



钢铁、水泥行业深度脱碳的 协同控制效果评估与路径设计

Co-control Effect Assessment of Industrial Deep Decarbonization &
Co-control Roadmap for China's Iron and Steel and Cement Sectors

毛显强 邢有凯 高玉冰 何 峰 等

北京亚太展望环境发展咨询中心

北京师范大学全球环境政策研究中心

2020 年 10 月

Asia-Pacific Consulting Center for Environment and Development

Center for Global Environmental Policy, Beijing Normal University

October, 2020

目录

执行摘要.....	1
1.研究背景.....	1
2.主要研究思路与内容.....	2
3.主要研究结论.....	2
4.政策建议.....	3
Executive Summary.....	4
1. Background.....	4
2. Main activies.....	5
3. Basic conculsion.....	6
4. Policy recommendation.....	7
1 研究背景.....	9
1.1 我国面临温室气体减排压力.....	9
1.2 协同控制已经融入宏观政策.....	11
1.3 深度脱碳的协同减排效益值得深入研究.....	13
2 研究思路与方法.....	14
2.1 研究思路与技术路线图.....	14
2.2 协同控制评价方法体系.....	16
2.2.1 协同控制效应坐标系分析.....	17
2.2.2 协同效应系数.....	18
2.2.3 污染物减排量交叉弹性分析.....	18
2.2.4 协同控制减排当量.....	20
2.2.5 单位污染物减排成本.....	21
2.2.6 边际减排成本曲线（MAC）.....	22
2.3 CGE-CIMS 复合模型.....	23
2.3.1 CGE 模型构建.....	23
2.3.2 CIMS-钢铁模型构建.....	24
2.3.3 CIMS-水泥模型构建.....	27

2.3.4 CGE-CIMS 复合模型构建	28
2.3.5 情景（碳税）设置	28
3 钢铁行业深度脱碳的协同效果评估.....	30
3.1 钢铁行业概况.....	30
3.2 钢铁行业深度脱碳措施初步筛选.....	33
3.2.1 措施筛选	33
3.2.3 措施属性汇总	34
3.3 钢铁行业深度脱碳措施的协同控制效果评估.....	41
3.3.1 协同控制效应坐标系	41
3.3.2 协同效应系数	48
3.3.3 污染物减排量交叉弹性分析	50
3.3.4 单位污染物减排成本	52
3.3.5 边际减排成本曲线（MAC）	54
3.3.6 钢铁行业协同控制措施/技术直接减排效果小结	60
4 水泥行业深度脱碳的协同效果评价.....	63
4.1 水泥行业概况.....	63
4.2 水泥行业深度脱碳措施初步筛选.....	65
4.2.1 措施筛选	65
4.2.2 措施属性汇总	66
4.3 水泥行业深度脱碳措施/技术的协同效果评估	71
4.3.1 协同控制效应坐标系	71
4.3.2 协同效应系数	78
4.3.3 污染物减排量交叉弹性分析	79
4.3.4 单位污染物减排成本	81
4.3.5 边际减排成本曲线（MAC）	82
4.3.6 水泥行业协同控制措施/技术直接减排效果小结	88
5 钢铁、水泥行业 CGE-CIMS 模拟分析	91
5.1 钢铁行业 CGE-CIMS 模拟结果分析	91
5.1.1 钢铁行业发展规模及技术竞争	91

5.1.2 钢铁行业能源消费	92
5.1.3 钢铁行业污染排放	93
5.2 水泥行业 CIMS 模型模拟结果分析	95
5.2.1 水泥行业发展规模及技术竞争	95
5.2.2 水泥行业能源消费	96
5.2.3 水泥行业污染排放	97
6 结论与促进钢铁行业、水泥行业温室气体与大气污染物协同控制措施建议..	99
6.1 结论.....	99
6.2 促进温室气体与大气污染物协同控制措施建议.....	100
6.3 关于今后协同控制研究工作的思考.....	101

执行摘要

1.研究背景

为实现到 2100 年将全球气温上升控制在 2℃ 以内的目标，2013 年 10 月在联合国秘书长潘基文的倡议下，联合国可持续发展网络和法国可持续发展与国际关系研究所共同发起“深度脱碳路径”项目（Deep Decarbonization Pathways Project, DDPP），力图找到深度碳减排路径。中国是参与该项目的 16 个国家之一。随着工业化、城镇化建设持续推进、经济稳健增长，中国的能源消费量逐年增加，相应的温室气体排放量也逐年上升。为履行温室气体减排的大国责任，2015 年 6 月 30 日，中国在向联合国气候框架公约秘书处提交的《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》中承诺了自主行动目标，即“二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰”。2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话。中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。

在寻找深度脱碳路径的同时，中国也面临着改善空气质量的压力。能否实现深度脱碳与局地大气污染物减排的协同，是深度脱碳能否取得成功的关键。由此，采取温室气体与局地大气污染物排放协同控制策略，成为当前中国同时应对全球与国内环境问题的不二选择。工业是中国温室气体排放的重点领域，也是局地大气污染物排放的主要来源，具备协同控制的巨大潜力，其中，钢铁和水泥是工业领域中优先实施协同控制策略的代表性行业。因此，在钢铁、水泥行业开展深度脱碳协同控制评估与路径设计研究意义重大，可以为推动钢铁、水泥行业低碳、绿色发展提供管理决策技术支撑。

受能源基金会（美国）北京办事处工业组委托，北京亚太展望环境发展咨询中心、北京师范大学全球环境政策研究中心联合开展了《钢铁、水泥行业深度脱碳的协同控制效果评估与路径设计》项目。该项目旨在研究分析中国钢铁、水泥行业深度脱碳措施协同控制局地大气污染物的效果，为在行业/企业实施协同控制策略提供备选措施、路径建议，为行业管理者和政策决策者开展协同控制效果评估工作提供技术支持，为制定相关政策提供参考依据。此外，本项目所采用的研究思路和方法可以为在其他行业开展类似工作提供借鉴。

2.主要研究内容

(1) 依托行业协会访谈、企业调研、相关研究数据资料收集整理等方式，对中国钢铁、水泥行业深度脱碳措施/技术展开分析研究，按消费减量、结构调整、原（燃）料回收与替代、节能与能效提升、末端脱碳等类别，汇总整理形成深度脱碳措施/技术清单及其效能、成本、效益属性参数表。

(2) 采用协同控制效果评价方法体系（包括协同控制效应坐标系分析、协同效应系数、污染物减排量交叉弹性分析、协同控制减排当量、单位污染物减排成本等评估指标和方法）对中国钢铁、水泥行业深度脱碳（及末端减污）措施/技术协同控制局地大气污染物的效果进行量化评估；通过绘制边际减排成本曲线，设计中国钢铁、水泥行业协同控制路径；采用 CGE-CIMS 复合模型，对中国钢铁、水泥行业实施碳税政策协同控制温室气体和局地大气污染物的效果进行模拟分析。

(3) 结合量化评估结果，就促进钢铁、水泥行业局地大气污染物与温室气体协同控制提出相关建议。

3.主要研究结论

(1) 绝大多数深度脱碳措施具有协同控制大气污染效果

从协同控制效果评估结果来看，本研究所筛选的钢铁、水泥行业大多深度脱碳措施（包括需求减量、结构调整、原（燃）料回收和替代、节能及能效提升）都具有协同减排大气污染物的效果，其中需求减量和结构调整措施的协同控制效果显著，减排潜力较大。

(2) 优先选择节能及能效提升、原（燃）料回收和替代类措施

从单位污染物减排成本来看，大多数节能及能效提升、原（燃）料回收和替代类措施，可以通过节能或燃料与原料替代带来收益（或降低成本），企业认可度较高。钢铁行业中，“高温高压干熄焦（T4）”的单位 EReq 减排成本最低，“烧结余热发电技术（T7）”“燃气轮机值班燃料替代（T13）”“大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术（T21）”等次之。水泥行业中，“水泥企业可视化能源管理系统（CT19）”“低温余热发电技术（CT8）”的单位 EReq 减排成本最低，“辊压机半终粉磨系统（水泥）（CT16）”“辊压机终粉磨系统（生料）（CT15）”“外循环生料立磨技术（CT17）”等次之。这些措施协同性较好，属于应优先选择的协

同控制措施。

(3) 碳税政策有助于推进钢铁、水泥行业协同控制

从 CGE-CIMS 复合模型模拟结果来看，与 BAU 情景相比，实施碳税政策有助于优化钢铁和水泥行业发展规模，增强低碳技术的竞争力，提高其市场占比，促进钢铁、水泥行业结构调整，进而促进温室气体和局地大气污染物协同减排。

(4) 末端治理措施仍是实现大气污染物减排的必要措施

末端减污类措施，例如钢铁行业的“超低排放改造(T29)”，水泥行业的“SCR(CT22)”“湿法脱硫(CT23)”措施，由于耗能会带来一定的温室气体增排，属于非协同减排措施，但是，这类措施能够快速、显著地降低局地大气污染物排放，是实现区域空气质量达标的必要措施。“十四五”时期及以后，可通过加强技术研发，以更低的处理成本和能耗实现更高的处理率，从总体上降低大气污染控制过程中温室气体排放的“代价”。

4.政策建议

(1) 推动将钢铁、水泥行业协同控制写入相关规划

2020 年既是“十三五”的收官之年，也是“十四五”相关规划的筹备和前期研究之年，应对气候变化相关工作内容将成为《十四五生态环境保护规划》的重要组成部分。钢铁和水泥作为温室气体减排和大气污染控制的重点行业，将该两行业的协同控制要求写入生态环境保护规划，不仅对本行业温室气体和大气污染物协同控制具有指导意义，也可以为其他行业开展协同控制提供思路和参考。

(2) 全面推进钢铁、水泥行业协同控制措施

在钢铁、水泥行业实施协同控制发展，应优先采用节能、能效提升、原(燃)料回收与替代措施，重点关注结构调整和需求减量化类措施，不断提升大气污染控制措施的能效和处理效率。

(3) 推动环境经济政策措施的出台和实施

目前，钢铁、水泥行业均未纳入全国碳排放权交易体系，我国的碳税政策仍处于理论研究和探讨阶段。碳税等环境经济政策有助于将温室气体和大气污染物排放的成本内部化，以市场经济的手段加快淘汰高碳、高污染的落后产能，助推钢铁、水泥行业协同控制的发展。

Executive Summary

1. Background

In order to achieve the goal of limiting the global warming to 2 °C by 2100, in October 2013, under the initiative of the UN Secretary-General, Mr. Ban Ki-moon, the UN Sustainable Development Network and the Institute for Sustainable Development and International Relations (IDDIR, France) jointly launched the “Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP)”, striving to find the deep carbon dioxide emission reduction paths. China is one of the 16 countries involved in this project. As the fast industrialization and urbanization process in China, the economy grows steadily, which result in increasing energy consumption and GHGs emissions year by year. To fulfill the responsibility of a major country to reduce GHGs emissions, on June 30, 2015, China submitted “Enhanced Actions on Climate Change: China’s Intended Nationally Determined Contributions” to the UNFCCC Secretariat and committed “to achieve the peaking of CO₂ emissions around 2030 and making best efforts to peak early”. On Sep 22, 2020, while addressing the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly via video, President Xi Jinping announced that China aims to have carbon dioxide emissions peak before 2030 and achieve carbon neutrality before 2060.

While looking for deep decarbonization paths, China is also under the pressure of improving local air quality. Co-control of the deep carbon dioxide emission reduction and local air pollutants emission reduction is the key to the ultimate success of deep decarbonization. Therefore, adopting co-control strategy of GHGs and local air pollutants emissions has become the best choice for China to cope with global and domestic environmental issues. Industry is the key area of China’s GHGs emissions and the main source of local air pollutants emissions, which has a great potential for the co-control. Iron & steel and cement are the typical sectors to prioritize the implementation of co-control strategies. Therefore, it is of great significance to carry out co-control effects evaluation for the deep decarbonization measures and path design in the iron & steel and cement sectors, which will provide critical technical support for management and decision-making of low-carbon and green development.

Commissioned by The Energy Foundation, APED (Asia-Pacific Consulting Center for Environment and Development) and CGEP (Center for Global Environmental Policy, Beijing Normal University) jointly carried out the project, Co-control Effect Assessment of Industrial Deep Decarbonization & Co-control Roadmap for China's Iron and Steel and Cement Sectors. This project aims to evaluate the effects of the deep decarbonization measures in China's iron & steel and cement sectors on the co-control of local air pollutants. It was expected to provide industrial practitioners and policy makers the technical support of co-control effect evaluation and design of co-control strategies for industries and enterprises. In addition, the experiences from this study can be a useful reference for other sectors.

2. Main activities

(1) This study screened the deep decarbonization measures of China's iron & steel and cement sectors first, and these measures are divided into several categories as consumption reduction, structural adjustment, raw material/fuel recovery and substitution, energy saving and energy efficiency improvement, and end-of-pipe decarbonization. Based on on-site investigations, interviews with industry associations, reported case studies and researches, this report provides the list of deep decarbonization measures, and their CO₂ reduction and air pollutants emission reduction parameters and costs and benefits calculation parameters.

(2) Co-control evaluation methodologies including co-control effects coordinate system, co-control effect coefficient, pollutant emission reductions cross-elasticity, emission reduction equivalence (EReq), unit cost of pollutant emission reduction (UCER), were applied to quantitatively assess the local air pollutants reduction effectiveness of the screened deep decarbonization measures and also the end-of-pipe pollution reduction measures in China's iron & steel and cement sectors. Co-control paths for China's iron & steel and cement sectors were explored by drawing marginal abatement cost curves. A CGE-CIMS hybrid model was applied to simulate the effects of carbon tax on co-control of GHGs and local air pollutants in China's iron & steel and cement sectors.

(3) Based on the above research results, this study provided policy recommendations

on promoting the co-control of local air pollutants and GHGs in the iron & steel and cement sectors.

3. Main conclusions

(1) Most of the deep decarbonization measures have the effect of co-control of local air pollutants.

According to the results of the co-control effects evaluation, the deep decarbonization measures of the iron & steel and cement sectors, including demand reduction, structural adjustment, fuel and raw material recovery and substitution, and energy saving and energy efficiency improvement, have the effects of synergistic emission reduction of air pollutants. Co-control effects of demand reduction and structural adjustment measures are significant, showing great potential of CO₂ and local air pollutants emission co-reduction.

(2) Energy saving and energy efficiency improvement, raw (fuel) material recovery and substitution are the prioritized measures of the industry.

Energy saving and energy efficiency improvement, raw (fuel) material recovery and substitution measures can bring benefits (or reduces costs) and are highly recognized by enterprises. In the iron and steel industry, the UCER of “High-temperature/High-pressure boiler technologies for Coke (T4)” is the lowest, followed by “sintering waste heat power generation technology (T7)”, “Gas Turbine Fuel Substitution (T13)”, and “New energy-saving technology of high thermal conductivity and high-density silica brick for large coke oven (T21)”. In the cement industry, the UCER of “Visualized energy management system (CT19)” is the lowest, followed by “Low temperature waste heat for power generation technology (CT8)”, “Roller press semi-final grinding system (Cement) (CT16)”, “Roller press final grinding system (raw meal) (CT15)”, “external circulation raw meal vertical grinding technology (CT17)”. These measures lead the ranking of co-control cost-effectiveness.

(3) Environmental-economic policy measures such as carbon tax can help to promote co-control in the iron & steel and cement sectors.

Simulation results of the CGE-CIMS model indicates that, the implementation of the

carbon tax policy can help to optimize the demand and production scales of the iron & steel and cement sectors. It also can help to enhance the competitiveness of low-carbon technologies, increase their market shares, and promote structural adjustments in the iron & steel and cement sectors, which will lead to co-reduction of CO₂ and local air pollutants.

(4) The end-of-pipe pollution reduction measures are still necessary to substantially reduce local air pollutants.

Although end-of-pipe pollutant reduction measures (such as "ultra-low emission retrofitting (T29)" in the iron and steel sector, "SCR (CT22)" and "wet flue gas desulfurization" in the cement sector) have increased energy consumption and brought about greenhouse gas emissions increase, they can significantly reduce air pollutant emissions. During the "14th Five-Year Plan" period, it is necessary to further strengthen the research and development of the end-of-pipe technologies to achieve higher emission reduction efficiency with less energy consumption and CO₂ emission.

4. Policy recommendations

(1) Integration of the co-control strategy into the 14th Five Year Plans.

2020 is the last year of the "13th Five-Year Plan" and "14th Five-Year Plan" is under preparation. Dealing with climate change should become an important part of the "14th Five-Year Ecological and Environmental Protection Plan". Co-control requirements of iron & steel and cement sectors, which are the key sectors of CO₂ emission reduction and local air pollution control, should be integrated into "Ecological and Environmental Protection Plan". It will have guiding significance for the other industrial sectors to promote co-control.

(2) Promoting co-control measures for the iron & steel and cement sectors

Co-control strategies in the iron & steel and cement sectors should be attached to more emphasis, including prioritizing energy saving, energy efficiency improvement, and fuel and raw material substitution measures; focusing on structural adjustment and demand side measures; and continuously improving the energy efficiency and the end-

of-pipe treatment efficiency.

(3) Promoting the feasibility study of environmental economic policy instruments.

At present, the iron & steel and cement sectors are not included in the national carbon emissions trading system, and China's carbon tax policy is still at the stage of theoretical research and discussion. Carbon tax and other environmental and economic policies can help to internalize the costs of GHGs and air pollutants emissions, to speed up phasing out high-carbon and high-pollution production capacities, and to encourage iron & steel and cement companies to practice co-control strategies.

1 研究背景

1.1 我国面临温室气体减排压力

(1) 中国是温室气体排放大国

随着我国的工业化、城镇化建设持续推进、经济稳健增长、人民生活水平的不断提高，能源消费量逐年增加，相应的温室气体排放量也逐年增加。根据国际能源署（IEA）的统计，2018 年我国的 CO₂ 排放量占世界排放总量的 28%左右（图 1-1）^{①②}，是世界第一温室气体排放大国。中国温室气体减排将对全球能否实现碳达峰以及何时达峰起到至关重要的作用，因此，我国的温室气体减排一直是国内和国际社会关注的焦点。

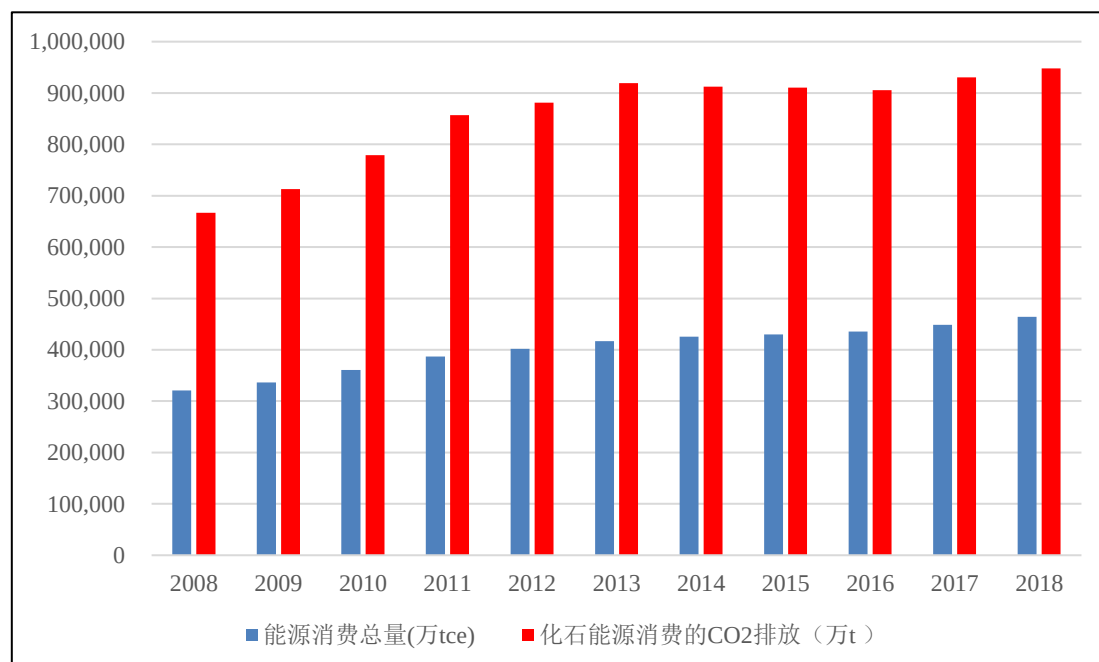


图 1-1 2008-2018 年间我国能源消费、CO₂ 排放情况

数据来源：国际能源署

IEA 公布的《Global Energy & CO₂ Status Report 2018》指出：与 2017 年相比，2018 年全球能源相关 CO₂ 排放增长 1.7%，达到历史最高水平（33.1Gt CO₂）；中国、印度和美国占新增排放的 85%^③。

近年来，在各项节能减排政策措施的大力推动下，我国的节能减排工作取得

^①IEA. CO₂ emissions from fuel combustion highlights 2019[R]

^②IEA. Global Energy & CO₂ Status Report 2018[R]

^③IEA. Global Energy & CO₂ Status Report 2018 [R]

了突出成效，单位 GDP 能耗整体呈现下降态势，2017 年比 1978 年降低 77.2%，年均下降 3.7%^①，相应的单位 GDP CO₂ 排放也快速下降（图 1-2）。另一方面，我国单位 GDP 的 CO₂ 排放仍然比世界平均水平高出许多。从 IEA 的统计数据来看，2016 年我国单位 GDP 的 CO₂ 排放是美国的 1.6 倍，欧盟的 2.6 倍，世界平均水平的 1.6 倍，我国依然面临着严峻的温室气体减排压力。

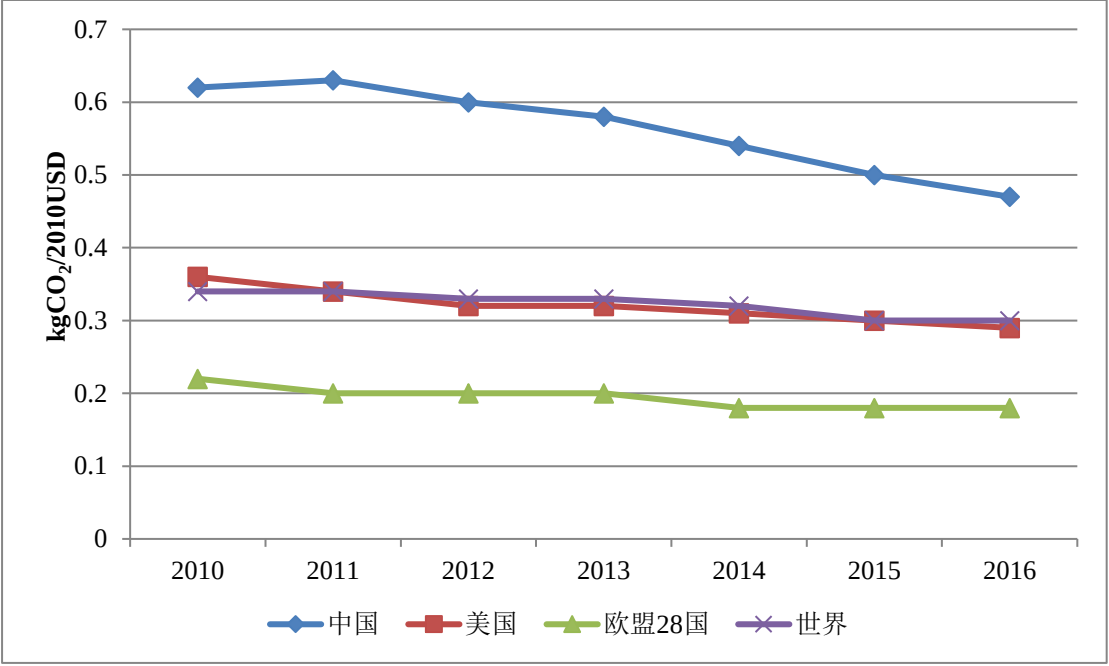


图 1-2 2010-2016 年间各国及世界单位 GDP 的 CO₂ 排放情况

数据来源：国际能源署

(2) “深度脱碳”是温室气体减排的重要途径

作为负责任的大国，我国一直在努力控制温室气体排放。2013 年 10 月，在联合国秘书长潘基文的倡议下，联合国可持续发展网络和法国可持续发展与国际关系研究所共同发起“深度脱碳路径”项目（Deep Decarbonization Pathways Project, DDPP），对 2℃ 目标和各国的深度减排路径问题开展技术性分析，我国是参与该项目的 16 个国家之一。2015 年 9 月 17 日，联合国可持续发展网络与法国可持续发展与国际关系研究所正式发布“深度脱碳路径”项目（DDPP）2015 年报告，首次从技术角度肯定了本世纪末控制全球升温在 2℃ 以内的目标的可行性^②。

^① 人民网. 改革开放 40 年 节能降耗步履铿锵[EB/OL]. 2018-10-06.

