同减排力度下的碳排放（低需求）	25
图 19	Merton 模型原理示意图	27
图 20	对数收益率的样本分布情况	28
图 21	不同情景下的行业违约率水平	30
图 22	水泥行业带息负债规模	32
图 23	水泥行业资产规模	32

摘要

水泥的原料属性和工艺特性决定了水泥行业的减碳难度大，在我国的碳达峰碳中和目标背景下面临较高的转型风险。为实现较强减排目标所需要的减排投入将对企业造成资金层面的压力。本文基于水泥行业上市公司的财务数据，对水泥行业在不同气候情景下的财务表现和信用风险进行测算，得到如下结论和建议。

首先，若政府及早行动、实施匹配碳中和目标的政策，在减排方面投入更多资金和技术的企业将获得更好的财务表现。因此政府应当及早稳定政策预期、释放明确的政策信号，为企业的减排投资提供有效的激励。

其次，水泥企业只要达到一定的减排力度，在中长期而言信用风险将有所下降。因此水泥企业应加大低碳减排方面的研发投入，同时制定强有力且可信的转型计划并做好信息披露，从而有效利用转型金融工具（转型贷款、转型债券、转型保险、转型基金等）为转型发展提供资金支持。

最后，金融机构应对转型意愿和能力不同的水泥企业进行分类管理，对具备强有力且可信的转型计划的水泥企业加大支持力度，因为此类企业在中长期的信用风险更低。同时，金融监管部门与财政部门应制定激励政策以支持银行等金融机构开展转型金融业务。





Executive Summary

The cement industry in China faces climate transition risks due to the carbon-intensive nature of its raw materials and industrial processes. To align with China's carbon peak and carbon neutrality goals, the industry needs to invest heavily in low-carbon technologies and solutions. This report analyzes the financial performance and credit risk of listed cement companies under different climate scenarios and provides the following conclusions and recommendations:

Early policy action and clear carbon neutrality targets can incentivize companies to invest more in emission reduction and improve their financial performance. The government should establish stable policy expectations as soon as possible to guide corporate emission reduction investments.

-Achieving a certain level of emission reduction can lower the credit risk of cement companies in the medium to long term. Cement companies should increase their R&D investment in low-carbon emission reduction and make use of transformation financial support tools.

-Financial institutions should support cement companies with strong and credible transformation plans because they have lower credit risks in the medium to long term. Financial regulatory authorities should formulate policies to support banks and other financial institutions in carrying out transformation finance business.

This report provides valuable insights for policymakers, cement companies, financial institutions and other stakeholders on how to achieve a low-carbon transition in the cement industry.

引言:

在气候变化压力下,各国陆续公布应对气候变化的目标和行动方案,截至2022年6月,已公布净零目标的国家 and 地区已覆盖全球GDP的90%,其中包括我国2020年9月公布的“3060”碳达峰、碳中和目标。气候变化本身和全球范围内的气候变化应对行动通过影响经济社会的方方面面,为未来的产业结构和经济发展带来了新态势,其中包含风险,也蕴藏机遇。

对于敏感行业和金融市场而言,识别、分析和管理其面临的气候相关风险和机遇是应对气候变化行动的重要基石之一。本报告针对我国典型高碳行业之一的水泥行业进行了气候转型风险方面的分析和研究,在梳理水泥行业主要转型路径和转型潜力的基础上,重点评估了不同强度的气候政策和转型力度如何影响水泥企业的财务表现和信用风险水平,并提出针对性的政策建议。

01

水泥行业的碳排放与减排路径

水泥行业是典型的高碳行业。中国是世界上最大的水泥生产国,过去三十多年来水泥产量稳居世界第一,全球水泥产量中超过一半来自中国(如图1所示)。2020年,中国水泥行业碳排放占全国碳排放量的12%,占我国建材行业碳排放量的83.1%¹,占全球水泥行业碳排放量的一半²。在国家2030年碳达峰、2060年碳中和的长期目标下,水泥行业减碳形势严峻,再叠加其他产业政策影响,水泥企业中长期发展将面临转型风险。

¹ 中国建筑材料工业碳排放报告(2020年度).<http://www.cbmf.org/cbmf/yw/7063198>

² 数据来自 Earth System Science Data

1.1 水泥行业碳排放现状

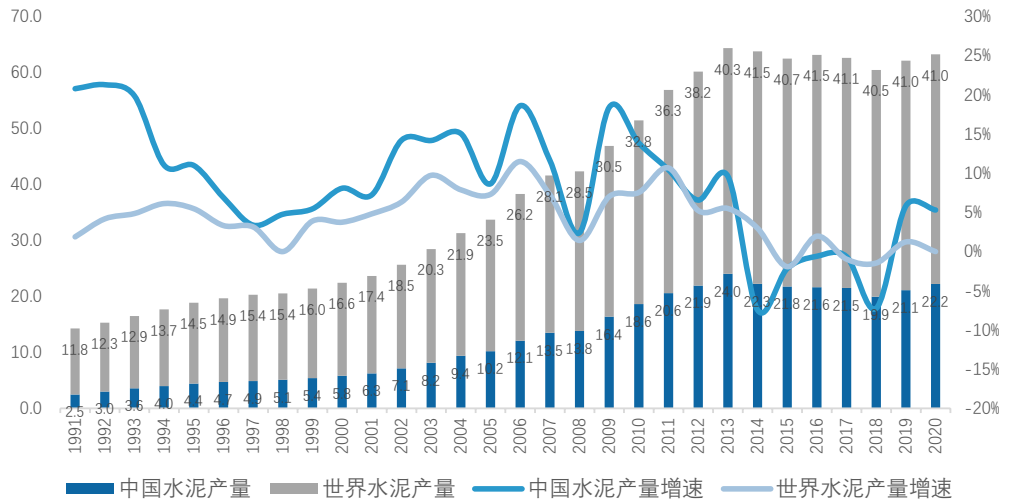


图 1 过去三十年中国和全球水泥产量

数据来源：中国统计局、USGS

注：左轴为水泥产量（亿吨），右轴为产量增速（%）。USGS 世界产量中对我国产量的估算与中国统计局统计数据略有出入，如 USGS 估算中国 2020 年的水泥产量约为 24 亿吨，比统计局统计产量要高。

尽管是全球最大的水泥碳排放国，但中国水泥的碳排放强度属于世界较低水平。2020 年全球水泥碳排放量约为 27.1 亿吨，中国水泥碳排放量约为 14.3 亿吨。根据各国水泥行业碳排放量和水泥产量数据，课题组计算得到 2020 年多国的水泥单位产量的碳排放强度，其中，中国的碳排放强度约为每吨水泥 595.97 千克二氧化碳，相比其他世界主要水泥生产国，碳强度较低（见图 2）。相比于国外，中国碳排放强度较低的原因之一可能在于我国 32.5 型号的水泥产量占比较高（大于 65%），该型号本身的碳强度相较于 42.5 和 52.5 水泥更低³。

³ 高长明. 我国水泥工业低碳转型的技术途径——兼评联合国新发布的《水泥工业低碳转型技术路线图》. 数字水泥网, 2019. <https://www.dcement.com/article/201901/164333.html>

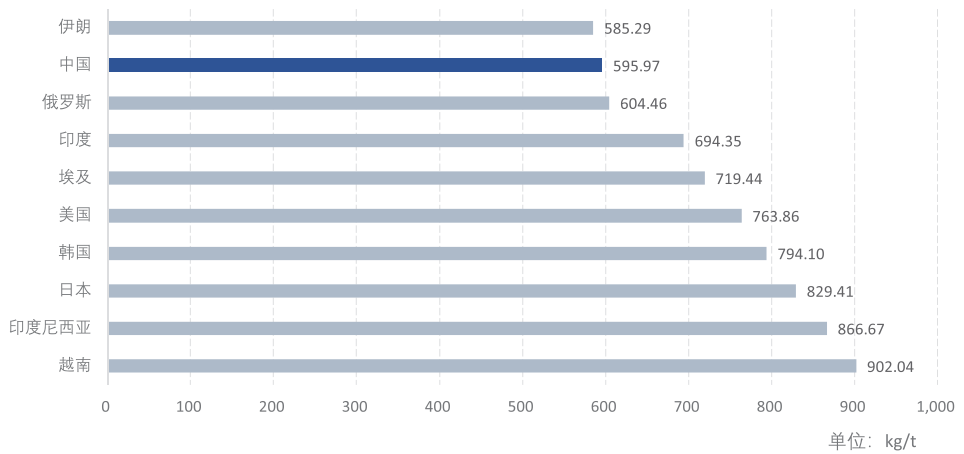


图2 2020年各国水泥单位产量碳强度

数据来源: U.S. Geological Survey, Earth System Science Data

水泥的主要生产工艺为新型干法水泥法的“两磨一烧”。目前除特种水泥熟料生产线和少许 JT 窑外,我国新型干法水泥产量比重已接近 100%。其生产过程主要分为生料制备、熟料煅烧、水泥粉磨三个阶段,具体环节包括矿山采运;物料破碎;对原料进行均化、存储与配比;生料粉磨(一磨)与均化;煤粉制备;熟料煅烧(一烧)及冷却;水泥配料及水泥磨粉(二磨)、水泥包装等。

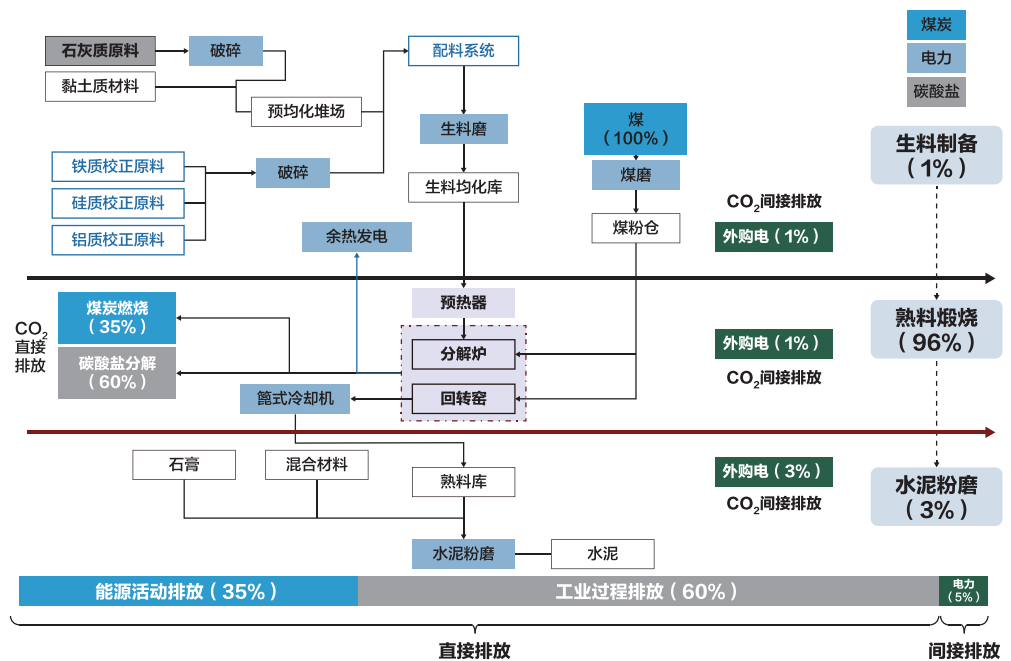


图3 水泥生产工艺流程和碳排放来源

来源: 生态环境部规划院

碳酸盐分解产生的碳排放占水泥生产过程的 60% 左右。“两磨一烧”的生产过程中的碳排放主要来自于生料碳酸盐分解、燃料燃烧以及电力消耗间接产生的二氧化碳。其中，熟料生产过程中的碳排放占水泥碳排放的 90% 以上，主要有三个来源，生产过程相关排放，指原材料碳酸盐分解过程中的化学反应（直接排放）；化石燃料使用有关排放，指实物煤、热处理和运输等设备的燃油排放（直接排放）；电力使用相关排放（间接排放）。从熟料到水泥产品的生产，仅多了水泥粉磨这一道工序，碳排放也仅多了这一环节的外购电（热）耗。具体企业的碳排放构成情况可参考附录。

