Climate Strategies

www.climatestrategies.org

碳控制与竞争力标杆2020：水泥报告

最终报告

2014年2月

本文中文版由德国国际合作机构（GIZ）中德合作中国排放交易体系能力建设项目支持
本报告中文版为原英文报告的节选翻译，并增加了新的序言部分

作者

Karsten Neuhoff
Bruno Vanderborght
Andrzej Ancygier
Ayse Tugba Atasoy
Manuel Haussner
Roland Ismer
Benedikt Mack
Jean-Pierre Ponssard
Philippe Q uirion
Arjan van Rooij
Nagore Sabio
Oliver Sartor
Misato Sato
Anne Schopp

DIW 柏林

UCL ENERGY INSTITUTE
Radboud University Nijmegen
Hertie School of Governance
IDDRI SciencesPo.
LSE THE LONDON SCHOOL OF ECONOMICS AND POLITICAL SCIENCE
FAU FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG FACHBEREICH RECHTSWISSENSCHAFT
Centre for Climate Change Economics and Policy
Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment
CIRED

Climate Strategies

www.climatestrategies.org

关于作者

Karsten Neuhoff,
德国经济研究所，DIW柏林
Bruno Vanderborght,
独立研究员
Andrzej Ancygier
赫尔梯行政学院
Ayse Tugba Atasoy
德国经济研究所，DIW柏林
Manuel Haussner
埃尔朗根-纽伦堡大学
Roland Ismer
埃尔朗根-纽伦堡大学
Benedikt Mack
德国经济研究所，DIW柏林
Jean-Pierre Ponssard
法国国家科学研究院-巴黎综合理工学校
Philippe Quirion
环境与发展国际研究中心（CIRED），法国国家科学研究院
Arjan van Rooij
内梅亨大学
Nagore Sabio
伦敦大学学院
Oliver Sartor
可持续发展与国际关系研究所（IDDRI）
Misato Sato
格兰瑟姆气候变化与环境研究所，伦敦政治经济学院
Anne Schopp
德国经济研究所，DIW柏林

本报告是高能耗行业项目成果，高能耗行业项目由德国、荷兰、法国、英国相关部委以及塔塔钢铁公司和海德堡水泥集团共同资助。本报告表达的观点和包含的信息未必代表资助单位的观点和信息或得到其认可，资助单位对该等观点、信息完整性和准确性以及对该等观点和信息的任何依赖概不负责。

作者感谢下列人士提供详细意见并参与其他工作：Samuela Bassi、Christopher Beauman、Simone Cooper、Michael Flach、Daniel Gauthier、David Grover、Guillaume Habert、Detlef Heinz、David Leal、Niall Mackenzie、Kerstin Ringelhan、Martin Schneider、Matthew Tisdale、Heleen de Coninck和Stefan Schleicher。

关于Climate Strategies

Climate Strategies是一家汇集气候变化政策挑战领域顶尖学术专家的国际机构。本机构向欧洲及其他地区政府和所有利益相关方提供深度独立研究服务。宗旨是帮助政府决策者管理选项评估工作以及确立利益相关方和公众意见。本机构的报告和出版物在政策制定者和企业界具有重要影响。

目 录

序言 ---- 1

1. 概要 ---- 2

2. 水泥行业减排措施 ---- 4

3. 运用不同减缓选项的既往驱动因素和未来需求 ---- 7

3.1 替代燃料、生物质和混合燃料物的二氧化碳排放强度 ---- 7

3.2 通过投资能效实现减排 ---- 9

3.3 通过使用其他材料替代熟料实现减排 ---- 11

3.4 高效水泥利用和替代建筑材料 ---- 13

3.5. 水泥替代品发展情况 ---- 15

3.6. 碳捕获与封存发展情况 ---- 15

4. 欧盟排放交易体系对定价、运营和投资决策的影响 ---- 17

4.1 定价：碳交易成本是否转嫁给水泥采购商? ---- 17

4.2 贸易与再投资：是否存在碳泄露证据? ---- 18

4.2.1 欧盟水泥和熟料消费及贸易 ---- 19

4.2.2 是否存在运营性泄露的证据? ---- 20

4.2.3 是否存在投资泄露的证据? ---- 21

4.3 由固定事前配额分配和活动排放限值造成的偏离 ---- 23

4.3.1 对运营决策的影响 ---- 23

4.3.2 对资产合理化配置和效率投资产生的影响 ---- 24

4.3.3 对贸易和水泥市场产生的影响 ---- 25

附录I. 访谈 ---- 27

附录II. 纳入消费 ---- 28

附录III. 基于水泥的创新材料 ---- 31

序言
（佟庆 清华大学能源环境经济研究所）

水泥作为一种用途广泛的建筑材料，在我国 31 个省份都有生产企业。统计数据显示，我国 2013 年水泥产量为 24.14 亿吨，位居世界第一，占全球总产量的 58% 以上。

水泥生产属于高耗能和高二氧化碳排放的行业，其主要的耗能和二氧化碳排放环节在于熟料的生产，我国目前主要采用新型干法窑煅烧石灰石制成水泥熟料，这一环节包括了三类二氧化碳排放机理：（1）化石燃料燃烧排放：我国主要以煤为燃料，吨熟料生产的煤耗平均约为 110 千克标准煤，折合约 290 千克二氧化碳排放；（2）过程排放：是指工业生产中，除能源活动之外的化学反应和物理变化所导致的温室气体排放，对于水泥行业而言，石灰石经高温煅烧分解所产生的二氧化碳即属于此类排放，我国吨熟料生产的过程排放量为 538 千克二氧化碳；（3）外购电力所对应的电力生产环节二氧化碳排放：我国吨水泥生产的电耗平均约为 110 千瓦时，折合约 94 千克二氧化碳排放。

水泥行业的节能和低碳发展，既要依靠产业结构调整，推进兼并重组，淘汰落后产能；也要依靠技术进步，推广使用新型干法水泥窑低温余热发电、高效粉磨系统等节能低碳技术。然而产业结构优化和低碳技术改造，都需要付出一定的经济代价。欧盟等发达国家适时提出并实施了碳排放权交易，为包括水泥生产在内的高耗能行业企业分配二氧化碳排放配额（即企业各条生产线在一年中可以排放的二氧化碳总量上限）。一般而言，实施了淘汰落后产能和低碳技术改造的企业，其配额会有富余，可以在碳排放权交易市场中出售，对于这些企业来说，相当于对他们的节能减碳行动进行了经济激励和补偿。而从全社会的角度来看，碳排放权交易是通过市场手段挖掘了相关行业和企业的节能减碳潜力，与行政手段具有相辅相成的作用。

我国目前正在建设全国碳排放权交易体系。在此之前，已有北京、上海、广东、深圳、湖北、天津、重庆等七省市开展了碳排放权交易试点，其中除天津和深圳之外的五个省市都纳入了水泥行业。虽然主管部门还未正式公布全国碳排放权交易体系的覆盖范围，但纳入水泥行业已是大势所趋。

本文作者中既包括了德国的资深经济学家，也包括水泥行业的技术专家，利用他们深厚的经济学和技术功底，对于欧盟的水泥生产企业参与碳排放权交易进行了深入分析，既总结了欧盟的成功经验，也阐述了其不足与教训，并在此基础上提出了纳入水泥产品消费侧、进一步挖掘全社会减碳潜力的政策建议，可为我国的碳排放权交易体系建设工作提供参考，也有助于相关行业、企业届人士更好地了解并参与碳排放权交易。

1. 概要

本研究旨在为欧盟排放交易体系（EU ETS）过去和现在对能源密集型产业（EII）的有效性提供基于证据的客观分析和解释。在此过程中，我们找出欧盟排放交易体系需要改进的地方，并完善政策工具。从中获得的见解使我们能够评估可选方案，提高政策效力，藉此促进能效提高和温室气体减排，同时保持欧洲能源密集产业的国际竞争力。

研究聚焦能源利用和碳排放最密集的三项产业活动，即水泥、钢铁和化工。这项首次基于对一些数据源的分析研究，探讨了水泥行业的形势。这些数据源包括世界可持续发展工商理事会 - 水泥可持续性倡议行动“Getting the Numbers Right”数据库、欧盟交易日志、欧洲统计局、联合国商品贸易统计数据库贸易流量数据以及公司年度财务报告。随后，研究人员对水泥企业的高层管理人员进行一系列采访，试图了解水泥企业的商业决策过程以及欧盟排放交易体系和其他政策工具的作用。附录 1 包含受访高层管理人员名单和访谈方法简述。本报告中凡是参考访谈内容之处，其结论均基于有代表性的大多数访谈得出，因此可代表整个行业状况。

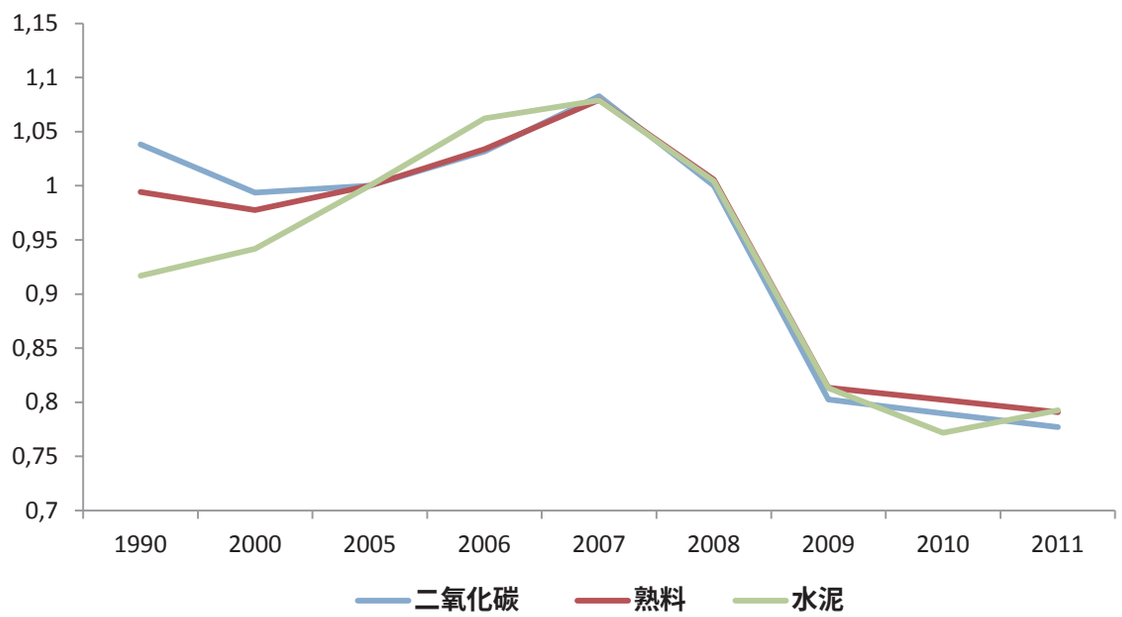
我们发现欧盟排放交易体系引起高层管理人员的关注，令其意识到减少二氧化碳排放量的必要性。近年来，由于欧盟配额价格高企以及对长期一致减排目标的强力政策支持，减排已成为大部分欧洲水泥企业公司策略的一部分。

然而，对水泥企业高管的访谈表明，过去两年中（2012-2013 年），欧盟排放交易体系在公司管理要务中已急剧滑落至较低的级别。该现象不仅归因于总体经济形势呈现产能过剩的局面，排放交易体系本身也是诱因之一。由于欧盟排放交易体系在一些方面被认为无效和有缺陷，管理层对采取二氧化碳减排措施的兴趣降低。二氧化碳市场价格缺乏可预测性，排放交易体系未来结构改革和针对碳泄漏保护的未来措施存在不确定性，对长期一致的二氧化碳减排目标的政策支持也存在不确定性，这些因素都减弱了企业对欧盟排放交易体系的信心。

图 1 描述了欧洲水泥行业各年份二氧化碳排放量及熟料和胶结类产品[2]的产量，以 2005 年数值作为参考基准。2009 年 -2011 年欧洲水泥行业的二氧化碳绝对排放量比 2000 年 -2005 年低 20-22%，较 1990 年水平低 25%。这一趋势在很大程度上与这段时期的经济周期相吻合——碳排放量和产量均在 2007 年达到峰值，并在随后两年降低 30%。

[2] 胶结类产品是未入水泥的熟料、水泥以及混凝土中使用的熟料和水泥替代品的总和。

图 1. 欧洲水泥行业二氧化碳绝对排放量及熟料和胶结类产品产量，
以 2005 年数值作为参考基准



资料来源：水泥可持续性倡议行动 GNR 数据源

2008 年 -2012 年，水泥行业得到的配额占配额总量的 8%，在各行业中位列第二，排在钢铁行业之后，石油炼制行业之前。同期，水泥行业碳排放量占欧盟排放交易体系碳排放总量的比例从 2008 年的 7% 降至 2012 年的 5.6%，位列第三，排在钢铁行业和石油炼制行业之后 [3]。

没有太多证据表明欧盟排放交易体系的建立加速了熟料和水泥生产领域二氧化碳排放强度的改善。欧盟排放交易体系建立之前的 5-10 年间及其建立后 7 年间的改善进度大致相同。欧盟排放交易体系建立后的 7 年间（2005 年 -2011 年），生产每吨熟料的二氧化碳平均排放量降低 1.2-2%。同一时期，生产每吨水泥的二氧化碳排放量降低 3%-5%。有观点认为，自 2005 年欧盟排放交易体系建立后，欧盟地区水泥产量和二氧化碳排放量大幅减少是经济危机所致，而非欧盟排放交易体系的投资和运营性泄漏所致。[4]

为了解这一点，我们将在下节介绍水泥行业二氧化碳减排的主要措施。随后，第 3 节将分析迄今为止使用不同二氧化碳减排方法所取得的进步、排放交易体系以及其他监管和经济动因对此进步的贡献。本节未涵盖目前采用的所有方法，仅讨论据报道确有减排作用的以往决策中使用的方法。第 4 节讨论碳泄漏保护措施的有效性和其他影响。基于所搜集的经验证据，第 5 节讨论政策框架完善问题，介绍了减排组合措施。