<http://opinion.people.com.cn/n1/2018/1006/c1003-30326263.html>

^② “深度脱碳路径”项目(DDPP)2015 年报告称：2 摄氏度目标或可实现.[EB/OL] [2015-09-21]

<http://www.tanjiaoyi.com/article-12746-1.html>

2015年6月30日,我国发表了《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》,确定了到2030年的自主行动目标:到2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%-65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右,森林蓄积量比2005年增加45亿立方米,二氧化碳排放2030年左右达到峰值并争取早日实现^①。随后,在2015年11月召开的气候变化巴黎大会达成了《巴黎协定》。《巴黎协定》进一步确定了以“国家自主贡献”目标为主体的国际应对气候变化机制安排,为2020年后全球应对气候变化行动作出了安排。

(3) 钢铁、水泥是温室气体减排重点行业

钢铁、水泥行业既是我国的工业主导产业,同时也是能源消耗和温室气体排放的重点行业。2017年,中国钢铁工业CO₂排放量约占中国总排放量的15%左右,在国内所有工业行业中位居第二位^②;2017年中国水泥工业CO₂排放量为12亿t,其中直接排放10.8亿t,间接排放1.2亿t,最终水泥单位产量CO₂排放为0.5 t CO₂/t,低于世界平均水平(0.589 t CO₂/t)^③。

为了落实“自主贡献”目标,我国在《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》中还规划了详细的政策措施和实施路径,其中第四条为“形成节能低碳的产业体系”,并提出“通过节能提高能效,有效控制电力、钢铁、有色、建材、化工等重点行业排放”,可见钢铁和水泥都属于深度脱碳的重点领域。

作为淘汰落后产能、推广节能减排新技术的重点行业,“十四五”及未来,钢铁、水泥行业存在着较大的温室气体减排潜力。

1.2 协同控制已经融入宏观政策

考虑到温室气体排放与传统大气污染物之间存在广泛的同源性,以及二者的减排措施之间的协同性(同时也存在一定的非协同性),“协同控制温室气体与大气污染物”的战略思路应运而生,并已得到了广泛认同,融入了国家宏观政策中。

(1) 多项法律/规划提出协同控制理念

政府在制定“十二五”时期国家政策层面的空气污染物减排规划时,已经逐

^①中央政府网站. 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献[EB/OL].[2015-06-30].

http://www.gov.cn/xinwen/2015-06/30/content_2887330.htm

^②中国节能协会冶金工业节能专业委员会,冶金工业规划研究院.《中国钢铁工业节能低碳发展报告(2018)》,2018年10月.

^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》[J]. 水泥,2019(1):4-8.

渐从单一污染物控制转向多污染物协同控制，并且在“十二五”和“十三五”期间出台了一系列政策法规，引导、鼓励多种空气污染物协同控制工作的开展。

《国家环境保护“十二五”规划》明确提出，实施多种大气污染物综合控制；开展多种污染物协同控制。

《重点区域大气污染防治“十二五”规划》要求，实施 SO₂、NO_x、烟粉尘等多污染物的协同控制，有效解决当前突出的大气污染问题。针对细颗粒物污染控制，必须实施多污染物协同控制政策，强化多污染源综合管理，开展区域联防联控。

特别需要指出的是，2015 年 8 月 29 日修订通过的《中华人民共和国大气污染防治法》中第二条提出：“对颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物、氨等大气污染物和温室气体实施协同控制”，首次明确了对局地污染物与温室气体实施“协同控制”的要求。

2016 年 10 月 27 日发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知》（国发〔2016〕61 号）提出“加强碳排放和大气污染物排放协同控制”。

2016 年 11 月 24 日，国务院印发的《“十三五”生态环境保护规划》（国发〔2016〕65 号）中多次提到协同控制/减排：“实施多污染物协同控制，提高治理措施的针对性和有效性”“推动行业多污染物协同治污减排”“以燃煤电厂超低排放改造为重点，对电力、钢铁、建材、石化、有色金属等重点行业，实施综合治理，对二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘以及重金属等多污染物实施协同控制”“强化挥发性有机物与氮氧化物的协同减排”。

环保部还于 2017 年 9 月发布了《工业企业污染治理设施污染物去除协同控制温室气体核算技术指南（试行）》（环办科技〔2017〕73 号），开始主动引导协同控制工作在工业领域的开展。

2018 年 6 月 27 日，《国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知》（国发〔2018〕22 号）提出了明确目标：“经过 3 年努力，**大幅减少主要大气污染物排放总量，协同减少温室气体排放**，进一步明显降低细颗粒物（PM_{2.5}）浓度，明显减少重污染天数，明显改善环境空气质量，明显增强人民的蓝天幸福感”。

（2）机构改革为协同控制提供机制保障

2018 年 3 月 21 日印发的《深化党和国家机构改革方案》第二十五条提出组

建生态环境部，整合相关部门职责：“为整合分散的生态环境保护职责，统一行使生态和城乡各类污染排放监管与行政执法职责，加强环境污染治理，保障国家生态安全，建设美丽中国，**将环境保护部的职责，国家发展和改革委员会的应对气候变化和减排职责，国土资源部的监督防止地下水污染职责，水利部的编制水功能区划、排污口设置管理、流域水环境保护职责，农业部的监督指导农业面源污染治理职责，国家海洋局的海洋环境保护职责，国务院南水北调工程建设委员会办公室的南水北调工程项目区环境保护职责整合，组建生态环境部，作为国务院组成部门。**”

随着“应对气候变化和减排职责”纳入新组建的生态环境部，温室气体与大气污染物减排同属生态环境部主管，以往由于管理部门职能分割所造成的“协同”管控障碍将得到消除。当前的政策形势下，探索温室气体与大气污染物的协同控制已经成为生态环境部的工作职责，未来应该进一步探讨的是如何落实协同控制策略，如何获得最大的综合减排效应。

1.3 深度脱碳的协同减排效益值得深入研究

除工艺过程排放外，由于温室气体和大气污染物很大程度上都来自于化石燃料燃烧，二者之间的“同源性”也使得其控制措施的作用相互交织、相互影响。温室气体控制措施会影响大气污染物的排放，大气污染物减排措施也会影响温室气体排放。如果不能协同两个控制目标，将两类控制措施有机结合，则可能造成措施之间以及措施效果之间的不协同，从而导致资源配置的重复甚至冲突。如果能够有效协同两类措施、协同达成两个目标，则可能达到“事半功倍”的效果。

“协同控制”的理念正是在此基础上产生，它意味着制订具体行动计划、采取具体行动措施，力图实现温室气体减排和大气污染物减排的“协同效益”^①。

钢铁行业 and 水泥行业既是能源消费和温室气体排放大户，同时也是大气污染物减排的重点部门。在钢铁、水泥行业实施深度脱碳措施的同时，对其协同控制大气污染物的效果及潜力值得深入研究。

^①毛显强,邢有凯,胡涛,曾桢,刘胜强.中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析[J].中国环境科学,2012,32(04):748-756.

2 研究思路与方法

2.1 研究思路与技术路线图

本研究所评估的温室气体为 CO_2 ，大气污染物包括： SO_2 、 NO_x 、PM。深度脱碳措施/技术主要分为消费减量、结构调整、原（燃）料回收和替代、节能及能效提升、末端脱碳五个类别，此外本研究还将大气污染治理的末端治污措施纳入评估。本研究的研究思路如下，包括两个部分：

（1）钢铁、水泥行业深度脱碳的温室气体与大气污染物协同控制效果核算

首先，以国家发改委发布的《国家重点节能低碳技术推广目录》、《重塑能源》、行业专家访谈调研、国内外最新的理论研究和技术创新等资料为基础，建立钢铁、水泥行业深度脱碳措施清单数据库（含成本、节能、减排、推广潜力等参数）。

其次，采用协同控制效应坐标系分析、协同效应系数、污染物减排量交叉弹性分析、协同控制减排当量、单位污染物减排成本等方法，对钢铁、水泥行业深度脱碳措施进行协同效应综合评价。

第三，在协同效应评价的基础上，将各项措施按照单位污染物减排成本由低到高进行排序，并结合未来市场占比，计算减排潜力，绘制污染物边际减排成本（MAC）曲线，从而为决策者规划协同控制减排路径提供参考。

（2）钢铁、水泥行业大气污染物与温室气体协同控制路径设计

首先，采用 CGE 模型模拟我国经济系统的未来发展情况，输出 BAU 情景和碳税情景下各时间节点的钢铁行业 and 水泥行业的发展规模。

其次，建立“CIMS-钢铁”和“CIMS-水泥”模型，将 CGE 模型所预测的基准情景和碳税情景下钢铁行业 and 水泥行业总体规模分别输入 CIMS 模型，通过模拟各种技术的市场竞争，获得各时间节点不同技术所占的市场份额以及相应的能源消耗和污染物排放结果。

第三，综合钢铁、水泥行业协同控制效果核算和 CGE-CIMS 复合模型模拟结果，分析两个行业温室气体和大气污染物协同减排效果及减排成本效益情况，提出我国钢铁和水泥行业温室气体与大气污染物协同控制的政策路径建议。

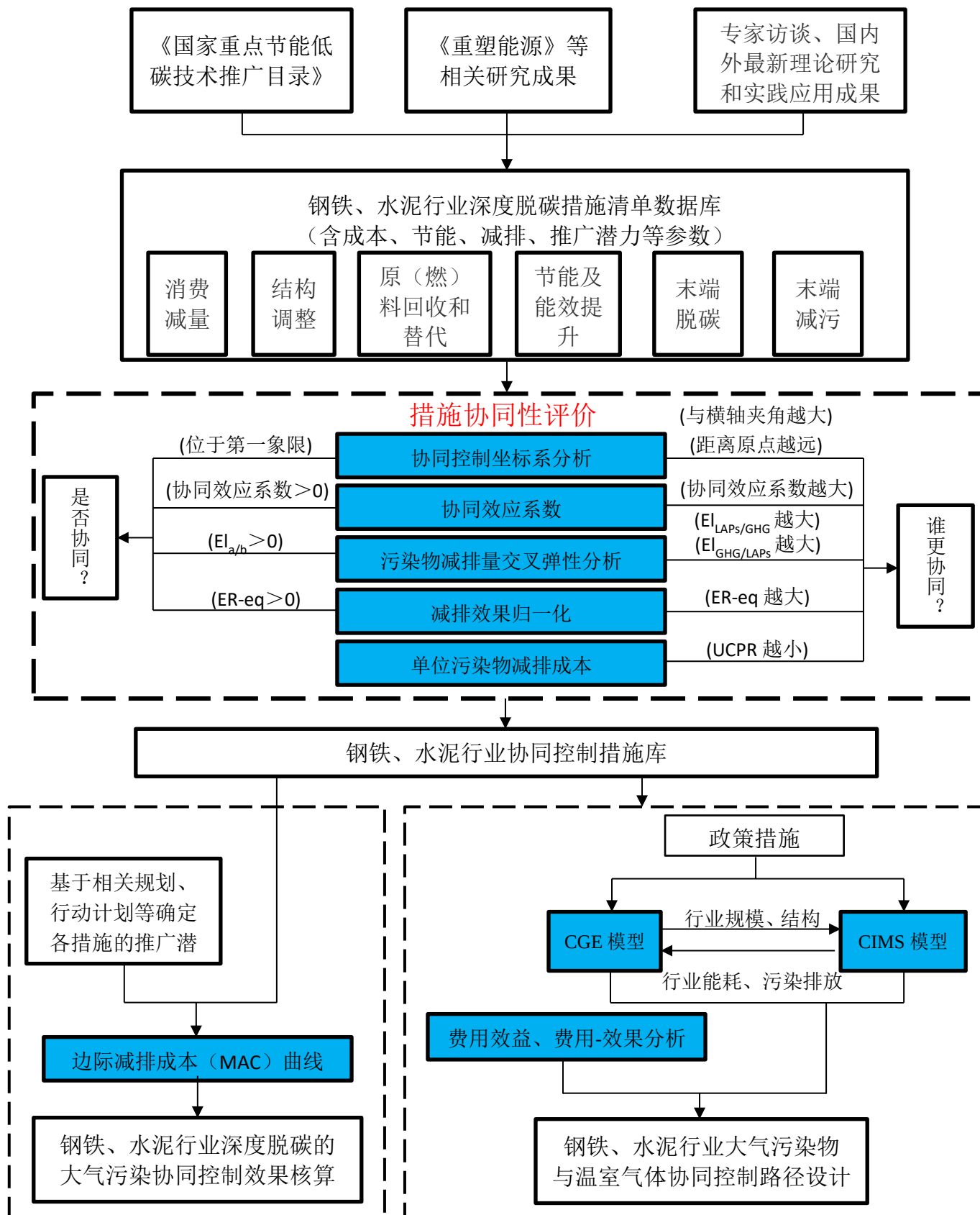


图 2-1 本研究技术路线图

2.2 协同控制评价方法体系

北京师范大学等单位在总结国内外协同效应、协同效益评价方法的基础上,提出了协同控制评价方法体系^{①②},大体可分为两类:一类是用于评价减排效果的物理协同性评价方法,另一类是用于评价减排经济性的成本有效性评价方法。

物理协同性评价方法包括:协同控制效应坐标系分析、协同效应系数、污染物减排量交叉弹性分析。其中“协同控制效应坐标系”能够较为直观地反映减排措施对于不同污染物的减排效果及协同程度,“协同效应系数”能够反应减排单位温室气体的同时能够减排局地大气污染物的量,“污染物减排量交叉弹性”则进一步以“敏感性”或“弹性”的方式表达协同减排效果及协同程度。

评价减排经济性的成本有效性方法为“单位污染物减排成本”“边际减排成本曲线(MAC)”分析。其中,“单位污染物减排成本”是将减排措施的减排效果和减排成本结合起来考察的量化评估指标;MAC可以在坐标系中表达一系列减排措施的边际及累计减排成本与相应的减排量之间的关系。

为了反映某一减排措施对于局地大气污染物和温室气体的综合减排效果,特别设计了减排效果归一化指标“协同控制减排当量 ER-eq”,试图将传统局地大气污染物和温室气体以适当的权重统一折合为“当量”,并以权重因子反映不同的局地污染物与温室气体的环境、健康、社会、经济成本,并可反映出人们基于既有的科学知识和环境意识,对于不同污染物相对危害性和总体危害性的认识程度和主客观评价。

此外,为了推进协同控制策略落地,为决策者提供决策依据,在绘制污染物边际减排成本曲线(MAC)的基础上,进一步开展协同控制路径设计与规划研究,构建我国钢铁行业 and 水泥行业温室气体与局地大气污染物及综合污染物减排指标 ER-eq 协同减排路径^{③④⑤⑥}。

^①毛显强,曾桢,胡涛等.技术减排措施协同控制效应评价研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(12): 1-7.

^②毛显强,曾桢,刘胜强,等.钢铁行业技术减排措施硫氮碳协同控制效应评价研究[J].环境科学学报,2012,32(5): 1253-1260.

^③毛显强,邢有凯,胡涛,等.中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析[J].中国环境科学,2012,32(4): 748-756.

^④刘胜强,毛显强,胡涛,等.中国钢铁行业大气污染与温室气体协同控制路径研究[J].环境科学与技术,2012,35(7): 168-174.

^⑤Mao X Q, Zeng A, Hu T, et al. Co-control of local air pollutants and CO₂ from the Chinese coal-fired power industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67: 220-227.

^⑥Xianqiang M, An Z, Tao H, et al. Co-control of Local Air Pollutants and CO₂ in the Chinese Iron and Steel Industry[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 47(21): 12002-12010.

2.2.1 协同控制效应坐标系分析

在二维或多维欧氏空间坐标系中，以不同的坐标表达某技术减排措施对于不同污染物的减排效果，这种分析方法称为“协同控制效应坐标系分析”。某技术减排措施在坐标系中所处的空间位置，可以直观地反映其减排效果及其“协同”状况。

以二维坐标系为例（如图 2-2 所示）：横坐标表示技术减排措施对温室气体的减排效果，纵坐标表示对某种大气污染物的减排效果。坐标系中的每个点分别对应一项技术减排措施，各点的横、纵坐标则直观地表达了该措施对温室气体和大气污染物的减排效果，详见表 2-1。

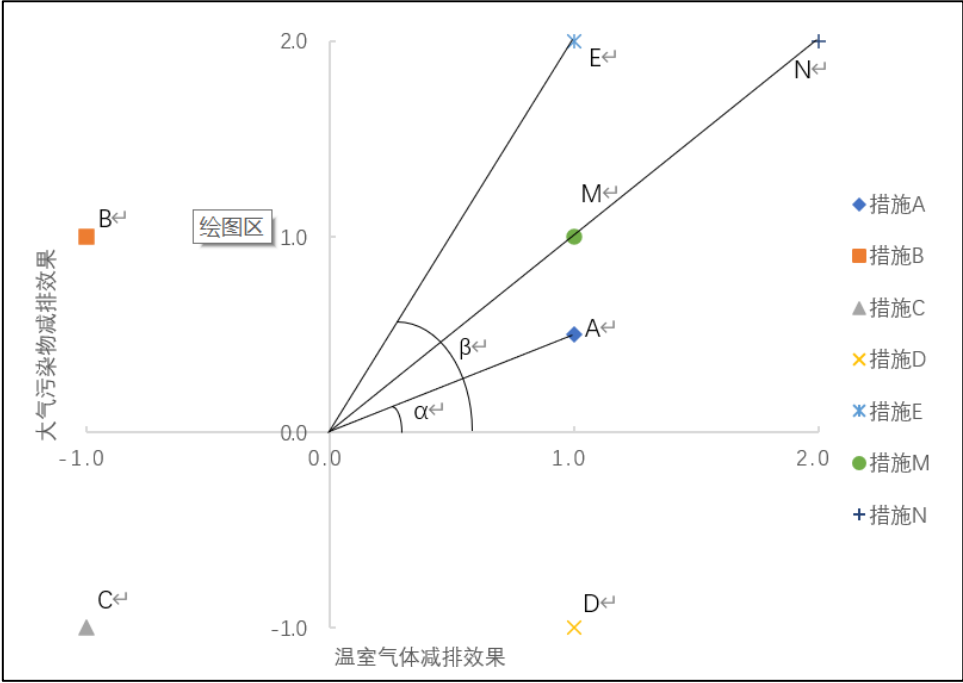


图 2-2 减排措施协同控制效应坐标系示意图

表 2-1 减排措施代表点位分布的含义

位置	含义
第一象限	可同时减排温室气体和局地大气污染物
第二象限	减排局地大气污染物但增排温室气体
第三象限	同时增排温室气体和局地大气污染物
第四象限	减排温室气体但增排局地大气污染物
原点	对温室气体和局地大气污染物均无影响
横坐标正半轴	减排温室气体，对局地大气污染物排放无影响
横坐标负半轴	增排温室气体，对局地大气污染物排放无影响
纵坐标正半轴	减排局地大气污染物，对温室气体排放无影响
纵坐标负半轴	增排局地大气污染物，对温室气体排放无影响

在第一象限中，某点到原点连线与横坐标的夹角越大，表明该点所代表的措施在减排等量温室气体的同时，对大气污染物的减排效果越好（如图 2-2 中点 E 所代表的措施优于点 A 所代表的措施），或协同性较好；该连线与横坐标夹角相同时，距原点越远则表明该措施对温室气体和大气污染物的减排强度越大（如图 2-2 中点 N 所代表的措施优于点 M 所代表的措施），协同性较好。

2.2.2 协同效应系数

“协同效应系数”^{①②}是指某项措施在减排单位温室气体的同时所能带来的其他某种大气污染物的减排量，这一指标能够比较直观的反映措施的协同减排效果，其计算公式如下：

$$R_i = \frac{Q_{i,j}}{Q_{i,c}} \quad (1)$$

其中：

R_i ——措施 i 的协同效应系数；

$Q_{i,j}$ ——措施 i 对污染物 j 的减排量；

$Q_{i,c}$ ——措施 i 对温室气体（CO₂）的减排量。

2.2.3 污染物减排量交叉弹性分析

污染物减排量交叉弹性用于评价技术减排措施对温室气体和大气污染物减排的协同程度，记为 $Els_{a/b}$ ，下标 a、b 分别代表不同的污染物。与协同控制效应坐标系一样，这一指标也能够反映各项技术减排措施对于不同污染物是否具有协同控制效应及其“协同程度”。大气污染物减排量交叉弹性的计算公式举例如下：

$$Els_{SO_2/CO_2} = \frac{\Delta SO_2/SO_2}{\Delta CO_2/CO_2} \quad (2)$$

$$Els_{NOx/CO_2} = \frac{\Delta NOx/NOx}{\Delta CO_2/CO_2} \quad (3)$$

$$Els_{PM/CO_2} = \frac{\Delta PM/PM}{\Delta CO_2/CO_2} \quad (4)$$

^①李丽平,周国梅,季浩宇.污染减排的协同效应评价研究——以攀枝花市为例[J].中国人口·资源与环境,2010,20(5):91-95.

