

2024年2月

中国水泥行业替代燃料、原料 技术现状及产业化发展建议 执行摘要

 中國水泥協會
CHINA CEMENT ASSOCIATION

 NRDC
自然资源保护协会
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

中国水泥协会（CCA）

中国水泥协会是经民政部注册登记的一级社团法人单位，会员由水泥制造和经营企业，相关科研院所、大专院校、社会组织以及与水泥行业相关的专业机构组成，现有会员单位企业约 900 余家。协会以服务政府、服务企业、服务行业、服务社会为宗旨，业务范围涵盖有产业政策研究、市场分析研究、行业科技发展、党建和行业文化、国际合作交流等。协会积极参与行业政策研究与制定，推动行业技术创新，构建行业绿色发展标准化体系，引领水泥行业绿色高质量发展。

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：

赵旭东	中国水泥协会	夏凌风	中存大数据
范永斌	中国水泥协会	郭珍妮	中存大数据
潘文明	自然资源保护协会	叶寒韵	中存大数据
赵喜龙	自然资源保护协会		

Cover Image on Freepik.

© Natural Resources Defense Council 2024

所使用的方正字体由方正电子免费公益授权

执行摘要

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。现阶段水泥产品碳排放组成中，约60%为工艺过程排放，由原料受热分解产生；约35%为化石能源排放，主要由煤炭燃烧产生。研究水泥行业如何使用燃料、原料替代技术，减少过程排放与能源排放，将有助于水泥行业实现碳达峰碳中和目标。

2022年11月，工信部、国家发改委、生态环境部、住房和城乡建设部联合发布了《建材行业碳达峰实施方案》，方案提出水泥行业要加大对替代燃料的利用，支持生物质燃料等可燃废弃物替代燃煤，推动替代燃料走向高热值、标准化、低成本的发展方向；推动替代原料的应用，通过逐步减少碳酸盐的使用量，加快非碳酸盐原料的替代，全面降低水泥生产过程中的碳排放。

替代燃料、原料技术减碳贡献可观。根据中国水泥协会水泥产品减排技术路径预测，到2060年，水泥碳排放强度预计可降至31kg CO₂/吨水泥；以2021年单位水泥碳排放量为基准，燃料替代技术和低碳水泥技术（包括替代原料和新品种低碳水泥）碳减排贡献分别为29%和19%。

其中，水泥生产所需的化石燃料（主要是煤炭）可以被高热值废弃物制备燃料（固体回收燃料、生物质燃料等）或二次能源（氢能）、可再生能源（绿电）替代，从而减少化石燃料燃烧产生的碳排放。低碳水泥是指使用替代原料（利用低碳排放原材料替代传统石灰石生产水泥熟料）或生产新品种水泥（改变熟料生产机理，生产非传统硅酸盐水泥），从而减少传统水泥生产的过程碳排放。

在自然资源保护协会（NRDC）的支持下，中国水泥协会对替代燃料和替代原料两项近期最具潜力的减排技术在我国的发展现状及问题进行了研究：通过市场调研分析水泥行业主要替代燃料、原料可用资源种类、产量、地理分布、性能特征，以及行业发展现状、问题及机遇；借鉴发达国家替代燃料、原料技术发展成功经验，提出了我国替代燃料和替代原料技术推广应用及产业化发展方面的建议。

1、替代燃料

（1）现状

我国替代燃料资源丰富，提高化石能源替代比例具有较大潜力。我国水泥工业开展替代燃料技术研究起步较晚，目前热量替代率¹不到2%，水泥生产严重依赖煤炭为主的化石能源。与之对比，在