---

[3] 欧洲环境署和欧盟排放交易体系登记处（欧盟交易日志）。

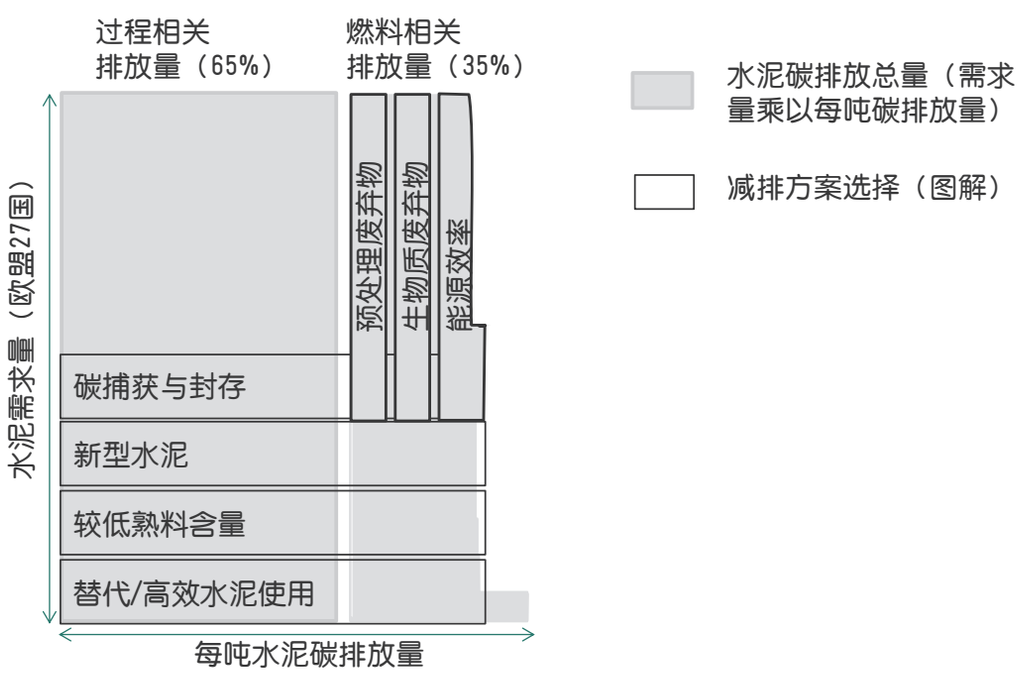
[4] 提交欧盟委员会的 Ecorys 研究中得出类似结论：工厂关闭和水泥产量减少由经济危机而非碳价造成。Ecorys (2013) "Carbon Leakage Evidence Project", http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/leakage/docs/cl_evidence_factsheets_en.pdf (133 页 -134 页)。

2. 水泥行业减排措施

本节旨在简要概括水泥行业二氧化碳排放源和减排可能性。[5] 水泥是一种矿物胶粘剂，用于增强混凝土和砂浆等广泛使用的建筑材料的强度。水泥的主要成分是熟料，以石膏作为激发剂。可通过添加其他矿物成分改变水泥的性质。这些矿物材料在一定程度上替代熟料，例如钢铁行业的矿渣微粉、煤燃烧产生的粉煤灰、研磨的石灰石以及过烧的油页岩。

将石灰石在高温环境中脱碳和矿化可得到熟料。因此，正是熟料生产活动是水泥行业二氧化碳排放的主要来源。总体来说，二氧化碳主要有两个来源：一是石灰石的分解（所谓的“过程二氧化碳”），二是达到高温的燃料燃烧（“燃料二氧化碳”）。过程二氧化碳排放量一般约为每吨熟料 530 千克[6,7]。依熟料窑的热能利用效率和燃料种类不同，燃料二氧化碳排放量在每吨熟料 220 千克至 500 千克之间。

图 2. 水泥行业与燃料及过程相关的二氧化碳排放量和减排措施



除过程和燃料相关排放外，还存在使用电力（约 110 千瓦时 / 每吨水泥）[8] 产生的间接排放和运输过程产生的排放。依运输距离和运输方式的不同，运输过程产生的排放量变化显著，但大体上至多相当于生产过程排放量的 5%。[9]

---

5 Ba-Shammakh 等，Analysis and Optimization of Carbon Dioxide Emission Mitigation Options in the Cement Industry，《美国环境科学学报》，4 (5): 482-490, 2008；Moya 等，Energy Efficiency and CO2 Emissions: Prospective Scenarios for the Cement Industry，JRC 科学技术报告，2010。

6 资料来源：水泥可持续性倡议行动 Getting the Numbers Right 数据库 <www.wbcsdcement.org>。

7 政府间气候变化委员会和欧盟排放交易体系第三阶段基准假设生产每吨熟料产生 525 千克二氧化碳。

8 水泥可持续性倡议行动 Getting the Numbers Right 数据库，指标 3212。

9 The role of cement in the 2050 low carbon economy，欧洲水泥协会，2013。

水泥行业碳排放的主要减排措施按要点列出如下：

燃料相关减排：

• 使用替代化石燃料（主要用废弃物制取，单位二氧化碳排放量约为 70-80 千克 / 兆焦耳）或气候中和的生物质废弃物或可持续生长的生物质，取代煤、褐煤和石油焦等传统化石燃料（单位二氧化碳排放量为 100 千克 / 兆焦耳）；及

• 通过使用最佳可行技术（即预热器和预分解炉技术）和最佳操作实践（即在最高效的设施中集中生产，设施运行接近额定产能）来提高熟料窑的热能利用效率。

过程和燃料减排：

• 使用其他矿物成分替代水泥和混凝土中的熟料。这会涉及熟料的高度矿化和反应，从而可在尽可能减少熟料含量的同时仍能保持混凝土强度；

• 使用低碳替代材料代替水泥；及

• 碳捕获与封存（CCS）或碳捕获与利用（CCU）。

间接减排：

提高熟料和水泥生产设施的电能利用效率。

一些机构组织曾预测 1990 年至 2050 年水泥行业的二氧化碳减排潜力。其中包括国际能源署与世界可持续发展工商理事会水泥可持续性倡议行动（CSI）联合发布的报告和路线图、水泥可持续性倡议行动与欧洲水泥研究院（ECRA）、欧洲水泥联盟（Cembureau）以及欧洲和英国水泥行业协会（MPA）从水泥行业角度联合发布的报告和路线图，以及 Ecofys 咨询公司、世界自然基金会（WWF）和英国气候变化委员会从非政府组织和政府角度联合发布的报告和路线图。[10]

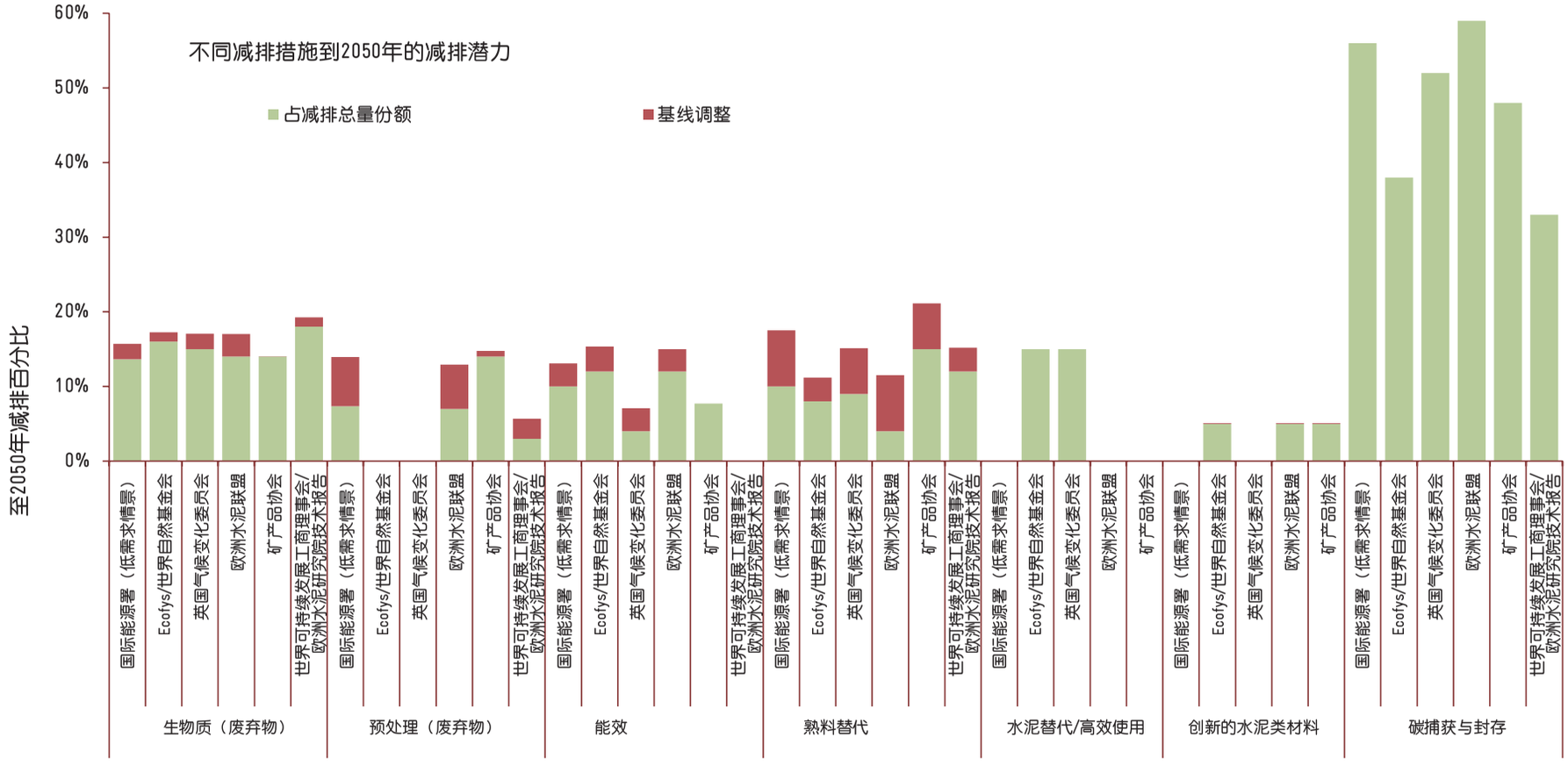
图 3 显示，截至 2050 年，以上减排措施可帮助减少 80% 的二氧化碳排放量。以上路线图一致预测，通过使用生物质替代化石燃料可减排约 15%，目前这部分潜力仅使用了一小部分。据估计，熟料替代具有类似潜力，但地区差异很大，并且已在 1990 年至 2011 年期间开展大量工作。由国际能源署和行业利益相关方提出的路线图的一个重要特点是这些路线图包括对使用化石燃料燃烧废弃物作为燃料排放的二氧化碳“抵消”（指二氧化碳“净”排放而非“总”排放[11]），这是欧盟排放交易体系、世界自然基金会和英国气候变化委员会不考虑的间接减排部分。关于水泥替代潜力、水泥更高效使用以及新型水泥的估计只是估算数据，各路线图在此方面并无一致性。为弥合至 2050 年实现减排 80% 的差距，约 40% 至 60% 的减排应来自碳捕获与封存。

---

[10] Cement Technology Roadmap 2009 Carbon emissions reductions up to 2050，世界可持续发展工商理事会、国际原子能机构；Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead，（水泥可持续性倡议行动 / 欧洲水泥研究院）《技术论文》，2009；The role of cement in the 2050 low carbon economy，欧洲水泥协会，2013；Mineral Products Association Cement GHG Reduction Strategy, The mineral Product’s Industries Contribution to the UK，2012；How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World，世界自然基金会。

[11] 世界可持续发展工商理事会 / 水泥可持续性倡议行动《监测报告核查议定书》定义的二氧化碳净排放量和总排放量。

图 3 为达成 1990-2050 年二氧化碳减排 80% 的目标所采用的主要减排方法的相对份额



*基准线调整基于从GNR数据库中收集的数据。预处理废弃物的计算基于以下假设：替代燃料使用主要包括生物质和预处理废弃物。

来源：不同水泥行业路线图汇编

减少二氧化碳间接排放量的其他方法（基于化石燃料发电）包括：

- 提高熟料和水泥生产的电能使用效率。将水泥研磨得更加精细和更多使用矿渣增加耗电量，但可提高水泥性能。这样，混凝土中需要使用的熟料和水泥量便会减少；
- 将熟料窑的余热回收用于发电。需要注意的是，熟料窑的能效越高，可回收的余热越少。

下节将描述排放交易体系和其他政策工具如何影响不同减排措施的效果和商业决策过程。

3. 运用不同减缓选项的既往驱动因素和未来的需求

3.1 替代燃料、生物质和混合燃料物的二氧化碳排放强度

2005 年至 2011 年，欧盟水泥行业的燃料相关二氧化碳排放强度总体水平下降 6%。取得该成绩的主要原因是用生物质替代煤炭。按照排放交易体系的核算标准，生物质被视为具有气候中和特点。此外，通过用废弃物替代煤炭，二氧化碳排放量也有所减少。

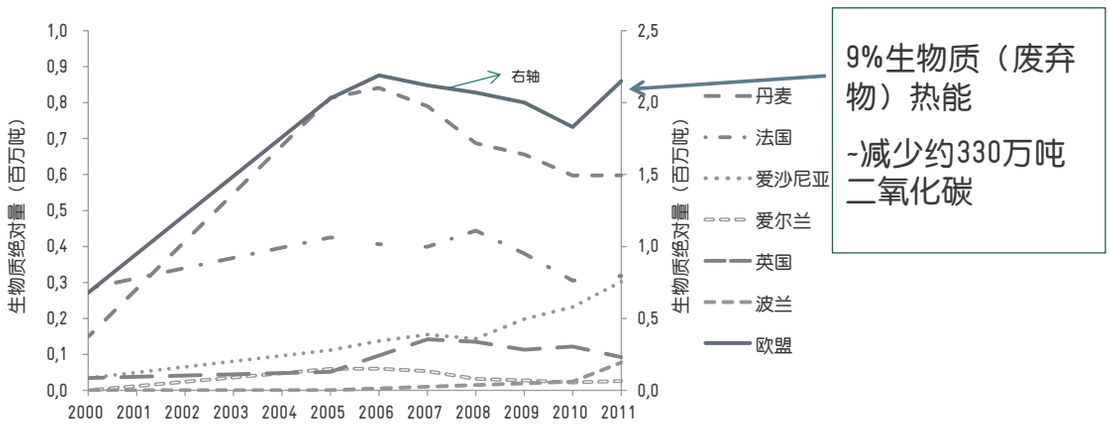
2005 年，生物质能源所占份额为 3.6%。2008 年，该数字突破 5.1%。2011 年增至 8.7%，是 2005 年的两倍多，煤炭燃烧的二氧化碳排放量减少约 330 万吨。化石燃料燃烧废弃物所占份额从 2005 年的 11% 增至 2011 年的近 26%[12]。目前，欧盟 80% 的设施利用化石燃料燃烧废弃物。推动利用替代燃料的的决定性因素包括：(i) 降低能源成本（约 10 欧元 / 每吨熟料）；(ii) 长期减少能源供给和成本风险。欧盟排放交易体系的经济激励对水泥行业利用生物质的重要性依然居次，对利用化石燃料燃烧废弃物的重要性较低。利用 1 吨生物质可减少约 1.5 吨二氧化碳排放量，利用 1 吨化石燃料燃烧废弃物可减少约 0.3 吨二氧化碳排放量。以二氧化碳市价为 10 欧元 / 每吨欧盟排放配额计算，公司利用生物质可节约 15 欧元 / 每吨配额，利用化石燃料燃烧废弃物可节约 3 欧元 / 每吨配额。若生物质提供 50% 能源，则相当于节约 3 欧元 / 每吨熟料。