^②李丽平,姜苹红,李雨青,廖勇,赵嘉.湘潭市“十一五”总量减排措施对温室气体减排协同效应评价研究[J].环境与可持续发展,2012(1):36-40.

$$Els_{LAPs/CO_2} = \frac{\Delta LAPs/LAPs}{\Delta CO_2/CO_2} \quad (5)$$

其中：

$Els_{a/b}$ ——污染物减排量交叉弹性；

$\Delta CO_2/CO_2$ —— CO_2 减排率；

$\Delta SO_2/SO_2$ —— SO_2 减排率；

$\Delta NO_x/NO_x$ —— NO_x 减排率；

$\Delta PM/PM$ —— PM 减排率；

$\Delta LAPs/LAPs$ ——大气污染物减排当量（LAPs）减排率。

（2）式表示技术减排措施对 SO_2 和 CO_2 减排的交叉弹性；（3）式表示技术减排措施对 NO_x 和 CO_2 减排的交叉弹性；（4）式表示技术减排措施对 PM 和 CO_2 减排的交叉弹性；本研究构建了大气污染物减排当量（LAPs）将 SO_2 、 NO_x 、PM 等不同的大气污染物归一化，（5）式表示技术减排措施对 LAPs 和 CO_2 减排的交叉弹性。

表 2-2 协同控制交叉弹性值的含义

$Els_{a/b}$ 计算值	含义
$Els_{a/b} > 0$ （且分子、分母均为正值）	对 a、b 均有减排作用，具有协同控制效应
$Els_{a/b} \leq 0$	对一种污染物有减排作用而对另外一种污染物没有减排作用
$Els_{a/b} = 1$	对 a、b 两种污染物的减排程度相同
$0 < Els_{a/b} < 1$	对 b 的减排程度高于 a
$Els_{a/b} > 1$	对 a 的减排程度高于 b
$Els_{a/b}$ 分子、分母均为负值时	同时增排两类污染物，为“反协同”措施

需要特别指出的是，当 CO 和 CO_2 排放均来源于化石燃料中碳元素的氧化时，二者数量之间存在此消彼长的关系，故 $Els_{CO_2/CO}$ 指标不适用于评估提高燃烧效率（以及具有相似效果）措施。

2.2.4 协同控制减排当量

不同措施的减排效果差异较大：为了合理评价这类措施，我们需要将多种污染物的减排效果统一到同一尺度上，以综合评价协同控制措施对多种污染物的协同控制效应。因此，需要采用归一化方法量化多污染物协同控制效应。

本研究构建了协同控制减排当量 ER_{eq} (Co-control Emission Reduction Equivalent)，用以反映温室气体与大气污染物协同减排的总体效果，其归一化计算公式如下：

$$ER_{eq} = R_{GHGs} \cdot \Sigma Q_{GHGs} + R_{LAPs} \cdot \Sigma Q_{LAPs}$$
$$ER_{eq} = R_{GHGs} \cdot (\alpha Q_{CO_2} + \dots) + R_{LAPs} \cdot (\beta Q_{SO_2} + \gamma Q_{NO_X} + \delta Q_{PM} + \dots) \quad (6)$$

式中： ER_{eq} ——协同控制减排当量；

R_{GHGs} 、 R_{LAPs} ——温室气体和大气污染权重系数，体现温室气体与大气污染之间的相对权重比较；

Q_{GHGs} 、 Q_{LAPs} ——温室气体和大气污染物减排量；

$\alpha \dots$ ——温室气体 ($CO_2 \dots$) 当量权重系数；

$\beta, \gamma, \delta \dots$ ——大气污染物 (SO_2 、 NO_X 、 $PM \dots$) 当量权重系数。

需要特别强调的是：当量系数（权重值）的取值有多种方法，可以是基于污染物的化学、物理、生物、健康等影响大小；也可以是基于外部性影响的价格化评价价值；甚至是决策者对污染物控制的紧迫性的认识和判断等等。较为理想的情况下，我们希望以权重因子反映不同的温室气体与局地污染物的环境、健康、社会、经济成本，并可反映出人们基于既有的科学知识和环境意识，对于不同污染物相对危害性和总体危害性的认识程度和主客观评价。权重因子的取值，可以对多污染物，特别是温室气体与局地大气污染物，进行协同控制的决策倾向进行充分反映。

从操作层面看，尽管中国尚未开征碳税，但碳排放权交易试点工作已开展多年，碳交易价格在一定程度上可以反映政府、企业、社会公众对于减排温室气体的环境效益的评价价值。

《环境保护税法》规定的环境保护税税率（即过去的污染物排污费价格）能够在一定程度上反映不同局地污染物对环境、健康、社会等方面的综合影响。税

率越高，说明这种污染物的综合影响越大，理应赋予这种污染物的权重也越高。以该税率为依据获得污染物的权重值，具有较好的法律基础。

综合温室气体和不同大气污染物的货币化价格，即可得到各自的归一化权重，详见表 2-3。

表 2-3 大气污染物和温室气体归一化权重值

权重参数			建议取值	来源	备注
R_{GHGs}			0.00372	碳交易价格。当局地大气污染物当量为 1 时， CO_2 -eq 的相对权重因子为 0.00372。	2013-2017 年，全国碳排放权交易试点平均价格为 22.33 元/吨 CO_2 ^① 。
R_{LAPs}			1	《中华人民共和国环境保护税法》中税收项目和税率表，局地大气污染物当量的相对权重因子取值为 1。	大气污染物的税率在 1.2 元/kg 污染当量至 12 元/kg 污染当量之间。在本研究中，本报告使用 6.0 元/kg 污染当量（或 6,000 元/t 污染当量）。
二氧化 碳当量 权重	CO_2	α	1	IPCC 第五次评估报告的 GWP100 值	
	...	...			
大气污 染当量 权重 ^①	SO_2	β	1/0.95	《中华人民共和国环境保护税法》所附《应税污染物和当量值表》	①根据大气污染当量数计算公式（大气污染当量数 = 大气污染物排放量 ÷ 污染当量值），在此 β 、 γ 、 δ 等取相应污染物的污染当量值的倒数； ②PM 取“烟尘”数据；
	NO_x	γ	1/0.95		
	PM	δ	1/2.18 ^②		
	...	...			

将上表中各权重值应用于公式(6)，可得出协同控制减排当量计算公式如下：

$$ER - eq = 0.00372 \times (1 \cdot Q_{CO_2} + \dots) + 1 \times (Q_{SO_2}/0.95 + Q_{NO_x}/0.95 + Q_{PM}/2.18 + \dots) \quad (7)$$

2.2.5 单位污染物减排成本

综合考虑减排措施的财务成本和环境效益、直接减排效果和间接减排效果，使用“单位污染物减排成本”指标对减排措施进行成本有效性评价。单位污染物

^①碳交易网.截至 2017 年 12 月 31 日，全国配额累计成交 4.70 亿吨，成交总额达到 104.94 亿元.[EB/OL][2018-01-29] <http://www.tanpaifang.com/tanjiaoyi/2018/0129/61449.html>

减排成本的计算公式如下：

$$C_{i,j} = \frac{CC_i - MB_i}{Q_{i,j}} \quad (8)$$

式中：

$C_{i,j}$ ——减排措施 i 减排单位污染物 j 的成本；

CC_i ——减排措施 i 的污染物控制成本（包括建设成本和运行成本）；

MB_i ——减排措施 i 的节能增效收益；

$Q_{i,j}$ ——减排措施 i 对污染物 j 的减排量。

单位污染物减排成本将减排措施的减排效果和减排成本综合考虑，反映了减排单位量的污染物所必须付出的经济代价。单位污染物减排成本较低的措施成本有效性较好，在进行措施选择时应具有较高的优先度；单位污染物减排成本较高的措施成本有效性较差，优先度较低。

2.2.6 边际减排成本曲线（MAC）

基于措施的减排潜力和单位污染物减排成本的排序结果，可以绘制污染物边际减排成本（MAC）曲线。

减排潜力反映了减排措施能够实现的最大减排量，计算公式如下：

$$MAX_{EMij} = (MaxQ_i - Q_0)R_i \quad (9)$$

MAX_{EMij} ——减排措施 i 对污染物 j （或协同控制减排当量 ER-eq）的减排潜力；

$MaxQ_i$ ——减排措施 i 能够实现的最大市场占有量；

Q_0 ——减排措施 i 在基准年已实现的市场占有量；

R_i ——减排措施 i 对污染物 j （或协同控制减排当量 ER-eq）的减排率（单位市场占有量的减排水平）。

减排潜力对应着减排措施的最大可实现减排量和最大减排成本，其大小取决于该减排措施的剩余市场容量及其对污染物的减排率。

MAC 曲线反映了减排单位污染物的边际成本，减排量越大，污染物边际减排成本越高。绘制 MAC 曲线时要特别注意，有些减排措施的减排潜力之间存在

交叉重叠，为避免重复计算应扣除重叠的部分。

MAC 曲线的示意图如下：

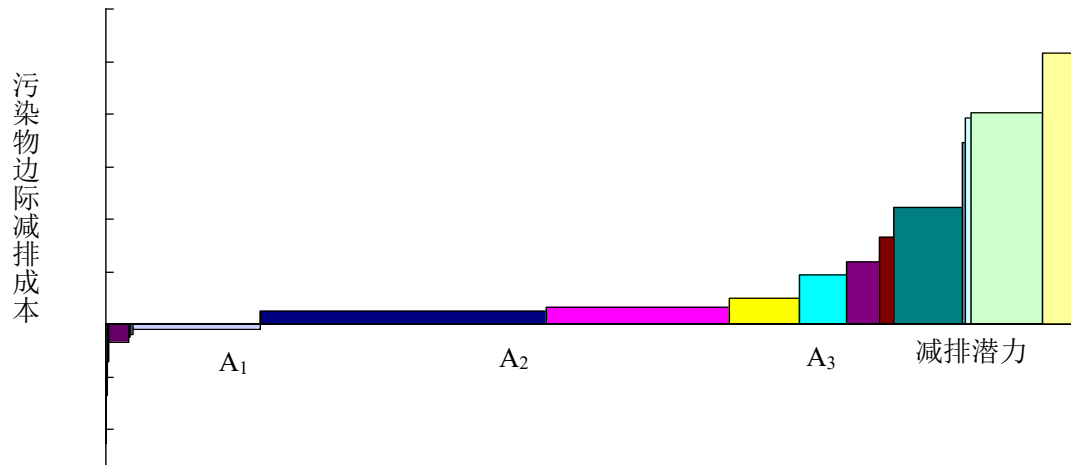


图 2-3 边际减排成本(MAC)曲线

图中，横坐标代表不同的减排措施及其减排潜力，纵坐标代表污染物边际减排成本(对某一种措施来说是平均减排成本)。图中每个矩形代表一种减排措施，矩形的长度（在横坐标上的长度）代表该项减排措施对某种污染物的减排潜力，矩形的宽度（在纵坐标上的高度）代表该项减排措施的污染物边际减排成本（单位污染物减排成本），矩形的面积代表该减排措施实现减排潜力时的减排成本。

2.3 CGE-CIMS 复合模型

在进行协同控制路径设计时，需要借助能源-环境-经济模型（Energy-Economic-Environment，3E 模型）的支持。本研究将自上而下的 CGE 模型和自下而上的 CIMS 模型采用“软连接”的方式构建了“CGE-CIMS 复合模型”。

2.3.1 CGE 模型构建

本研究构建了中国单区域开放的 60 部门递归动态 CGE 模型。在进行动态模拟时，主要考虑了以下情景设置条件：

（1）保持经济中高速增长：根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》，在“十三五”期间（2016-2020 年）GDP 增长率达到 6.5%，考虑到中国经济体量的不断增大，经济结构转型的压力以及欧美发达国家的发展历史轨迹，2021-2050 年间中国经济将保持中高速增长。

（2）经济结构逐步转型：中国正处于经济结构调整的关键时期，深入推进供给侧结构性改革是未来中国改革发展的重要内容，中国政府将采取经济手段（如提高

税收水平）与行政命令手段（如淘汰落后产能、提高排放标准、限制工作时间等）对钢铁、水泥等重点行业尤其是过剩产能行业规模进行控制。CGE 模型的操作界面如图 2-4 所示。

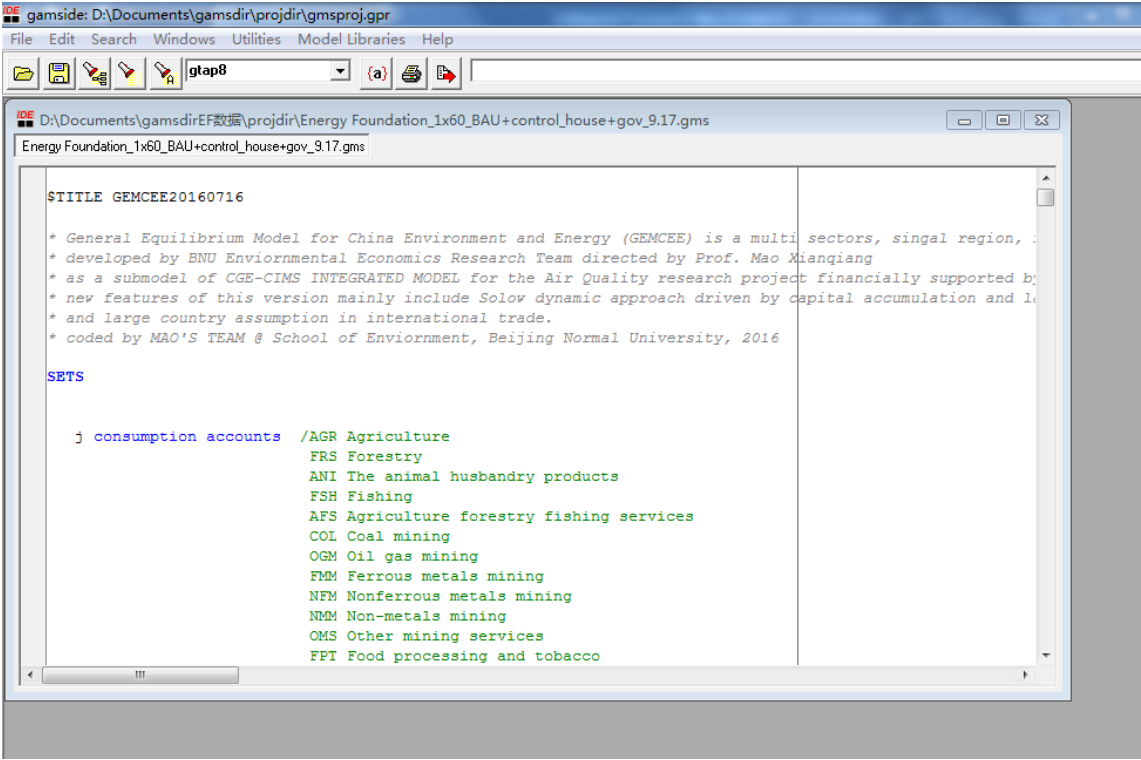


图 2-4 CGE 模型的 GAMS 软件操作界面

2.3.2 CIMS-钢铁模型构建

本研究根据《中国钢铁工业年鉴》、钢铁行业现状、相关发展政策文件以及 CIMS 模型特点，构建中国钢铁行业 CIMS 模型框架，分生产环节对不同生产工艺和技术的市场竞争进行模拟分析。详见表 2-4 和图 2-5。

表 2-4 中国钢铁行业 CIMS 模型技术分类

产品分类	设备名称	序号	技术名称	技术代码
焦炭	焦炉	1	炭化室高度>6.25m	Oven>6.25m
		2	4.3m<炭化室高度<6.25m	4.3m<Oven<6.25m
		3	炭化室高度<4.3m	Oven<4.3m
	熄焦	4	湿法熄焦	Coke_Wet_Quenching

产品分类	设备名称	序号	技术名称	技术代码
		5	干法熄焦	Coke_Dry_Quenching
铁矿石	烧结矿	6	烧结机 $\geq 130\text{ m}^2$	Sintering $\geq 130\text{ m}^2$
		7	$90\text{ m}^2 < \text{烧结机} < 129\text{ m}^2$	$90\text{ m}^2 < \text{Sintering} < 129\text{ m}^2$
		8	$36\text{ m}^2 < \text{烧结机} < 89\text{ m}^2$	$36\text{ m}^2 < \text{Sintering} < 89\text{ m}^2$
		9	烧结机 $\leq 35\text{ m}^2$	Sintering $\leq 35\text{ m}^2$
	球团矿	10	球团机	Pellet_ore
铁水	高炉炼铁	11	高炉容积 $> 3000\text{ m}^3$	Blast_furnace $> 3000\text{ m}^3$
		12	$2000\text{ m}^3 < \text{高炉容积} < 3000\text{ m}^3$	$2000\text{ m}^3 < \text{Blast_furnace} < 3000\text{ m}^3$
		13	$1200\text{ m}^3 < \text{高炉容积} < 2000\text{ m}^3$	$1200\text{ m}^3 < \text{Blast_furnace} < 2000\text{ m}^3$
		14	$450\text{ m}^3 < \text{高炉容积} < 1200\text{ m}^3$	$450\text{ m}^3 < \text{Blast_furnace} < 1200\text{ m}^3$
		15	高炉容积 $< 450\text{ m}^3$	Blast_furnace $\leq 450\text{ m}^3$
钢水	转炉	16	转炉容积 $\geq 300\text{ tons}$	Converter $\geq 300\text{ t}$
		17	$200\text{ t} < \text{转炉容积} < 299\text{ t}$	$200\text{ t} < \text{Converter} < 299\text{ t}$
		18	$120\text{ t} < \text{转炉容积} < 199\text{ t}$	$120\text{ t} < \text{Converter} < 199\text{ t}$
		19	$50\text{ t} < \text{转炉容积} < 119\text{ t}$	$50\text{ t} < \text{Converter} < 119\text{ t}$
		20	转炉容积 $\leq 49\text{ t}$	Converter $\leq 49\text{ t}$
	电炉	21	电炉容积 $\geq 100\text{ t}$	Electric furnace $\geq 100\text{ t}$
		22	$50\text{ t} < \text{电炉容积} < 99\text{ t}$	$50\text{ t} < \text{Electric furnace} < 99\text{ t}$
		23	电炉容积 $\leq 49\text{ t}$	Electric furnace $\leq 49\text{ t}$
钢坯	铸造机	24	模铸钢锭	Moulded ingot
		25	连铸坯	Continuously cast steel
钢材产品	热轧	26	热轧机	Hot_rolled
	冷轧	27	冷轧机	Cold_rolled
	涂镀	28	涂镀机	Clad and coated



2.3.3 CIMS-水泥模型构建

本研究根据《中国钢铁工业年鉴》、水泥行业现状、相关发展政策文件以及 CIMS 模型特点，构建中国水泥行业 CIMS 模型框架，详见表 2-5 和图 2-6。

表 2-5 中国水泥行业 CIMS 模型技术分类

技术名称			技术代码
熟料生产	新型干法	8000t/d 以上	NSP>8000t/d
		5000~8000t/d（含）	5000t/d<NSP≤8000t/d
		2500~5000 t/d（含）	2500t/d<NSP≤5000t/d
		2000~2500t/d（含）	2000t/d<NSP≤2500t/d
		2000t/d（含）以下	2000t/d≤NSP
	协同处置 固体废物	协同处置生活垃圾	Co-processing of domestic waste
		协同处置城市污泥	Co-processing of sewage sludge
		协同处置危废	Co-processing of hazardous waste
水泥粉磨			Cement grinding

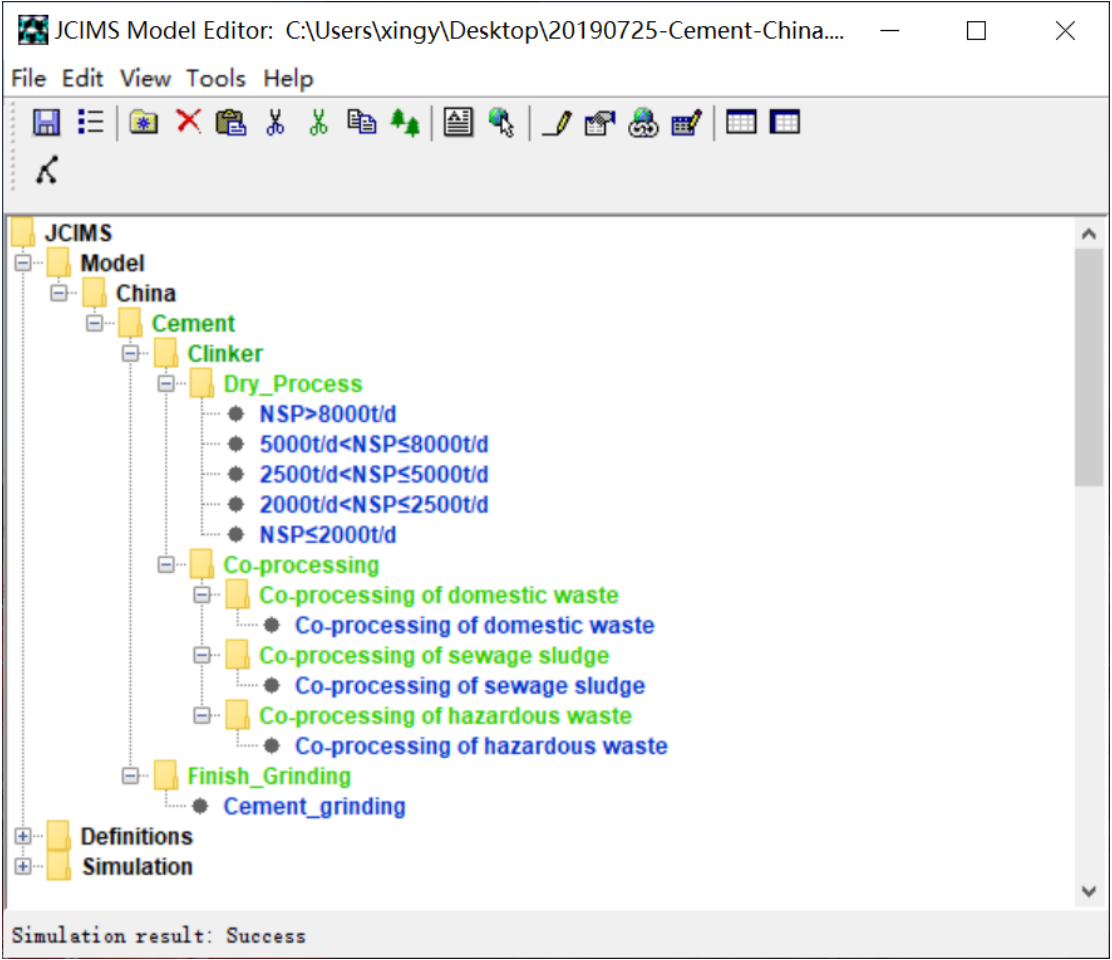


图 2-6 中国水泥行业 CIMS 框架图

2.3.4 CGE-CIMS 复合模型构建

本研究将自上而下的 CGE 模型和自下而上的 CIMS 模型采用“软连接”的方式构建了“CGE-CIMS 复合模型”，框架见前文图 2-7。

2.3.5 情景（碳税）设置

我国尚未实施碳税政策，但已有大量的理论研究积累。

自 2013 年“两省五市”碳排放权交易试点至 2017 年底全国碳排放权交易体系建设（仅电力行业），为促进温室气体减排发挥了重要作用，但目前包括钢铁、水泥在内的多个重点行业尚未进入全国碳排放权交易体系。

2011 年国家发改委发布《碳排放权交易试点工作通知》，启动了 7 个国内碳排放权交易试点。截至 2017 年 12 月 31 日，全国配额累计成交 4.70 亿 t，成交总额达到 104.94 亿元^①。折合 22.33 元/t CO₂。

《2019 年中国碳价调查》^②显示“全国碳市场的平均碳价预期为：2020 年为人民币 43 元/t CO₂。

碳税情景设置：综合根据我国碳排放权交易现状及预测，本研究假设自 2021 年起在中国钢铁、水泥行业征收碳税，税率为 50 元/tCO₂。

模拟时间段：本研究以 2017 年基准年，模拟时间段为 2017-2050 年。

^①碳交易网.截至 2017 年 12 月 31 日，全国配额累计成交 4.70 亿吨，成交总额达到 104.94 亿元.[EB/OL][2018-01-29] <http://www.tanpaifang.com/tanjiaoyi/2018/0129/61449.html>

^②Slater, H.,De Boer, D.,钱国强,王庶.《2019年中国碳价调查》,2019年12月,中国碳论坛,北京.