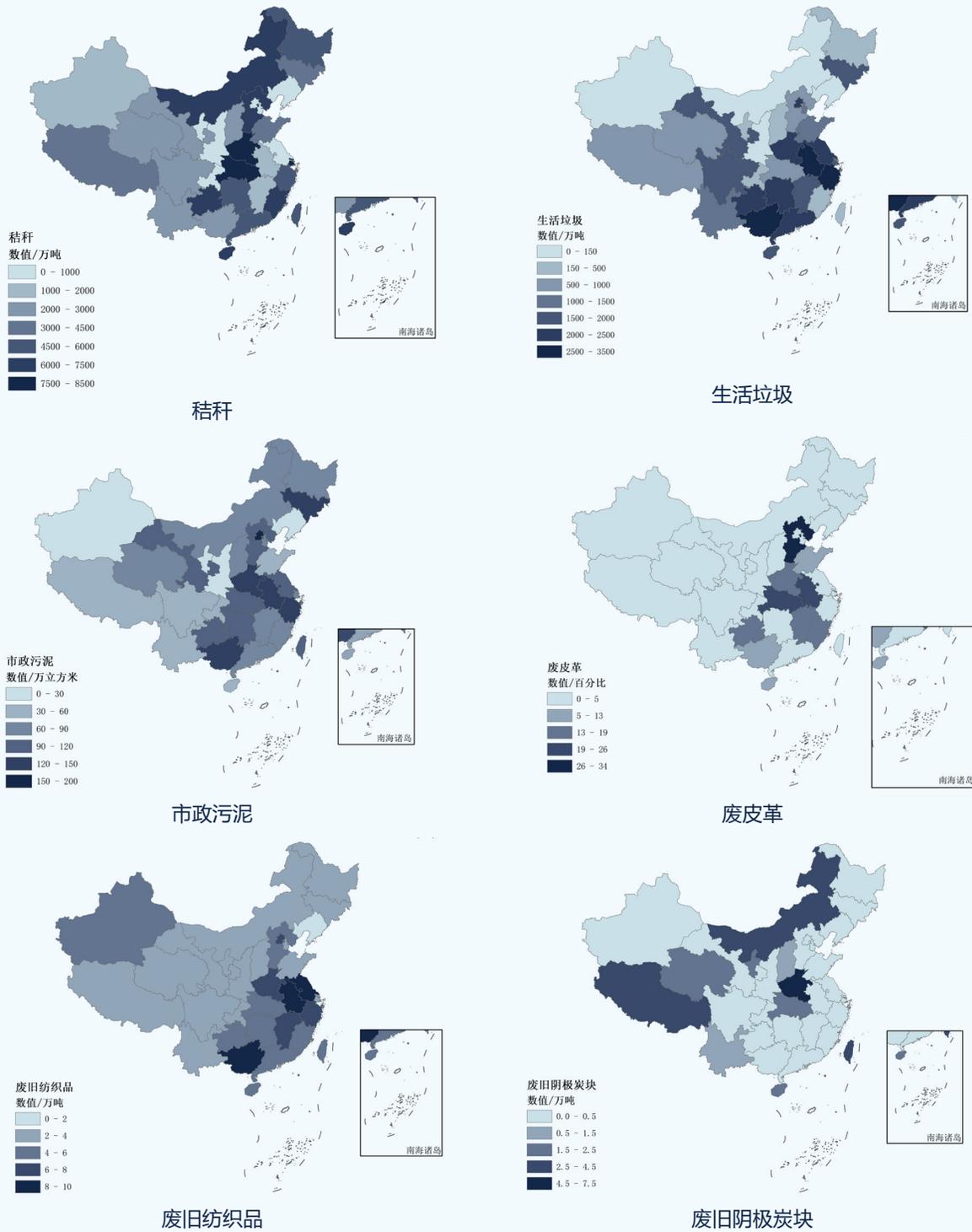
1 “热量替代率”，是指熟料煅烧过程中消耗的替代可燃物热量占窑炉内燃料总热量的比例。

欧洲，替代燃料的热量替代率普遍较高，平均为40%，德国、奥地利甚至可以达到70%以上。事实上，我国生产替代燃料可用的资源非常丰富，主要包括工商业和城市固体废弃物、废塑料、市政污泥、废轮胎等。报告调研梳理了水泥行业现有主要替代燃料种类及其热值、产品应用情况，替代燃料生产主要原料资源分布情况，见表1，图1。

表 1：水泥行业主要替代燃料

替代燃料	热值 (MJ/kg)	产量 (万吨)	产量分布	主要优势	主要劣势
垃圾衍生燃料、固体回收燃料	16~22	未知	全国	原料分布广泛	产品含水量高
生物质	14~21	35亿吨	河南、黑龙江、山东	原料分布广泛	产品含水量高、有季节性
糠醛渣 (生物质)	16~20	400~500	山东、河南、河北	原料来源稳定	产品含水量、硫含量高
干市政污泥	8~12	5500	全国	产品产量高	产品处置技术不成熟、热值低、含沙量高、有机质低
轮胎衍生物	25~30	2000	全国	产品热值高	产品价格昂贵