自 2005 年以来，整个欧洲水泥生产领域的生物质用量（吨生物质 / 年）几乎没有变化。西班牙（增长 50-100%）、英国（增长 10%）和波兰（仍处于低位）例外。与之相反，德国和法国在欧盟排放交易体系第二阶段期间的生物质用量降低约 25%。该结果归因于可再生能源的支持机制，该类机制针对在热电联产领域而非水泥行业利用生物质制定激励措施。因此，水泥行业仅利用不到 10% 的“传统”生物质（主要在西班牙），更依赖各类废弃物，例如被污染的动物肉类和脂肪、废水处理产生的泥浆以及处理后的城市垃圾中的少量生物质（废弃物衍生燃料）。熟料生产期间实现的高温确保破坏动物粪便产物中的任何生物污染，为生物垃圾处置提供的理想环境。高温环境允许水泥生产设施利用生物质产物，否则必须利用专用废弃物焚烧装置处理生物质产物。

欧盟各成员国和设施的生物质能源所占份额差异明显。一些设施的生物质能源所占份额高达 40%，但该份额通常较低。在法国和德国，80% - 90% 的设施利用生物质。在意大利，仅有 10% 的设施利用少量生物质，自 2000 年以来利用生物质的设施数量未增加。意大利平均热替换率比欧洲平均水平低 3 至 7 倍。该结果归咎于与许可流程相关的多个因素，例如：对所提供的信息认识不足，缺乏信任；地方抵触情绪；碎片化和分散化的许可效力；上诉程序繁冗漫长，导致合理实施政策和变化异常困难。

[12] 水泥可持续性倡议行动“Getting the Numbers Right”，3211a 指标。

图 4. 欧盟部分国家水泥生产领域生物质用量（2001 年 -2004 年插值）

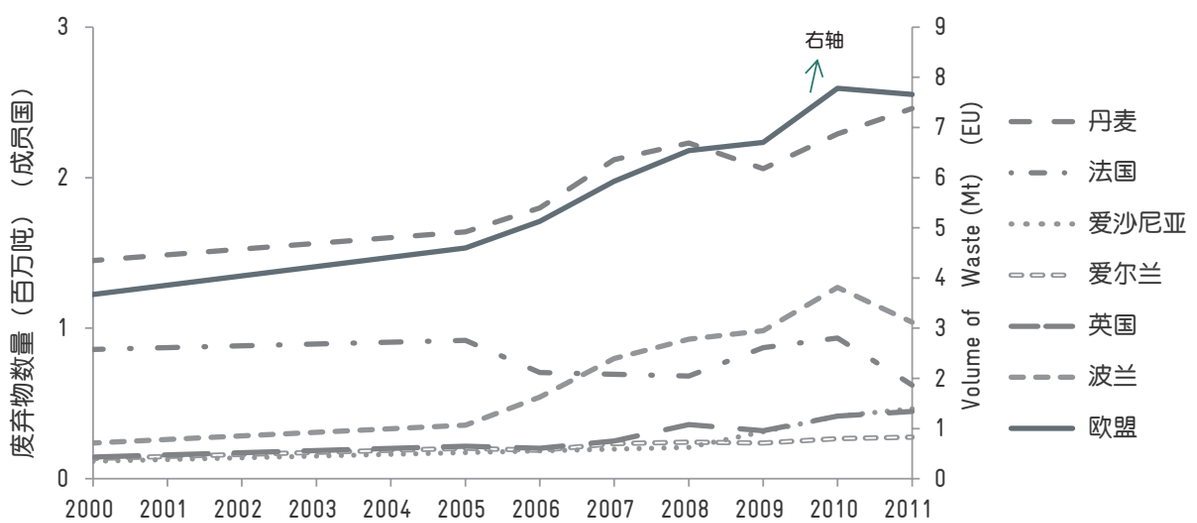


资料来源：水泥可持续性倡议行动 GNR：指标 314

在整个欧洲，化石燃料燃烧废弃物往往可在支付服务费的前提下进行混合焚烧，服务费标准为约 10 欧元 / 每吨废弃物，针对难以处置的危险废料，可增至 100 欧元 / 每吨废弃物。然而，对废油等一些易于处置的高热量废弃物而言，水泥企业则须付费。因此，对欧盟排放交易体系之外利用化石燃料燃烧废弃物已形成有力的经济激励机制。这一废弃物利用激励机制亦与其他监管措施挂钩。尤其是，欧盟指令（99/31/EC）[13] 限制废弃物填埋，实施该指令后水泥厂废弃物利用水平逐步提高，可归因于缓慢转移至国家法律的做法。事实上，仅有 9 个成员国在 2009 年最后期限前完成转移。意大利再次落伍，原因是自 2000 年以来利用用作燃料之废弃物的设施数量未增加。造成该现象的原因仍是颇具挑战性的地方许可流程。

利用生物质和废弃物要求投资废弃物预处理、储存和搬运设施等领域。利用生物质亦缩小设施的熟料产能。然而，该问题在产能（显著）过剩期间引起的关注有限。

图 5. 水泥厂用作燃料的废弃物数量



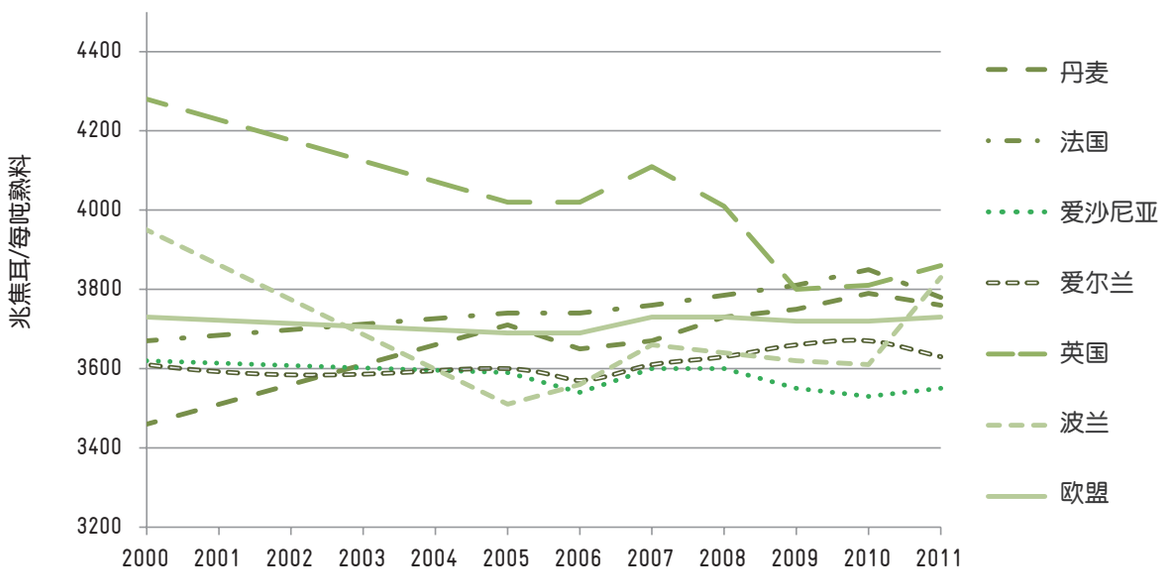
资料来源：水泥可持续性倡议行动 GNR：指标 313

[13] 废弃物填埋指令 99/31/EC。

3.2 通过投资能效实现减排

2000-2011 年（共 12 年，包括实施欧盟排放交易体系的 8 年），欧盟水泥窑的平均热能利用效率保持不变，为 3’730 兆焦耳 / 吨，比最佳可行技术水平高 20%。

图 6. 水泥厂平均热能利用效率变化



资料来源：水泥可持续性倡议行动 GNR：指标 329

欧洲约 45% 的熟料产自采用多级预热器和预分解炉（PHPC）的干窑。此类干窑被视为最佳可行技术（BAT），潜在能耗为 2’900 – 3’300 兆焦耳 / 每吨熟料 [14]。然而，欧洲 PHPC 窑的平均运行能耗高于潜在水平。2005 年至 2011 年，欧盟 PHPC 窑的平均热能耗稳定在约 3’550 兆焦耳 / 每吨熟料 [15]。原因包括水泥窑利用率低于设计能力，过程控制和混合燃料欠稳定。由于含水量和粗颗粒因素，提高替代燃料在混合燃料中的份额可导致能耗增加 2%。

欧洲另外 45% 产能来自不属于最佳可行技术的干窑，包括配备预热器但无预分解炉的干窑以及无预热器和预分解炉的长期干窑。

欧洲其余 10% 产能基于 10 座湿法和 30 座半湿法的熟料设施。此类技术的能源强度高于 [16] 最佳可行技术：普通半湿窑 9%，湿窑 50%。然而，自 2000 年以来，欧洲湿窑和半湿窑的使用范围缓慢缩小，引入欧盟排放交易体系后的使用范围进一步缩小（表 1）[17]。通过取代其余水泥窑，欧盟水泥行业可实现 50 万吨二氧化碳 / 年的减排目标。

2005 年之前，德国、英国和波兰新建或扩建了现代化 PHPC 窑。欧盟排放交易体系第二阶段期间，爱尔兰和一些东欧国家（保加利亚、罗马尼亚、斯洛伐克和塞浦路斯）也开展了相关工作。

---

[14] Moya, J. A. 等，“The potential for improvements in energy efficiency and CO2 emissions in the EU27 cement industry and the relationship with the capital budgeting decision Criteria”，《清洁生产杂志》19 (2011) 1207-1215.
[15] 水泥可持续性倡议行动“Getting the Numbers Right”，指标 3210a。
[16] 水泥可持续性倡议行动“Getting the Numbers Right”。
[17] 水泥可持续性倡议行动“Getting the Numbers Right”，指标“综合”。

表 1. 最佳可行技术（BAT）、半湿窑和湿窑的水泥产量份额

年份	欧盟各类水泥窑熟料产量份额		
	最佳可行技术（预热器 + 预分解炉）	半湿（能耗增加 9%）	湿（能耗增加 50%）
2000	34%	12%	6%，19 座设施
2005	42%	9%	5%，13 座设施
2011	44%	7%（30 座水泥窑）	5%，11 座设施

资料来源：水泥可持续性倡议行动 GNR

欧盟同时考量众多市场、经济、金融和监管因素，在此基础上做出投资决定，其中欧盟排放交易体系及其碳成本仅是诸多考量因素之一。

受 2008 年以来经济低迷因素影响，欧洲水泥行业在做出投资决定期间遇到重重困难。传统上，相比允许进入新市场或提高产品价值和价格的投资，对设施现代化和降低成本的投资要求更加出色的财务业绩（投资回报率、内部收益率、投资回收）。然而，考虑到水泥行业目前有限的盈利能力，短期–3 年内 – 财务因素和业绩（资本与负债比率以及投资回报率、内部收益率、投资回收期）在长期投资领域扮演比以往更加重要的角色，对于将资本与负债比率、削减债务和财务评级视为绝对优先事项的跨国集团而言尤其如此。

在如此短的时期内，财务评估甚至集中应用于长期资产投资，欧盟排放交易体系关于碳低效资产的长期目标和风险在投资决定方面仅扮演次要角色。假设碳价为 20 欧元 / 欧盟配额，用 PHPC 窑替代湿窑或半湿窑可分别节约 4.6 欧元 / 吨和 1.4 欧元 / 吨熟料成本。尽管该成本不可忽略，但尚不足以证明将湿窑转变成干窑的合理性。由于欧洲众多效率低下的设施规模相对较小（小于 100 万吨 / 年），因此通过改造现有设施将其提升到最佳可行技术水平将付出高昂的成本。

基于与公司管理人员的访谈内容，尽管能耗和二氧化碳排放量较高，湿窑仍可实现约 20 至 30 欧元 / 每吨产品的财政贡献（即售价减去生产成本）。除已摊销的投资成本之外，欧洲（半）湿法设施还通过从废弃物（往往是所获包括服务费的工业废弃物）获取高至甚高（最高 70%）的能源贡献降低能源成本。

因此，在碳价介于 10 至 20 欧元 / 欧盟配额范围的条件下，二氧化碳成本尚不足以引发从湿窑到干燥窑的转变。欧盟排放交易体系内的配额分配规定削弱碳价效应。只要年产量不低于历史产量的 50%，设施可获得全面配额分配。因此，旧设施能够以较低的产能系数运行（因为此类设施已折旧），仍能从全面配额分配中受益，从而获得有助于提高净收入的盈余配额。[18]

一系列欧盟排放交易体系规定和措施促使业界形成以下观念：监管可预测性下降，投资呈现不确定性。这一观念可能延迟做出投资决定。具体包括每 5 年修订一次容易产生碳泄漏的行业名单、2020 年后碳泄漏保护措施的不确定性以及基于历史的分配规定的复杂性。此外还涉及目前正在进行的关于折量拍卖的讨论、欧盟排放交易体系的结构改革、2030 年目标以及关于二氧化碳减排的国际协议。然而，几位接受采访的管理人员表示，欧盟排放交易体系引致的风险也可成为推迟困难决策时普遍选择的借口。

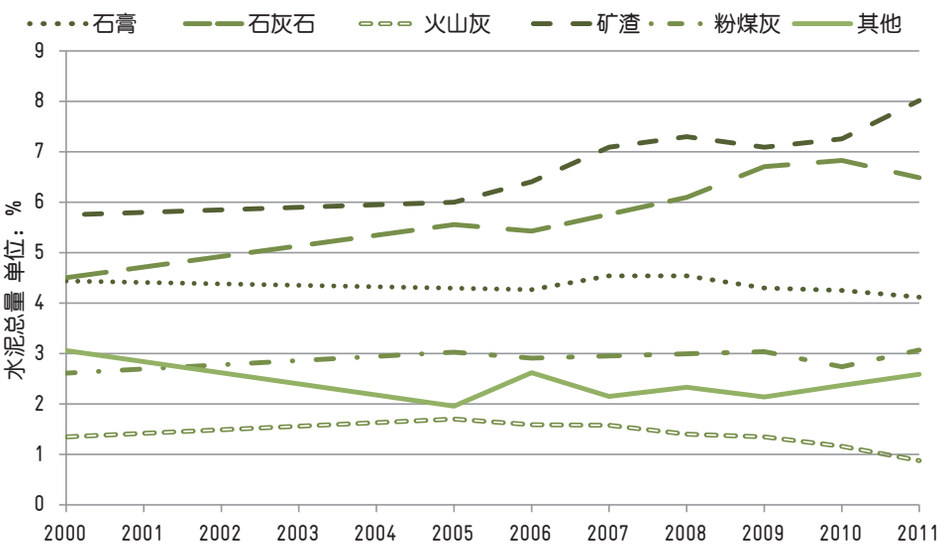
[18] Demailly, D. 等，“How to design a border adjustment for the European Union Emissions Trading System?”，《能源政策》38 (2010) 5199–5207.