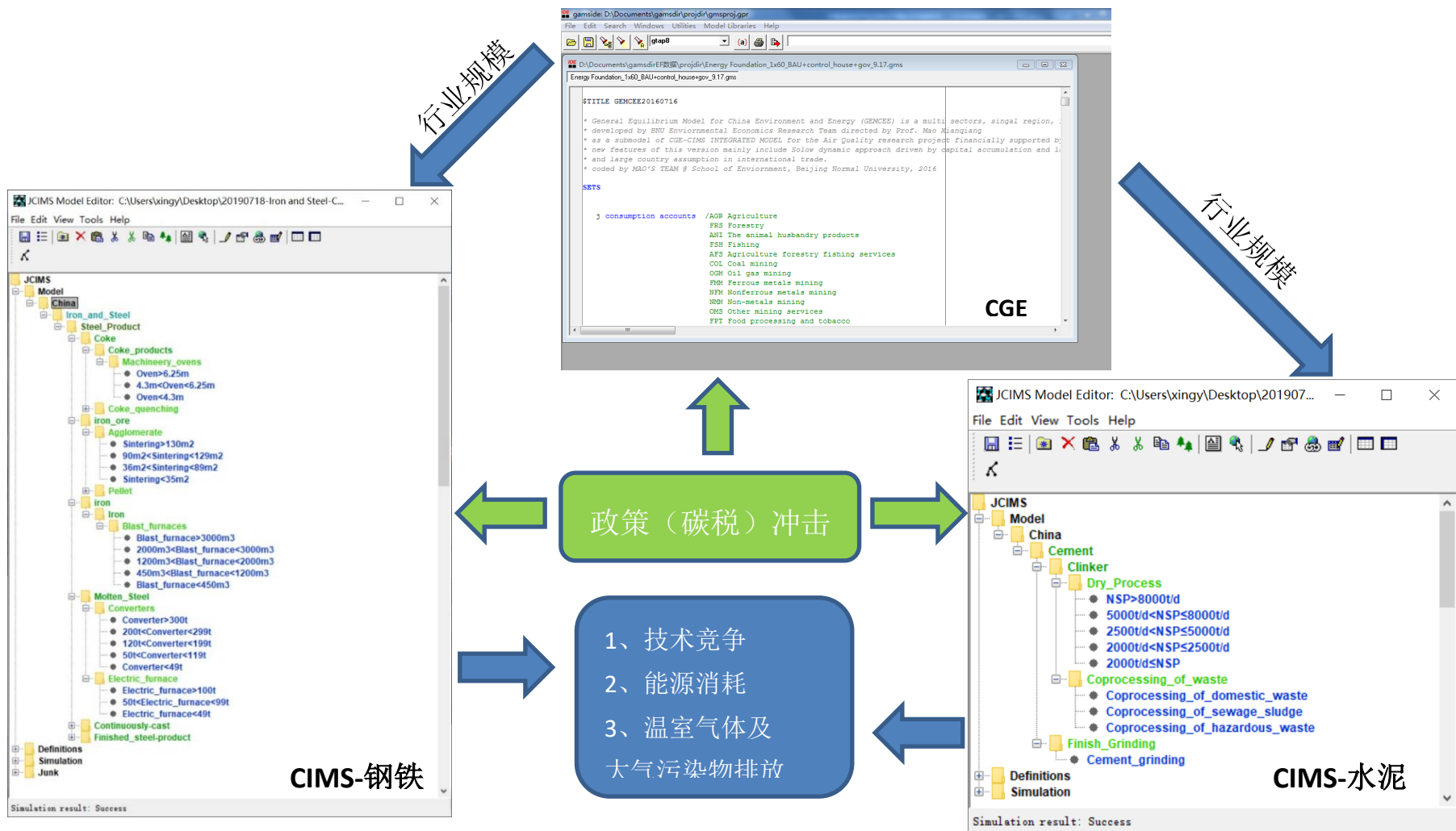


图 2-7 CGE-CIMS 复合模型框架

3 钢铁行业深度脱碳的协同效果评估

本研究中所核算的钢铁行业的能耗与排放，主要涵盖长流程工艺的炼焦、烧结、炼铁、炼钢、连铸、轧钢等环节与短流程工艺的电炉炼钢的能耗与排放。由于国内大型钢铁企业普遍拥有焦化厂，因此所核算的钢铁行业的能耗与排放也包括炼焦部分的能耗与排放。

本研究的比较基线为 2015 年，减排潜力按各项措施或技术 2025 年相比 2015 年的市场份额、生产规模等变化确定。

3.1 钢铁行业概况

(1) 近年来钢铁产量反弹上升

钢铁行业是国民经济的重要部门，是国家工业化的重要标志，在经济建设中起着举足轻重的作用。2018 年我国粗钢产量达到 9.28 亿 t，约占世界总产量的 51.3%^①。

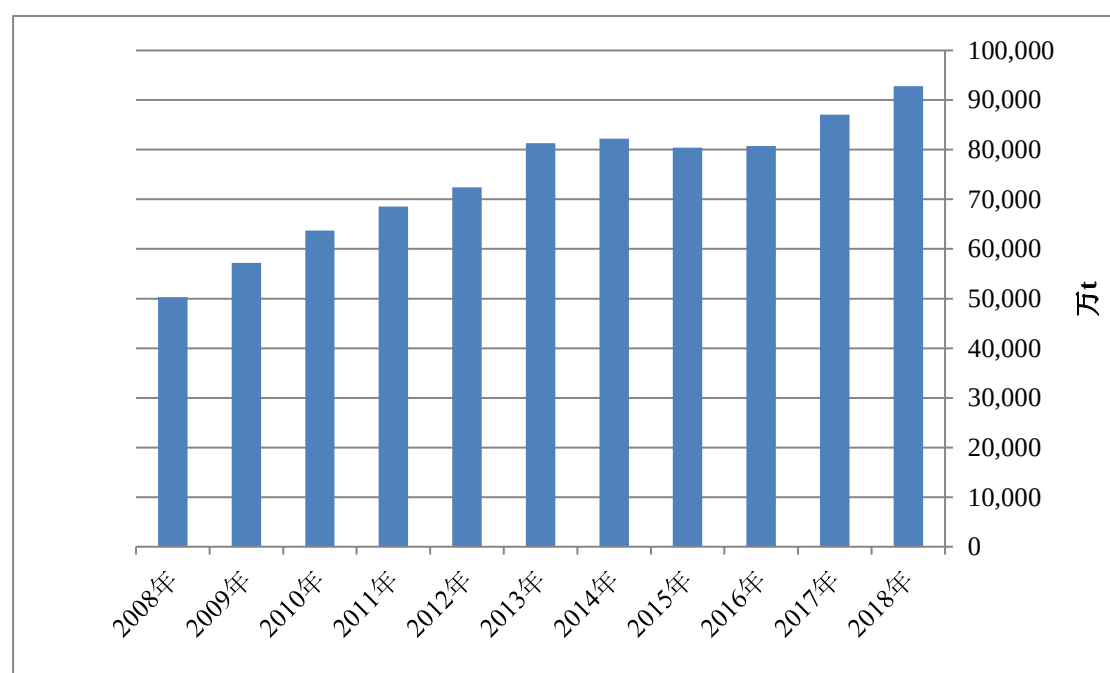


图 3-1 全国粗钢产量变化图

数据来源：国家统计局

^①世界钢铁协会. 《世界钢铁统计数据 2019》<https://www.worldsteel.org/zh/media-centre/press-releases/2019/world-steel-in-figures-2019.html>

2015 年，我国钢铁企业分布情况见图 3-2，可以看出，我国每个省份都有钢铁企业，尤其在华北地区和东南沿海地区更是分布密集。

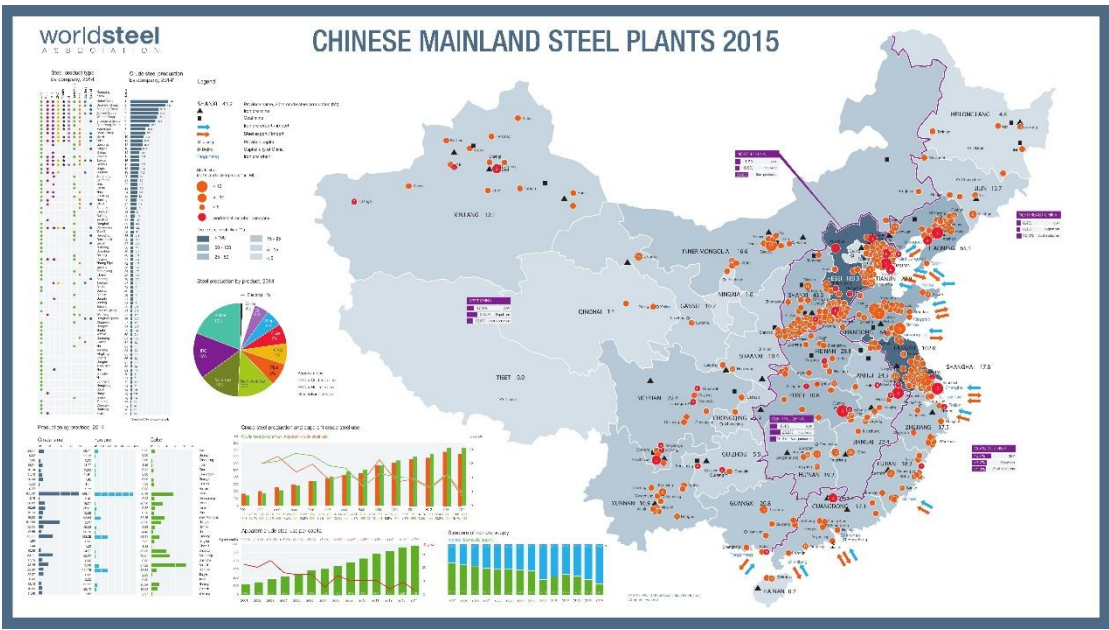


图 3-2 2015 年我国钢铁企业分布情况

数据来源：world steel association

(2) 能源消耗、温室气体与大气污染物排放概况

钢铁行业是典型的能源密集型工业，根据煤炭工业协会发布的《2018 煤炭行业发展年度报告》，2018 年钢铁行业耗煤 6.2 亿 t^①，仅次于电力行业位居第二；钢铁行业目前年总用电量约 4000 亿 kWh^②。

另一方面，钢铁行业通过实施节能减排，吨钢综合能耗显著下降。根据《钢铁行业“十三五”煤控中期评估与后期展望》，重点统计钢铁企业平均吨钢综合能耗从 2010 年的 599 kgce 下降至 2015 年的 572 kgce，2018 年进一步下降至 555 kgce，提前完成《工业绿色发展规划（2016-2020 年）》吨钢综合能耗降低至 560 kgce 的规划目标。

^①煤炭工业协会.《2018 煤炭行业发展年度报告》。
^②“十三五”工业节能依然“压力山大” 工信部推出多项技术解决方案[EB/OL] [2018-04-24]
http://www.sohu.com/a/229306664_118622

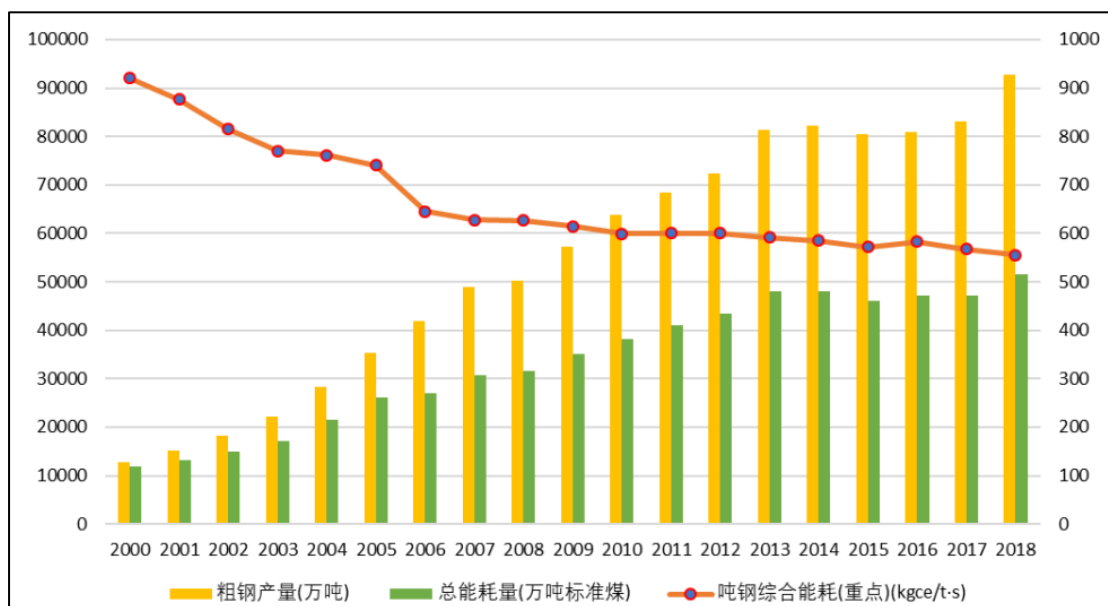


图 3-3 2000-2018 年我国钢铁行业总能耗与吨钢综合能耗变化情况

来源：中国钢铁工业协会.《钢铁行业“十三五”煤控中期评估与后期展望》，2019.

大量的能源消费导致钢铁行业成为我国工业部门中的二氧化碳和大气污染物排放大户。2017 年，钢铁工业能源消耗占全国能源消耗比重为 11%。中国钢铁工业 CO₂排放量约占全球钢铁工业的 51%，占中国 CO₂排放总量的 15%左右，在国内所有工业行业中位居第二位^①。

2015-2017 年重点环保统计钢铁企业大气污染减排情况见表 3-1。提前 3 年实现《钢铁工业调整升级规划（2016-2020 年）》中提出的 2020 年吨钢 SO₂排放削减目标。

表 3-1 2015-2017 年重点环保统计钢铁企业大气污染排放情况

年度	吨钢颗粒物排放(kg)	吨钢 SO ₂ 排放(kg)	吨钢 NO _x 排放(kg)
2015 年	0.81	0.88	1.05
2016 年	0.75	0.69	1.06
2017 年	0.59	0.54	0.89

数据来源：黄导,《2017 年中国钢铁行业节能环保进展报告》。

^①中国节能协会冶金工业节能专业委员会,冶金工业规划研究院.《中国钢铁工业节能低碳发展报告（2018）》，2018 年 10 月。

（3）钢铁行业超低排放改造

2019 年 4 月 22 日，生态环境部、发展改革委、工业和信息化部、财政部、交通运输部联合制定的《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（环大气〔2019〕35 号）提出了主要目标“全国新建（含搬迁）钢铁项目原则上要达到超低排放水平。推动现有钢铁企业超低排放改造，到 2020 年底前，重点区域钢铁企业超低排放改造取得明显进展，力争 60%左右产能完成改造，有序推进其他地区钢铁企业超低排放改造工作；到 2025 年底前，重点区域钢铁企业超低排放改造基本完成，全国力争 80%以上产能完成改造。”

3.2 钢铁行业深度脱碳措施初步筛选

3.2.1 措施筛选

根据《重塑能源：面向 2050 年能源消费和生产革命路线图.中国.工业卷》，《国家重点节能低碳技术推广目录》，行业协会专家访谈调研，钢铁行业相关规划、研究成果等资料，初步筛选出 29 项节能减排措施/技术，见表 3-2。各项措施/技术有按类型和按环节两个分类维度：

表 3-2 钢铁行业初步筛选节能减排措施/技术分类

类别	所处环节	措施/技术名称	序号
消费减量	消费减量	减少不合理钢铁消费需求	T1
结构调整	结构调整	先进产能代替落后产能	T2
	结构调整	增加短流程炼钢比例	T3
原（燃）料回收和替代	炼焦	高温高压干熄焦	T4
	炼焦	炼焦煤调湿风选技术	T5
	炼焦	焦炉荒煤气显热回收利用技术	T6
	烧结	烧结余热发电技术	T7
	烧结	烧结余热能量回收驱动技术（SHRT 技术）	T8
	烧结	烧结废气余热循环利用工艺技术	T9
	炼铁	提高高炉入炉球团比	T10
	炼铁	高炉冲渣水直接换热回收余热技术	T11
	炼铁	燃气-蒸汽联合循环发电技术（CCPP）	T12
	炼铁	燃气轮机值班燃料替代技术	T13
	炼铁	煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT 技术）	T14
	炼钢	转炉煤气干法回收技术	T15

类别	所处环节	措施/技术名称	序号
节能及能效提升	炼焦	大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术	T16
	烧结	环冷机液密封技术	T17
	球团	蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术	T18
	炼铁	高炉鼓风除湿节能技术	T19
	炼铁	基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术	T20
	炼铁	旋切式高风温顶燃热风炉节能技术	T21
	炼钢	冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术	T22
	炼钢	钢水真空循环脱气工艺干式（机械）真空系统应用技术	T23
	炼钢	加热炉黑体强化辐射节能技术	T24
	整体节能	钢铁行业能源管控技术	T25
	整体节能	高辐射覆层技术	T26
末端脱碳	末端脱碳	二氧化碳捕集与封存（CCS）	T27
		二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）	T28
末端减污	末端减污	超低排放改造	T29

3.2.3 措施属性汇总

各项措施/技术的 **2015 年、2020 年** 市场占比数据来自《重塑能源：面向 2050 年能源消费和生产革命路线图.中国.工业卷》、《国家重点节能低碳技术推广目录（2015 年本，节能部分）》、相关规划、文献等，**2025 年市场占比数据为参考 2015-2020 年的推广比例变化情况，估算而来。**

根据项目组实地调研所收集的数据资料，结合国内外措施/技术的典型应用、统计数据、相关学术研究成果等资料，可计算出 2025 年各项措施/技术的减排潜力，详见下表。

表 3-3 钢铁行业各节能减排措施/技术综合减排潜力表

类型	所处环节	措施/技术名称	序号	减排潜力（2025 年，万 t/a）					
				大气污染物				温 室 气 体 GHG	ER-eq
				SO ₂	NO _x	PM	LAPs	CO ₂	
消费减量	消费减量	减少不合理钢铁消费需求	T1	7.44	8.87	6.84	20.31	13288.25	69.74
结构调整	结构调整	先进产能代替落后产能	T2	4.60	5.48	4.23	12.55	8213.03	43.10
		增加短流程炼钢比例	T3	15.34	18.30	14.12	41.89	27414.19	143.87
原（燃）料替代	炼焦	高温高压干熄焦	T4	0.01	0.01	0.00	0.03	23.84	0.12
		炼焦煤调湿风选技术	T5	0.13	0.95	0.46	1.35	1230.91	5.93
		焦炉荒煤气显热回收利用技术	T6	0.73	0.83	1.84	2.49	570.98	4.61
	烧结	烧结余热发电技术	T7	0.13	0.11	0.03	0.26	231.28	1.13
		烧结余热能量回收驱动技术（SHRT 技术）	T8	0.14	0.13	0.03	0.30	259.43	1.26
		烧结废气余热循环利用工艺技术	T9	0.56	0.72	0.60	1.63	272.86	2.65
	炼铁	提高高炉入炉球团比	T10	0.33	0.09	0.14	0.50	1038.41	4.37
		高炉冲渣水直接换热回收余热技术	T11	1.51	1.74	3.83	5.17	1187.31	9.59
		燃气-蒸汽联合循环发电技术（CCPP）	T12	1.28	1.13	0.26	2.65	2315.76	11.27
		燃气轮机值班燃料替代技术	T13	0.08	0.07	0.02	0.17	151.02	0.73
		煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT 技术）	T14	0.47	0.41	0.09	0.97	849.38	4.13
	炼钢	转炉煤气干法回收技术	T15	0.24	0.21	0.05	0.50	434.15	2.11

能效提升	炼焦	大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术	T16	0.05	0.35	0.17	0.50	453.01	2.18
	烧结	环冷机液密封技术	T17	0.01	0.01	0.00	0.03	23.86	0.12
	球团	蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术	T18	1.88	7.67	1.48	10.73	1261.08	15.42
	炼铁	高炉鼓风除湿节能技术	T19	0.09	0.02	0.04	0.14	280.52	1.18
		基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术	T20	0.56	0.15	0.24	0.86	1768.30	7.43
		旋切式高风温顶燃热风炉节能技术	T21	0.25	0.07	0.11	0.38	784.83	3.30
	炼钢	冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术	T22	3.30	2.92	0.66	6.85	5982.21	29.10
		钢水真空循环脱气工艺干式（机械）真空系统应用技术	T23	0.68	0.78	1.72	2.32	533.70	4.31
		加热炉黑体强化辐射节能技术	T24	0.39	0.15	0.06	0.60	719.33	3.27
	整体节能	钢铁行业能源管控技术	T25	0.11	0.13	0.10	0.29	191.49	1.00
		高辐射覆层技术	T26	2.93	3.49	2.69	7.99	5230.60	27.45
末端脱碳	末端脱碳	二氧化碳捕集与封存（CCS）	T27	-0.041	-0.036	-0.008	-0.085	542.87	1.93
		二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）	T28	-0.041	-0.036	-0.008	-0.085	466.48	1.65
末端减污	末端减污	超低排放改造	T29	13.26	22.09	12.78	43.08	-1108.82	38.95
合计				56.40	76.83	52.57	164.36	74610.27	441.91

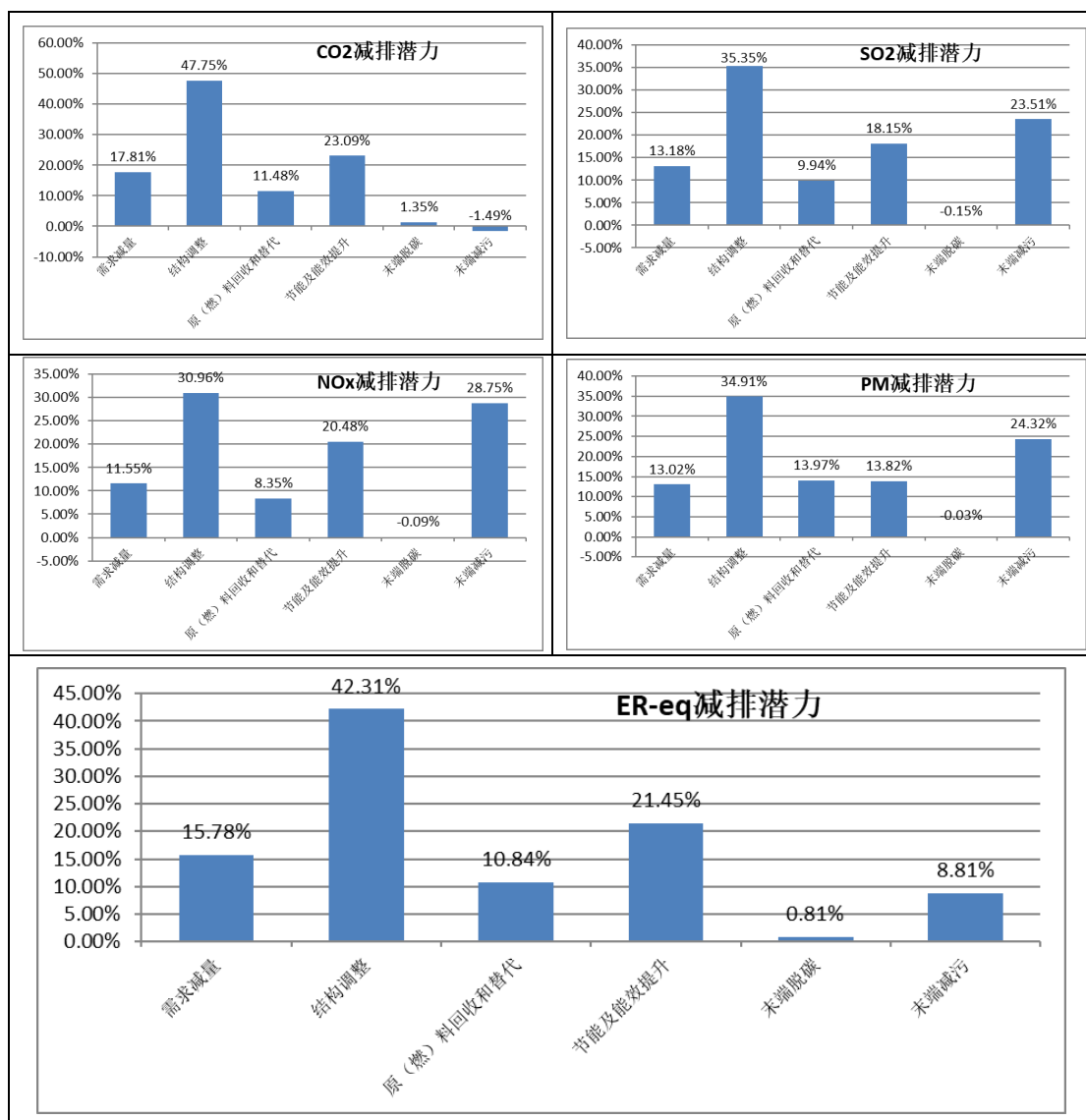


图 3-4 钢铁行业按类型分措施/技术的减排潜力占比

从图 3-4 可以看出：

(1) 按照措施/技术的类型分：

● CO₂ 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 47.75%；其次为节能及能效提升型措施/技术，占 23.09%；第三为需求减量型措施/技术，占 17.81%。末端减污型措施/技术会带来微量的增排，占-1.49%。