来源：本研究课题组



来源：本研究课题组绘制

图 1：水泥行业主要替代燃料生产原料资源分布

目前，我国水泥行业实际用煤热值在21-23MJ/kg之间，从上图各替代燃料种类和资源分布情况来看，满足替代燃煤热值要求的替代燃料种类较多，资源分布也比较广泛，可供水泥生产企业根据自身情况选择使用。在各替代燃料中，生活垃圾和一般固体废弃物的潜力尤其突出，其数量将会随着人们生活水平的提高而增加，给当地水泥企业使用替代燃料提供稳定、丰富的原料资源。根据中国水泥协会预测，在碳达峰碳中和情景下，到2030年，我国水泥行业替代燃料热值替代率可达6%，2060年可达45%，促进替代燃料产业化发展是推动当前热值替代率提高的关键。

（2）影响水泥行业替代燃料技术、产业化发展的主要问题

1) 误把协同处置技术等同于替代燃料技术，市场主体对替代燃料理解不足。水泥窑协同处置技术主要涉及对生活垃圾、一般固体废弃物等进行的预处理，这些预处理后的可燃物缺乏统一标准，仅需满足特定水泥企业的使用要求。尽管这种处理可以回收一部分废弃物热值，但其热值贡献并不足以稳定替代化石燃料。协同处置更多地关注废弃物的处理，而替代燃料技术则专注于燃料的属性，应符合国家统一标准，并具有严格的质量控制要求。替代燃料可以直接供用能单位使用，无需再进行复杂的预处理。

目前，这两项技术的区别缺乏清晰界定，管理部门和市场主体认识也不够准确，常将协同处置技术视作替代燃料技术的一部分。这种误解导致水泥企业普遍建立自己的协同处置系统，处置生活垃圾和一般固体废弃物，而不是形成对替代燃料市场供应的需求；同时，现有替代燃料生产商面临挑战，因为其产品未能获得用能单位

和管理部门对其作为“燃料”的认可。这种认识上的偏差导致替代燃料在产品价值和管理策略上被视同预处理可燃物，进而影响了替代燃料产品生产的积极性。

2) 替代燃料标准体系建设不完善，产品分级分价供需关系尚未形成。对比国际与国内替代燃料相关标准工作，我国在替代燃料系统化标准体系建设方面存在缺失，在行业层面也无切实可行的促进产品分级分价的核心标准。虽然已经制定了一些替代燃料的理化指标分类或分级标准，但是，多数标准还是根据具体行业、应用场景进行的制定，应用范围受限，因而替代燃料的分级分价尚难以实现。

3) 替代燃料跨地区流通困难，固废管理方式影响产业化发展。现阶段，我国工业领域替代燃料的使用仍以固废管理的方式开展监管工作，这就导致水泥企业即使购买使用部分地区市场上已经标准化的替代燃料产品，仍需与协同处置项目一样进行立项、环评等流程，获得主管部门的行政许可后方可使用。根据《GB24330 固体废物鉴别标准通则》的描述，固体废物按照焚烧处置（包括获取热能的焚烧和垃圾衍生燃料的焚烧），或用于生产燃料，或包含于燃料中，仍然作为固体废物管理。例如，垃圾衍生燃料，仍然需要按照《关于规范城市生活垃圾跨界清运处理的通知》进行跨境管理，阻碍了垃圾衍生燃料的跨区域流通。

（3）促进水泥行业替代燃料技术、产业化发展的主要机遇

1) 煤炭价格上涨使替代燃料更具经济性竞争力。水泥行业燃料成本在总成本中占比近40%，煤炭价格是影响水泥企业生产成本的重要因素。2022年水泥行业利润同比减少60-70%，企业营利能力严重下滑。同时，煤炭行业供需延续紧平衡状态，煤炭价格整体仍高位运行。严峻的行业竞争和高位的煤炭价格，都给水泥企业的生存带来了很大的不确定性。替代燃料相对于煤炭，具有较大的成本优势，水泥企业若提早布局替代燃料技术，锁定替代燃料供给资源，将能有效应对未来煤炭价格波动对水泥成本的影响，降低水泥生产成本，提高企业产品市场竞争力。