3.3 通过使用其他材料替代熟料实现减排

由于熟料生产期间排放二氧化碳，使用其他液压矿物质替代熟料是减少水泥二氧化碳排放量的最有效途径。欧洲水泥标准 [19] 允许使用六种矿物质替代熟料，其中最重要的矿物质包括钢铁行业颗粒化高炉矿渣微粉、热电站粉煤灰、石灰石和过烧油页岩。目前，减少水泥的熟料含量是最有效的减缓选项，原因是此举不仅防止燃烧二氧化碳，而且可减少熟料中石灰石化学变化过程的二氧化碳排放量。

在欧盟排放交易体系第一阶段，欧盟水泥中的熟料平均含量下降约 2%，但在第二阶段，使用各类液压矿物质替代熟料的平均水平 [20] 稳定在 20% 至 20.5% 之间（图 7）。

图 7. 水泥中熟料替代品所占份额



资料来源：水泥可持续性倡议行动 GNR：指标 3219

熟料替代是一项重要的商业活动，下文将从多层面详述。熟料替代影响水泥行业的核心产品和资产，即熟料、熟料设施和石灰石储备。替代程度取决于下列因素。

替代品的地区可得性

鉴于长途获取的运输成本，矿渣、粉煤灰和火山灰的地区可得性是其用作熟料替代品的前提。

粉煤灰是源自安装在火电站内灰尘过滤器的废弃物。因此，本地发电组合中煤炭的不同份额影响粉煤灰可得性。例如，波兰在水泥生产过程中使用 9% 粉煤灰，显著高于欧洲 3% 的平均水平。扩大使用粉煤灰的潜力有限。若气候政策减少热电联产，则该潜力将下降。

---

19 欧洲标准 EN197-1 水泥 – 第 1 部分：普通水泥的组成、规格和一致性标准

20 熟料替代品由除熟料和石膏之外的所有矿物成分组成。

在整个欧洲，钢铁厂的炉渣多数用于水泥生产。将炉渣融入水泥前，要求对加工设施进行高额先期投资。在英国和爱尔兰，在混凝土搅拌机使用期间而非水泥生产期间用炉渣替代熟料。这些国家在水泥和混凝土组合领域的熟料替代整体水平与欧洲其他国家类似。

由于地质因素，火山灰矿物质仅存在于一些火山活动的南欧国家，如意大利和希腊。[21] 此外，过烧油页岩是一种出色的胶结制品。该材料由流化床燃烧设施生产，联合发电。每吨水泥二氧化碳排放量较低，原因如下：石灰石不会分解，要求的燃烧温度低（熟料窑的一半），联合发电。然而，地质因素导致可露天开采的有用页岩仅存在于欧洲部分地区。

替代品的成本

粉煤灰和矿渣是电力和钢铁生产过程的副产品。使用粉煤灰和矿渣要求对处理厂进行先期投资。水泥生产商为有限的可用粉煤灰和矿渣展开竞争，导致价格高企不下。然而，该类价格通常低于提供熟料的总成本。此外，还存在以下趋势：随着合同续约，用矿渣替代熟料所减少的二氧化碳的价值由水泥企业和钢铁企业共享。典型情况下，供应合同确保水泥企业稳定获得价格固定的粉煤灰和矿渣。

依赖其他公司

水泥和钢铁的经济周期并非始终重合。这种情况可能导致作为熟料替代品的炉渣供给暂时失衡。自 2009 年以来，炉渣一直（临时）堆放在水泥企业的石灰石采石场，而非用于水泥生产。关于堆放炉渣的数量和时间无可用的准确数据。合理估计为 300 万吨左右或整个欧洲每年炉渣用量的 15% 左右。

满足消费者需求

熟料替代或许影响混凝土的技术质量和要求，例如早期和后期强度、抗硫酸盐性、颜色及可用性。这要求消除需求侧对新产品的抵触。

一些公司已着手开展产品碳足迹工作，在推销各类水泥期间标示并宣传内含二氧化碳的减少情况。市场反应不一，但总体接受度很低。产品质量和价格是客户考量的两个最重要因素。这反映了欧盟排放交易体系中减排经济激励对消费者选择的重要性。水泥价格应反映内含的二氧化碳成本，以更加有效地激励消费者选择低碳水泥类型。

欧盟排放交易体系

举例而言，通过替代 25% 至 30% 熟料，即销售 CEM II 水泥而非 CEM I 水泥，可减少约 0.2 吨二氧化碳 / 每吨水泥。以碳价为 10 欧元计算，此举可节约 2 欧元 / 每吨水泥。由此产生以下问题：欧盟排放交易体系为何不深入推行熟料替代实践。

接受采访的水泥企业高层管理人员多数表示，尽管承认水泥替代是减少二氧化碳排放量的有效选项，但欧盟排放交易体系的影响的受重视程度，（尚）未达到促使做出熟料替代之决定的水平。具体可细分为两个因素：

---

[21] “A blue print for a climate friendly cement industry. How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World”, Ecofys, 2008.

首先，水泥企业仅将二氧化碳配额的机会成本中有限且不确定的份额加入水泥价格（见第 4.2 节）。因此，目前对水泥消费者转向熟料含量更低的水泥所给予的经济激励非常有限。为有效影响消费者选择更低二氧化碳含量的水泥类型和生产商，或许有必要在水泥定价过程中转嫁（全部）二氧化碳成本。

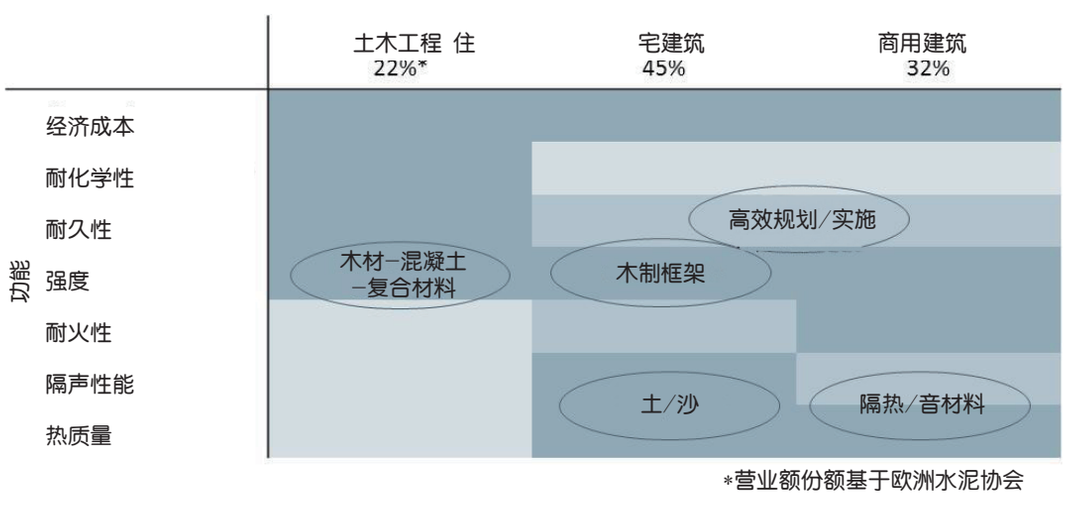
其次，水泥企业低估免费分配配额的条件下熟料替代的潜在减排价值。这种普遍存在的行业现状与追求利润最大化的公司的简化经济模型相悖。理论上，公司若能够通过减少购买配额节约成本或能够提高销售额外盈余配额的收入，则其应追求同等减排水平。现实与理论背道而驰，原因在于：(i) 关于降低熟料产量是否将反映在未来时期配额分配的基线存在不确定性；(ii) 报告成本的企业会计程序准则，但忽略放弃的机会成本节约（见第 4.3 节：水泥企业超额分配的利润使用）。

因此，一些公司已投资熟料含量减少的生产活动，其主要考量企业二氧化碳减排长期策略。然而，在整个欧洲，欧盟配额交易体系的有效激励有限，熟料替代的平均份额保持稳定。然而，的确存在地区差异。德国和英国在欧盟排放交易体系两个阶段期间进一步扩大熟料替代范围，英国主要使用粉煤灰。波兰在第一阶段扩大熟料替代范围，第二阶段未能继续。在意大利和捷克共和国，自欧盟排放交易体系实施以来，熟料替代范围一直没有变化。自 2005 年以来，英国混凝土搅拌机利用矿渣的情况亦未变化。另一方面，西班牙在欧盟排放交易体系第二阶段减少了熟料替代，恢复至 2000 年水平（详见第 4.3 节）。奥地利提高了水泥的熟料含量，替代水平仅略高于欧盟平均水平。

3.4 高效水泥利用和替代建筑材料

当前，水泥和混凝土是最常见的建筑材料。主要原因是这两类材料成本相对较低，性能出色，其他任何建筑材料均无法媲美。据笔者所知，关于通过更加高效地利用水泥（如改进设计）或用替代品取代水泥制品可减少的水泥潜在份额和相关排放量尚未开展系统评估。未来不可能出现某种单一的水泥替代品。相反，更加有效地利用水泥的方法和合适的替代品将取决于需要提供的特定功能。这些功能在住宅和商用建筑与土木工程之间可能不同（图 8）。

图 8：高效水泥利用和使用替代品取代水泥
（深色 - 功能相关性）



资料来源：水泥可持续性倡议行动 GNR：指标 3219

在土木工程领域，桥梁是一个例子。从技术角度来看，建造木材 - 混凝土 - 复合材料桥梁可减少混凝土用量。通过采用此类材料，混凝土能够支撑压缩载荷，木材可用于承受张力[22]。接受采访的工程师表示，相比建造大型重载桥梁或长甲板结构，木材 - 混凝土 - 复合材料桥梁能够节约 50% 混凝土和 20% 钢材。

在住宅和商用建筑建造领域，混凝土通常用于实现不同功能：强度；耐火；热质量；或隔声。几项研究显示框架、内墙和外墙及地面等建筑组件可用木材建造，同时具备相同功能。根据生命周期评估结果，木材的碳排放量低于混凝土。[23] 然而，由于商用仓库的防火要求更加严苛，住宅建筑使用木材的潜力或许比商用仓库更高。此外，沙或土能够提供热质量功能。[24] 据报道，若混凝土仅用于结构目的，从技术角度来看，在建筑层面另可节约 20% 混凝土。

然而，用其他建筑材料替代水泥产品的实际潜力不仅取决于以上技术考虑因素，而且取决于以下因素，例如替代品可得性、其经济成本、该领域的创业活动、文化层面以及建筑法规的作用。为更好地理解减少水泥需求和相关排放量的潜力，需针对这些领域进行更加系统的分析。

除混凝土替代之外，还可通过完善规划和实施工作减少混凝土用量。有观点认为结构工程师与建筑师之间的早期合作可减少材料需求量。[25] 完善规划的一个范例是在地基、墙体及地面之间实现协调——因此，用比混凝土更轻的材料制成的墙体和地面对地基混凝土用量的要求更低。[26] 此外，改进实施可减少建筑地面的混凝土用量。例如，顶部和底部需要混凝土，以满足强度要求。填充部分可空置或用发泡聚苯乙烯填充。然而实践中，由于易于实施，混凝土亦用作填料。

以往研究估计替代实践的价格弹性范围介于 -0.5 至 -1[27] 之间。若水泥价格不含碳成本且为欧洲当前水平 60 欧元 / 吨，到 2050 年，40 欧元 / 吨的二氧化碳价格可将水泥需求量减少 20%-35%。

然而，迄今为止尚无明显的碳成本转嫁至水泥价格，因此包含免费配额分配规定的欧盟排放交易体系未对用其他建筑材料替代水泥做出贡献。

与此同时，需防止由于使用其他排放量更高的材料替代混凝土而增加二氧化碳排放量。因此，碳成本转嫁至最终客户不可仅限于水泥制品，还应涵盖潜在的替代品，如钢材。总之，以上简要概述了减少水泥需求量的各种机会，并对减少混凝土用量的潜力进行更系统分析的需要。

---

[22] Flach, M. 和 Frenette, C.D., (2003), Wood-Concrete-Composite-Technology in Bridge Construction.

[23] Albrecht, S. Rüter, S. Welling, J. Knauf, M. Mantau, U. Braune, A. Baitz, M. Weimar, H. Sörgel, S. Kreissig, J. Deimling, J. Hellwig, S., (2008), Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern, Bericht gefördert von BMBF; Gustavsson L., Madlener R., Hoen H.-F., Jungmeier G., Karjalainen T., Klöhn S., Mahapatra K., Pohjola J., Solberg B., Spelter H. (2006). The Role of Wood Material for Greenhouse Gas Mitigation, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11(5-6): 1097-1127; O' Connor, J. and Sathre, R., (2010), A Synthesis of Research on Wood Products and Greenhouse Gas Impacts, 第 2 版 , 温哥华 , FP Innovations.

[24] Pacheco-Torgal, F. 和 Jalali, S., (2011), Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction, Construction and Building Materials, 第 29 卷 , 第 512 页 –519 页 ; Goodhew, S. 和 Griffiths, R. (2005), Sustainable earth walls to meet the building regulations, Energy and Buildings, 第 37 卷 , 第 451 页 –459 页 .

[25] Mehta, K.和 Meryam, H., (2009), Tools for Reducing Carbon Emission due to Cement consumption,《结构》杂志 , 2009 年 1 月 .

[26] John, V., Habert, G. (2013), Graue CO2-Emissionen im Gebäude – wo sind sie hauptsächlich verortet? Ökobilanzanalyse mittels zweier verschiedener virtueller Blickwinkel auf die Konstruktionsweisen und Bauteile von vier unterschiedlichen Mehrfamilienhäusern, Bauingenieur 08, 第 342 页 -348 页 .

[27] Cour 和 Møllgaard (2002) -0.3; Roller 和 Steen (2006) -0.5 – 1.5; Jans 和 Rosenbaum (1997) -0.8; Ryan (2005) -3.