从市场格局而言，中国水泥的行业集中度及龙头企业区域市场集中度都较高。伴随着市场发展和近年来国家产业政策的推动，国内水泥企业兼并收购加速，市场集中度得到不断提高。据中国水泥协会统计，2010 年排名前十的水泥企业的市场集中度为 43.9%，到 2020 年已上升为 57%，仅中国建材、安徽海螺、金隅冀东三家企业的水泥熟料产能便占到了全国的 39%。从行业竞争格局来说，水泥行业是一个充分竞争的行业，在长期需求下降趋稳、相关能效要求及合规要求提升的趋势影响下，未来水泥行业的集中度和企业之间的协同作用可能进一步提升，头部企业话语权进一步扩大，尾部企业加速退出。

由于水泥产品不易储存、运输半径短，水泥产销形成了区域属性强的特点。据中国水泥协会统计，有 18 个省（市）前 3 家企业产业集中度超过 60%。我国水泥生产区域集中性明显，2019 年，华东地区和中南地区两地区水泥产量合计占比超过 60%；而东北、西北地区各产量占比较低，各自水泥产量占比均不足全国总产量的 10%。⁴

1.2 水泥企业的主要低碳转型路径

水泥企业采取不同的转型路径或减排⁵技术，直接影响其技术成本及减排效果，进而影响到企业的成本效益和经营表现。如图 4 所示，水泥行业的主要转型路径可以总结为四大类型：能效工艺提升、能源结构调整、原料及产品替代及 CCUS 技术。其中，相对于其他减排路径类型，能效工艺提升手段本身对碳排放影响较低，并且由于技术和经济效益条件都已较为成熟，已经被大部分水泥企业应用，未来的减排空间不高；而 CCUS 技术和氢能燃料替代技术虽然应用空间大，减排潜力高，但目前商业化条件不成熟，短期内全面铺开的可能性不高。

⁴ 2019 年中国水泥行业经济运行报告，中国水泥协会，
<http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/gzdt/202005/W020200528770642044654.pdf>

⁵ 本文所提及减排均特指二氧化碳减排，不涉及其他温室气体及有害气体排放。

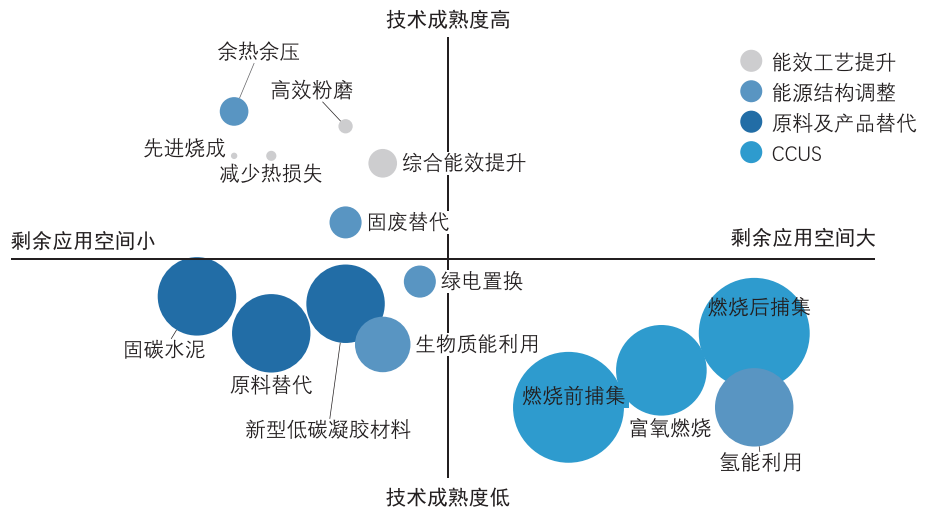


图 4 水泥企业四大类转型技术路径潜力示意图

注：气泡大小表示技术的吨熟料减排幅度大小，本图为概念图，气泡的绝对面积不代表绝对减排幅度。剩余应用空间小有两种可能性，一是已经有大量生产线应用该技术，二是由于某些限制因素，即使现有生产线应用比例尚不高，但未来绝大部分生产线都应用该技术的可能性不大。

来源：课题组

1.2.1 能效工艺提升

水泥生产总能耗占全球工业的 7% (Wang 等, 2009)，能耗（热能和电能）主要来自于研磨、生料预热、熟料煅烧和运输环节 (Usón 等, 2013; Kermeli 等, 2019) (如图 5 所示)，能效工艺提升类的技术手段目标在于降低吨熟料的能耗，从而降低碳排放。在实际操作中，企业常常多管齐下，采取综合性的能效提升方案。能效工艺提升的主要手段分为三类，分别是先进烧成、高效磨粉和降低热损，其他能效提升方式还有综合能效提升方案和高效风电机等手段。

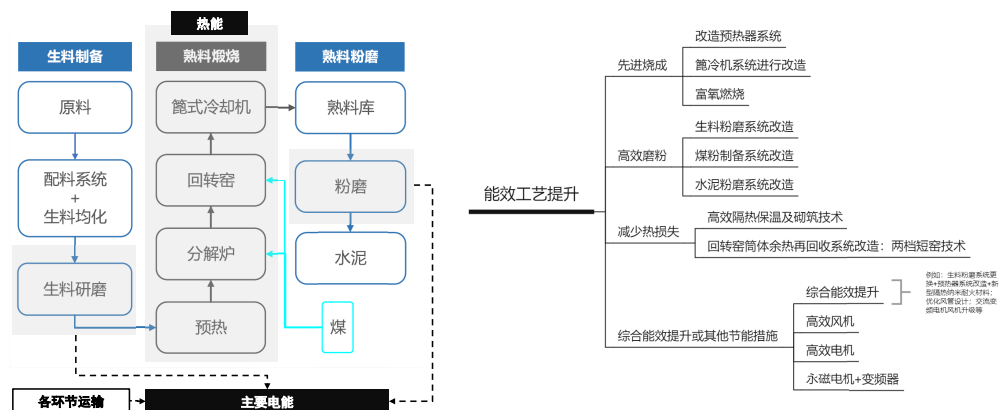


图 5 能效工艺提升的关键生产环节（左）及技术路径（右）

来源：课题组

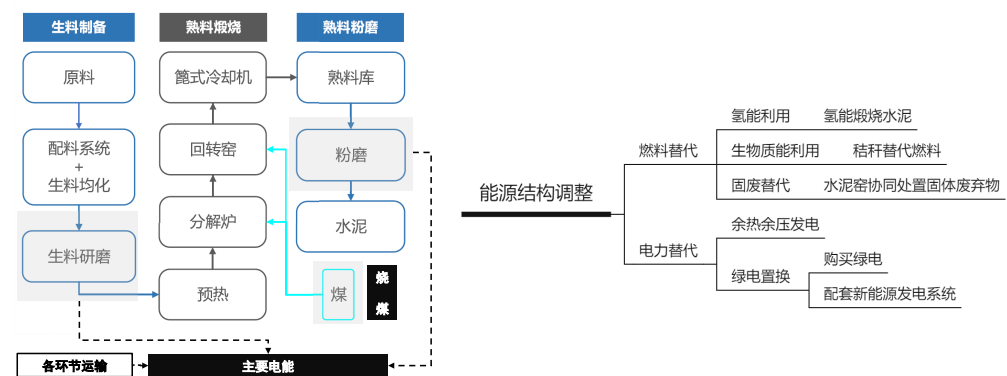
先进烧成相关的改造技术包括预热器系统改造、篦冷机系统改造、富氧燃烧等，主要针对熟料煤耗不达先进值⁶的生产线进行改造。例如，采用六级预热器系统可相对五级预热器降低熟料烧成综合能耗 4 ~ 5kgce/t⁷，采用第四代篦冷机可减排 5.6kg~8.4kg CO₂/t 熟料⁸。

高效磨粉相关的升级方案一般是对生料粉磨系统、煤粉制备粉磨系统和水泥粉磨系统等进行系统改造。目前 30% 的企业已经采用了高效粉磨系统，专家预测这一比例在 2035 年将达到 80%⁹。

降低热损失的手段包括高效隔热保温及砌筑技术、回转窑余热再回收系统改造等。例如，采用窑体保温材料可节约热能 0.26 GJ/t 熟料（Hasanbeigi 等，2013），采用两档短窑技术对回转窑余热回收系统进行改造可减排 1.82kg CO₂/t 熟料¹⁰。

1.2.2 能源结构调整

水泥生产过程中来自能源活动和电力使用的碳排放占总排放的 40%，主要涉及的环节有：煅烧环节所用化石燃料（煤炭）、粉磨和运输等环节涉及的电力（煤电，如图 6 所示）。用低碳能源替代高碳能源是有效减少该部分碳排放的方式，调整能源结构的主要方式分为燃料替代和电力替代两方面。欧盟水泥行业的整体燃料替代率高达 39%，荷兰、奥地利、挪威等国家甚至达到 60% 以上，但我国固体废物替代的潜力目前主要受制于废弃物分类和来源不完善。



TSR：喂入窑系统的废弃物对煤的热量替代率

图 6 能源结构调整的关键生产环节（左）及技术路径（右）

来源：课题组

⁶ 目前的先进值为 100kg 标准煤 / 吨熟料。

⁷ 中国建筑材料联合会《水泥行业碳减排技术指南》。

⁸ 根据文献数据计算所得（罗雷等，2022）。

⁹ 高长明：我国水泥工业低碳转型的技术途径——兼评联合国新发布的《水泥工业低碳转型技术路线图》。数字水泥网，2019。<https://www.dcement.com/article/201901/164333.html>

¹⁰ 同脚注 8。

可用作替代燃料的来源有固体废物、生物质能及氢能等。固废替代燃料的主要方式有水泥窑协同处置固体废弃物，指将预处理后的固体废弃物投入水泥窑，在进行水泥熟料生产的同时实现对固废的无害化处置，我国相关的技术已较为成熟（何纪纲等，2021）。我国水泥窑协同处置的固废来源主要还是城市生活垃圾、污水污泥等。生物质能利用中，可以利用秸秆、树皮等农作物“废物”作为替代燃料，枞阳海螺公司建设的秸秆替代燃料项目燃料替代率超过40%，每年节省原煤4.9万吨，处理掉生物质废物约15万吨/年¹¹。减排潜力最高的氢能利用技术目前是建材行业重大科技攻关项目之一，在替代比例达到20%的情况下，可以将吨熟料的碳排放降低32%左右，且不需要改变现有水泥生产线的技术¹²。但是目前制氢成本较高，特别是绿氢，应用在水泥生产中成本高达130-240美元/吨熟料（Friedmann等，2019），未来降本是重要方向之一。