2) 新版能耗限额标准实施。2022年11月1日，GB16780-2021《水泥单位产品能源消耗限额》修订版正式实施。这一标准作为水泥工业节能的强制性标准，支撑国家淘汰落后产能、严格新建水泥项目准入、实施差别电价和惩罚性电价等政策行动的实施。标准规定了水泥单位产品能源消耗的限额等级、技术要求、统计范围和计算方法。在用能统计边界上，这一标准强调，“当企业采用协同处置或替代燃料时，其单位产品综合能耗、综合煤耗与综合电耗各等级限额值计算应扣除协同处置消耗的能源量和替代燃料量”、“应单独统计其消耗的能源量和替代燃料量”。现阶段，燃料替代的使用暂不计入产品的能耗统计范围，大量使用替代燃料，可有效降低化石燃料的使用，帮助企业提升产品生产的能耗水平等级。

3) 水泥行业即将纳入碳市场。未来水泥行业纳入全国碳市场，企业都将面临碳排放配额的履约问题。2023年10月，生态环境部发布《关于做好2023—2025年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知》，规定了各替代燃料碳排放因子的计算，其中，常见替代燃料废轮胎、废塑料、废溶剂、废皮革、废纺织品、废橡胶、污泥（干物质）、生物质的非生物质碳排放因子都要明显小于水泥生产传统用烟煤的排放因子，因此替代燃料的使用可以帮助企业减轻履约压力。另外，替代燃料大比例使用带来的减排量，未来也可在碳市场进行交易，低排放企业可以交易剩余碳配额，给企业带来一定经济效益。

2、替代原料

(1) 现状

我国工业固废产量巨大，替代原料供应充足。生态环境部在《2021年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报》指出，196个大、中城市一般工业固体废渣产生量达15.2亿吨，综合利用量达55.9%。这其中，大量废渣已经作为熟料生产替代原料用于水泥生产。这是由于水泥生产过程具有温度高、行业产能大、分布广等特点，利用水泥行业消纳工业废渣具有明显优势，另外，仍有大量工业固废未被利用。利用含钙质组分的非碳酸盐工业固废替代水泥生产所需的石灰石，可减少过程碳排放，减碳强度与替代原料中钙组

分含量密切正相关。常见替代原料中，电石渣减碳潜力最大，钢渣次之，煤矸石、粉煤灰和石英污泥等减碳潜力有限，水泥行业主要替代原料信息见表2。

表 2：水泥行业主要替代原料

替代原料	主要成分	钙质化合物	产量 (万吨)	石灰石理论替代量 (万吨)	应用特点
电石渣	Ca(OH)_2	$\text{Ca(OH)}_2 > 90\%$	3380	4500	钙含量高，减碳潜力大 含水量高、产量低
钢渣	CaO 、 SiO_2 、 FeO	CaO (40-60%)	12000	12000	钙含量高，有一定减碳潜力，成分波动大，易磨性差、稳定性差
粉煤灰	SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO	CaO (1-12%)	79000	7200	硅含量高，减碳潜力有限
煤矸石	SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3	$\text{CaO} < 2\%$	74300		有一定热值，可替代少量煤炭，无减碳潜力
石英污泥	SiO_2		未知		生料稳定、易烧，不易运输，运输成本高，无减碳潜力

石灰石理论替代量计算方法（石灰石CaO含量取值50%）：

1) 假设熟料成分组成，CaO 65%，SiO₂ 22%，Al₂O₃ 5%，Fe₂O₃ 3%。

2) 电石渣为钙质替代原料，提供钙元素；Ca(OH)₂含量按90%计算；

3) 钢渣作为铁质替代原料，提供铁元素；FeO含量按15%计算，带入CaO含量按50%计算；

4) 粉煤灰作为硅质替代原料，提供硅元素；SiO₂含量按50%计算，带入CaO含量按6%计算；

根据上表测算，以上三种工业废弃物如果全部应用于水泥行业，进行原料替代，理论可替代石灰石合计约2.37亿吨，可减少二氧化碳排放约1亿吨，占2021年水泥行业总碳排放量约7.4%。

电石渣作为一种钙含量非常高的替代原料，主要产自西北地区。目前，电石渣已经基本实现在水泥行业的全部固废利用；钢渣作为铁质替代原料，由于成分波动大，稳定性差，原料替代利用率较低，仅有少量（约占钢渣产量5%）用于水泥生料配料。粉煤灰中的硅、铝含量较高，钙含量相对较低，一般作为水泥生产中硅质原料和铝质原料的替代品，减碳潜力有限。