3.5．水泥替代品发展情况

低碳水泥选项包括基于“旧”观点的“新”水泥，例如钙硫铝酸盐水泥、熟料矿化、碱激发水泥以及 Celitement（Schwenk 集团）和 Novacem 等新工艺和新产品。水泥行业管理人员称开发和示范此类新产品将耗时 10 至 15 年。

产品创新的首要壁垒或许是低碳产品缺乏市场需求，在碳价低迷且未在水泥价格方面得到反映的情况下尤其如此。即使将碳价纳入水泥成本，也难以鼓励用户转向新的水泥类型：水泥和混凝土在超长使用寿命的基础设施、地基、建筑及住宅领域的应用，令经证实的产品耐用性成为客户至关重要的要求。

与水泥替代品案例的讨论内容一样，低碳水泥替代品不能提供与水泥完全相同的功能。相反，或可根据具体应用领域使用或优先选择特定的低碳水泥类型。潜在有限的单个资源或许构成一组更加差异化的低碳水泥类型的另一个理由。

3.6. 碳捕获与封存发展概况

碳捕获与封存（CCS）是一个减缓选项，指捕获固定设施烟气中的二氧化碳，压缩提纯后的二氧化碳并将其运至地质封存场所，将提纯后的二氧化碳注入地下深处，实现与大气的永久隔离。[28]

自 2007 年起，欧洲水泥研究院（ECRA）开展了多个水泥行业碳捕获技术研究项目，公开发表内容广泛的技术报告。[29] 多家水泥企业及水泥设备和气体技术企业参与了该项联合研究计划。

经初步评估，欧洲水泥研究院聚焦两项捕获技术。通过采用“后燃”技术，设在传统熟料生产设施末端的烟气处理装置吸收从烟气进入化工液体的二氧化碳，随后实现液体再生和纯二氧化碳分离。通过采用“氧化燃料”技术，环境空气分解为氧气和氮气，使用氧气 / 二氧化碳混合物而非空气燃烧熟料窑内的燃料。由此生成的烟气的主要成分为二氧化碳和水，这两种成分在二氧化碳压缩前分离。

欧洲水泥研究院的研究显示两项技术均可用于改造既有熟料生产设施。采用后燃技术分离 1 吨二氧化碳所需的能源几乎相当于熟料最佳可行技术的热能需求。氧化燃料技术的能源损耗较低：每吨熟料的热能需求相当于采用传统最佳可行技术的水平，但电能消耗量翻番。

自 2013 年年中以来，海德堡水泥集团挪威子公司 Norcem 使用试验台检测各类二氧化碳捕获技术。

大量研发工作（包括试点工厂）尚待完成。经济分析只是此项研究的初步工作，结果显示投资成本约为 1 亿欧元，减排成本约为每吨捕获的二氧化碳 30 至 40 欧元，压缩、运输和封存除外。

---

[28] 政府间气候变化委员会，2005: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. 剑桥大学出版社：英国剑桥。
[29] 欧洲水泥研究院 -ECRA 碳捕获与封存技术报告 第 1 至第 3 部分 ‹www.ecra-online.de›.

碳捕获与封存通常存在若干壁垒，这也适用于水泥领域。捕获导致能耗上升。具体而言，水泥行业的碳捕获与封存技术成本或将突破 40 欧元 / 每吨二氧化碳 [30]，二氧化碳封存的社会接受度尚不确定 [31]。二氧化碳封存的研发工作通常由油气类专业从事地下开采活动的企业开展，要求水泥企业与地下开采企业建立新型合作，被一些人看作另一壁垒。欧洲环境组织普遍反对在电力行业实施碳捕获与封存，其理由是开展此项工作会取代可再生能源，但更加支持在工业领域实施碳捕获与封存，工业领域的现有深度减排选项的数量极少。[32]

尽管多份文件已推荐特定活动，但欧盟无成员国就水泥行业的碳捕获与封存制定具体政策。[33]2008 年欧盟经济复苏方案为碳捕获与封存示范提供了专项资金，但六个提议项目均涉及火力发电。NER300 征求意见对水泥工厂的碳捕获与封存开放，但水泥行业未提交申请。

欧洲水泥研究院一项引人注目的新研发计划虽处于早期阶段，但该计划的宗旨是在被捕获的二氧化碳永久封存之外找到其他解决方案。该计划聚焦利用太阳能和可再生能源将捕获的二氧化碳转化为甲醇等碳氢化合物。通过这种形式，被捕获的二氧化碳可被再转化为工业用化石燃料或资源。

欧洲水泥研究院受欧盟二氧化碳长期减排的宏远计划的鼓舞，遂决定实行上述长期研发计划。然而，该项计划未获得经济支持，欧盟排放交易体系也未制定相应的经济激励措施。根据麦肯锡咨询公司的研究，既有水泥工厂的改造活动处于碳减排成本曲线的成本顶端。[34] 由于排放交易体系的目的是激励制定成本最低的减排选项，经济理论表明，除非其他减排手段不足以达成减排目标且排放交易体系价格相应上升，否则排放交易体系不会对碳捕获与封存产生激励。在此之前，针对在水泥行业开展碳捕获与封存大规模示范工作，还需其他支持机制。

---

30 国际能源署 / 联合国工业发展组织 . Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage in Industrial Applications. 国际能源署 , 法国巴黎 .

31 Global Energy Assessment, 2012: 第 13 章 : Carbon capture and storage. 载于 www.iiasa.at/gea.

32 “Climate Action Network Europe Position Paper CO2 Capture and Storage” 欧洲气候行动网络 2006, ‹http://www.climnet.org/resources/doc_download/1119-caneurope-ccs-position-paper-11-2006›.

33 国际能源署 / 联合国工业发展组织 . Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage in Industrial Applications. 国际能源署 , 法国巴黎 .

34 麦肯锡 , 2009, Pathways to a Low-Carbon Economy; the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve 第 2 版 .

4. 欧盟排放交易体系对定价、运营和投资决策的影响

4.1 定价：碳交易成本是否转嫁给水泥采购商？

碳交易市场促进减排的举措包括激励选用替代品，以及提高二氧化碳高排放产品的利用效率。若碳排放密集型产品制造商将生产过程产生的碳排放成本计算在成品售价内，消费者便有动力选择碳排放强度更低的替代品或提高产品使用效率。对于低碳水泥生产商等碳排放强度较低产品的制造商而言，碳排放成本传递的方法亦具有重要意义，可确保其产品具有商业竞争力。

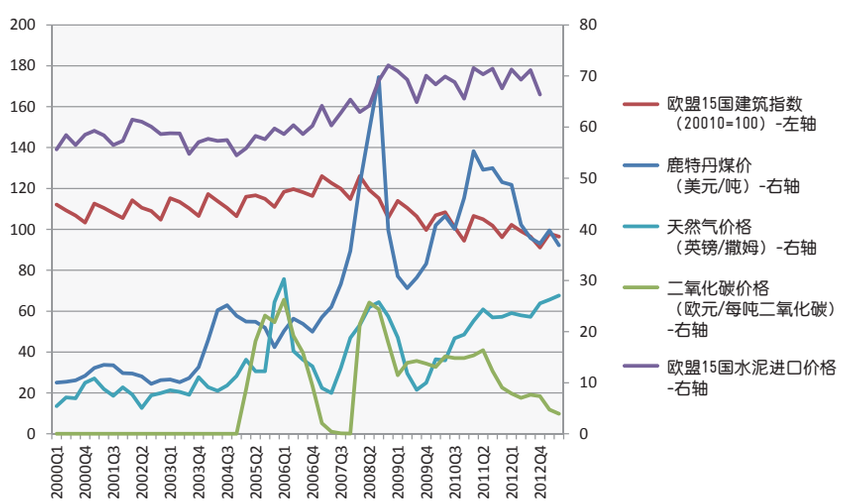
过去，欧洲水泥企业一直采用“成本加成”法为产品定价，即产品价格等于成本与预设利润之和。最近，一些企业开始探讨是否应改用“附加值”法为产品定价，依据消费者在特定应用中使用产品所获附加值作为定价基础。

专家访谈期间，当被问及价格传递话题时，水泥企业高层管理人员表示并未将碳排放成本加入水泥销售价中。随后通过分析现有水泥价格数据，结果亦证实如其所言，水泥销售价不包括二氧化碳机会成本。

收集自 2000 年的欧盟统计局季度欧盟贸易总值，将其除以对应的欧盟 15 国灰色硅酸盐水泥贸易总量，计算得出水泥价格数据。目前缺乏公开发布的欧盟地区水泥价格数据，因此需进行计算。尽管欧盟 15 国仅占贸易总量的小部分，但 Prodcom 表示，将贸易值与欧盟统计局年生产值和产量数据进行比对，可看出销售价格较接近实际生产价格。

图 9 显示根据欧盟 15 国灰色硅酸盐水泥进口价所得出的季度平均价。该图亦展示了欧盟 15 国自 2000 年起建筑领域、蒸汽煤价、天然气价格以及欧盟排放交易体系碳价走向。假定每吨水泥二氧化碳平均排放强度为 0.6 吨，若将碳排放成本全部转移至消费者，则每吨 10 欧元的碳价便会导致水泥提价 6 欧元。然而，自 2005 年 1 月实施欧盟排放交易体系之后，尚未观察到水泥与碳价之间存在此种联系。每吨水泥价格在 2004 年第三季度和 2008 年第四季度之间从 60 欧元逐渐升至 70 欧元。但水泥价格快速上升时期与 2005 年 1 月实施欧盟排放交易体系并无紧密联系。相反，水泥价格从 2006 年下半年碳价大幅下跌后开始迅速攀升，另外在 2007 年下半年至 2008 年上半年期间亦出现迅猛增长，其主要原因应与能源价格飙升以及建筑行业发展相关。

图 9. 计算得出的欧盟 15 国水泥价格与碳价、能源价格及建筑需求对比



资料来源：路透社、欧盟统计局、国际货币基金组织商品数据库、土木工程师协会（ICE）

自 2011 年起，碳价出现下跌，但并未造成水泥价格持续下降。由此，这些数据进一步验证了水泥企业高层的说法，即碳价机会成本并未转嫁给水泥采购商。

针对碳价并未转移至水泥价格的各种原因已展开讨论并进行汇报。商家对于来自进口水泥产品的竞争存在担忧，在一定程度影响了将碳排放成本转嫁给终端消费者的做法。本土产品在水泥价格中加入碳成本后，会令进口产品更具优势，尤其碳价在 15 至 20 欧元 / 欧盟排放配额时更是如此。免费的配额分配正是为了避免发生进口产品取代本土产品、碳成本未转移而发生碳泄露的情况。

若水泥企业可将碳成本转嫁并且不发生碳泄露问题，便可实证证明水泥行业不存在碳泄露风险。由此出现了一种质疑，即当前对于碳泄露保护措施的探讨是否反而限制了碳价的传递。

维持市场份额和良好客户关系等长远战略考量可能会打消一部分企业将碳价传递至产品价格的做法。

另一担忧在于，商家在享受免费配额的同时提高产品售价以体现碳机会成本，此举可带来利润大幅增长。部分受访者亦表示担忧该情况会引来市场竞争监管机构的猜疑和注意，后者密切关注水泥行业的定价行为。

近几年产能与市场需求之间的严重失衡削弱了水泥行业将其他成本上涨因素纳入产品价格的能力，如能源成本上涨。

最后，数位受访高层证实其所在企业尚不会利用水泥碳含量进行市场营销或对不同水泥类型进行区别定价。水泥企业不会借用碳成本传递来推广销售低碳水泥，甚至反而有些企业尝试收取“绿色”低碳产品溢价。遗憾的是，“增加值”理念与环保成本国际化理念背道而驰。

当前，水泥企业很少或没有将碳价传递至水泥售价的原因在于欧盟排放交易体系发放的免费排放配额可满足其需求。但该情况在欧盟排放交易体系第三阶段可能发生变化。届时，如果生产设施的产能利用接近或高于其参照期的产量，设施排放量高于基准值，相关设施便会面临真正的碳成本问题。

4.2 贸易与再投资：是否存在碳泄露证据？

“碳泄露”[35] 一词有诸多定义。本报告关注欧盟排放交易体系是否会对贸易和投资模式产生直接影响，从而导致欧盟生产活动和排放量“逃离”至未被欧盟排放交易体系覆盖的地区。主要担忧在于，欧盟排放交易体系影响欧盟水泥企业的生产成本不断攀升，直接导致进口水泥产品在欧盟市场份额的增长。

探讨该问题时，我们区别对待运营性泄露和投资泄露。运营性泄露指进口产品因不同产区的碳价差异而从本地企业争得市场份额，具有短期性特点。投资泄露指由欧盟排放交易体系对水泥行业投资政策产生影响而造成的碳泄露，具有长期性特点。此外，在特定条件下，欧盟排放交易体系还会造成逆运营性泄露，即其直接影响欧盟扩大进口，亦需对其展开探讨。

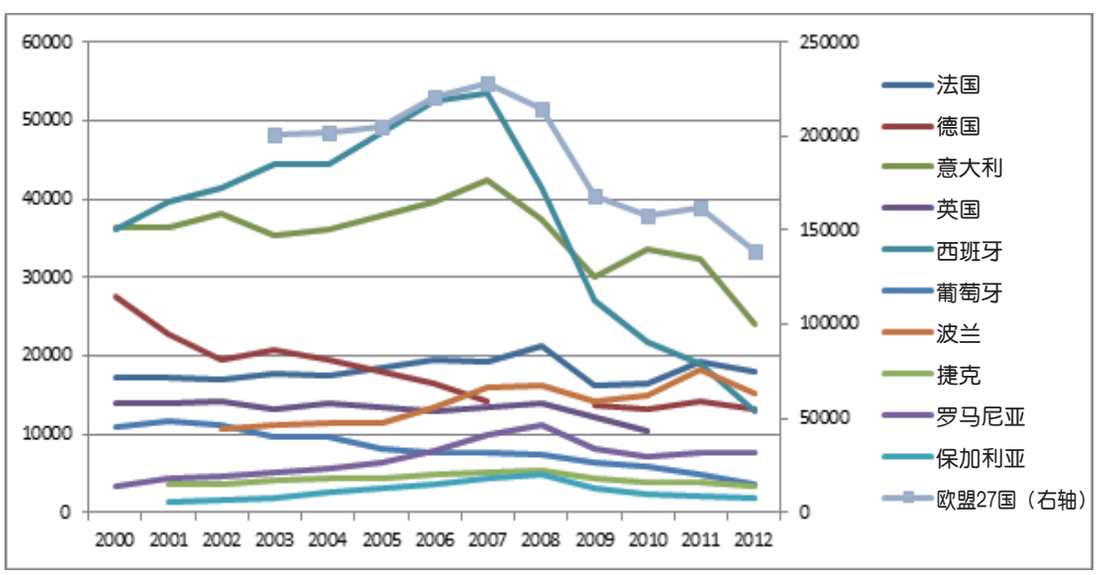
---

[35] 通常认为指由 A 国气候政策导致 B 国的排放量差异。目前已知多种潜在泄露途径（包括增加或减少），并了解其对国际贸易、投资、国际能源价格和技术溢出（详见 Dröge，S.2011）。Using border measures to address carbon flows。气候政策，11（5），1191-1201。

4.2.1 欧盟水泥和熟料消费及贸易

针对欧洲水泥和熟料贸易展开的任何分析均须首先考虑欧盟的消费模式。图 10 以部分欧盟国家为例，展示过去 13 年欧盟的表观水泥消费（生产加净进口）情况。图中可看出水泥消费深受经济周期影响。水泥消费在大部分成员国实现增长，欧盟 27 国整体涨势良好，而 2009 年经济不景气后出现显著下滑。该现象在西班牙和意大利尤其明显，这两个国家经历了 2008 年前建筑业的急速发展，随后又饱受欧债危机困扰。值得一提的是德国和波兰属于例外。随着两德统一带来的十年强劲需求开始削弱，德国水泥消费量自 2000 年起呈稳步下降态势。而波兰经济表现强劲，国内广泛开展建筑和基础设施建设活动，因此欧债危机并未影响其水泥消费的增长。