电力替代方案中，一方面是减少外购电力，一方面是将现有电力置换为绿色或零碳电力¹³。目前的电力替代主要依赖于内部余热余压发电，应用比例已经很高；同时，部分大型水泥集团已经开始发展光伏电站、储能项目等新能源业务，同时满足减少外购电力和电力绿色化的要求。例如，海螺水泥2021年已累计建成200MW光伏电站项目，预计到2022年底容量可达1GW，年发电能力达到10亿千瓦时¹⁴；其中济宁海螺2011年建成1.5兆瓦风力发电项目，是首个利用新能源的水泥企业。

1.2.3 原料和产品替代

水泥生产中最主要的碳排放来源是碳酸盐煅烧环节，占总排放的60%，碳酸盐（石灰石）的替代比例是实现减碳的关键。原料或产品替代方案有原料替代和新型低碳凝胶材料两类，另外，新型的固碳水泥和混凝土再利用等技术也在探索中。此类技术在目前的应用场景并不多，大多只能专途专用，例如大坝水泥等。根据研究（贺晋瑜等，2022）测算，若水泥行业的低碳转型力度较强，原料替代或低碳水泥的生产线应用比例预计可在2025年达到5%。

¹¹ 新闻：替代40%燃煤！海螺成功研发熟料生产新技术！https://www.sohu.com/a/430278695_653352

¹² 汪澜，绿氢煅烧水泥熟料关键技术研究，2021年建材行业碳减排国际论坛，<http://www.cbmf.org/cbmf/xydt/xyxx/7095149/index.html>

¹³ 非化石能源等碳排放接近零的能源产生的电力。

¹⁴ 海螺水泥，2022年5月答投资者问，<https://finance.eastmoney.com/a/202205252390776723.html>

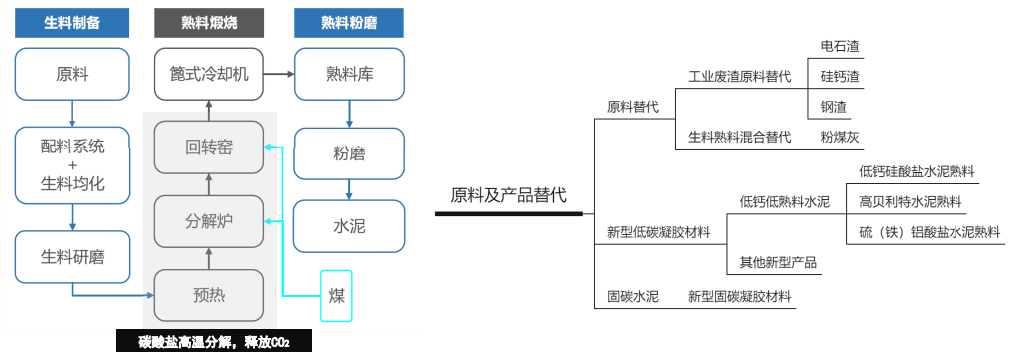


图 7 原料产品替代的关键生产环节（左）及技术路径（右）

来源：课题组

其中，原料替代的来源例子有工业废渣和粉煤灰等。工业废渣来源有电石渣、硅钙渣、钢渣等。电石渣的总体可利用量较小，国内有电石渣的企业基本都已经配套了水泥生产线，未来挖潜空间十分有限。

新型低碳凝胶材料主要是通过调整碳酸盐的比例或种类实现减碳目的。国内常见的低钙低熟料水泥有低钙硅酸盐水泥熟料、高贝利特水泥熟料、硫（铝）酸盐水泥熟料等，国外有索利达水泥、Celitement 水泥等；其中 Celitement 水泥相较于波特兰水泥熟料可减碳 50%（张宾等，2021）。

混凝土方面，英国、荷兰、挪威、澳大利亚等国家的水泥企业已经研发了 EcoPlus、Ecocrete、Nor Lavkarbon、Green Concrete 等通过调整成分组成实现低排放的混凝土产品，最高减碳幅度达到 70%¹⁵。在我国建筑业逐渐转为存量市场的趋势下，未来可能通过延长混凝土的生命周期、保有量混凝土返窑利用（部分高校在研究）等方式，部分替代新增水泥，但完全替代的可能性较低。

1.2.4 碳捕集和利用

对于包括水泥行业在内的高碳行业而言，CCUS 技术是减碳潜力最高、效果最好的技术选项之一。CCUS 技术中的碳捕集主要分为燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧（见图 8），还包括生物能与 CCUS 耦合、直接空气捕集等新型技术。目前 CCUS 规模化应用的主要困难点主要在于捕集成本高昂，以及捕获气体的处理利用途径有限。

¹⁵ Heidelberg Cement, Sustainable Products, <https://www.heidelbergcement.com/en/sustainable-products>

成本效益问题在长期中可能得到解决，但二氧化碳的后续处置和利用途径仍需持续进行探索和研究。国际上主流的二氧化碳利用途径是在食品加工行业再利用或石油开采，但我国大规模应用的条件尚不成熟。已知的二氧化碳利用路径有矿化封存、混凝土固碳、CO 还原及其他行业再利用等。其中，矿化封存在实验室阶段已经可行，但商业效益性不足，且可利用规模有限，可能只能达到百万吨级别。混凝土固碳路径具有技术可行性，但吸收量有限，且其减碳进程和效果和装配式行业发展息息相关。CO 还原过程本身用电量极高，需要解决的反而是绿色电能的问题。

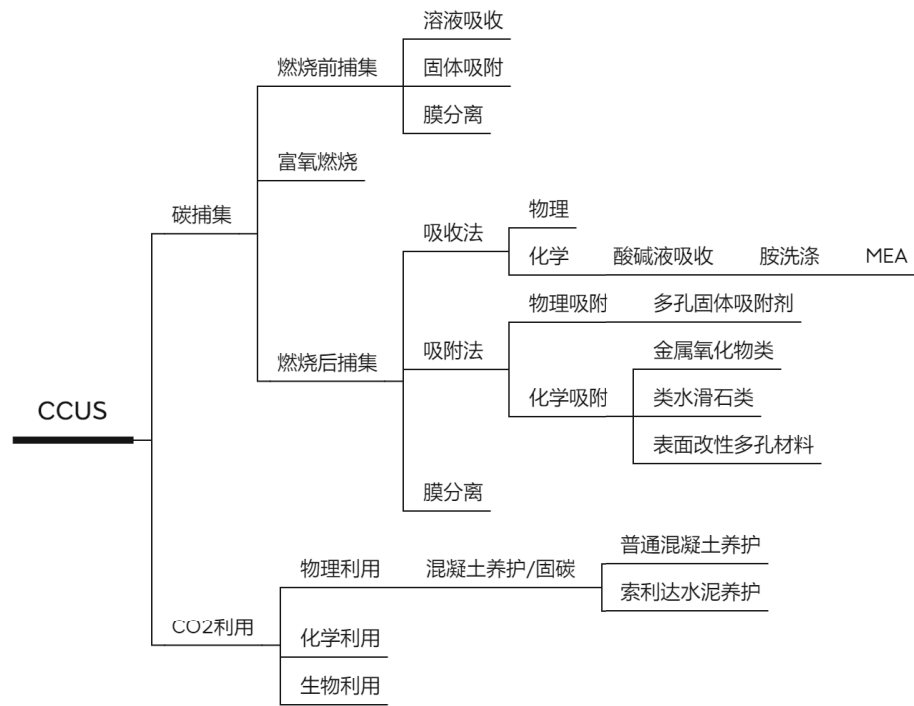


图 8 CCUS 技术路径

来源：课题组

案例

企业背景

A 企业位于我国华东地区，是一家国有集团公司的下属水泥厂，拥有一条 4500 吨 / 天的单一熟料产能的生产线，每年熟料产量约 150-180 万吨。A 企业生产环节涵盖“两磨一烧”中的前两部分，即“一磨一烧”。A 企业距离当地矿山资源地较近，生产的熟料产品部分销往集团内部粉磨站，部分对外销售，销售半径覆盖苏锡常沪地区。

现有低碳转型举措

低碳转型措施	具体措施及效果
能源结构调整 ——燃料替代	A 企业 2020 年引进了水泥窑协同处置生活垃圾设备和水泥窑协同处置危废垃圾设备。现阶段，A 企业水泥窑年运行日 330 天，每年可协同处理所在城市 16.50 万吨生活垃圾，处理危废垃圾 10 万吨，可替代 10-15% 的煤炭燃烧。
原料替代	A 企业水泥窑在协同处置垃圾时，垃圾焚烧后产生的部分飞灰可以代替水泥原料，固废处置的部分污染土可作为粘土替代。例如，废塑料焚烧后产生的部分灰尘可用于替代水泥原料。然而，A 企业每天生产 4500 吨熟料产品需要约 7000 吨生料原料，由垃圾处理产生的可替代废料在原料总量中占比很小。
能源结构调整 ——能效提升	已安装 9MW 的水泥窑低温余热发电项目，大量减少了 A 企业的外购电力。据调研，该企业电力 55%-60% 来自于余热发电、自发自用，余下的 40%-45% 来自于外购电。
能源结构调整 ——绿电置换	A 企业计划未来在厂房布局屋顶光伏，以进一步减少外购电力比例。然而，由于该项目推进涉及发改委、自然资源局、工信部门、产权部门、供电系统等多个政府部门，政府部门备案手续较为复杂，A 企业现阶段推进较为缓慢。
公正转型—— 员工“一工多能” 技能培训	高碳企业在低碳转型过程中往往也伴随着失业等社会问题，而 A 企业作为国有企业承担着更多的社会责任，采取了一些确保员工就业的转型举措。为实现企业内部的人员优化目标但尽量减少对员工失业的影响，A 企业通过岗位合并、优化，以及岗位培训实现人员缩减，如使机修工经过培训取得电工、焊工的资格证，使工人实现“一工多能”。

基于上述减碳举措，现阶段 A 企业的碳排放水平已达到国家水泥行业先进水平。据调研，A 企业要求企业的熟料单位产品综合能耗 2022 年度达到 100 千克标准煤 / 吨以下，该指标与国家标准《水泥单位产品能源消耗限额》（GB 16780-2021）对 1 级先进值的要求持平；要求熟料单位产品综合电耗 2022 年达到 51-52 千瓦时 / 吨，接近 48 千瓦时 / 吨的 1 级先进值标准。据 A 企业 2021 年度温室气体排放报告显示，A 企业每吨水泥熟料直接排放为 0.7644 吨二氧化碳，每吨熟料直接排放与间接排放的和为 0.7853 吨二氧化碳，低于全国平均水平。

企业低碳转型面临的挑战

企业长期低碳转型依然面临行业共性和企业个性挑战。伴随着国内长期产业结构调整，以及经济下行风险、新冠疫情风险的影响，水泥企业面临复杂多变的发展挑战。在碳中和背景下，水泥企业更面临着低碳转型资金缺口和技术挑战。

行业性挑战

水泥企业的经营情况受宏观经济影响较大。2022 年上半年，受上海地区疫情影响，长三角地区水泥出现“量价齐杀”局面。受此影响，A 企业利润空间大幅收缩，当地多家水泥厂甚至出现亏损。维持企业生存与经营成为企业最重要的目标，许多企业环保和减碳等计划的推进也受到影响。

尽管疫情影响是短期的，但水泥行业依然面临经济转型的“去产能”挑战。现阶段，传统基础设施建设对我国经济增长带动越来越小，房地产行业也从增量市场转向存量市场，水泥需求端长期来看呈下降态势。需求收缩将影响企业的长期经营，水泥行业长期将走向“去产能”；需求收缩也将加剧行业竞争，在劳动生产率、技术水平、节能环保水平上处于劣势的企业将加速淘汰出清。