● SO₂ 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 35.35%；其次为末端减污型措施/技术，占 23.51%；第三为节能及能效提升型措施/技术，占 18.15%。末端脱碳型措施/技术会带来微量的增排，占-0.15%。

● NO_x 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的

30.96%；其次为末端减污型措施/技术，占 28.75%；第三为节能及能效提升型措施/技术，占 20.48%。末端脱碳型措施/技术会带来微量的增排，占-0.09%。

- PM 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 34.91%；其次为末端减污型措施/技术，占 24.32%；第三为原（燃）料回收与替代型措施/技术，占 13.97%。末端脱碳型措施/技术会带来微量的增排，占-0.03%。

- **ER-eq 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 42.31%；其次为节能及能效提升型措施/技术，占 21.45%；第三为需求减量型措施/技术，占 15.78%。ER-eq 均为正值，说明各类型措施/技术的综合减排效果为正，没有增排。**

（2）按照措施/技术的环节分：

- CO₂ 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 47.75%；其次为需求减量型的措施/技术，占 17.81%；第三为炼铁工序的措施/技术，占 11.23%。末端减污型措施/技术会带来微量的增排，占-1.49%。

- SO₂ 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 35.35%；其次为末端减污型措施/技术，占 23.51%；第三为需求减量型的措施/技术，占 13.18%。末端脱碳型措施/技术会带来微量的增排，占-0.15%。

- NO_x 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 30.96%；其次为末端减污型措施/技术，占 28.75%；第三为需求减量型的措施/技术，占 11.55%。末端脱碳型措施/技术会带来微量的增排，占-0.09%。

- PM 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 34.91%；其次为末端减污型措施/技术，占 24.32%；第三为需求减量型措施/技术，占 13.02%。末端脱碳型措施/技术会带来微量的增排，占-0.03%。

- **ER-eq 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 42.31%；其次为需求减量型的措施/技术，占 15.78%；第三为炼铁工序的措施/技术，占 9.50%；第四为末端减污型措施/技术，占 8.81%；最小的为末端脱碳的措施/技术，占 0.81%。各类型措施/技术的 ER-eq 均为正值，说明其综合减排效果为正，没有增排。**

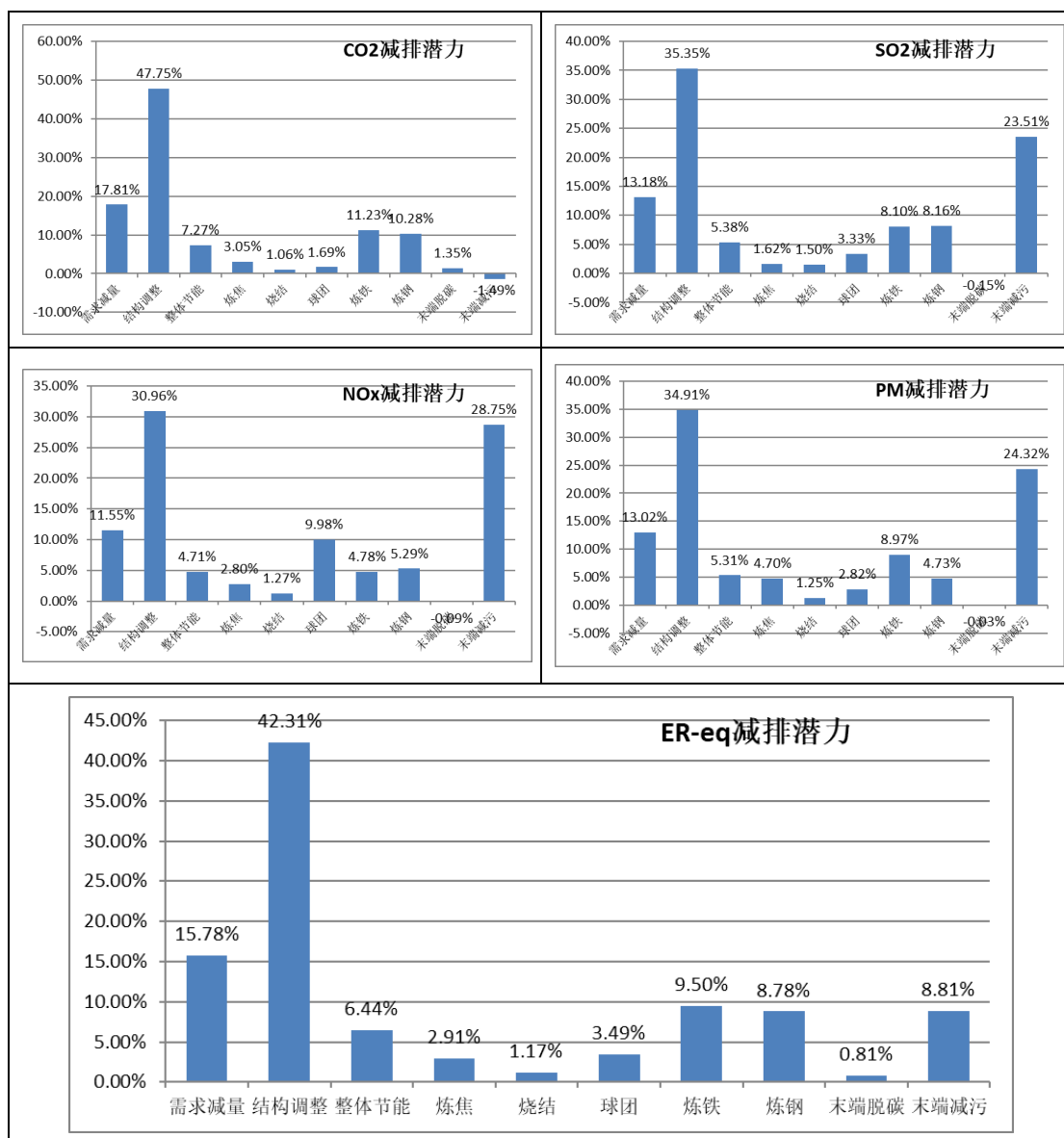


图 3-5 钢铁行业按环节分措施/技术的减排潜力占比

表 3-4 钢铁行业各节能减排措施/技术实现综合减排潜力成本表

类型	所处环节	措施/技术名称	序号	实现减排潜力成本（万元）
消费减量	消费减量	减少不合理钢铁消费需求	T1	0.00
结构调整	结构调整	先进产能代替落后产能	T2	-138,521.88
		增加短流程炼钢比例	T3	6,105,000.00
原（燃）料替代	炼焦	高温高压干熄焦	T4	-37,363.46
		炼焦煤调湿风选技术	T5	-59,634.82
		焦炉荒煤气显热回收利用技术	T6	-103,559.51
	烧结	烧结余热发电技术	T7	-147,146.25

类型	所处环节	措施/技术名称	序号	实现减排潜力 成本（万元）
		烧结余热能量回收驱动技术（SHRT 技术）	T8	-157,805.07
		烧结废气余热循环利用工艺技术	T9	-156,241.65
	炼铁	提高高炉入炉球团比	T10	443,432.18
		高炉冲渣水直接换热回收余热技术	T11	-83,613.65
		燃气—蒸汽联合循环发电技术（CCPP）	T12	-50,001.85
		燃气轮机值班燃料替代技术	T13	-93,589.18
		煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT 技术）	T14	-521,921.63
	炼钢	转炉煤气干法回收技术	T15	-158,510.48
能效提升	炼焦	大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术	T16	-81,440.00
	烧结	环冷机液密封技术	T17	-8,821.47
	球团	蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术	T18	-380,177.74
	炼铁	高炉鼓风除湿节能技术	T19	-39,157.86
		基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术	T20	-454,424.44
		旋切式高风温顶燃热风炉节能技术	T21	-384,463.94
	炼钢	冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术	T22	-2,253,820.25
		钢水真空循环脱气工艺干式（机械）真空系统应用技术	T23	-112,351.30
		加热炉黑体强化辐射节能技术	T24	-147,651.61
	整体节能	钢铁行业能源管控技术	T25	-97,189.20
		高辐射覆层技术	T26	-81,953.79
末端脱碳	末端脱碳	二氧化碳捕集与封存（CCS）	T27	271,008.40
		二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）	T28	198,406.00
末端减污	末端减污	超低排放改造	T29	24,580,992.40
合计				25,849,477.94

表 3-4 展示了各措施/技术实行的成本数据，可以看出“增加短流程炼钢比例（T3）”“提高高炉入炉球团比（T10）”“二氧化碳捕集与封存（CCS）（T27）”“二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）（T28）”“超低排放改造（T29）”5 项措施/技术的成本为正值，高于其他措施/技术，其中“超低排放改造（T29）”的成本最高，远高于其他措施/技术。

3.3 钢铁行业深度脱碳措施的协同控制效果评估

3.3.1 协同控制效应坐标系

3.3.1.1 CO₂-SO₂ 二维坐标图：

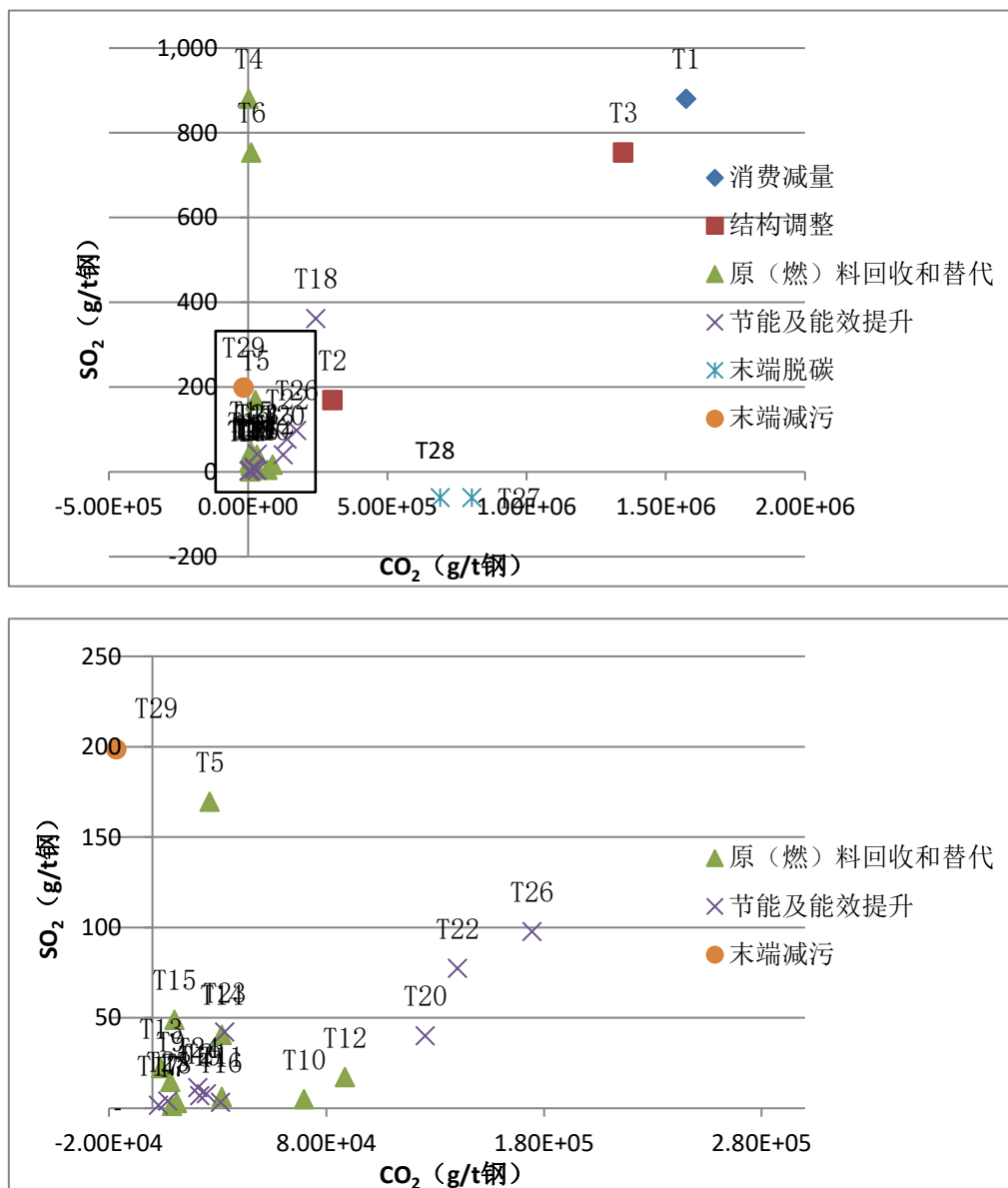


图 3-6 钢铁行业 CO₂ 与 SO₂ 协同控制效应二维坐标系及局部放大图

从图 3-6 可以看出：

从象限位置来看：“二氧化碳捕集与封存（CCS）（T27）”“二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）（T28）”位于第四象限，SO₂ 增排，说明不具备协同减排 CO₂、SO₂ 的能力。“超低排放改造（T29）”位于第二象限，CO₂ 增排，不具备协同减排 CO₂、SO₂ 的能力。另外 26 项措施/技术（T1-T26）均位于第一象限，

说明可以同时减排 SO₂ 与 CO₂。

从点距原点的距离来看，消费减量型的“减少不合理钢铁消费需求（T1）”距离远点最远，表明其对 CO₂ 和 SO₂ 的减排效果都最明显，综合来看在各措施/技术中协同减排效益最大，其次为结构调整型的“增加短流程炼钢比例（T3）”。

分环节 CO₂ 和 SO₂ 坐标系分布如下图所示：

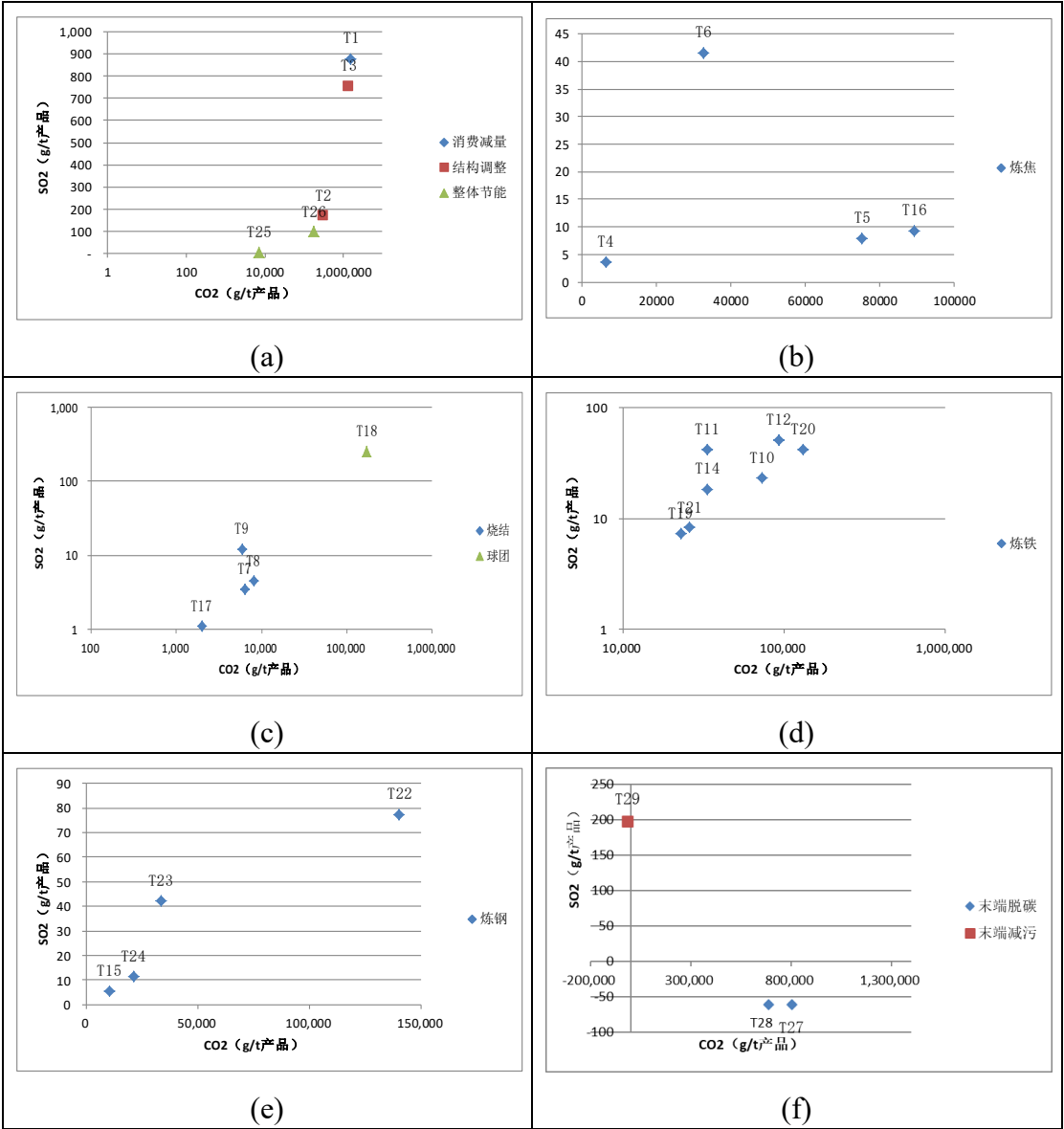


图 3-7 钢铁行业分环节 CO₂ 与 SO₂ 协同控制效应二维坐标系

从图 3-7 分环节 CO₂ 和 SO₂ 坐标系分布情况来看：

- 从（a）可知，消费减量型措施/技术的协同效益大于结构调整型措施/技术，结构调整型措施/技术优于整体节能型措施/技术。

- 从(b)可知,炼焦环节4项技术中,“大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术(T16)”的协同减排效益相对最优。
- 从(c)可知,球团环节的“蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术(T18)”的协同效益大于烧结环节的技术,烧结环节4项技术中“烧结废气余热循环利用工艺技术(T9)”的协同减排效益最大。
- 从(d)可知,炼铁环节的“基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术(T20)”的协同减排效益最大。
- 从(e)可知,炼钢环节的“冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术(T22)”的协同减排效益最大。
- 从(f)可知,“二氧化碳捕集与封存(CCS)(T27)”“二氧化碳捕集、利用和封存(CCUS-EOR)(T28)”位于第四象限,SO₂增排,说明不具备协同减排CO₂、SO₂的能力。“超低排放改造(T29)”位于第二象限,CO₂增排,不具备协同减排CO₂、SO₂的能力。

3.3.1.2 CO₂-NO_x 二维坐标图:

从图 3-8 可以看出:

从象限位置来看:“二氧化碳捕集与封存(CCS)(T27)”“二氧化碳捕集、利用和封存(CCUS-EOR)(T28)”位于第四象限,NO_x增排,说明不具备协同减排CO₂、NO_x的能力。“超低排放改造(T29)”位于第二象限,CO₂增排,不具备协同减排CO₂、NO_x的能力。另外26项措施/技术(T1-T26)均位于第一象限,说明可以同时减排NO_x与CO₂。

从点距原点的距离来看,消费减量型的“减少不合理钢铁消费需求(T1)”对CO₂和NO_x的减排效果都较明显,综合来看在各措施/技术中协同减排效益最大,其次为结构调整型的“增加短流程炼钢比例(T3)”。能效提升型的“蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术(T18)”的NO_x减排效果最优,但CO₂减排效果稍弱。

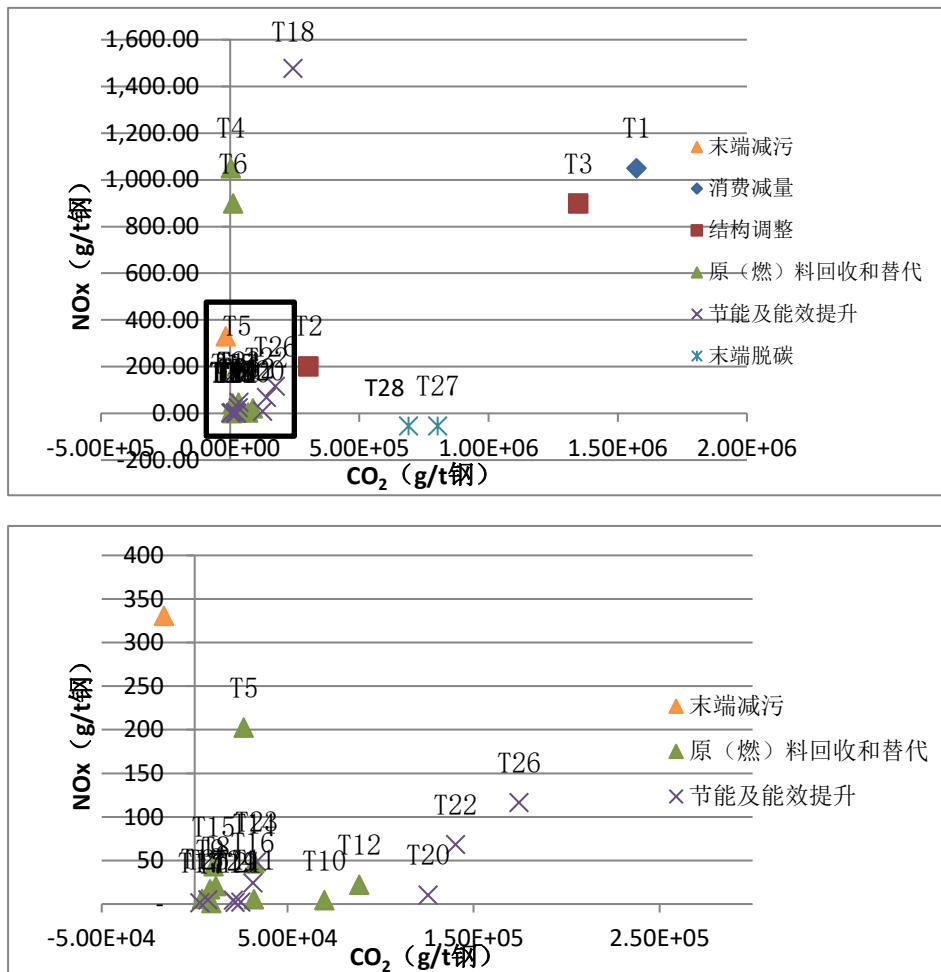


图 3-8 CO₂ 与 NO_x 协同控制效应二维坐标系及局部放大图

从图 3-9 分环节 CO₂ 和 NO_x 坐标系分布情况来看：

- 从（a）可知，消费减量型措施/技术的协同效益大于结构调整型措施/技术，结构调整型措施/技术优于整体节能型措施/技术。
- 从（b）可知，炼焦环节 4 项技术中，“大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术（T16）”的协同减排效益最大。
- 从（c）可知，球团环节的“蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术（T18）”的协同效益大于烧结环节的技术，烧结环节 4 项技术中“烧结废气余热循环利用工艺技术（T9）”的协同减排效益最大。
- 从（d）可知，炼铁环节的“燃气-蒸汽联合循环发电技术（T12）”的协同减排效益最大。
- 从（e）可知，炼钢环节的“冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术（T22）”的协同减排效益最大。