图 10. 成员国水泥消费走向（单位：千吨）

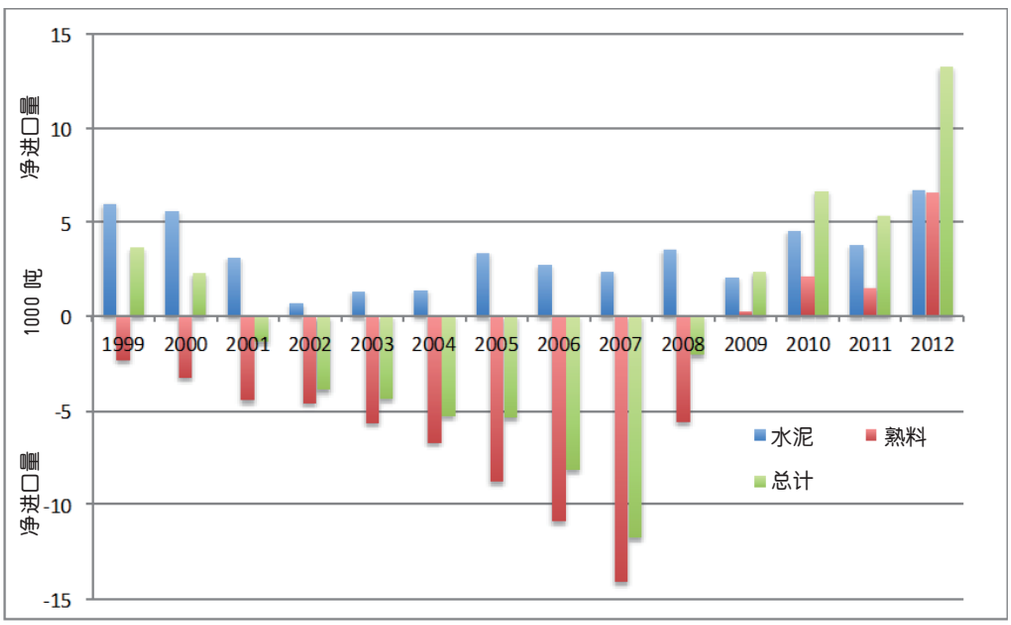


资料来源：欧盟统计局（Prodcom）

与消费量相比，水泥贸易量规模较小。水泥产量仅 2% 至 4% 出口至欧盟国以外国家，而进口量更是仅为其一半。因此，欧洲在 1999 年至 2012 年期间一直是小规模的水泥出口地区。欧盟地区内的贸易量亦较小，平均占国内生产总量的 2% 至 4%，并长期维持该水平。但德国属于例外，其所产水泥 12% 出口。法国近几年亦大量从欧盟其他国家进口水泥产品，占其总量的 12%。

由于熟料的散装运输比水泥简单许多（水泥散装运输对处理工序和存储设备要求更高，因水泥含粉尘，必须保持干燥），与欧盟之外国家的熟料贸易量稍大一些（详见图 11）。2009 年前，欧洲为熟料净进口地区（2007 年从非欧盟国家进口熟料达到净进口量峰值 1400 万吨），主要归因于西班牙和意大利对熟料的需求。同时，欧盟熟料出口量在危机爆发前仍属小规模（少于 300 万吨，即占国内产量约 2%）。该趋势在 2009 年发生转变，欧盟净熟料贸易流动实现逾 30 万吨小幅顺差，主要由西班牙、葡萄牙和希腊出口拉动。巴西和非洲国家成为熟料出口主要目的国。因此，欧盟从 2009 年前水泥净出口地区和熟料净进口地区转变为这两类产品的净出口地区。

图 11. 向非欧盟国家水泥和熟料净出口量变化（1999 年 -2012 年）



资料来源：联合国商品贸易统计数据库和欧盟统计局

上述调查结果突出两点结论。首先，水泥行业贸易往来的主要驱动力来自国内熟料和水泥的产能与需求之间存在差异。举例而言，2002 年至 2007 年建筑业急速发展期间，西班牙成为水泥和熟料进口大国，熟料进口量占其国内生产总量 20% 至 30%。西班牙主要从埃及和中国进口熟料，水泥则主要从土耳其进口。然而，2008 年建筑业发展开始放缓之时，西班牙水泥行业成为净出口方，国内熟料产量 2% 至 5% 出口至非欧盟国家，该数据 2012 年达到 20% 以上。同样，2008 年后，葡萄牙、希腊、爱尔兰和瑞典的熟料和 / 或水泥出口量出现增长，其主要原因在于国内产能过剩达到最高水平。从图 10 可看出该转变的原因：自 2008 年起，大部分欧盟国家的国内水泥消费量急剧下降。

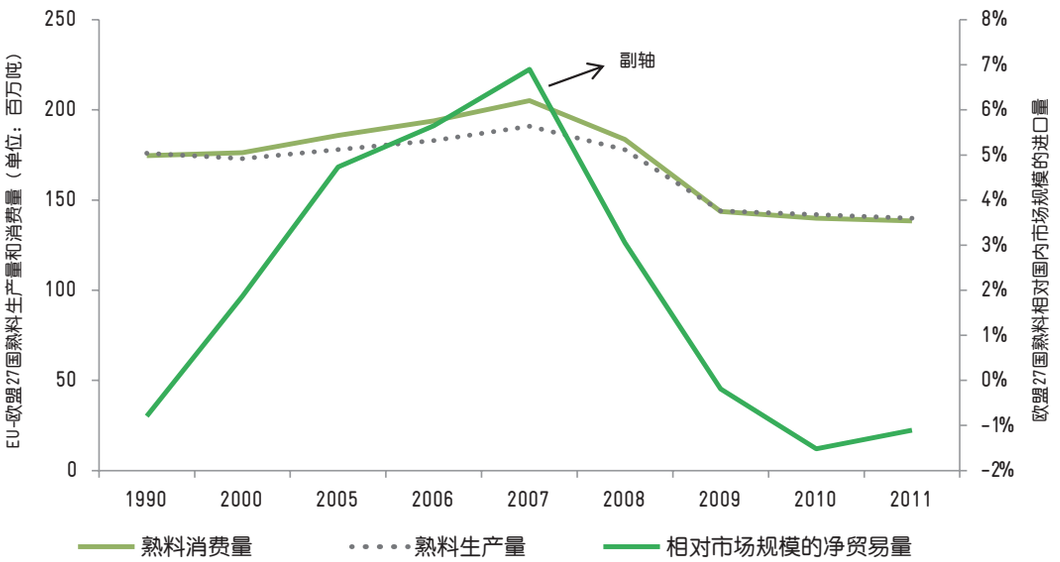
其次，贸易量占欧盟总产量的比重往往较小。体现出水泥市场本土化的特征，水泥贸易面临诸多障碍，包括作为附加值的高昂运输费 [36] 以及专业化的水泥进口及仓储容量要求。再次以西班牙为例说明：在经济蓬勃发展时期，随着进口终端和粉磨站建在进口熟料港口附近，进口量逐渐增长。危机爆发造成产能过剩，同样的港口和粉磨站开始应用于西班牙国内熟料和水泥出口领域。

4.2.2 是否存在运营性泄露的证据？

根据贸易数据分析、相关文献以及对水泥企业高管的采访，目前尚未发现因欧盟排放交易体系而导致运营性泄露的证据。如上所述，2008 年前熟料净进口量大幅增长主要归因于国内产能与需求失衡（见图 12）。随着需求骤减，尽管 2008 年欧盟排放交易体系碳价攀升，但熟料净进口量仍大幅下降。

[36] 据麦肯锡（2008 年）预测，从亚历山大港将 1 吨熟料运往鹿特丹港的运输成本为 20 欧元，内河航运成本约每 100 公里 3.5 欧元 / 吨，国内陆运每 100 公里约 8.6 欧元 / 吨。

图 12. 欧盟 27 国熟料：消费量、生产量和净进口量 / 出口量之间的关系



资料来源：欧盟统计局 Comext，GNR

与水泥企业高层的探讨证实了从上述数据总结出的推论，即进口量目前并非由碳价所驱动。举例而言，某高管表示，除非未来欧盟排放配额价格“显著高于”碳排放市场第二阶段数值，否则单靠碳价差异而令欧盟进口产品的境外生产成本与物流费用合理化实在“过于困难”。然而，若未来碳差价大幅增加，可能造成第三国运营性泄露（生产商缺乏公平竞争）。

该情况符合当前就欧盟排放交易体系第二阶段[37]相关课题所做的计量经济学研究。研究发现，碳价在解释欧盟 27 国水泥和熟料净进口量水平的短期变化方面不具备统计学意义。该结论亦符合第 4.1 节得出的结论，即欧洲水泥制造商并未将碳排放成本传递至水泥售价中[38]。

4.2.3 是否存在投资泄露的证据？

鉴于碳价对投资的影响需长时间观察了解，而且投资与短期碳价之间并不存在必要关联，因此要找到投资泄露的实证证据更加困难。然而，通过约访专家了解到的轶事证据显示，因欧盟排放交易体系而造成投资泄露的可能性很小。

受访的部分水泥高管表示，在欧盟以外专为服务欧洲水泥市场而建设相关设施并非明智的长远发展战略。针对附加价值低、运输和能源费用高昂的重工业产品而言，许多水泥高管均认为“贴近市场的最佳可用技术开展生产”方式应为最佳商业和环保之选。

---

[37] Ellerman 等（2010 年）研究了由 Frédéric Branger、Philippe Quirion 和 Julien Chevallier（2013 年）提供的 2005 年至 2008 年数据。Carbon leakage and competitiveness of cement and steel industries under the EU ETS: much ado about nothing，国际环境与发展研究中心 CIRED 工作报告第 2013-53 号，分析至 2012 年数据。

[38] 价格转移并非一定导致运营性泄露。理论上，若无产能限制，而且碳排放成本较高，欧洲企业可能因国际套利生产成本而导致碳泄露发生。

当前欧盟水泥生产所需的大部分排放配额在第一阶段和第二阶段免费发放，但第三阶段推出对标系统后，设施将得到相当于其历史产量[39] 88.4% 的免费配额，再乘以熟料基准（标杆值）。在 2013 年 9 月最终分配配额之前，免费配额分配量具有很大的不确定性。尽管排放交易体系碳总量上限每年下降 1.74% 的长期发展路线被纳入《碳排放交易指令》，该指令仍存在诸多可带来投资不确定性的因素。其中包括：（i）每五年修订一次易发生碳泄露行业的清单；（ii）2020 年后碳泄露预防措施的不确定性；（iii）基于历史数据分配配额的规则的复杂性和缺陷；（iv）当前关于被动性、架构改革、2030 年目标以及国际协定的讨论导致人们认为存在立法不可预测性。

尽管该情况令欧洲规划和投资决策更为困难，但目前尚无证据表明在欧投资因欧盟排放交易体系而取消并转移阵地。无法明确此类不确定性在何种程度导致投资泄露，这点与在欧投资决策放缓完全不同。

4.3 由固定事前配额分配和活动水平门槛造成的偏离

截至目前，免费配额分配以基于历史数据的固定事前分配原则为基础。若配额分配未根据实际产量变动而相应调整，便会在水泥需求低迷期造成初始免费配额分配过量的问题。

第二阶段期间，企业即使部分停产仍能继续得到全额免费配额的评定标准在不同欧盟成员国有所不同。但大部分国家并未明确最低活动水平，因此造成 95% 的过量配额分配。

固定事前配额分配完毕后发生因经济衰退导致的生产减量情况，从而造成免费配额发放过量的问题。欧盟地区整个水泥行业免费配额发放过量的比例从 2009 年的 27% 增加至 2012 年的 37%。由于熟料每吨碳排放强度仅提升约 1%，因此该免费配额发放过量问题主要由生产减量造成。大部分水泥企业均出售这种富余配额。2009 年至 2012 年，欧洲前五大水泥企业的财务收益总计逾 10 亿欧元[40]。这几家水泥企业并未将出售富余配额的获利专门用于能效或减排项目，而是将其纳入公司全面预算。

第三阶段采用欧盟统一化配额分配规则，可以解决部分停产问题，要求必须达到 50% 的历史活动水平（HAL）利用率，方能继续在来年获得全额的事前分配的免费配额；达到 25% 的历史活动水平（HAL）利用率，可获得 50% 的事前分配配额[41]。该规则旨在避免因产能开工率过低而发生配额过量分配的情况。

然而，通过分析欧盟交易日志（EUTL）的排放数据，并且与水泥企业高管交流后发现，事前配额分配仍会对水泥企业产生反向激励作用，尤其熟料需求较低时期会造成严重偏离。

4.3.1 对运营决策的影响

活动水平门槛的设置带来的一个问题是企业会有意将生产活动分摊到数个设施内完成，以确保所有设施均能获得全额免费配额。当区域水泥市场需求低于最低生产活动水平时，企业便有动力将国内无法消费的过剩产量出口至国外，并提高水泥中的熟料含量，因为活动水平规则覆盖的只是熟料生产。

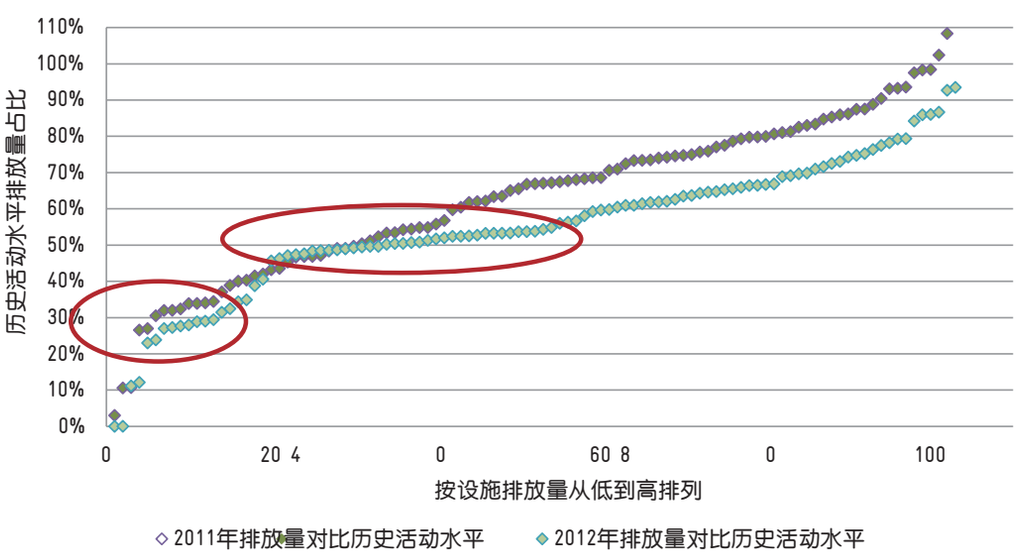
---

39 通过使用跨行业校正因子得出平均配额率。
40 参考资料：Lafarge、Cemex、HeidelbergCement、Italcementi 和 Holcim 公司财务报表。
41 参考委员会决议第 23 条 2011/278/EU