水泥行业颠覆性减碳技术尚未成熟，行业数字化、智能化程度不足。目前，水泥行业已有的成熟的减碳技术减碳贡献有限，行业深入减碳仍需颠覆性减碳技术。例如，前文所述的氢能利用、碳补集技术、新型低碳凝胶材料等技术，现阶段尚不成熟，尚未实现大规模商业化应用。数字化设备可以协助水泥生产线实现全流程能耗监控，也有利于企业改进工艺，然而现阶段大部分水泥企业均未实现数字化转型。

水泥行业低碳转型存在资金缺口，现有绿色投融资难以匹配企业融资规划。尽管部分减碳技改项目有利于企业降本增效，经济性强，但行业大部分减碳投资项目盈利能力弱。除了减碳投资外，水泥企业现阶段面临环保改造要求（如绿色矿山改造、超低排放改造），这加剧了企业在环保和

减排上的资金支出压力。然而，现有财政公共资金难以满足水泥行业的节能环保资金缺口。此外，现有绿色金融政策体系更多从项目层面给予企业金融支持，但由于企业内部资金的使用规划和融资规划难以一一对应，而且绿色金融目录较少覆盖高碳企业的低碳转型项目，这也使得企业难以得到绿色投融资支持。

A 企业面临的个性挑战

新技术的应用对于大型集团下属单体企业来说风险较大。现阶段，A企业的能效表现在全国已属于领先者，若想进一步减碳，就需要探索应用更多的减碳新技术。然而，A企业作为已具规模的国有企业子公司，在生产、税收、就业上均有很强的社会属性，对经营稳定性要求高，对新技术风险承受能力低。此外，A企业作为大型国有集团的五级单位，在大型资本支出项上的决策权也相对较小。

技改停工与垃圾处置难以中断存在矛盾。技改通常需要超过一个月以上的停窑改造期，但企业现有垃圾存储与处置能力难以满足技改对停窑的时间要求。在政府部门规划下，A企业所在地每天产生近500吨生活垃圾运往A企业处理，若出现长期停窑，A企业将难以消化当地的生活垃圾。因此，即使企业有减碳技改需求，也或难以协调垃圾处置而被迫推迟或放弃改造。

02

水泥行业气候风险情景分析

2.1 分析方法与模型

本节主要介绍报告中所用到的气候转型风险分析方法和建模流程。分析方法主要分为四个步骤：一、关键因素与传导关系识别；二、银行风险敞口测量；三、情景设置；四、建立分析模型并进行情景分析。

2.1.1 气候风险因素及传导路径

气候因素相关的风险来源于物理风险和转型风险（NGFS，2019）。其中，转型风险指在应对气候变化的行动中，为实现经济低碳转型，政策调整、技术突破、社会意识变化等因素对重点行业造成的影响。例如，国家出台支持低碳行业发展、限制高碳经济活动的政策，不作为的高碳企业可能面临高企的合规成本、萎缩的市场需求等冲击，而低碳企业及积极转型的高碳企业则有可能抓住机遇，从政策优惠、潜在市场中受益。经营水平受到影响的企业，盈利能力、财务表现和偿债能力也随之产生波动，影响与企业挂钩的金融资产价值。例如，经营水平下降的企业债务偿付能力下降，银行面临的与该企业相关的信贷风险上升，若发生集体性信贷风险大幅上升事件，有可能催生系统性的金融风险。气候相关风险与企业经营表现乃至金融风险之间的传导关系如图 9 所示。对于双碳行动下首当其冲的高碳排放行业而言，识别其在经济低碳转型进程中的风险至关重要。

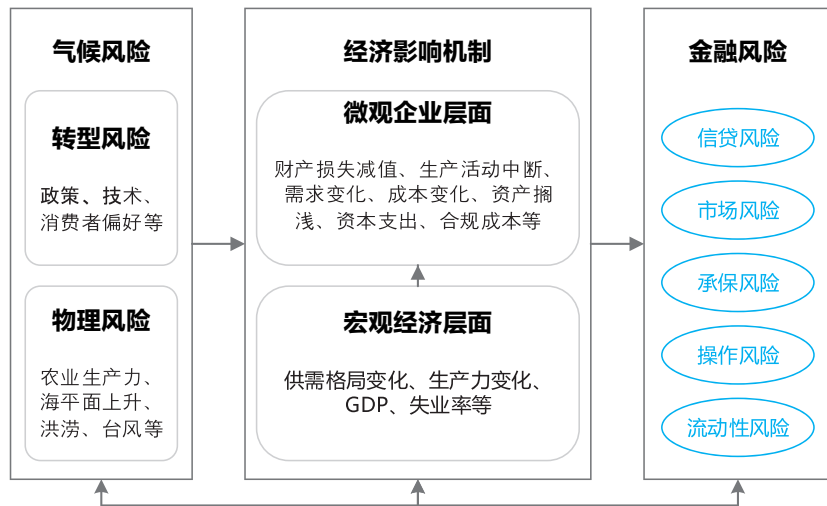


图 9 气候相关风险与金融风险之间的传导机制

来源：NGFS (2020)，课题组

基于 NGFS 提出的气候风险分析框架，结合水泥行业自身特点，本报告识别出水泥行业的三大关键影响因素，分别为能效减排目标、气候政策及市场环境（见图 10），用于识别和分析水泥企业面临的气候转型风险挑战。其中，水泥行业能效减排目标和气候政策为主要受气候目标影响的因素，市场环境受多方因素影响；三类因素通过不同的途径对资本支出、碳排放权支出和营收等三大承压因素产生作用，承压因素的变化导致净资产变动，最后通过金融风险模型反映在行业整体的违约率变化上。

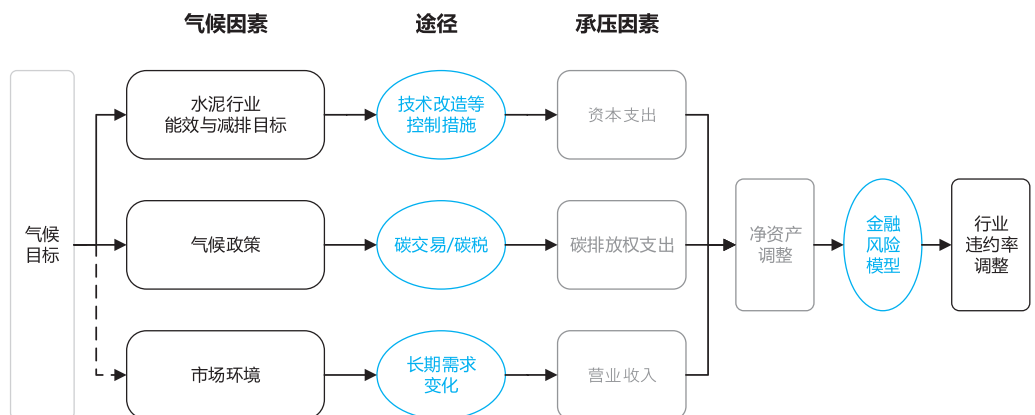


图 10 水泥企业转型风险到金融风险的传导机制

来源：课题组

具体而言，上述三种财务承压因素对水泥企业净资产的影响可用以下会计式表达：

$$\begin{aligned}
 \Delta \text{净资产}_{k,i} &= \underbrace{S_{capex} \text{ 减排资本支出 } (f_{capex,i,t})}_{\text{资本支出项}} \\
 &+ \underbrace{S_{carbon} \text{ 碳排放权支出 } (f_{carbon,i,t})}_{\text{碳排放权支出项}} \\
 &+ \underbrace{S_{rev} \Delta \text{营业收入 } (f_{rev,i,t})}_{\text{营业收入项}} \\
 &= \sum S_k f_{k,i,t} \tag{1}
 \end{aligned}$$

其中，减排相关资本支出、碳排放权支出和营业收入等三个财务承压因素分别由 $f_{capex,i,t}$ 、 $f_{carbon,i,t}$ 、 $f_{rev,i,t}$ 三个变量表示。三个参数 S_{capex} 、 S_{carbon} 和 S_{rev} 分别表示净资产变动对上述三个财务承压因素的敏感度（参数校准详见下文）。变量和参数的下标中的 i 表示不同的气候情景（详见 2.1.3 节）， t 表示年份， k 表示三项财务承压因素。本节以下部分介绍三大财务承压因素和敏感度参数的计算和校准。

（1）资本支出项

水泥行业的减排目标（减排量）和单位减排成本构成整体的减排支出。随着双碳目标下“1+N”政策体系的逐步完善，国内各部门对水泥行业的能效和减排目标日益明晰。2022年，各部门先后出台《“十四五”节能减排综合工作方案》《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》《工业领域碳达峰实施方案》，对水泥行业节能降碳提出了具体工作要求。2020年，水泥行业能效优于标杆水平的产能占5%，能效低于基准水平的产能占24%；预计2025年，水泥行业标杆水平产能达到30%，能效基准水平以下清零，熟料单位产品综合能耗水平下降3%以上；2030年，原燃料替代水平大幅提高，突破氢能煅烧等低碳技术，改造建设一批减污降碳协同增效的绿色低碳生产线，实现窑炉碳捕集利用封存技术产业化示范。

水泥行业要实现相应的能效目标和减排效果，需要企业加大节能减排相关技术的研发投入，采取技术改造、燃料替代、原料替代等节能减排控制措施，力图达成经济可行的技术突破。

(a) 减排目标（减排量）

考虑水泥行业的碳排放现状、能效要求和减碳措施可行性的情况下，生态环境部规划院联合多机构研究（贺晋瑜等，2022），基于现有的技术情况，设计了如表 1 所示的能效与减排的措施和目标。若采取表 1 右列对应的减碳手段并达到该节能减碳目标，2035 年水泥的碳排放强度可从基准情景（0.64 吨二氧化碳 / 吨水泥）下降 0.05 到 0.59 吨二氧化碳 / 吨水泥。2.1.2 节中将此减排目标定义为“弱减排”情景。

表 1 实现减排目标的措施（生态环境部规划院）

减碳手段	年份	基准情景	实现阶段性减排目标的措施
熟料烧成系统节能改造	2025	单位熟料煤耗保持现状	对单位熟料煤耗大于 112kg/t (以标准煤计) 的生产线实施技术改造
	2030		对单位熟料煤耗大于 109kg/t (以标准煤计) 的生产线实施技术改造
	2035		对单位熟料煤耗大于 105kg/t (以标准煤计) 的生产线实施技术改造
推广高效粉磨技术	2025	30% 企业采用高效粉磨技术 (现状)	40% 企业采用高效粉磨技术
	2030		60% 企业采用高效粉磨技术
	2035		80% 企业采用高效粉磨技术
推进替代燃料使用	2025	5% 生产线采用燃料替代技术 (现状)	20% 生产线采用燃料替代技术
	2030		40% 生产线采用燃料替代技术
	2035		60% 生产线采用燃料替代技术

来源：贺晋瑜等 (2022)

部分头部企业在节能降碳方面对自身提出了更高的要求。华新水泥 2020 年单位水泥二氧化碳排放量为 0.69 吨，计划通过阶段性减排计划（见图 11），目标在 2035 年实现单位水泥二氧化碳排放量 0.43 吨（见表 2）。2.1.2 节中将参照华新水泥的计划，将其减排目标定义为“强减排”情景。根据华新水泥公布的预期的研发支出，可估算华新水泥在 2020-2035 年间的平均的每年单位减排成本约为 40 元每吨二氧化碳。