- 从 (f) 可知，“二氧化碳捕集与封存 (CCS) (T27)” “二氧化碳捕集、利用和封存 (CCUS-EOR) (T28)” 位于第四象限，NO_x 增排，说明不具备协同减排 CO₂、NO_x 的能力。“超低排放改造 (T29)” 位于第二象限，CO₂ 增排，不具备协同减排 CO₂、NO_x 的能力。

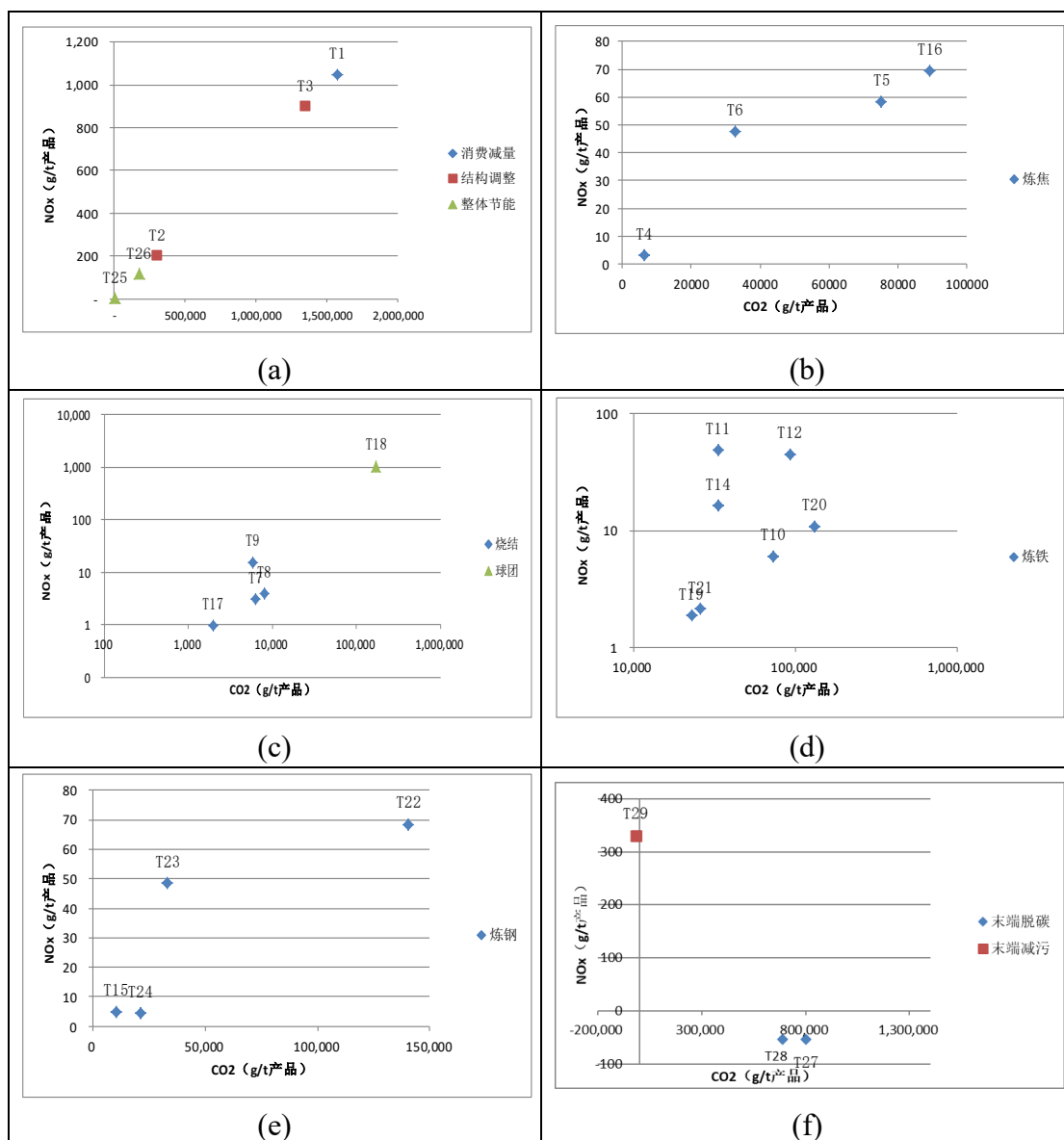


图 3-9 钢铁行业分环节 CO₂ 与 NO_x 协同控制效应二维坐标系

3.3.1.3 CO₂-PM 二维坐标图:

从图 3-10 可以看出:

“二氧化碳捕集与封存 (CCS) (T27)”“二氧化碳捕集、利用和封存 (CCUS-EOR) (T28)” 位于第四象限, PM 增排, 说明不具备协同减排 CO₂、NO_x 的能力。“超低排放改造 (T29)” 位于第二象限, CO₂ 增排, 不具备协同减排 CO₂、PM 的能力。另外 26 项措施/技术 (T1—T26) 均位于第一象限, 说明可以同时减排 PM 与 CO₂。

从点距原点的距离来看, 消费减量型的“减少不合理钢铁消费需求 (T1)”对 CO₂ 和 PM 的减排效果最明显, 综合来看在各措施/技术中协同减排效益最大, 其次为结构调整型的“增加短流程炼钢比例 (T3)”。原(燃)料替代的“高温高压干熄焦 (T4)”的 PM 减排效果虽然很大, 但 CO₂ 减排效果较差。

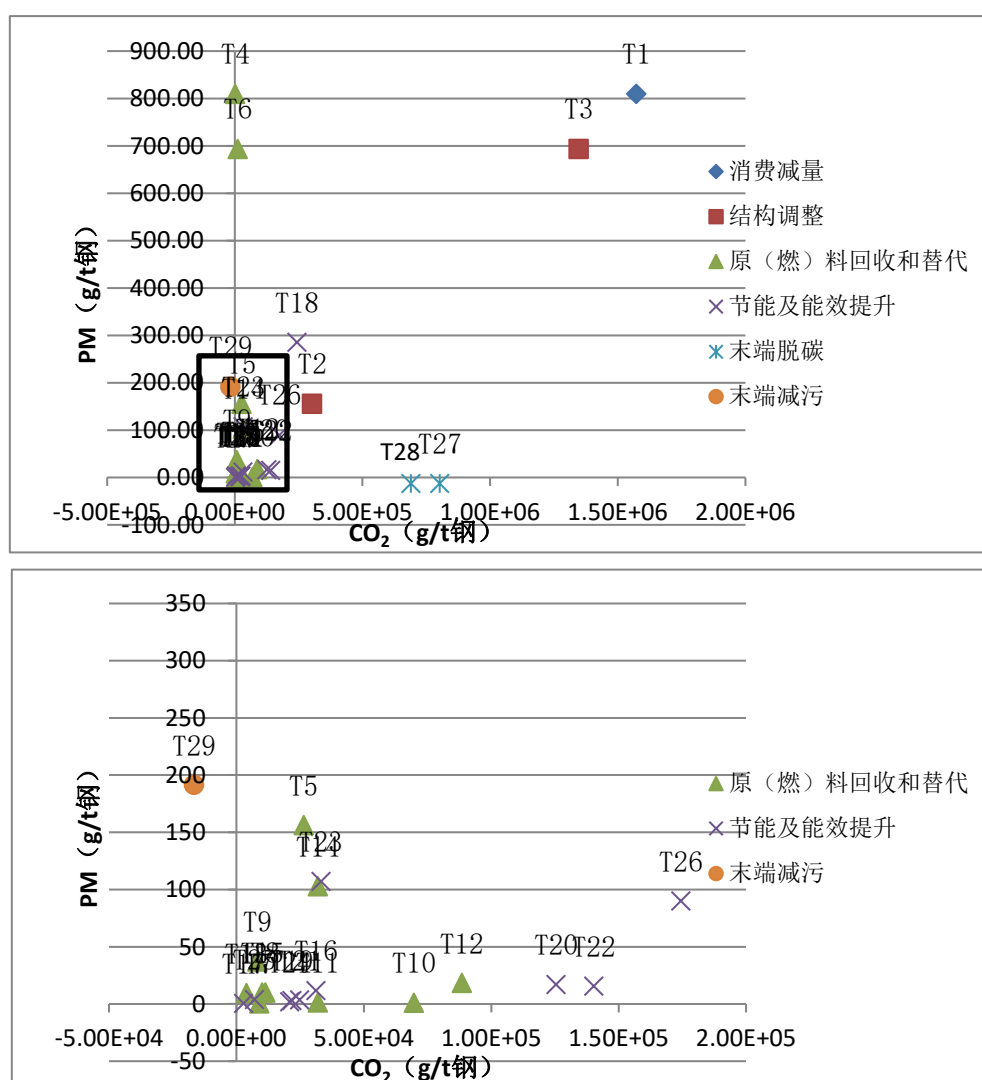


图 3-10 钢铁行业 CO₂ 与 PM 协同控制效应二维坐标系及局部放大图

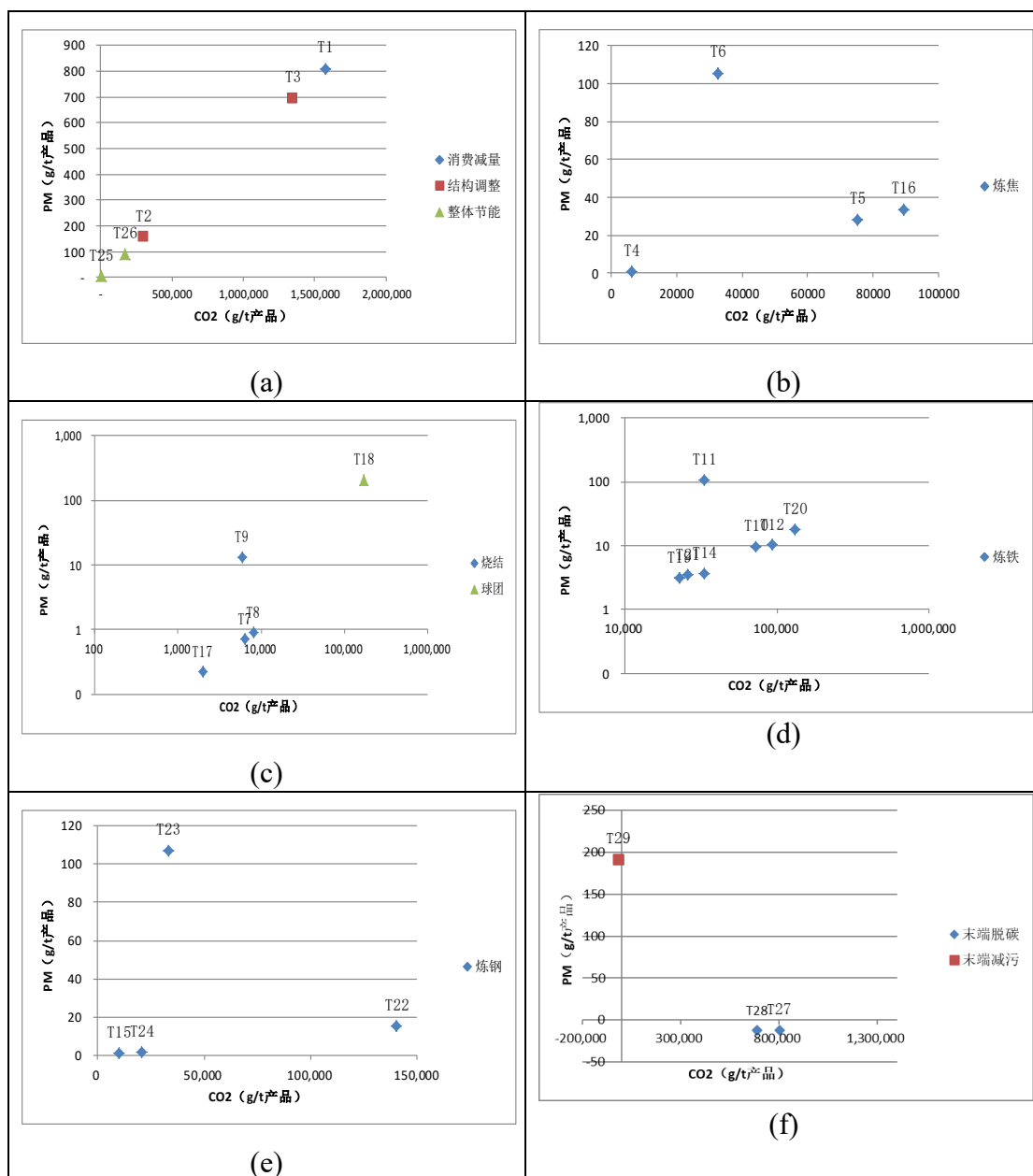


图 3-11 钢铁行业分环节 CO₂ 与 PM 协同控制效应二维坐标系

从图 3-11 分环节 CO₂ 和 PM 坐标系分布情况来看：

- 从（a）可知，消费减量型措施/技术的协同效益大于结构调整型措施/技术，结构调整型措施/技术优于整体节能型措施/技术。
- 从（b）可知，炼焦环节 4 项措施/技术中，“大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术（T16）”的协同减排效益最大。
- 从（c）可知，球团环节的“蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术（T18）”的协同效益大于烧结环节的措施/技术，烧结环节 4 项措施/技

术中“烧结废气余热循环利用工艺技术（T9）”的协同减排效益最大。

- 从（d）可知，炼铁环节的“基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术（T20）”的协同减排效益最大。
- 从（e）可知，炼钢环节的“冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术（T22）”的协同减排效益最大。
- 从（f）可知，“二氧化碳捕集与封存（CCS）（T27）”“二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）（T28）”位于第四象限，PM 增排，说明不具备协同减排 CO₂、NO_x 的能力。“超低排放改造（T29）”位于第二象限，CO₂ 增排，不具备协同减排 CO₂、PM 的能力。

3.3.2 协同效应系数

根据 2.2.2 节“协同效应系数”计算公式，分别计算 SO₂、NO_x 和 PM 相对于 CO₂ 的协同效应系数，结果见下表。

表 3-5 钢铁行业节能减排措施/技术协同效应系数表

类型	所处环节	技术名称	序号	R_{SO_2/CO_2}	R_{NO_x/CO_2}	R_{PM/CO_2}	R_{LAPs/CO_2}
消费减量	消费减量	减少不合理钢铁消费需求	T1	5.60E-04	6.68E-04	5.15E-04	4.11E-01
结构调整	结构调整	先进产能代替落后产能	T2	5.60E-04	6.68E-04	5.15E-04	4.11E-01
		增加短流程炼钢比例	T3	5.60E-04	6.68E-04	5.15E-04	4.11E-01
原（燃）料替代	炼焦	高温高压干熄焦	T4	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
		炼焦煤调湿风选技术	T5	1.04E-04	7.75E-04	3.73E-04	2.95E-01
		焦炉荒煤气显热回收利用技术	T6	1.27E-03	1.46E-03	3.23E-03	1.17E+00
	烧结	烧结余热发电技术	T7	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
		烧结余热能量回收驱动技术（SHRT 技术）	T8	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
		烧结废气余热循环利用工艺技术	T9	2.07E-03	2.65E-03	2.21E-03	1.61E+00
	炼铁	提高高炉入炉球团比	T10	3.19E-04	8.30E-05	1.34E-04	1.30E-01
	炼铁	高炉冲渣水直接换热回收余热技术	T11	1.27E-03	1.46E-03	3.23E-03	1.17E+00
	炼铁	燃气—蒸汽联合循环发电技术（CCPP）	T12	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
	炼铁	燃气轮机值班燃料替代技术	T13	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01

类型	所处环节	技术名称	序号	R_{SO_2/CO_2}	R_{NOx/CO_2}	R_{PM/CO_2}	R_{LAPs/CO_2}
	炼铁	煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT 技术）	T14	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
	炼钢	转炉煤气干法回收技术	T15	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
能效提升	炼焦	大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术	T16	1.04E-04	7.75E-04	3.73E-04	2.95E-01
	烧结	环冷机液密封技术	T17	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
	球团	蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术	T18	1.49E-03	6.08E-03	1.17E-03	2.29E+00
	炼铁	高炉鼓风除湿节能技术	T19	3.19E-04	8.30E-05	1.34E-04	1.30E-01
	炼铁	基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术	T20	3.19E-04	8.30E-05	1.34E-04	1.30E-01
	炼铁	旋切式高风温顶燃热风炉节能技术	T21	3.19E-04	8.30E-05	1.34E-04	1.30E-01
	炼钢	冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术	T22	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
	炼钢	钢水真空循环脱气工艺干式（机械）真空系统应用技术	T23	1.27E-03	1.46E-03	3.23E-03	1.17E+00
	炼钢	加热炉黑体强化辐射节能技术	T24	5.41E-04	2.09E-04	8.20E-05	2.22E-01
	整体节能	钢铁行业能源管控技术	T25	5.60E-04	6.68E-04	5.15E-04	4.11E-01
	整体节能	高辐射覆层技术	T26	5.60E-04	6.68E-04	5.15E-04	4.11E-01
末端脱碳	末端脱碳	二氧化碳捕集与封存（CCS）	T27	-7.55E-05	-6.68E-05	-1.51E-05	-4.21E-02
		二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）	T28	-8.78E-05	-7.78E-05	-1.76E-05	-4.90E-02
末端减污	末端减污	超低排放改造	T29	-1.20E-02	-1.99E-02	-1.15E-02	-1.04E+01

从 $R_{a/b}$ 正负来看，末端脱碳的“二氧化碳捕集与封存（CCS）（T27）”“二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）（T28）”和末端减污类措施中的“超低排放改造（T29）”的各项污染物协同效应系数为负值，说明 T27、T28、T29 为弱协同或非协同措施。其他 26 项措施/技术属于强协同措施/技术。

从 $R_{a/b}$ 值来看，“烧结废气余热循环利用工艺技术（T9）”“蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术（T18）”“焦炉荒煤气显热回收利用技术（T6）”“高炉

冲渣水直接换热回收余热技术（T11）”“钢水真空循环脱气工艺干式（机械）真空系统应用技术（T23）”的 $R_{a/b}$ 值相对较大，说明其具有较好的协同减排效应。

LAPs 和 CO₂ 协同效应来说， R_{LAPs/CO_2} 最大的技术为“蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术（T18）”，其次为“烧结废气余热循环利用工艺技术（T9）”，由于其对大气污染物减排效果明显。

3.3.3 污染物减排量交叉弹性分析

节能减排措施/技术污染物减排量交叉弹性分析的结果如下表所示：

表 3-6 钢铁行业节能减排措施/技术污染物减排量协同度结果汇总

类型	所处环节	技术名称	序号	EI _{SO2/CO2}	EI _{NOx/CO2}	EI _{SPM/CO2}	EI _{LAPs/CO2}
消费减量	消费减量	减少不合理钢铁消费需求	T1	1.06	1.06	1.06	1.06
结构调整	结构调整	先进产能代替落后产能	T2	1.06	1.06	1.06	1.06
		增加短流程炼钢比例	T3	1.06	1.06	1.06	1.06
原（燃） 料替代	炼焦	高温高压干熄焦	T4	25.83	0.70	0.90	1.41
		炼焦煤调湿风选技术	T5	4.89	1.12	3.03	1.35
		焦炉荒煤气显热回收利用技术	T6	59.55	2.10	26.21	5.37
	烧结	烧结余热发电技术	T7	1.30	0.21	0.15	0.35
		烧结余热能量回收驱动技术（SHRT 技术）	T8	1.30	0.21	0.15	0.35
		烧结废气余热循环利用工艺技术	T9	4.89	1.12	3.03	1.82
	炼铁	提高高炉入炉球团比	T10	7.18	1.64	4.46	4.25
	炼铁	高炉冲渣水直接换热回收余热技术	T11	28.62	28.85	106.90	38.24
	炼铁	燃气—蒸汽联合循环发电技术（CCPP）	T12	12.42	9.63	3.65	10.05
	炼铁	燃气轮机值班燃料替代技术	T13	12.42	9.63	3.65	10.05
	炼铁	煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT 技术）	T14	12.42	9.63	3.65	10.05
	炼钢	转炉煤气干法回收技术	T15	1.04	0.77	0.23	0.79
能效提升	炼焦	大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术	T16	4.89	1.12	3.03	1.35
	烧结	环冷机液密封技术	T17	1.30	0.21	0.15	0.35

类型	所处环节	技术名称	序号	EI _{SO₂/CO₂}	EI _{NO_x/CO₂}	EI _{SPM/CO₂}	EI _{SLAPs/CO₂}
	球团	蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术	T18	4.89	1.12	3.03	1.36
	炼铁	高炉鼓风除湿节能技术	T19	7.18	1.64	4.46	4.25
	炼铁	基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术	T20	7.18	1.64	4.46	4.25
	炼铁	旋切式高风温顶燃热风炉节能技术	T21	7.18	1.64	4.46	4.25
	炼钢	冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术	T22	1.04	0.77	0.23	0.79
	炼钢	钢水真空循环脱气工艺干式（机械）真空系统应用技术	T23	2.40	2.31	6.61	3.01
	炼钢	加热炉黑体强化辐射节能技术	T24	1.02	0.33	0.17	0.57
	整体节能	钢铁行业能源管控技术	T25	1.06	1.06	1.06	1.06
	整体节能	高辐射覆层技术	T26	1.06	1.06	1.06	1.06
末端脱碳	末端脱碳	二氧化碳捕集与封存（CCS）	T27	-0.14	-0.11	-0.03	-0.11
		二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）	T28	-0.17	-0.12	-0.04	-0.13
末端减污	末端减污	超低排放改造	T29	-22.56	-31.50	-23.63	-26.84

从 EI_{sa/b} 正负来看，末端脱碳的“二氧化碳捕集与封存（CCS）（T27）”“二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）（T28）”，末端减污类措施中的“超低排放改造（T29）”的各项污染物协同效应系数为负值，说明 T27、T28、T29 为弱协同或非协同措施/技术。其他 26 项措施属于强协同措施/技术。

从 EI_{sa/b} 值来看：

（1）“焦炉荒煤气显热回收利用技术（T6）”“高炉冲渣水直接换热回收余热技术（T11）”的 EI_{SO₂/CO₂} 相对较大，说明其具有较好的 SO₂ 与 CO₂ 协同减排效应。

（2）“高炉冲渣水直接换热回收余热技术（T11）”“燃气—蒸汽联合循环发电技术（CCPP）（T12）”、“燃气轮机值班燃料替代技术（T13）”、“煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT 技术）（T14）”的 EI_{NO_x/CO₂} 相对较大，说明其具有较好的 NO_x 与 CO₂ 协同减排效应。

(3)“焦炉荒煤气显热回收利用技术(T6)”“高炉冲渣水直接换热回收余热技术(T11)”的 Els_{PM/CO_2} 相对较大,说明其具有较好的 PM 与 CO_2 协同减排效应。

(4)从 LAPs 和 CO_2 协同效应来说, Els_{LAPs/CO_2} 最大的技术为“高炉冲渣水直接换热回收余热技术(T11)”,其次为“燃气-蒸汽联合循环发电技术(CCPP)(T12)”“燃气轮机值班燃料替代技术(T13)”“煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术(BPRT 技术)(T14)”,由于这 4 项措施/技术对大气污染物,尤其是 NO_x 、PM 减排效果明显。