受访企业高管一致证实存在该做法，不仅受金融危机重创的国家，甚至整个欧盟地区均存在该现象。企业高管纷纷表示该做法并非主观意愿，亦带来不良影响，希望杜绝出现该情况，但体系规则的设计导致企业很难经受诱惑而不对其加以利用。

欧盟交易日记载有发生门槛效应的证据。图 13 对需求急剧下降的五个国家的水泥生产设施进行分析：希腊、意大利、爱尔兰、葡萄牙和西班牙。根据欧盟交易日记系统数据，每个数据点代表单个设施 2011 年和 2012 年的核证排放量与历史活动水平基准年核证排放量之比。约 30% 的设施 2012 年达到约 50% 历史配额分配水平，但 2011 年并未实现。此外，2012 年（而非 2011 年）排放比下跌至约 47-48%[42]，少部分设施仅略高于 25%，适用于配额分配原则另一门槛值。免费配额分配活动水平门槛值会经过评估后予以回溯性应用，即 2012 年减产的情况将帮助确定 2013 年的配额分配。因此，可以预见到的结果是，企业确实会将其生产活动水平维持在门槛值以上，以获得最大量的免费配额分配。

图 13. 西班牙、意大利、希腊、葡萄牙和爱尔兰欧盟排放交易体系水泥设施 2011 年和 2012 年排放量与历史活动水平对比



资料来源：笔者根据欧盟交易日记数据计算得出。

这种配额分配规则造成的意外后果在于其可能降低了企业通过提高运营效率而减少排放的积极性。实际上，企业得到了间接激励，增加而非减少排放量，如：

- 仍使用陈旧、能源效率偏低的设施，而不是关闭此类设施；
- 设施开工不足，产能利用率保持在 51%，在低能效状态运行；

[42] 部分设施的历史活动水平排放量占比均低于 50%。但该计算结果仅用于代替产能利用率预测，并未公开发布。

• 更多地生产熟料以满足门槛值，然后在水泥中多添加熟料而不采用其他低碳的熟料替代品（如矿渣或其他产品）。以西班牙为例，水泥中熟料含量从 2006 年 8 月的 77.5% 升至 2009 年 11 月的 80%[43]。

上述行为可能导致水泥行业排放量的增加，特别是在产能过剩的经济环境下，既有设施的运营效率具备提升空间。

4.3.2 对资产合理化配置和效率投资产生的影响

部分受访者亦提到部分停产的规定可能影响远期决策，例如资产合理化配置。其与能源和碳排放效率提升领域的新投资诱因紧密相关。资产合理化配置包括削减过剩产能内容，实为重要商业决策，往往经过慎重考量方可做出。此类决策必须考虑到方方面面的因素，包括：

- 未来经济形势预测；
- 运营许可值、石灰石储量和开采许可；
- 水泥市场准入和市场份额；
- 关停后的社会成本；
- 场地清理费用；
- 对公司资产负债表的影响

资产合理化配置与能源和排放效率方面的投资紧密相关，原因在于若要从此类投资中获利，与其他资金支出一样，应充分利用这笔新投资。新建资产或改造设施产能利用率越高，投资回收期越短。若因部分关闭规定而促使工厂开工不满，以将生产任务分摊至各既有设施；亦或导致产能过剩，由此造成水泥价格下跌，都可能会削减在提高能源和排放效率领域的新投资回报。

专栏 1 运输成本如何影响资产合理化配置决策?

关于资产合理化配置（生产集中化）的反对观点在于，为满足水泥需求，减少工厂数量的做法可能导致产品运输量的增加。此外，熟料替代品用量增长需要从更远距离获得炉渣或粉煤灰。为量化论据的相关性，我们将运输环节和水泥生产带来的二氧化碳排放进行对比。此类排放量可与普通工厂和欧洲 10% 拥有最低排放量工厂之间的排放差异进行对比。每吨熟料存在 52 千克二氧化碳排放量差值，每吨水泥则存在 86 千克差值。

下表展示各类运输方式[44]每公里典型二氧化碳排放量（吨）以及熟料和水泥运输排放等同于普通和前 10% 最优生产技术之间排放量差值时的运输距离。从中看出，即便是采用单位排放最高的卡车运输方式，也可以将熟料、水泥和矿渣等重型产品运输相当远的距离，其运输排放量才会抵消掉生产改进带来的减排量。

[43] 该比例提升的部分原因可能是水泥出口增长。
[44] 交通运输产生的二氧化碳排放量测量与管理指南，欧洲化学工业委员会 CEFIC，2011 年 3 月

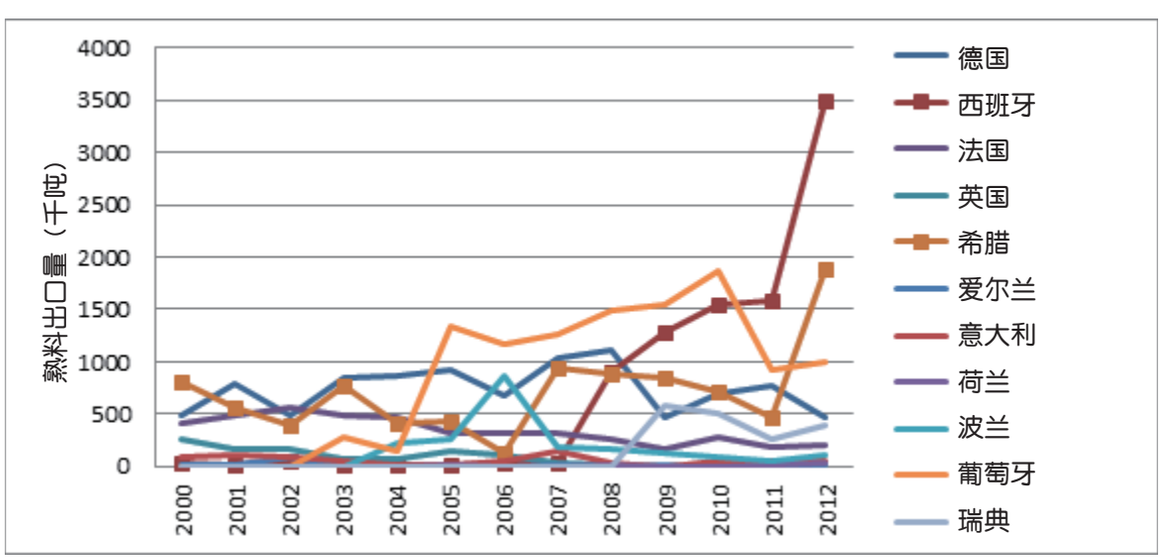
	G CO_2/ 吨每公里	熟料运输距离	水泥运输距离
卡车	100	520	860
铁路	22	2300	3900
内陆水运	31	1700	2800
短途海运	16	3200	5400
长途海运	8.4	6200	10000

4.3.3 对贸易和水泥市场产生的影响

除影响生产优化决策外，目前亦有证据显示熟料产量过剩会对贸易和水泥市场带来影响。

图 14 显示数个欧盟成员国熟料出口数据。数据显示，因经济危机造成的水泥需求锐减给其中的一些成员国带来重创，其中以希腊和西班牙最为明显，而 2012 年，这些成员国熟料出口至欧盟和非欧盟国家的数量突然出现激增。该增长部分归因于其国内不断恶化的经济形势，因此需通过出口或销售产品以保全企业运营。然而，2012 年出口量激增，外加这些国家的企业生产情况仅略高于 50% 历史活动水平，表明其出口量极可能与活动水平门槛有关。通过采访水泥企业高管亦证实了该猜想。

图 14 各国水泥和熟料出口量



资料来源：欧盟统计局、联合国商品贸易统计数据库、CN8“水泥熟料”

由此，证据表明当前欧盟排放交易体系免费配额分配规定所包括的固定历史法配额分配和特定的关停门槛会对生产和出口水平产生扭曲，尤其像西班牙和希腊这样当地需求严重不足的情况下影响更为明显。尽管无法区分欧盟排放交易体系带来的激励与其他促进工厂持续运营的激励措施，但活动水平要求很可能导致面向欧盟和非欧盟国家的出口量增长。

该影响或将在 2013 年期间下降，因配额价格降低，企业将产量维持在活动水平门槛以上的诱因被削弱。然而，配额市价若再次上涨，第三阶段配额分配规则的负面影响可能被再次放大。

附录 I. 访谈

研究团队首先从大量资源中收集和分析数据，例如世界可持续发展工商理事会—水泥可持续性倡议行动 GNR 数据库、欧盟交易日志、欧洲统计局、联合国商品贸易统计数据库贸易流量数据以及公司年度财务报告。随后，研究人员对水泥企业的高层管理人员进行一系列采访，试图讨论商业决策过程以及欧盟排放交易体系和其他政策工具对影响能源和二氧化碳强度、贸易流、竞争力、投资和创新等不同因素的短期、中期和长期影响。

采访者了解第 3、4 节各个主题的事实与数字，重点探讨各项事实与数字的相关商业考量因素。

2013 年 7 月至 9 月期间，下列管理人员接受采访：

海德堡水泥集团：Daniel Gauthier，海德堡水泥集团（欧洲和非洲）首席执行官；

西麦斯：Ignacio Madridejos，马德里，西麦斯（北欧）总裁；

Schwenk：Gerhard Hirth，Schwenk（德国）董事总经理；

霍尔希姆：Lukas Epple，霍尔希姆首席执行官（比利时）；

拉法基集团：Christophe Bouf，战略总监；

老城堡国际建材集团：Mossy O’Connor，老城堡国际建材集团首席执行官（波兰）；及

欧洲水泥研究院：Martin Schneider，欧洲水泥研究院首席执行官

此外，接受采访的二氧化碳政策和公共事务专家包括：

二氧化碳政策专家：Rob Vander Meer，海德堡水泥集团和 Vincent Mages，拉法基集团

公共事务：Alain Guillen，拉法基集团

本报告从访谈中得出的结论均基于多数代表性访谈，不可归于某位受访者。

附录 II. 纳入消费侧

目标

排放交易机制的目标是落实责任，确定排放现场的二氧化碳减排成本，该成本沿价值链传递，并因此创建价值链减排经济激励措施。为解决泄漏问题，向排放设施免费分配配额。免费配额分配的规则设计需要通过与产量或活动水平挂钩，在有效地预防碳泄漏与弱化碳价信号之间达到一种平衡。因此，免费配额分配既会扭曲欧盟排放交易体系对熟料生产活动的激励效应，又会减低或弱化碳价信号，该信号对于通过熟料替代品和水泥产品的有效利用促进减缓的作用是不可或缺的。因此，有观点称免费配额分配应与设施产量（基于产出的分配）建立更加密切的联系，以增加上游生产的产权激励（和透明度）。然而，该做法自身将弱化下游制造商的碳价信号。这一形势引发相关方面探讨是否可能通过将消费侧纳入欧盟排放交易体系，恢复下游碳价信号。

“纳入消费侧”方法基于以下构想：应基于熟料含量基准值将碳价计入商品价格之中，向消费者收费。因此，该方法成为对基于产出的配额分配（基于相同基准）的补充，恢复由消费者偏好引导的消费选择和上游决策的完整碳价信号。

方法

将消费侧纳入欧盟排放交易体系将把该体系的应用范围延伸至消费类商品所含的碳。由于每位消费者均参加交易体系的做法不可行，因此应征收间接消费费用，该费用反映消费类商品所含的碳。该费用应在待消费产品（无论产品来源）在欧共体领土范围内发售时支付给国家信托基金[51]。因此，不供欧共体领土范围内消费但准备出口的产品无需承担费用。基于消费的规则设计和费用征收（无论产品来源），符合国际贸易领域的非歧视规则[52]。

可通过以下方法建立与欧盟排放交易体系的直接联系：采用欧盟排放交易体系对熟料生产商进行免费配额分配的相同排放基准值，基于欧盟排放交易体系的配额价格，对水泥消费品征税，将征得的部分税款用于购买配额。购买后即被注销的配额数量反映的是欧盟消费所含的碳按照现行 ETS 规则，这部分碳未计入生产商用于履约清算的配额之中。其余税收资金须用于资助适应和减缓工作。这样，即使由于继续沿用基于产量的配额分配导致初级拍卖量减少，仍可重建欧盟排放交易体系指令的以下精神：来自欧盟排放交易体系配额拍卖的收入专门用于应对气候行动（至少 50%[53]）。

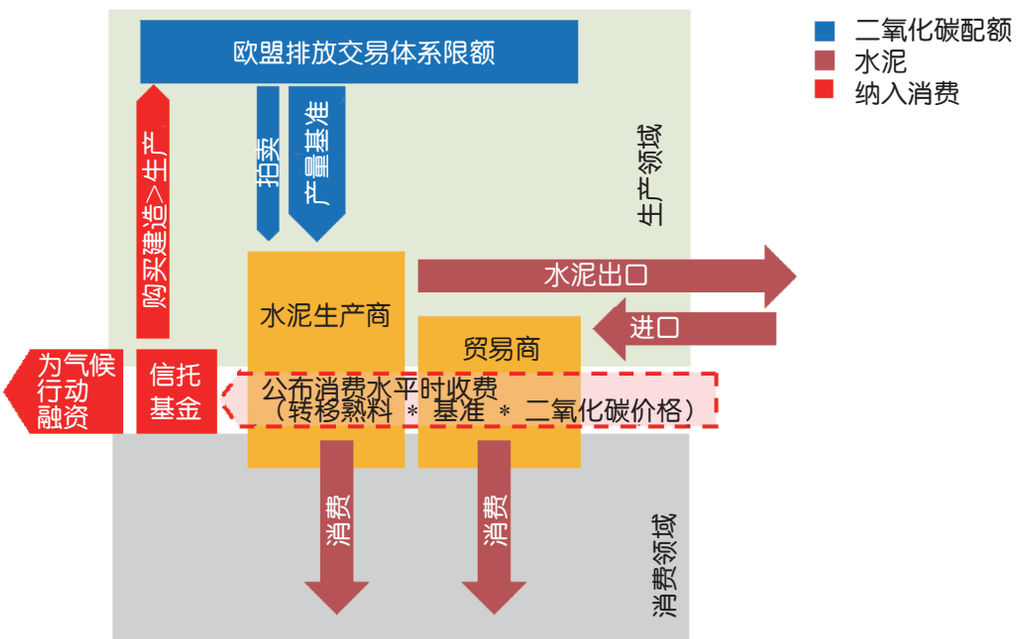
---

[51] 税费可定义为向一般政府支付的强制性、无回报费用。税费遵循普遍性和纳入国家预算的原则。不涉及划拨。相反，设想征收的费用不纳入国家预算，而是交付受公法管辖的机构（“国家信托基金”）。此外，费用被划拨和引入，以此确保将消费纳入欧盟排放交易体系的做法可行。