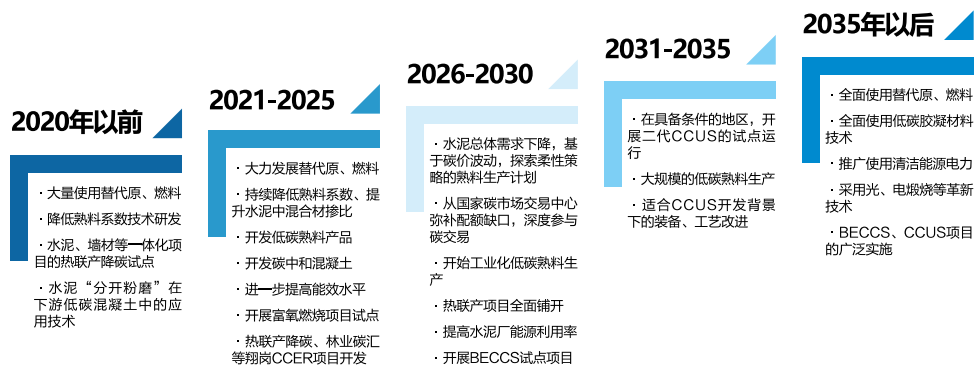


图 11 华新水泥减碳路线图

来源：华新水泥 (2021)

表 2 华新水泥减碳目标时间表

目标碳强度（千克二氧化碳 / 吨水泥）		
年份	华新水泥	华新水泥武穴工厂
2020	652	623
2025	565	539
2030	475	471
2035	432	-

注：未将 CCUS 相关减碳效果纳入计算。

来源：华新水泥 (2021)

(b) 减排的资本支出

水泥行业整体而言，减碳成本取决于采用的减排技术和应用范围。生态环境部规划院联合多位高校学者（朱淑瑛等，2021）对水泥行业减排成本进行了估算。图 12 展示的是该论文中各类碳减排技术的减排潜力和对应的减排成本。在此基础上，论文考虑了未来不同技术普及率与熟料产量，构建了 2025、

2030、2035 年减排成本曲线，横轴和纵轴分别表示总减排量和总减排成本（如图 13 所示）。可以看到，随着减排量上升，边际减排成本有所上升。同时，随着技术进步及应用普及率上升，2035 相较于 2025 年而言，在相同的减排量下的减排成本有所下降。本文选取其中 2025 年的减排成本曲线作为减排支出的基本假设（图 13），表示每年水泥行业相对于基准情景的总减排量对应的总减排成本，根据该曲线，计算单位二氧化碳减排成本。

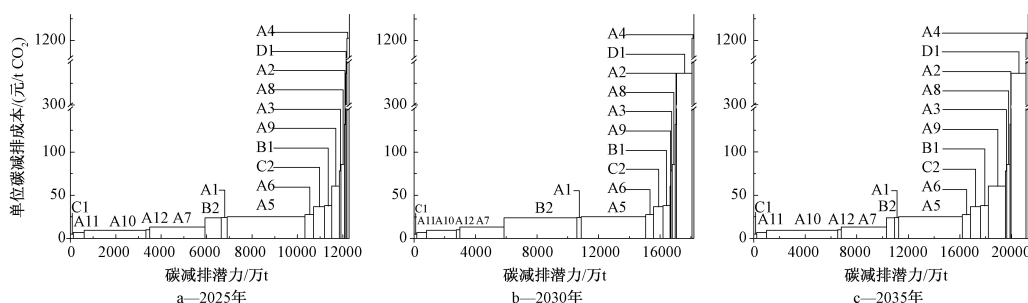


图 12 水泥行业各碳减排技术的减排潜力和成本

来源：朱淑瑛等 (2021)

注：图中的字母和数字对应原文中的技术集，此处不作展开

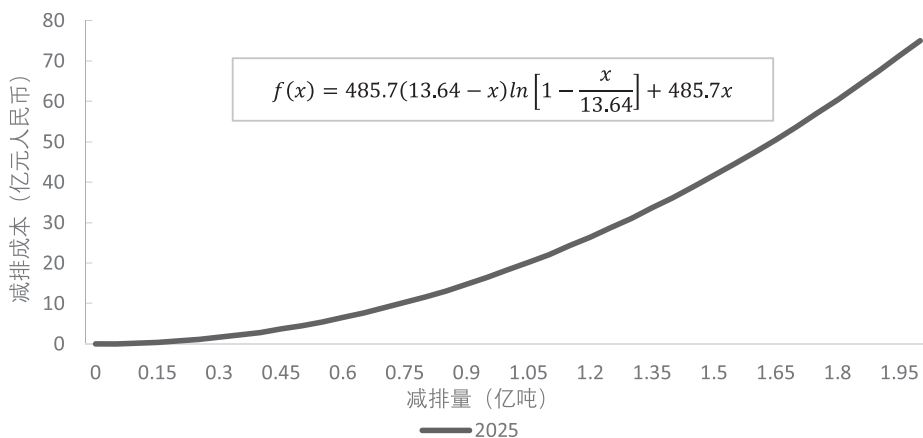


图 13 我国水泥行业的减排成本曲线

来源：朱淑瑛等 (2021)，课题组绘制

注：该曲线由图 12 (a) 拟合，具体方法见《中国水泥行业二氧化碳减排技术及成本研究》（朱淑瑛等，2021）。

表 3 水泥行业边际减排成本

减排量 (亿吨)	0.5	1.0	1.5	2	3
边际减排成本 (年) (元 / 吨二氧化碳)	13.5	22.9	37.3	52.4	96.1

从企业的财务角度, 减排成本主要体现为能效与减排目标实施的资本支出, 包括研发投入、购买新设备、新技术产生的支出。基于上述计算的行业边际减排成本和减排目标 (减排量), 可以估算减排相关的年资本支出 ($f_{capex,i,t}$), 具体见表 3。

表 4 资本支出项计算方法

$S_{capex} * f_{capex,i,t}$		
$f_{capex,i,t}$	$f_{capex,i,t} = \text{减排量} * \text{单位减排资本支出}$	
	减排量	能效与减排目标对应的减排量
	单位减排支出	根据最新前沿研究的中国水泥行业 2025 年减排成本曲线的拟合模型计算, 见表 3。
S_{capex}	根据 10 年间 26 家上市企业的财务数据校准, 取中位数 -0.96: 资本支出每增加一元, 净利润减少 0.96 元。	

(2) 碳排放权支出

作为高碳行业, 碳排放权支出将是水泥企业的重要的财务成本。影响碳排放权支出的核心因素是气候政策的力度。中国在积极构建全国的碳交易市场, 在理想情况下碳交易价格可以被视为行业统一的碳排放的成本。尽管我国也同时实施许多非价格型的气候政策工具, 但总体都可以表示为隐性的碳排放的价格。因此本文将碳交易市场价格作为气候政策的指标。

目前, 专家学者对我国实现双碳目标下的碳价的走势有不同的预测, 总体而言国内对碳价的预测相对国外偏低一些。例如, 如图 15 所示, 根据清华大学的预测, 2035 年国内碳交易价格在 178 元人民币左右 (清华大学气候变化与可持续发展研究院, 2020); 而在国际能源署的预测中, 中国要达到碳中和目标, 2035 年碳价需要达到 407 元人民币左右 (IEA, 2021)。总体来说, 各个预测中的碳价都随时间的上升而不断攀升。

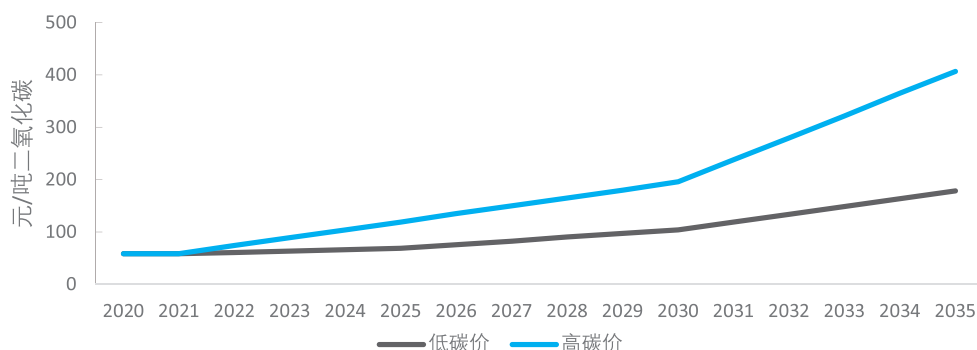


图 14 碳价格预测情景

来源：IEA (2021)、清华大学气候变化与可持续发展研究院 (2020)、课题组

除了碳价，碳排放权支出还受到碳配额和碳交易市场基准线¹⁶设定的影响。被纳入碳排放交易市场的企业每年以免费分配或拍卖的方式获得一定数量的碳排放权配额。为达成履约，当年碳排放量超过自身所获碳配额的企业，需要通过碳市场交易购买额外的排放权；相应地，当年排放量低于自身配额的企业，可通过卖出富余碳排放权获得收益。碳排放权支出 (f_{carbon}) 即为购买碳配额缺口部分付出的交易成本。碳排放权支出及其对净利润的影响的参数计算如下表。

表 5 碳排放权支出项计算方法

$S_{carbon} * f_{carbon,i,t}$		
$f_{capex,i,t}$	$f_{capex,i,t} = \text{碳交易价格} * \text{碳配额缺口}$	
	碳配额缺口	产量 * 实际碳强度 - 免费配额比例 ¹⁷ * 产量 * 基准碳强度
	碳交易价格	参考 IEA Announced Pledges Scenario 碳价预测及清华气候变化研究院碳价预测数据 (见图 15)。
	实际碳强度	能效与减排目标对应的碳强度
	基准碳强度	参考贺晋瑜等 (2022) 中基准情景的碳强度
S_{carbon}	根据 10 年间 26 家上市企业的财务数据校准，取中位数 -0.96：碳排放权支出成本每增加一元，净利润减少 0.96 元。	

¹⁶ 本文假设碳交易市场基准线为基准情景中碳强度，具体数据见 2.1.3 节表 7

¹⁷ 免费碳排放额发放比例设定为 96%，具体见 2.1.3 节表 7。

(3) 营业收入

除了气候转型因素以外,随着我国经济增速的放缓和地产、基建需求的变化,水泥的总体需求和产量也将有所下降,存量市场更新替换成为水泥需求的主要来源。如图 16 所示,根据中国水泥协会的预测,预计 2022 年熟料产量 14.5 亿吨,水泥产量 22.45 亿吨;2025 年熟料产量 13 亿吨,水泥产量 19 亿吨;2035 年熟料产量 10 亿吨,水泥产量 15 亿吨左右(图中高需求情景)。同时,根据贺晋瑜等(2022)研究中高需求和低需求之间的比例关系,我们基于水泥协会的需求预测,拟合出低需求情景下的水泥需求曲线,作为对比。