3.3.4 单位污染物减排成本

各措施的单位污染物减排成本及优先度排序结果如下图所示。从各项措施成本-效果评价的结果来看,各措施对 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM 的单位减排成本区间分别为-1.57 元/kg~0.50 元/kg、-2842.93 元/kg~1853.46 元/kg、-5901.31 元/kg~5144.30 元/kg、-14214.64 元/kg~3176.56 元/kg。

从综合减排成本来看,单位 ER-eq 减排成本区间为-322.11 元/kg~631.07 元/kg。“高温高压干熄焦(T4)”成本最低,综合排序最为靠前,“炼焦煤调湿风选技术(T5)”次之。而“超低排放改造(T29)”的成本最高。

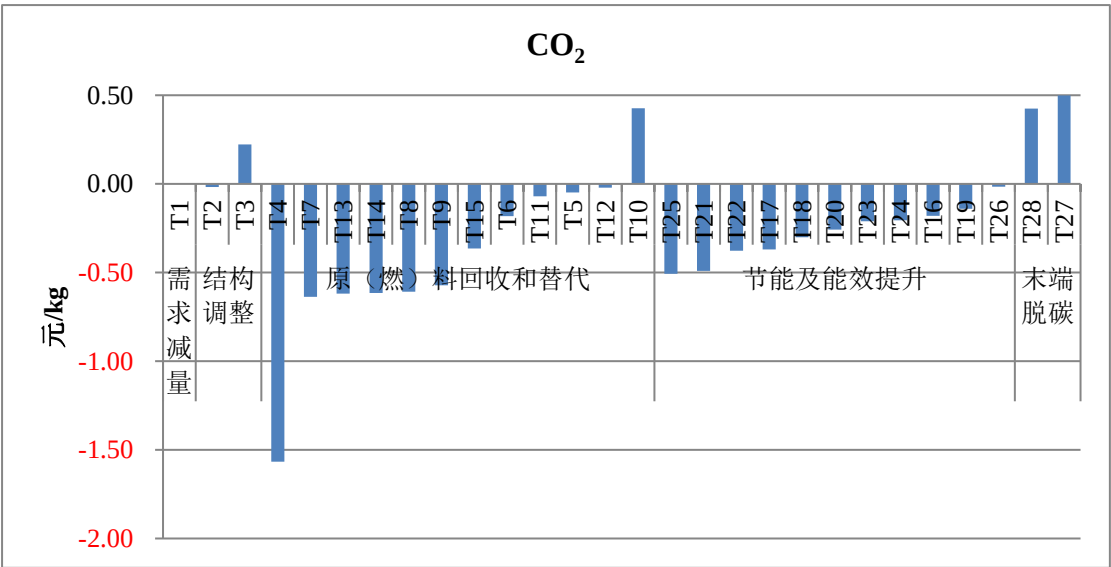


图 3-12 钢铁行业节能减排措施单位 CO₂ 减排成本及优先度排序

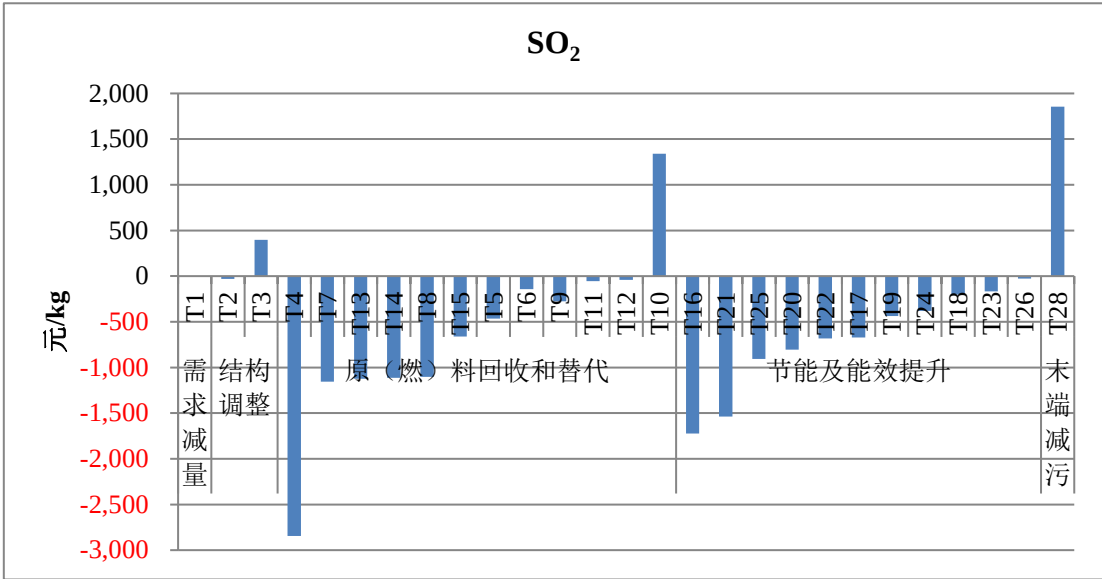


图 3-13 钢铁行业节能减排措施单位 SO₂ 减排成本及优先度排序

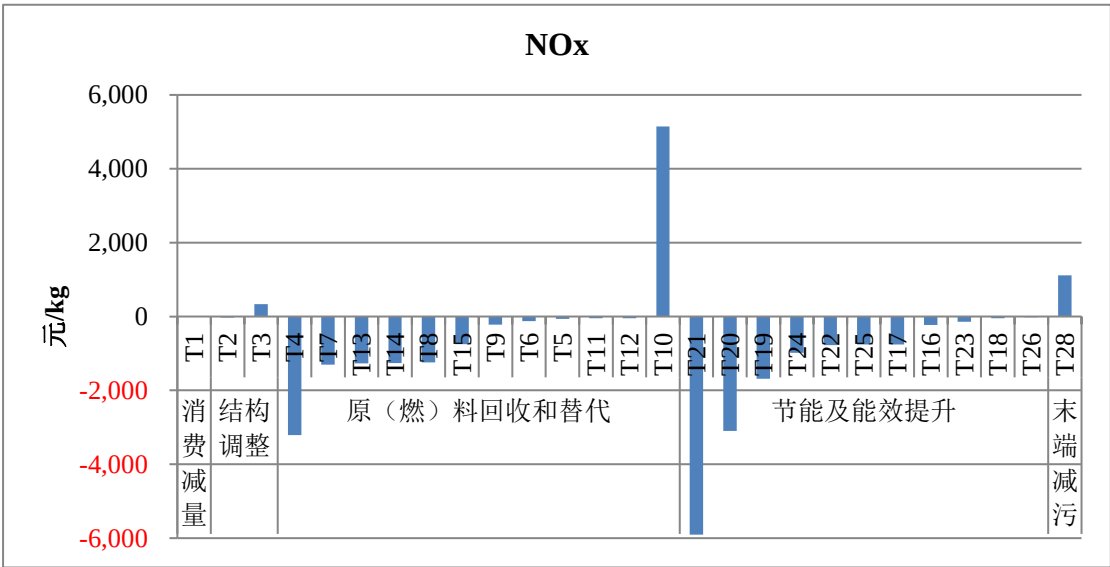


图 3-14 钢铁行业节能减排措施单位 NO_x 减排成本及优先度排序

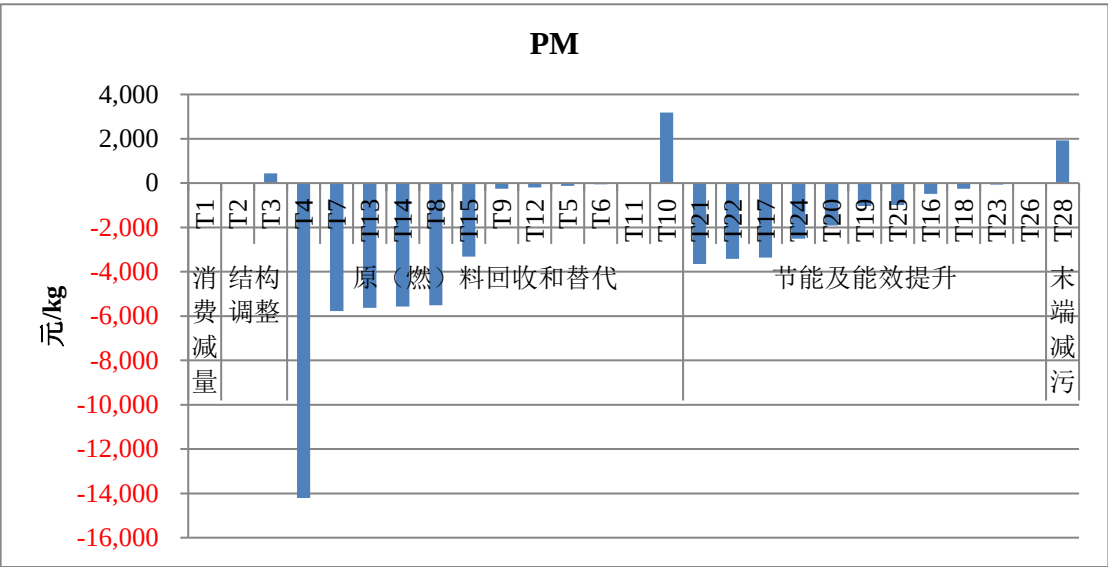


图 3-15 钢铁行业节能减排措施单位 PM 减排成本及优先度排序

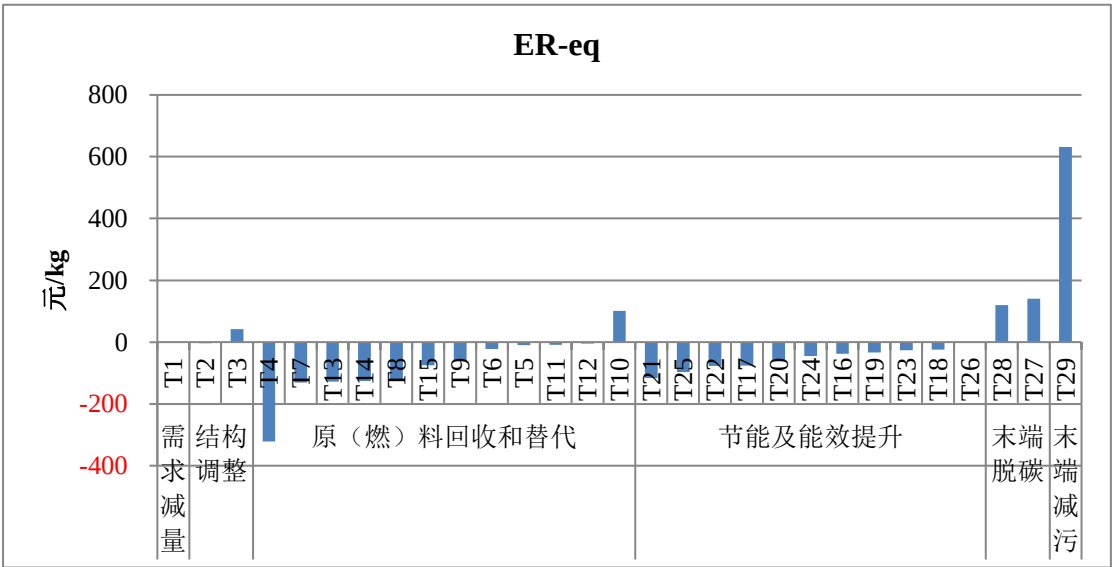


图 3-16 钢铁行业节能减排措施单位 ER-eq 减排成本及优先度排序

3.3.5 边际减排成本曲线（MAC）

根据节能减排措施的单位污染物减排成本的排序结果和减排总量，分别绘制针对 CO₂、SO₂、NO_x、PM 和 ER-eq 的单污染物边际减排成本（MAC）曲线示意图。

3.4.5.1 CO₂ 边际减排成本曲线

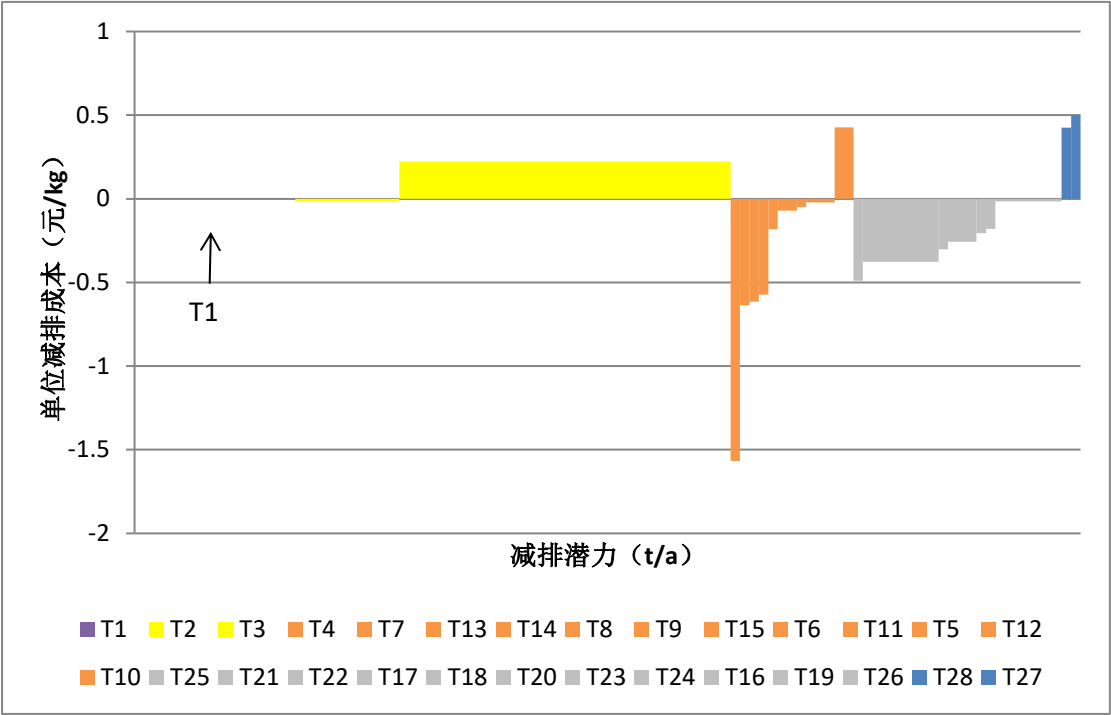


图 3-17 钢铁行业节能减排措施 CO₂ 单位(边际)减排成本曲线示意图

注：紫色为消费减量类；黄色为结构调整类；橘色为原（燃）料回收和替代类；灰色为节能及能效提升类；深蓝为末端脱碳类；浅绿为末端减污类。

除未计入“超低排放改造（T29）”增排 CO₂ 量以外，其他各措施（T1—T28）每年的 CO₂ 减排潜力约为 75,719.08 万 t/a，其总成本为 126.85 亿元/a（平均减排成本为 16.75 元/tCO₂）^①，其中，“增加短流程炼钢比例（T3）”“提高高炉入炉球团比（T10）”“二氧化碳捕集与封存（T27）”“二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）（T28）”的成本为正，分别为 610.5 亿元/a、44.34 亿元/a、27.1 亿元/a、19.84 亿元/a；其他 24 项措施/技术由于节能可带来收益，成本均为负值，共有-574.94 亿元/a。

各措施中 CO₂ 减排潜力最大的为“增加短流程炼钢比例（T3）”，其 CO₂ 减排潜力为 27,414.19 万 t/a；单位 CO₂ 减排成本最低的为“高温高压干熄焦（T4）”，其单位 CO₂ 减排成本为-1.57 元/kg。

^① 按 2018 年可比价格计。

3.4.5.2 SO₂ 边际减排成本曲线

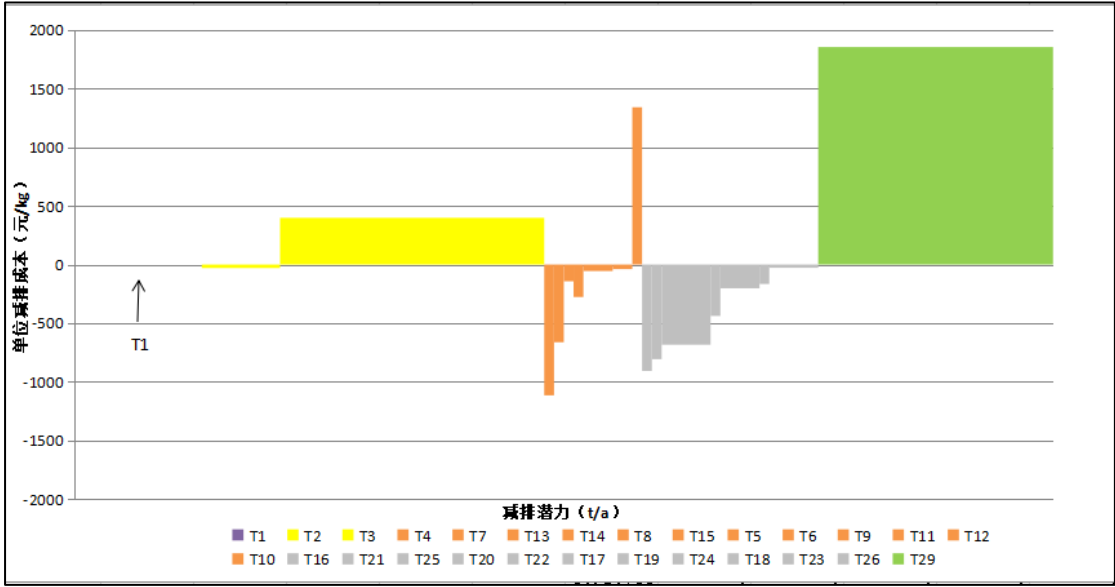


图 3-18 钢铁行业节能减排措施 SO₂ 单位(边际)减排成本曲线示意图

注：紫色为消费减量类；黄色为结构调整类；橘色为原（燃）料回收和替代类；灰色为节能及能效提升类；深蓝为末端脱碳类；浅绿为末端减污类。

除“二氧化碳捕集与封存(T27)”“二氧化碳捕集、利用和封存(CCUS-EOR)(T28)”增排 SO₂ 未计入外，其他各措施(T1—T26、T29)每年的 SO₂ 减排潜力约为 56.48 万 t/a，实现全部减排潜力的总成本为 2,538 亿元/a，其中，“增加短流程炼钢比例(T3)”“提高高炉入炉球团比(T10)”“超低排放改造(T29)”的成本为正，分别为 610.5 亿元/a、44.34 亿元/a、2,458.1 亿元/a；其他 24 项措施/技术由于节能可带来收益，成本均为负值，共有-574.94 亿元/a。

各措施中 SO₂ 减排潜力最大的为“增加短流程炼钢比例(T3)”，其 SO₂ 减排潜力为 15.34 万 t/a；单位 SO₂ 减排成本最低的为“高温高压干熄焦(T4)”，其单位 SO₂ 减排成本为-1,114.84 元/kg。

3.4.5.3 NO_x 边际减排成本曲线

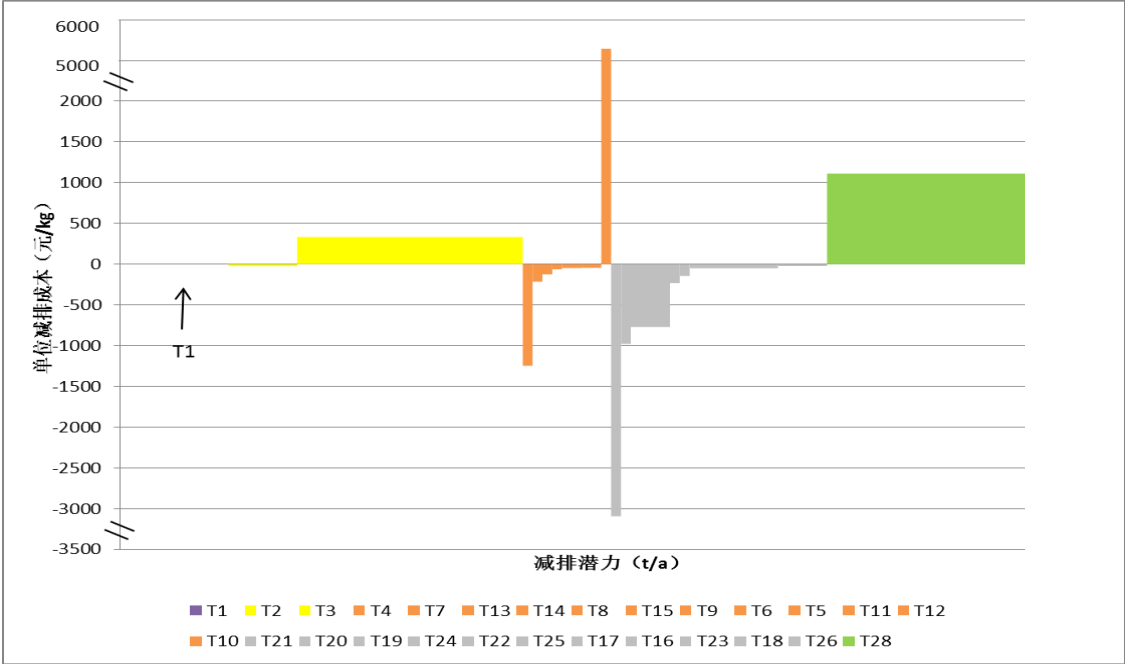


图 3-19 钢铁行业节能减排措施 NO_x 单位(边际)减排成本曲线示意图

注：紫色为消费减量类；黄色为结构调整类；橘色为原（燃）料回收和替代类；灰色为节能及能效提升类；深蓝为末端脱碳类；浅绿为末端减污类。

除“二氧化碳捕集与封存(T27)”增排 NO_x 未计入外，其他各措施(T1-T26、T28)的 NO_x 减排潜力约为 76.90 万 t/a，实现全部减排潜力的总成本为 2,538 亿元/a，其中，“增加短流程炼钢比例(T3)”“提高高炉入炉球团比(T10)”“超低排放改造(T29)”的成本为正，分别为 610.5 亿元/a、44.34 亿元/a、2458.1 亿元/a；其他 24 项措施由于节能可带来收益，成本均为负值，共有-574.94 亿元/a。

各措施中 NO_x 减排潜力最大的为“超低排放改造(T29)”，其 NO_x 减排潜力为 22.09 万 t/a；单位 NO_x 减排成本最低的为“旋切式高风温顶燃热风炉节能技术(T21)”，其单位 NO_x 减排成本为-5,901.31 元/kg。