3、促进水泥行业替代燃料、替代原料产业化发展政策建议

推动替代燃料和替代原料产业化发展，需要从技术标准、管理政策等多方面发力，破除产品商品化、市场化发展的障碍。

（1）完善替代燃料标准体系建设，促进市场形成分级分价机制。首先，需要建立和完善替代燃料产业链相关标准体系，覆盖替代燃料生产、储运和消耗的全生命周期；尤其需要建立不同质量等级的替代燃料标准，充分利用不同质量可燃废弃物，实施替代燃料差异化生产，满足不同用能单位的用能需求，充分发挥不同替代燃料的利用价值。从而促进替代燃料商品化发展和供需双方之间的合理交易。此外，考虑到水泥熟料质量受替代燃料使用的影响，需对替代燃料使用的安全性进行特殊要求，应单独编制适用于水泥行业的替代燃料质量标准。

（2）区分替代燃料和协同处置项目，简化相关监管审批手续。从标准和政策等多个方面，引导水泥行业从“协同处置废物”向“利用固体回收燃料”转变。简化替代燃料包装运输、交易流程手续，促进替代燃料多主体、跨地区应用。在替代燃料产业链尚未完善，市场激励机制不明显的情况下，政府相关部门应出台完整的政策支持体系，涵盖收储运方面行政审批和许可流程的便利化、补贴政策、税收优惠政策等，吸引和鼓励社会资本进入相关产业链的上下游环节，促进替代燃料行业市场的形成与发展。

(3) 兼顾碳排放统计的科学性和产业发展的积极性。替代燃料不是零碳燃料，其非生物碳排放部分和化石燃料碳排放性质相同，因此，在替代燃料的非生物碳排放的核算问题上，应该保持科学性，区分计算。2013年10月，生态环境部发布了《关于做好2023—2025年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知》，明确规定替代燃料非生物碳排放需计入企业层级核算边界，不计入熟料生产核算边界。未来水泥行业纳入碳交易市场，将以熟料生产为碳排放履约边界，因此，替代燃料非生物碳排放存在碳泄露风险，为避免此部分的碳泄露，建议统计替代燃料非生物碳排放。为鼓励水泥企业使用替代燃料，培育用户习惯，此部分碳排放可暂不纳入碳交易范围，只做统计上报。

当然，为了促进替代燃料的产业化发展，在科学统计替代燃料非生物碳排放的原则下，也应考虑水泥行业使用替代燃料在非碳方面的环境效益。水泥窑使用替代燃料，可以最大化实现城市垃圾的无害化处置，利用水泥生产线窑炉的高温，能够将各类危废充分稳定燃烧，重金属离子实现无废渣排放，二噁英等有毒有害有机物得到彻底分解，具有更大的环境效益。因此，建议未来水泥行业纳入碳市场，除了科学统计碳排放外，还应考虑替代燃料在非碳方面的环境效益，研究将非碳的环境效益量化，在碳市场给与综合考虑，真正做到既兼顾替代燃料减碳的科学性，又做到公正评价替代燃料的环境效益，推动替代燃料产业与水泥行业减碳的科学可持续发展。

(4) 加强跨行业协调与合作，提高工业固废替代原料利用技术。对于一般工业固废，由于其化学成分、物理特性的不同，对水泥熟料质量的影响也不同，因此，不同工业固废的利用水平，相应替代比例也有所不同，尤其钢渣，替代原料比例相对较低，据不完全统计，目前水泥生产线使用的钢渣替代原料比例仅为3-5%。因此，针对较难利用的一般工业固废，需要开展跨行业的协同研究工作，应结合水泥行业原料使用要求，加强固废源头质量控制，推动固废再利用技术的协作开发，共同开展固废在水泥行业替代原料利用方面的技术、标准等方面的合作，开展固废产品质量评价、实际工程应用验证等，多方共同为固废高效利用提供跨行业的专业技术支持。

(5) 加强国际合作，借鉴欧洲替代燃料产业化发展经验。加强与欧洲发达国家之间的交流学习，充分调研和分析欧洲替代燃料、替代原料产业化发展关键政策、技术及标准体系，结合我国水泥行业和替代燃料、替代原料产业发展现状，加快营造有利于我国替代燃料和替代原料产业发展的市场环境。



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) 5332-1910