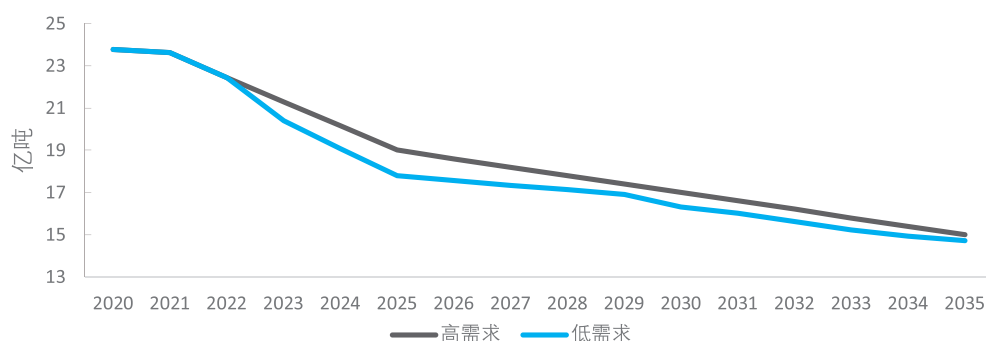


图 15 水泥需求情景

来源: 水泥协会, 课题组

市场需求变化作用的财务承压因素为营业收入,其定义为由于需求或价格变动带来的营业收入变动。营业收入项的计算方法见下表。

表 6 营业收入项计算方法

$S_{rev} * f_{rev,i,t}$		
$f_{rev,i,t}$	$f_{rev,i,t} = \text{需求变化量} * \text{平均销售价格}$	
	需求变化	水泥协会最新内部预测、生态环境部研究(见图 16)。
	平均销售价格	水泥协会预测其将维持在 450-650 元/吨的水平。
S_{rev}	根据 10 年间 26 家上市企业的财务数据校准,取中位数 0.18: 资本支出每增加一元,净利润增加 0.18 元。	

2.1.2 气候情景设置

如上文分析，三大气候影响因素分别为减排目标和力度、气候政策（碳价）和市场需求变化。我们设置了两类需求情景，给定不同需求预测的前提下，对减排目标和气候政策的执行力度进行不同的假设，在此基础上分析行业违约率受到的影响。

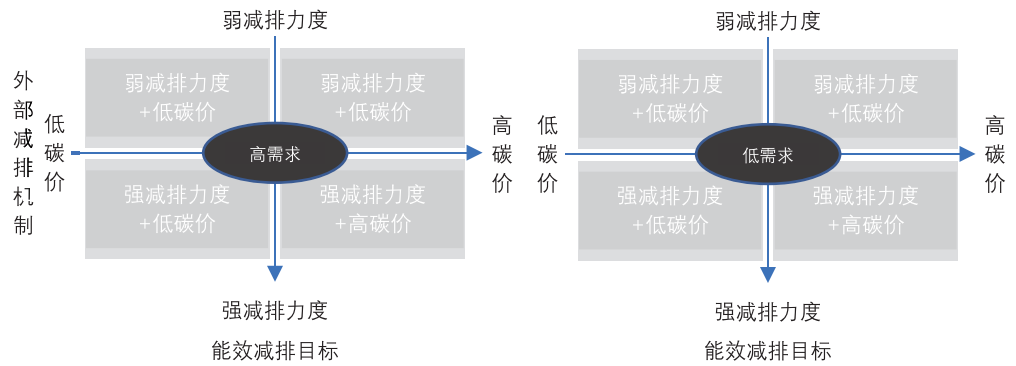


图 16 八类气候情景示意图

表 7 情景假设

气候因素	强 / 高情景	弱 / 低情景
市场需求	根据中国水泥协会的预测，2025 年熟料产量 13 亿吨，水泥产量 19 亿吨；2035 年熟料产量 10 亿吨，水泥产量 15 亿吨左右。	根据中国水泥协会和生态环境部的预测，水泥产量在 2025 年达到 17.8 亿吨，2035 年达到 14.7 亿吨左右。
能效与减排目标	以华新水泥的减排目标作为实施较强度减排的代表，2035 年目标碳强度为 0.43 吨二氧化碳 / 吨水泥。	以生态环境部设计的控排情景中减排目标力度作为实施较弱力度减排的代表，2035 年目标碳强度为 0.59 吨二氧化碳 / 吨水泥。
气候政策	尽早实施碳中和政策，碳价在 2030 年达到 195 元 / 吨二氧化碳，2035 年达到 406 元 / 吨二氧化碳。	延迟实施碳中和政策，碳价在 2030 年达到 104 元 / 吨二氧化碳，2035 年达到 178 元 / 吨二氧化碳。

在高需求情景下，若采取强有力的减排目标，吨水泥碳强度在 2030 年达到 0.47 吨二氧化碳，2035 年达到 0.43 吨二氧化碳，则到 2035 年，水泥行业相较于高需求的基准排放可减排 3.1 亿吨二氧化碳；若采取相对较弱的减排

目标，吨水泥碳强度在 2035 年达到 0.59 吨二氧化碳，则到 2035 年，水泥行业相较于高需求的基准排放可减排 0.65 亿吨二氧化碳（见图 18）。类似地，在低需求情景下，若采取强有力的减碳目标，2035 年可相对基准排放减碳 3 亿吨；若采取相对较弱的减排目标，2035 年可相对基准排放减排 0.64 亿吨（见图 19）。

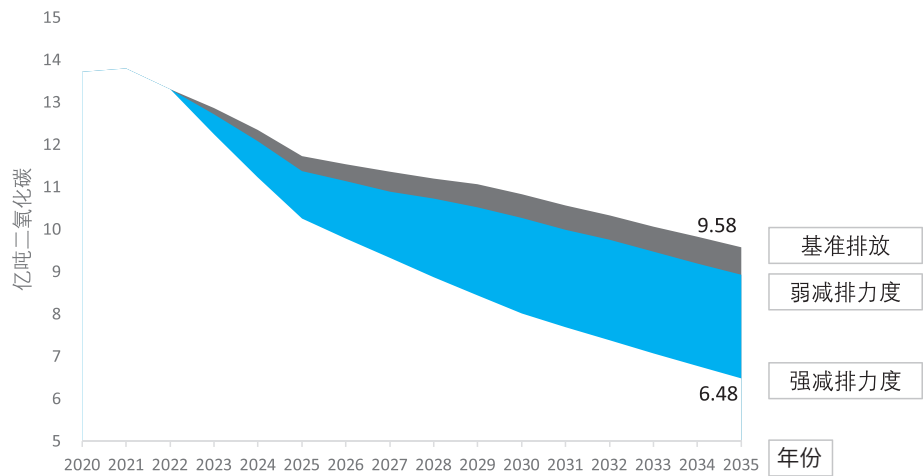


图 17 不同减排力度下的碳排放（高需求）

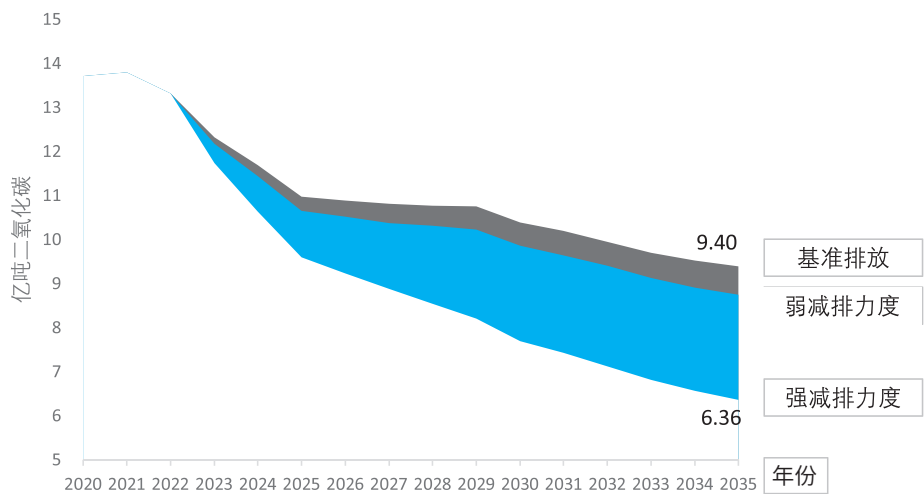


图 18 不同减排力度下的碳排放（低需求）

在进行具体的情景分析时，以图 19 气候情景中低需求（右图）的强减排力度 + 高碳价（右下角）情景为例：在该气候情景下，水泥产量在 2025 年达到 17.8 亿吨，2035 年达到 14.7 亿吨左右（见图 16 低需求），合理的平均销售价格区间位于 450 元 -650 元 / 吨水泥之间；政府较早实施碳中和政策，碳价在 2030 年达到 195 元 / 吨二氧化碳，2035 年达到 406 元 / 吨二氧化碳（见图 15 高碳价），水泥行业加大对节能减排的投入，并设定了强有力的能效与减排目标，预期 2030 年实现单位水泥碳强度 0.47 吨二氧化碳，2035 年实现单位水泥碳强度 0.43 吨二氧化碳（见图 21 强减排力度）。具体的假设数据和参考依据可参考表 7。

表 8 情景设置的相关参数

假设类型	年份		单位	2025	2030	2035	参考依据
能效 减排 目标	基准碳强度 ¹⁸		tCO ₂ /tcm	0.62	0.64	0.64	贺晋瑜等 (2022)
	目标 碳强度	弱减排	tCO ₂ /tcm	0.60	0.60	0.59	
		强减排	tCO ₂ /tcm	0.54	0.47	0.43	华新水泥 (2021)
	单位减 排成本 /年	弱减排	CNY/tCO ₂	9.0	18.2	22.9	朱淑瑛等 (2021)
		强减排	CNY/tCO ₂	37.3	84.7	108.0	
气候 政策	低碳价		CNY/tCO ₂	68	104	178	清华大学 (2020)
	高碳价		CNY/tCO ₂	119	195	406	IEA (2021)
	免费配额比例		-	0.96	0.96	0.96	试点碳市场
市场 需求 因素	高需求		亿吨水泥	19.0	17.0	15.0	中国水泥协 会
	低需求		亿吨水泥	17.8	16.3	14.7	贺晋瑜等 (2022)
	平均销售价格		CNY/tcm	550	550	550	水泥协会

¹⁸ 熟料系数在 2020-2035 年间有所变化。

2.1.3 水泥行业违约率分析

设置了气候情景后，本节通过建立 Merton 模型，分析行业违约率在不同的气候情景下会产生何种变化。Merton 模型（如图 20 所示）作为国际金融市场评估企业主体信用风险常用的结构性风险模型，其原理可通俗地理解为，企业价值低于负债（实际负债点）时，企业变卖所有资产也不足以偿还所有债务，此时企业股权价值为零，企业发生违约。Merton 模型假设企业资产的回报率遵循对数正态分布，均值和波动率等分布特征可利用历史数据进行校准。违约率（PD）¹⁹ 反映水泥企业资产低于实际负债水平²⁰ 的可能性。