[52] 重点对比《关税与贸易总协定》第 3 条 (1)、(2)。

[53] 对比 DIR 2003/87/EC 第 10 (3) 条，经 DIR 2009/29/EC 修订。

图 18：纳入消费侧



税费计算

为将税费与现行碳价挂钩，可按以下公式计算：

*税费 = 消费品中的熟料重量 * 基准值 * 碳价*

单位：

*欧元 = 熟料吨数 * 吨二氧化碳每吨熟料 * 欧元每欧盟排放配额*

应基于初级市场的配额价格计算碳价。计算期间，不应根据每件产品的生命周期碳足迹确定碳含量，而应基于水泥产品的熟料含量和基于产出的方法测算的基准值值得出计算结果。该方法采用 DIR 2003/87/EC 第 10a (1) 条 [54] 已设定好的基准值，简化了碳评估过程，降低了实施成本。应避免每日调整碳价，以控制成本和提高可行性。采用平均碳价是一种比较合理的做法。为反映消费时期的市场价格（亦即碳排放的真实价值），采用月度或季度平均碳价或许是合理的折中方法。

消费领域

确定产品何时离开生产领域和进入消费领域可谓重大挑战。消费品所涉及的生产流程越多，实施难度越大，行政管理的范围越广。然而，由于水泥可被视为消费品，并且可轻易确定最终消费者，因此水泥行业不会出现以上问题。因此，应在水泥售出时收取税费。若需遵循更多贸易层级，批发应是最后一个免收费用的层级。此项安排可最大程度降低行政成本，同时可借鉴类似体系应用消费税行政管理机构的经验。因此，当水泥用于建筑等领域时，应征收相关税费。

[54] 经 DIR 2009/29/EC 修订。

管理与监督

为确保有效监督，可实施欧洲水泥贸易流记录制度，通过电子程序记录生产商、贸易商、进出口的贸易流的。应引入一个数据库，在不收费的前提下，向生产商和贸易商提供关于贸易合作伙伴合格性的信息，用于配货和收货。基于所记录的进出口数字，可轻松计算国际贸易领域包含的碳量，该数字对于调整排放配额必不可少。可基于消费税实施和管理方面的成熟软件和经验建立必要的电子管理系统。

在国家层面，可根据现有行政管理流程建立相关机制。因此，信托基金应受国家管理机构管控，该机构负责根据 DIR 2003/87/EC 第 18 条实施欧盟排放交易体系。在该层面，能够控制税费征收和监督各项交易。

法律背景

在欧洲范围内实施要求根据《欧盟条约》建立法律基础[55]。《欧盟运行条约》第 192 条[56]为环境政策措施开启大门。根据相关措施的性质，可适用不同立法程序。《欧盟运行条约》第 192 条 (1) 适用于普通立法程序，第 192 条 (2) 要求欧洲理事会就财政条款达成一致决定，该目标或许不能达成。《欧盟运行条约》第 192 条 (2) 包括狭义上的税费和财政可用费用，意味着应付金额可由政府轻松调整，并可用于支付一般经费。相反，第 192 条 (1) 包含的费用用于支付准捐税。

由此产生以下问题：提议的计划主要具有财政性质。在 ATA 决定中[57]，欧洲法院裁定将航空业纳入欧盟排放交易体系“意图不是为政府当局创收，在任何方面均未促成确立必须支付的金额，应用评估基础和提前规定的费率 [⋯]”，因此未产生税费。总体上，欧洲法院的以上调查结果可概括和应用于欧盟排放交易体系。因此，将消费纳入欧盟排放交易体系本身将具备非财政性质。因此，此项工作可基于《欧盟运行条约》第 192 条 (1)。

在笔者看来，若消费者、零售商或批发商以可行性为依据，未直接纳入欧盟排放交易体系，以上结果不会改变。原因在于应支付信托基金的费用不应被视为具有财政性质。根据已确立的判例法，欧洲法院认定具有以下特征的费用为准捐税：拨付、分配给公法管辖的机构、未流向国家预算。这意味着提议的计划可基于《欧盟运行条约》第 192 条 (1) 而非《欧盟运行条约》第 192 条 (2)，费用不会纳入成员国预算，费用仅构成令“纳入消费侧”计划可行的机制。

---

[55] 《欧盟条约》第 4 条 (1)、第 5 条 (2)。
[56] 《欧盟运行条约》。
[57] Case C-366/10 ATA v Secretary of State for Energy and Climate Change（欧洲法院，2011 年 12 月 21 日），para 142ff.

附录 III. 基于水泥的创新材料

尽管已有针对特定领域使用水泥替代品的若干范例，但现有基于水泥的创新产品目前几乎均处于示范或早期商业化阶段或研发阶段。每种产品均有自身特定优点，多数面向预先设定的应用领域，同时存在自身挑战，主要原因是其生产过程必需的不同材料的可得性有限。因此，不同创新水泥材料的替代和二氧化碳减排潜力各不相同。

多数情况下，使用创新材料的目的是减少产品氧化钙含量，原因在于碳酸钙煅烧是产生燃料燃烧和工业生产过程二氧化碳排放的主要原因。另一个创新流程使用基于碳酸镁的产品，虽然在生产过程中生成氧化镁（MgO）的反应也会排放二氧化碳，但该产物的额外好处是在构建后的稳定化阶段能够捕集二氧化碳。在下述分类中，不同类别的水泥和混凝土被分成 5 类，包括由不同水泥企业开发的产品。必须注意的是，尽管其中部分产品开发至今已十年有余，但仍停留在示范阶段，尚未在更大范围内投入商业利用。其中一些产品不再使用。

标准根据用途对水泥进行分类，原因是水泥的化学成分通常颇为复杂，某些成分尚未被完全认识。按照更广范畴的分类，传统水泥可归入水硬类别（例如硅酸盐水泥），此类水泥基于氧化铝、硅酸盐和钙氧化物，例如贝利特、阿利特和寅式盐，与水反应后沉淀硬化。非水硬水泥在空气中存在二氧化碳的条件下产生碳化反应，因此硬化。创新水泥材料的目的是减少熟料含量。

基于石灰石的水泥

硫铝酸钙水泥

此类水泥可在更低温度条件下制成，所含石灰少于硅酸盐水泥。此类水泥的二氧化碳排放量比普通硅酸盐水泥（OPC）减少 25% 至 50%。然而，其价格高于普通硅酸盐水泥，而且基于贝利特的水泥凝固更慢。

乙醚

乙醚™水泥是拉法基集团开发的替代产品，同样基于原料重新计算，其中氧化钙含量减少，被更多铝和氧化硅取代。制品成分是基于作为一个主相的贝利特以及作为另外两个主相的硫铝酸钙和铝铁酸钙的混合物。制成的水泥根据特定应用而非水泥一般用途进行调整适应。拉法基集团曾在以下场所试制乙醚™水泥：波兰某半工业化设施，该集团设在英国、配备立波尔窑的 BRE 半干燥设施以及法国某干燥窑设施。通过降低温度可减少燃料消耗量，从而将排放量减少 25%-30%，通过降低氧化钙含量可减少过程排放物，最后，得益于乙醚™熟料出色的粉磨性能，可显著减少粉磨和搅拌作业的排放量。

铝酸钙和钙铝硅酸盐水泥

这两类水泥采用铝矾土而非典型硅酸钙在回转窑中制成。尽管能够减少二氧化碳排放量，但这两类水泥更贵，其可得性低于普通硅酸盐水泥。这两类水泥往往采用高浓度粒化高炉矿渣微粉（GGBFS）混合。

人造火山灰

利用人造火山灰，即通过高岭土灰热活化而生产，以获得偏高岭土，可比普通硅酸盐水泥减少 20% 二氧化碳排放量。其挑战在于可得性。由于富高岭土奇缺，其价格高昂。

Celitement

Celitement 属于含水硅酸钙，其生产过程中使用的原材料与普通硅酸盐水泥相同，基于钙和氧化硅，但对钙硅比率的要求大幅降低。差别在于 Celitement 不含混合物，仅含一种产品，该产品增加混凝土的机械强度，同时减少能耗和石灰用量，降低排放量。其石灰含量仅为普通硅酸盐水泥的三分之一，生产过程中的二氧化碳排放量可减少 50%。此外，单元操作普遍运用，Celitement 成分均匀，兼容常规水泥用途，可与之混合。该产品由德国卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）研发。卡尔斯鲁厄理工学院等机构共同组建 Celitement 有限公司，该公司负责开发商用产品和工艺。

天然火山灰

天然火山灰的成分与人造火山灰相似，但通过自然方式产生。历史上，罗马人和希腊人用于建造牢固建筑（这些建筑今天仍在使用）的火山包括维苏威火山和著名岛屿圣托里尼岛上的火山。天然火山灰最多可取代 35% 的熟料。然而，其成本在很大程度上取决于区域和可得性。

富硫酸盐水泥

富硫酸盐水泥含 80%-85% 粒化高炉矿渣微粉、10%-15% 硫酸钙及 5% 熟料，生产此类水泥的主要目的是实现高抗硫酸盐性能和耐化学性。但由于原料可得性因素，其价格昂贵。

非石灰石水泥

含镁水泥

含镁水泥的反应方式与普通硅酸盐水泥相似，例外是碳酸钙和氧化物被相应碳酸镁和氧化物取代。由于反应发生的温度显著降低，其所需能量减少约 30%。碳化过程中，含镁水泥捕捉大气二氧化碳排放物的速度甚至比产自普通硅酸盐水泥的混凝土更快。相比普通硅酸盐水泥，此类水泥的抗压强度和拉伸强度大幅提高。

CeramiCrete

此类材料的强度是传统混凝土的 2 至 3 倍。同时，其成本是水泥混凝土的 2 至 3 倍。此类材料基于酸化反应而产生，环境耐受性更强。

Novacem

Novacem 具有在稳定化阶段捕获二氧化碳的特性，同时具备与传统水泥相当的结构性质。捕获过程是被称为矿物碳酸化或矿物分离的知名自然过程。该过程自身包含焙烧逆反应。在此过程中，通过添加二氧化碳，矿氧化物转化为稳定的碳酸盐。最具创新性的做法是使用硅酸镁，其脱碳温度（650 ° C）远远低于传统熟料。在此过程中，排放量可减少 50% 以上。在施工阶段，据称每使用 1 吨水泥，该过程可捕获 1 吨二氧化碳。帝国理工学院实验室承担研发工作，澳大利亚某公司已获得知识产权。

TecEco

此类水泥含氧化镁，具备从大气中分离二氧化碳的能力。此外，TecEco 还能够将固定其结构中的有毒物质。然而，TecEco 属于含镁水泥，由于原材料可得性不足，其全球利用潜力受限。

碱激发水泥或土聚水泥

土聚水泥是另一类基于火山灰的水泥。传统火山灰水泥要求石灰激发火山灰，而地质聚合物则利用氢氧化钠或硅酸钠。此类水泥的二氧化碳排放量比普通硅酸盐水泥低 80%。该材料另外一个有益功能是其能够达到应对腐蚀性和超高温度环境的超高强度。然而，土聚水泥要求达到高碱度，以完成其化学形成反应。为保持高碱度，其混合物中不添加水。因此，粘度可达到

超高水平，导致其可加工性下降。在一些地区，火山灰可得性或许是一大挑战。该领域要求的氢氧化钠或硅酸钠全球供应量不足，无法满足此项技术需求。其纳米孔隙耐久性存在缺陷。

E-crete

E-crete 是一种替代性水泥，基于知名的土聚废料，如粉煤灰（PFA）和粒化高炉矿渣微粉。该产品性能和原料可得性正在讨论中，不过该产品已在澳大利亚投入道路建设商业化应用。因此，需根据不同使用领域进一步制定相关法规。

凝石水泥

这种硅铝基水泥不但可使用工业废料（与 E-crete 类似）制成，还可使用废砖或尾矿制成。凝石可将二氧化碳排放量减少 30% 至 90%。其原料 60% 以上为工业固体废物。

Calera

Calera 公司采用的工艺与制造海洋水泥的工艺相似，首先从海水中提取钙镁离子，通过沉淀反应与捕获的二氧化碳和二氧化硫相结合，生成希望得到的碳酸钙和碳酸镁。此项工艺中，排放物为洁净的烟气。此项工艺回收废料，通过反渗透回收沉淀反应中产生的废水，使用特别技术将氢氧化钠溶液输回原液。然而，由于由此产生的海水酸化现象以及需要大量水和能源，Calera 公司放弃了利用海水的想法。随后，该公司转向天然盐水溶液，但此类溶液极少。如今，该公司锁定人工盐水，但其生产成本和能耗颇高。

水泥材料创新成果

水泥最重要的应用是生产混凝土。作为牢固的建筑材料，混凝土是水泥与骨料相结合的产物。除水泥相关创新之外，混凝土领域也有创新，其目的是减少混凝土中的熟料含量（进而减少二氧化碳排放量），或在减小混凝土体积的同时实现类似强度。

织物增强混凝土

织物增强混凝土的基础是对类似应用而言，其所需材料量少于传统混凝土，原因是通过添加特定纤维，有助于增强用于特定领域的最终材料的强度。

导管

导管材料通过在混凝土拌合料中添加不同类型的纤维，例如钢、玻璃、合成及天然纤维增强拉伸强度。该解决方案降低目标应用领域混凝土拌合料中的熟料消耗量。桥梁是此类材料的潜在应用领域，尤其是在桥梁应用领域取代钢材。通过使用此类材料，二氧化碳排放量可减少近 60%。

碳纤维混凝土

生产此类混凝土的基础是向已有混凝土结构或拌合料中添加碳纤维，以提高机械强度。此类材料的强度接近传统混凝土，其材料耗用量少于使用混凝土的类似应用领域。此类材料适用于重工业道路和盐水应用领域。

碳固化

此项技术的目标是在二氧化碳加富大气环境下在蒸压釜中再碳酸化水泥或混凝土中的氧化钙成分，以此加快并增强混凝土固化（即硬化）过程，从而“分离”混凝土中的二氧化碳。此项技术被认为仅适用于二氧化碳吸收降低碱度（pH 值）期间不含钢筋的混凝土产品（可在蒸压釜内制成，因此不适用于结构）。

以上许多产品已上市超过 15 年时间（如土聚水泥和导管），但在市场普及方面存在困难。目前，诸多独立和公共机构以及公司内部已在开展水泥和混凝土材料研究活动。

Climate Strategies

www.climatestrategies.org

Climate Strategies总部设在英国，是一家领先的独立国际研究机构。通过我们的全球专家网络，我们协助世界各地的政府和行业利益相关方制定气候变化和能源政策。我们是一家非营利组织，众多政府、企业和基金会为我们提供所有活动资金。

本文中文版由德国国际合作机构（GIZ）
中德合作中国排放交易体系能力建设项目支持

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

On behalf of

Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety

of the Federal Republic of Germany