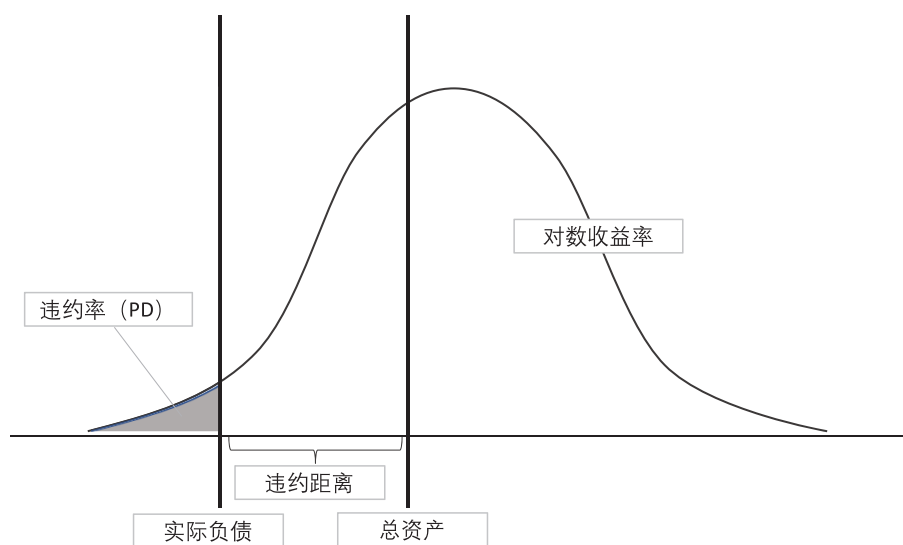


图 19 Merton 模型原理示意图

我们收集清洗了水泥行业 10 年间 26 家上市公司总资产对数变化的历史数据总计 218 条，并根据其数据分布特征，认为水泥行业的对数收益率符合均值 0.18、方差 0.27 的正态分布。

¹⁹ 跨周期的违约率水平。

²⁰ 实际负债水平与财务概念的负债规模并无关系，而是反映不发生违约的情况下企业资产最低限值。

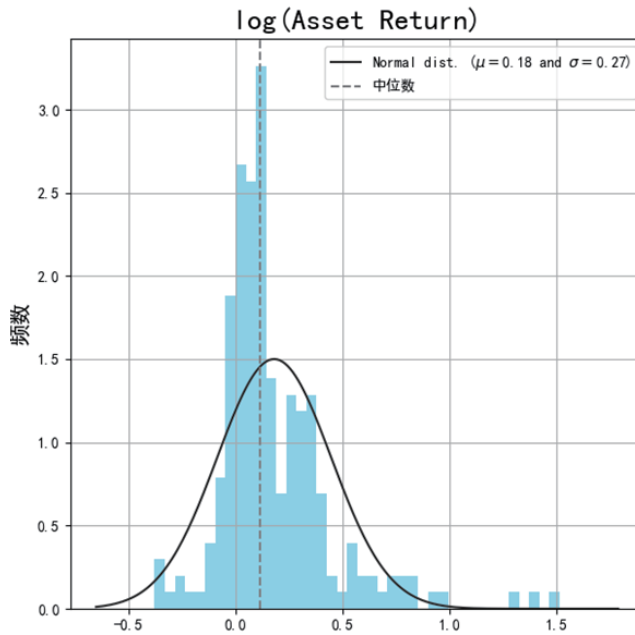


图 20 对数收益率的样本分布情况

在水泥行业的对数收益率分布基础上，利用 Merton 模型思想，我们构建了如下文公式(2)所示的违约率模型²¹，用于气候情景下的水泥行业违约率分析。

$$PD_{i,t} = \Phi \left[\Phi^{-1}(PD_{t-1}) - \sum_k s_k f_{k,i,t} \right] \quad (2)$$

其中，

$PD_{i,t}$: 第 t 年在气候情景 i 下的新违约率

PD_{t-1} : 第 t 年初始违约率

$f_{k,i,t}$: 财务承压因素 k 在情景 i 下第 t 年的值

s_k : 净资产对财务因素 $f_{k,i,t}$ 的敏感行参数。

如上文所述，模型中所用的正态分布 Φ 的特征均值(0.18)与方差(0.27)。

第一年的初始违约率 PD_0 为水泥行业历史上的平均违约率水平(跨周期)，取值基于银行实际调研数据，即 0.88%。 $\sum s_k f_{ki}$ 来自于公式(1)，表示不同气候情景 i 下，第 t 年净资产的变化。其中， $f_{capex,i,t}$ 、 $f_{carbon,i,t}$ 、 $f_{rev,i,t}$ 根据情景和年份有不同取值； s_{capex} 、 s_{carbon} 和 s_{rev} 为净利润对三个财务承压因素(即

²¹ 此处模型构建参考加拿大央行 2022 年报告 Assessing Climate-Related Financial Risk: Guide to Implementation of Methods。

$f_{capex,t}$ 、 $f_{carbon,i,t}$ 、 $f_{rev,i,t}$ 各自的敏感度参数，在所有情景和年份中取值一致，意味财务承压因素每变动一单位，净利润受到影响的幅度（指标和参数的计算见 2.1.1 节）。

表 9 模型变量和参数

变量或参数	取值
Φ	由水泥企业总资产对数变化的历史数据得到该正态分布的特征，数据特征和分布见图 23。
PD_0	银行调研数据（0.88%）。
$f_{ki,t}$	资本支出、合规成本和营收在不同情景下分别会有不同的变化值（详见表 3、表 4、表 5）。
S_k	$S_{capex} = 0.96$ $S_{carbon} = 0.96$ $S_{rev} = 0.18$ （详见表 3、表 4、表 5）

2.2 气候风险情景分析结果

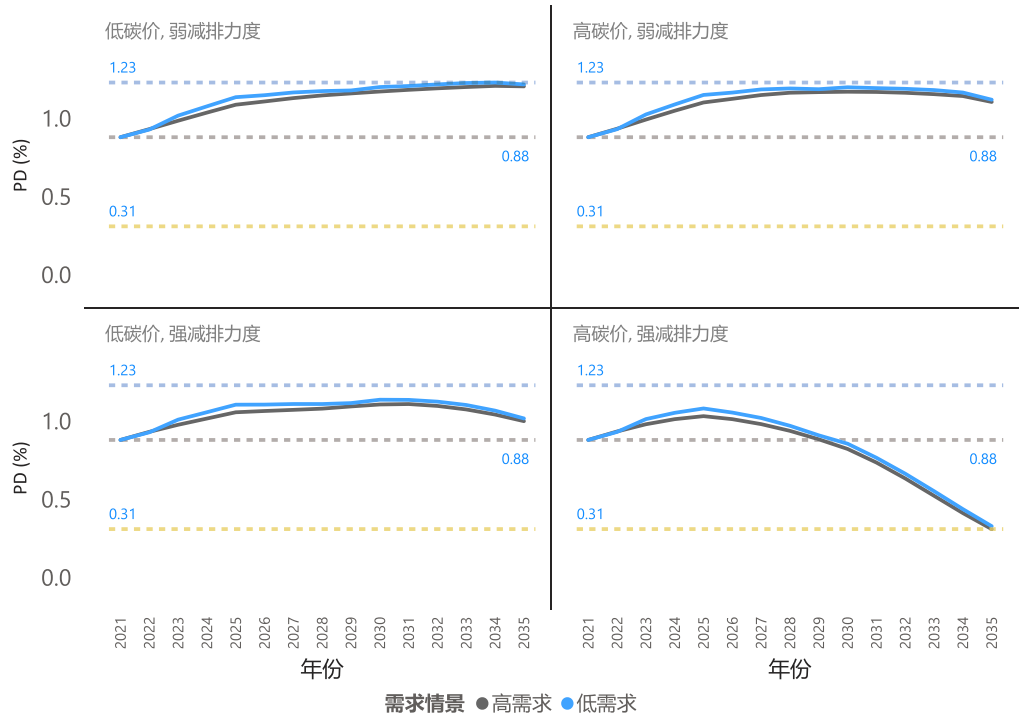


图 21 不同情景下的行业违约率水平

利用 Merton 模型，我们对不同情景下的行业违约率进行了定量分析，并得到了如图 22 所示的结果。结果显示：

(1) 若水泥企业采用较强减排力度，则信用风险更低，且中长期内大幅下降：

如果企业采取较弱的减排力度（2035 年碳强度达到 0.59 吨二氧化碳 / 吨水泥），违约率将从基准水平逐步上升，2035 年达到 1.11%–1.23%；如果企业采取较强的减排力度（2035 年碳强度达到 0.43 吨二氧化碳 / 吨水泥），无论碳价高低，违约率将比采取弱减排措施企业低；其违约率将在 2025–2030 年之间达到 1.03%–1.14% 的峰值，随后逐步下降；若气候政策力度较大（碳价较高），水泥企业采取强减排力度则更能降低信用风险，预期违约率在 2025 年以后就开始低于历史基准水平并持续下降。

(2) 若及早行动实施匹配碳中和目标的政策（较高的碳价），减排企业将获得财务收益，信用风险更低：

在高碳价的情景下，减排企业虽然需要承担减排成本，但有潜力在碳市场获得收益，从而获得财务回报；

在高碳价的情景下，即便企业采用弱减排措施（即 2035 年碳强度达到 0.59 吨二氧化碳 / 吨水泥），违约率水平也会在 2032 年开始下行，信用风险逐步降低。

(3) 根据现有的预测，市场需求不是影响水泥企业信用风险的关键因素：

基于目前的预测，水泥的市场需求未来逐步下降，但需求不确定性的范围小，对水泥行业的财务表现和信用风险的影响有限。

2.3 银行的水泥资产风险敞口

上文分析气候因素对水泥行业的财务表现和违约率的影响，本节简要分析银行部门对水泥行业资产的风险敞口，以判断气候因素通过水泥行业向银行部门传导的可能性。

根据国资委的历史数据及近年同比数据，2021 年水泥行业总资产规模接近 2.6 万亿元人民币（见图 24）。截至 2020 年底，水泥制造企业带息负债比率的全行业平均值为 53.20%，与其它行业相比杠杆率不高。水泥制造企业 2020 年末的债券余额为 1458 亿元，贷款余额估计为 2133 亿元。水泥行业带息负债规模在 3000-4000 亿元，占我国银行资产总额 300 万亿的 0.06%²²（见图 23）。总体而言，水泥行业的负债比率不高，信贷规模占我国银行信贷资产的比重也很有限。因此，即便在较差的情景下行业违约率从 0.88% 上升到 1.21%，对整体金融风险影响也将非常有限。

²² 我国银行业总资产 2022 年度二季度达到 367.68 万亿元。

中国人民银行：<http://www.pbc.gov.cn/goutongjiaoliu/113456/113469/4657367/index.html>

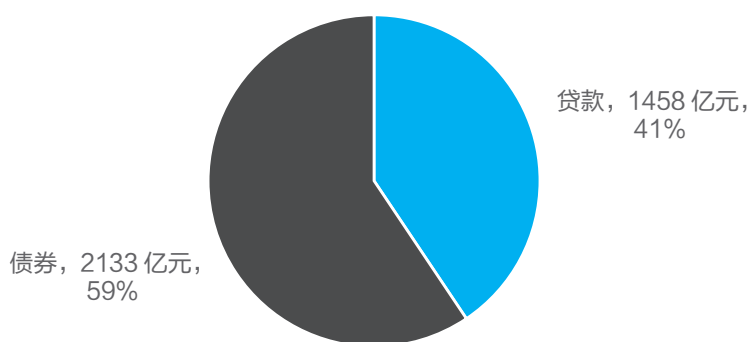


图 22 水泥行业带息负债规模

来源：《中国工业统计年鉴 2021》、WIND 数据库、中国水泥协会、课题组

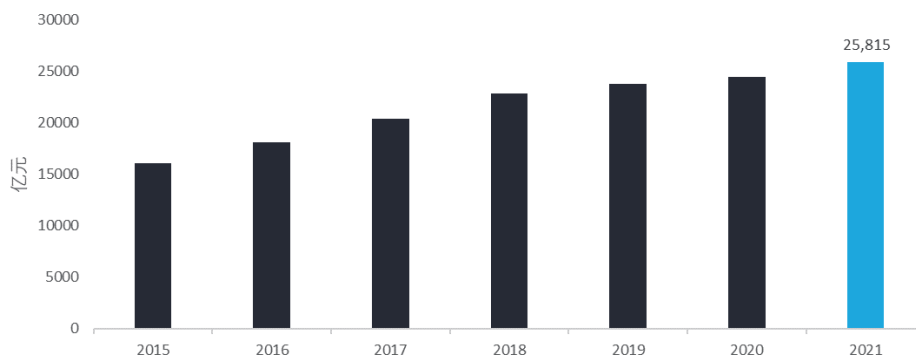


图 23 水泥行业资产规模

来源：WIND 数据库、国资委公开数据、课题组

03

结论与建议

水泥行业是典型的高碳行业。由于经济增速下降和新型低碳建筑材料兴起，长期而言我国对水泥的总需求将逐步下降，水泥行业的总碳排放也将随之下降。但从碳强度的角度而言，受制于目前的水泥生产过程原理，常规的减碳技术能实现的减碳幅度有限，预计中短期内大规模的减排技术仍将以能效提升和燃料替代方面为主。在未出现关键技术突破的情况下，为实现较强减排目标所需要的减排投入将对企业造成资金层面的压力。本课题设置八类气候情景，分别考虑减排的目标和技术、气候政策的力度以及市场需求的变化，然后基于水泥行业上市公司的财务数据，对水泥行业在八类气候情景中的财务表现和信用风险做了估算，得到以下几个结论。

首先，若政府及早行动实施匹配碳中和目标的政策（例如碳价在 2035 年达到 400 元 / 吨二氧化碳的水平），实施更强减排力度的企业（例如 2035 年碳强度下降到 0.43 吨二氧化碳 / 吨水泥的企业）将更有可能获得更好的财务表现，因此有力的气候政策将为企业投入资金和技术进行减排提供有效的激励。

其次，水泥行业只要达到一定的减排力度（例如 2035 年碳强度下降到 0.59 吨二氧化碳 / 吨水泥），中长期而言整体行业的信用风险都将有所下降。如果水泥企业采取较强的减排力度（例如下降至 0.43 吨二氧化碳 / 吨水泥），信用风险的下降水平更加显著，行业违约率在 2025 年以后便从峰值逐步下降，2030 年以后就会低于历史基准违约率。

最后，水泥行业整体负债率不高，对我国整体金融稳定的影响有限；若水泥行业积极转型，将有助于降低金融机构持有的水泥资产的信用风险。

基于上述结论，课题组提出以下建议：

第一，政府尽早实施与碳中和目标相匹配的、强有力的气候政策。有力的气候政策有助于从财务层面激励水泥企业加大研发投入、采用转型力度较强的技术，从而实现水泥行业整体降低碳排放强度。同时，由于采取较强转型措施

的企业需要支付较高的转型技术成本，而政策的不确定性可能带来较大的财务风险，因此政府需要释放明确稳定的政策信号，有助于提升企业投资减碳技术的动力。

第二，水泥企业应加大低碳减排方面的研发投入，并有效利用转型金融支持工具。企业应制定并披露其减碳目标，增加减碳技术研发相关投入；同时关注转型金融产品（例如转型贷款、转型债券、转型保险、转型基金）的发展，积极通过转型金融工具解决减碳技术购买或研发的融资问题。同时，鼓励大型企业试点先行，积极探索研发突破性减碳技术，形成示范效应，力求形成规模效应。

第三，商业金融机构应着重支持具有较强转型计划的水泥企业。一方面，从中长期风险收益角度看，具有强有力的可信转型计划（目标、路径、配套措施等）能够降低企业信用风险，建议银行基于水泥企业的转型计划及落实情况对其进行分类管理（授信限额、融资期限、利率定价），大力支持转型优秀企业的融资需求。另一方面，鼓励商业金融机构从企业主体和项目两个层面出发，设计支持高碳企业转型的结构性金融工具，尤其是混合融资工具（hybrid financial instruments），提高企业的转型动力。

第四，金融监管部门和财政部门应制定激励政策以支持企业减排。例如央行将高碳企业转型活动纳入结构性货币政策工具的支持范畴，通过提供低成本资金支持银行开展转型金融业务；财政部门设立政府转型基金，撬动社会资本一起通过股权投资或融资担保等方式支持高碳企业使用更前沿、但成本更高的减碳技术。



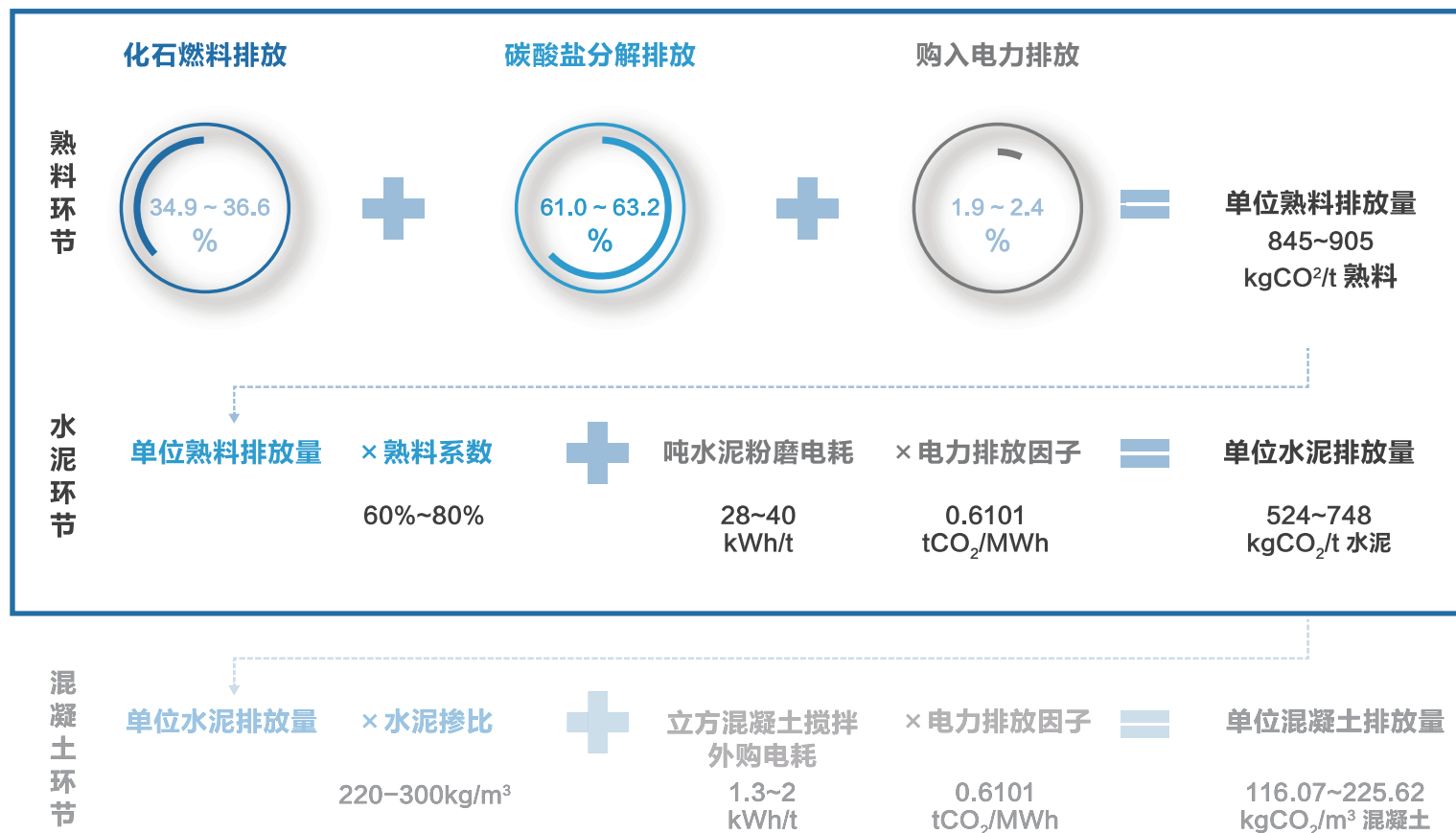
附录 1 减排技术路径树



注：参考公开资料与专家访谈整理，仅列出重要或有一定潜力的减排技术路径，未全面覆盖所有技术



附录 2 代表性企业水泥生产环节的碳排放构成



来源：《华新水泥低碳发展白皮书》



参考文献

- [01] Friedmann, S.J., Fan, Z., Tang, K., Low-carbon heat solutions for heavy industry: sources, options, and costs today[R]. 2019.<https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/low-carbon-heat-solutions-heavy-industry-sources-options-and-costs-today>
- [02] Hasanbeigi, A., Morrow, W., Masanet, E., Sathaye, J., Xu, T.J.E.P., Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China[J]. 2013. 57: 287-297
- [03] IEA, World Energy Outlook 2021[R]. Paris; 2021.<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- [04] Kermeli, K., Edelenbosch, O.Y., Crijns-Graus, W., van Ruijven, B.J., Mima, S., van Vuuren, D.P., Worrell, E.J.A.E., The scope for better industry representation in long-term energy models: Modeling the cement industry[J]. 2019. 240: 964-985
- [05] NGFS, First comprehensive report: A call for action: Climate change as a source of financial risk[R]. 2019.<https://www.ngfs.net/en/liste-chronologique/ngfs-publications?year=2019>
- [06] NGFS, 2020. Guide for Supervisors - Integrating climate-related and environmental risks in prudential supervision.
- [07] Usón, A.A., López-Sabirón, A.M., Ferreira, G., Sastresa, E.L.J.R., Reviews, S.E., Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options[J]. 2013. 23: 242-260
- [08] Wang, J., Dai, Y., Gao, L.J.A.E., Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry[J]. 2009. 86: 941-948
- [09] 何纪纲, 管高伟, 秦思绘, 李东红, 付慧芳, 水泥窑协同处置固体废弃物在生产中的应用 [J]. 中国水泥, 2021. 113-115
- [10] 贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 范永斌, 石红卫, 蔡博峰, 严刚, 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究, 2022. 35: 347-355
- [11] 华新水泥, 华新水泥股份有限公司低碳发展白皮书 [R]. 2021.
- [12] 罗雷, 郭旻旻, 李寅明, 张增寿, 朱廷钰, 碳中和下水泥行业低碳发展技术路径及预测研究 [J]. 环境科学研究, 2022. 35: 1527-1537
- [13] 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020. 30: 1-25
- [14] 张宾, 赵有强, 林永权, 陶从喜, 水泥工业二氧化碳循环利用现状 [J]. 中国水泥, 2021. 75-81
- [15] 朱淑瑛, 刘惠, 董金池, 蔡博峰, 何捷, 杨璐, 夏楚瑜, 汤铃, 中国水泥行业二氧化碳减排技术及成本研究 [J]. 环境工程, 2021. 39: 15-22

免责声明

若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。

凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.

The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.



北京大学国家发展研究院
National School of Development

MGF MACRO AND GREEN FINANCE LAB
宏观与绿色金融实验室



ENERGY FOUNDATION
能源基金会

联系我们：

地址：北京市海淀区北京大学国发院承泽园校区

邮编：100871

电话：010-62755882

邮箱：mgf@nsd.pku.edu.cn

网址：<http://mgflab.nsd.pku.edu.cn>



微信公众号