3.4.5.4 PM 边际减排成本曲线

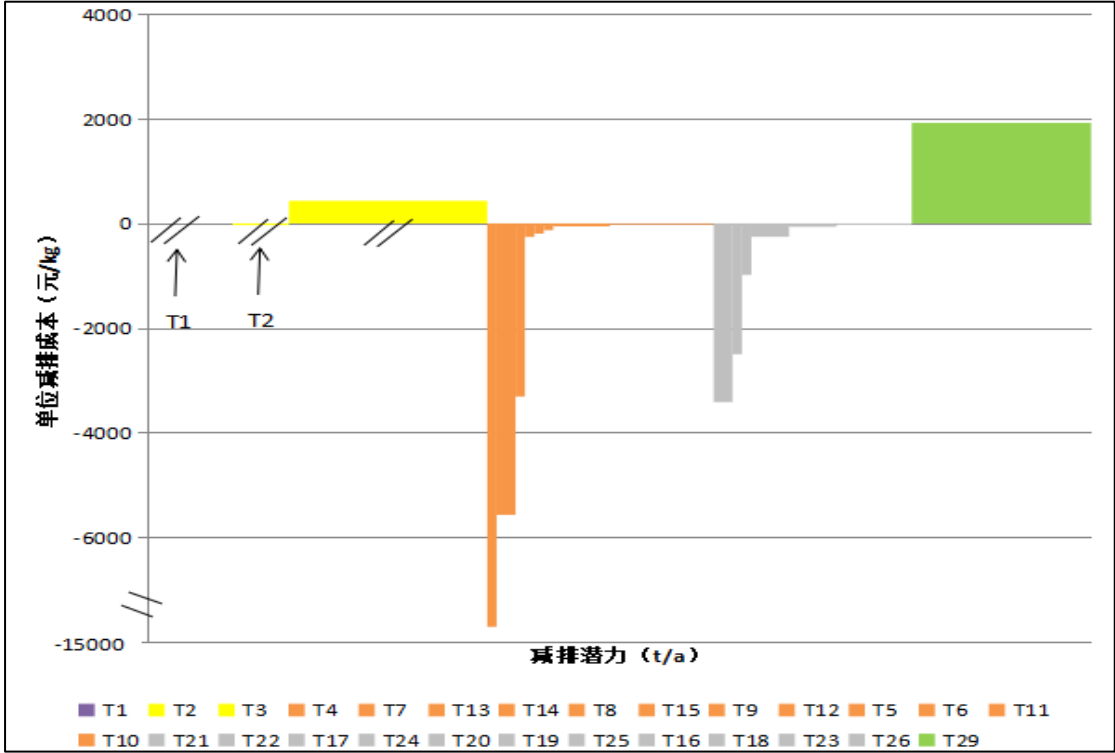


图 3-20 钢铁行业节能减排措施 PM 单位(边际)减排成本曲线示意图

注：紫色为消费减量类；黄色为结构调整类；橘色为原（燃）料回收和替代类；灰色为节能及能效提升类；深蓝为末端脱碳类；浅绿为末端减污类。

除“二氧化碳捕集与封存（T27）”增排 PM 未计入外，其他各措施（T1-T26、T28）每年的 PM 减排潜力约为 52.44 万 t/a，实现全部减排潜力的总成本为 2,538 亿元/a，其中，“增加短流程炼钢比例（T3）”“提高高炉入炉球团比（T10）”“超低排放改造（T29）”的成本为正，分别为 610.5 亿元/a、44.34 亿元/a、2,458.1 亿元/a；其他 24 项措施由于节能可带来收益，成本均为负值，共有-574.94 亿元/a。

各措施中 PM 减排潜力最大的为“增加短流程炼钢比例（T3）”，其 PM 减排潜力为 14.12 万 t/a。

3.4.5.5 ER-eq 边际减排成本曲线

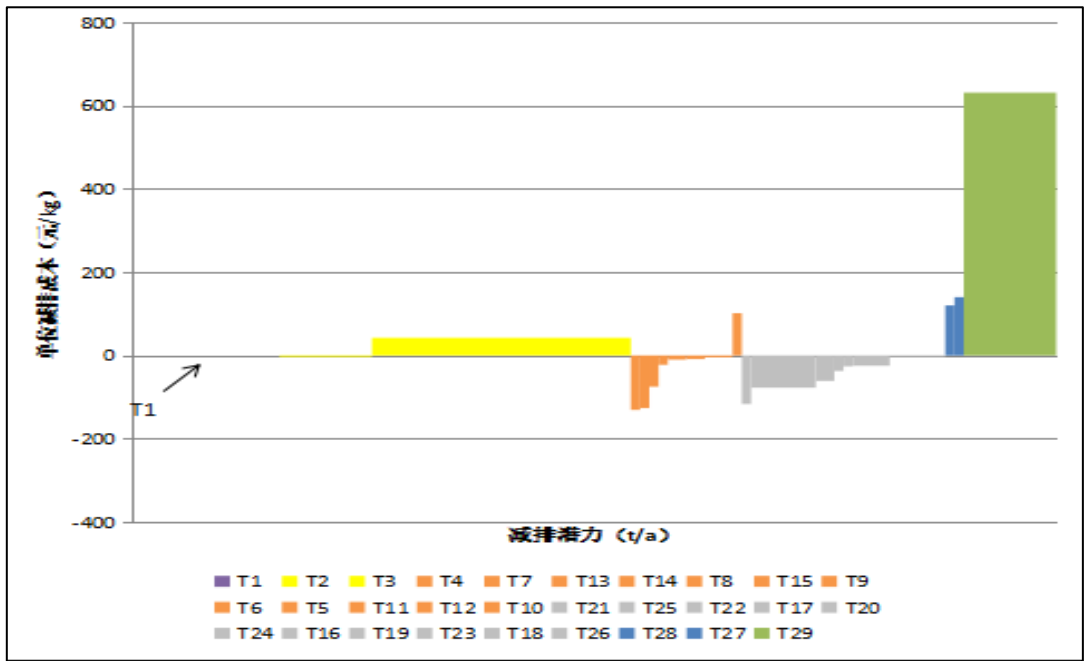


图 3-21 钢铁行业节能减排措施 ER-eq 单位(边际)减排成本曲线示意图

注：紫色为消费减量类；黄色为结构调整类；橘色为原（燃）料回收和替代类；灰色为节能及能效提升类；深蓝为末端脱碳类；浅绿为末端减污类。

各措施（T1-T29）每年的 ER-eq 减排潜力约为 441.91 万 t/a，实现全部减排潜力的总成本为 2,584.95 亿元/a，其中，“增加短流程炼钢比例（T3）”“提高高炉入炉球团比（T10）”“二氧化碳捕集与封存（CCS）（T27）”“二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS-EOR）（T28）”“超低排放改造（T29）”的成本为正，分别为 610.5 亿元/a、44.34 亿元/a、27.1 亿元/a、19.84 亿元/a、2,458.1 亿元/a；其他 24 项措施由于节能可带来收益，成本均为负值，共有-574.94 亿元/a。

各措施中 ER-eq 减排潜力最大的为“增加短流程炼钢比例（T3）”，其 ER-eq 减排潜力为 143.87 万 t/a；单位 ER-eq 减排成本最低的为“高温高压干熄焦（T4）”，其单位 ER-eq 减排成本为-322.11 元/kg。

3.3.6 钢铁行业协同控制措施/技术直接减排效果小结

钢铁行业 2015 年 CO₂ 和大气污染物的直接排放量与 2025 年预测的直接排放量见下图。

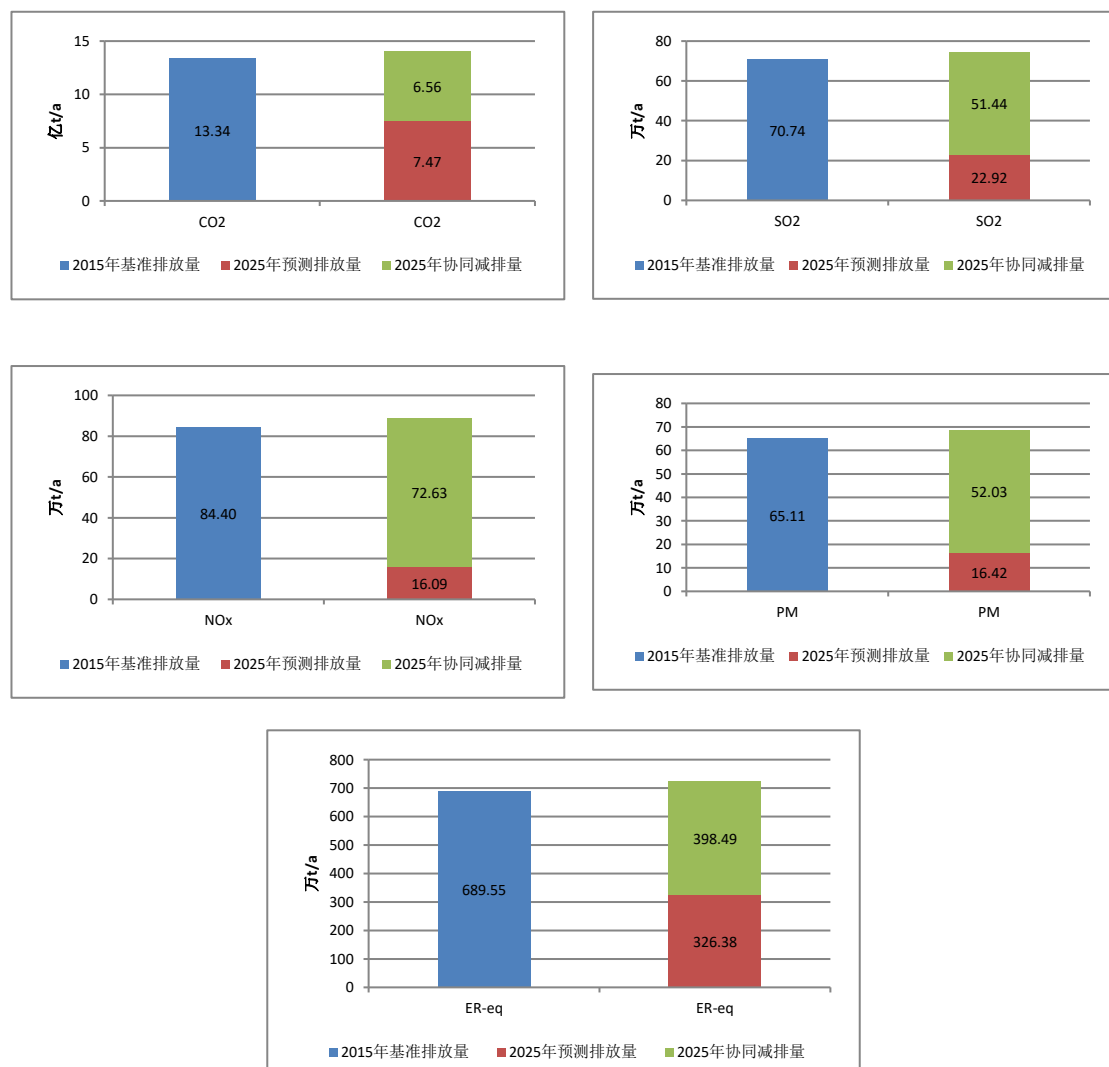


图 3-22 钢铁行业 2015 年排放量、2025 年协同减排量、2025 年预测排放量

注：这里的“协同减排量”指“直接减排量”，未涵盖因节电等带来的“间接减排”；当“减排量”为“负值”时，表示事实上的“增排”。

可以看出，2015 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 的直接排放量分别为 13.34 亿吨/a、70.74 万吨/a、84.40 万吨/a、65.11 万吨/a、689.55 万吨/a。根据预测 2025 年钢铁产量（8.45 亿吨）和 2015 年钢铁行业排放系数，估算 2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 的基线直接排放量分别为 14.03 亿吨/a、74.36 万吨/a、88.72 万吨/a、68.44 万吨/a、724.87 万吨/a。29 项措施/技术 2025 年的 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 直接协同减排潜力分别为 6.56 亿吨/a、51.44 万吨/a、72.63 万吨/a、

53.03 万吨/a、398.49 万吨/a。在采取系列协同控制措施/技术后，即减去直接协同减排潜力后，2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 预测直接排放量分别为 7.47 亿吨/a、22.92 万吨/a、16.09 万吨/a、16.42 万吨/a、326.38 万吨/a。

2025 年 29 项措施/技术分类型的 ER-eq 直接协同减排潜力见下图，消费减量的 ER-eq 直接协同减排潜力为 69.74 万 t/a，结构调整 186.98 万 t/a，原（燃）料回收和替代为 27.14t/a，节能与能效提升为 65.55 万 t/a、末端脱碳为 4.31 万 t/a，末端减污为 38.95 万 t/a。

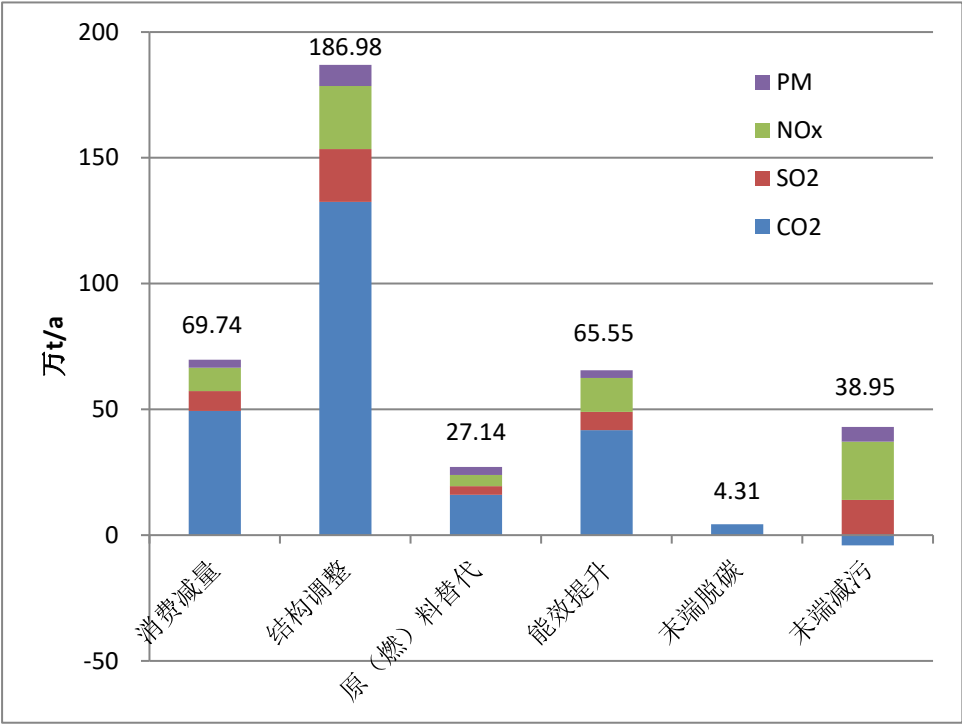


图 3-23 钢铁行业 2025 年分措施/技术类型的 ER-eq 直接协同减排潜力

2025 年分措施类型的 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 直接协同减排潜力见下图：

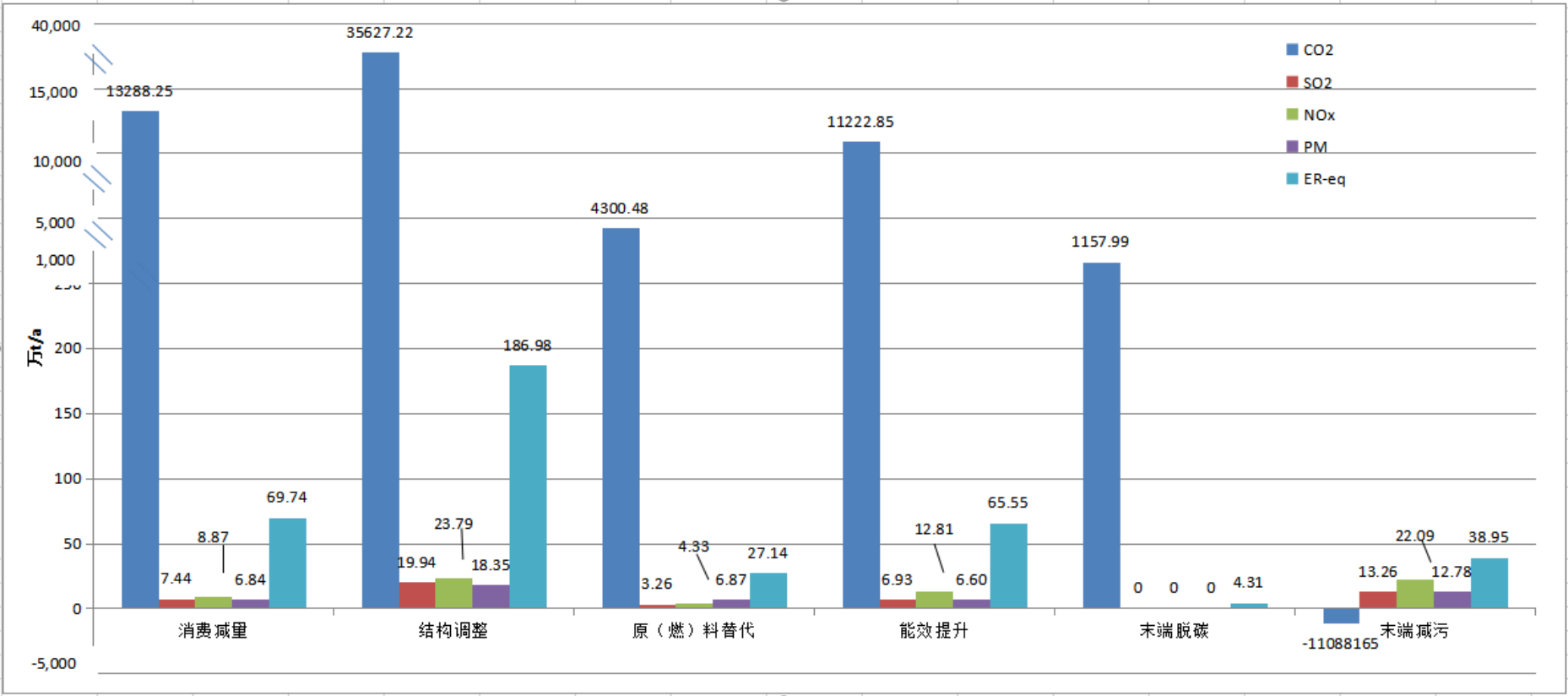


图 3-24 钢铁行业 2025 年分措施类型 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 直接协同减排潜力

4 水泥行业深度脱碳的协同效果评价

4.1 水泥行业概况

(1) 水泥行业产量、产能

水泥工业是我国国民经济发展的重要基础原材料工业。2011 年以来在经济放缓大背景下，需求增速总体放缓。2014 年水泥生产达到 24.8 亿 t 的高峰。2015 年首次出现 5% 的负增长。此后，在去产能行动的影响下，水泥产量继续受到抑制，但年产量仍保持在 22 亿 t 以上。

截至 2018 年底，全行业共有水泥企业 3,336 家，其中只生产熟料的企业 46 家，生产熟料和水泥企业 1,234 家，水泥粉磨站企业 2,056 家。全国熟料设计产能 18.2 亿 t，实际产能 20.2 亿 t，水泥产能约 38.0 亿 t。^①

近年来，水泥窑协同处置取得突破进展，协同处置生产线稳步推进。截止 2018 年底，全国已建成水泥窑协同处置线近 150 条，其中生活垃圾处置线 51 条、年处置能力约 578 万 t；污泥处置线 45 条、年处置能力约 325 万 t；具有水泥窑协同处置危废资质的企业 52 家，核准年处置能力约 341 万 t。协同处置生产线合计约占全部新型干法水泥生产线的 10%。^②

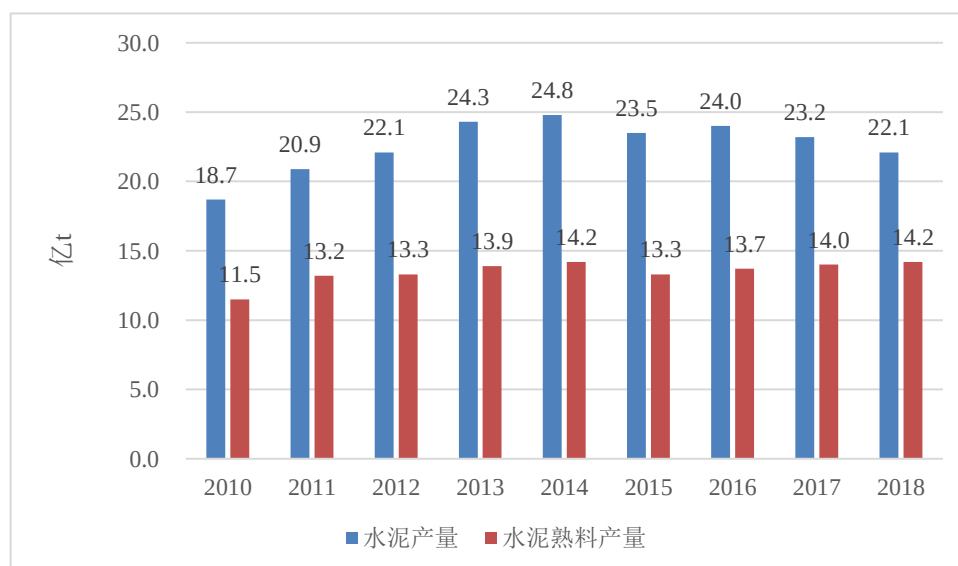


图 4-1 2010 年以来全国水泥与水泥熟料产量变化图

数据来源：中国水泥协会

^①煤控研究项目水泥课题组.水泥行业“十三五”煤控中期评估及后期展望[R]. 2019.05.

^② 中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目水泥课题组. 水泥行业“十三五”煤控中期评估及后期展望[R] 2019.06

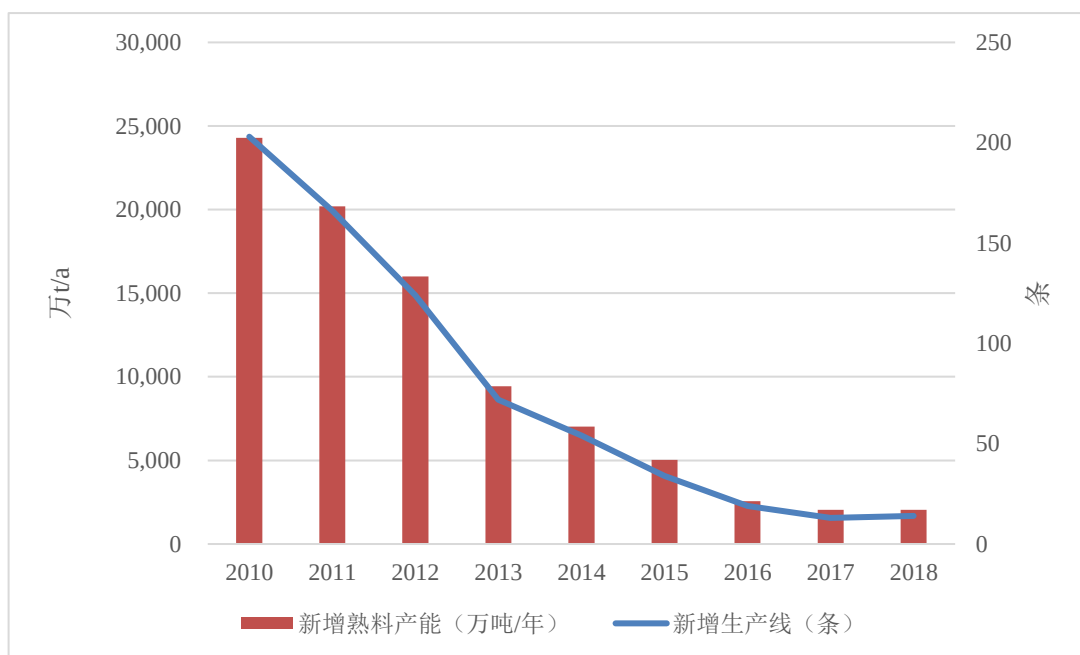


图 4-2 2010 年以来全国水泥熟料新增产能和新增生产线数^①

（2）能源消耗、CO₂ 排放和大气污染排放状况

“十二五”期间，通过加快推广粉磨新技术、高能效烧成系统技术、大型高效袋式除尘技术等，全国水泥生产平均可比熟料综合能耗小于 114 kgce/t，水泥综合能耗小于 93 kgce/t。大型水泥熟料生产线安装脱硫脱硝综合治理设施和大型高效袋式除尘设施等，主要污染物排放浓度及强度明显下降，脱硝水泥熟料产能占比达 90% 以上。余热利用水平进一步提高，水泥余热发电普及率达 80% 以上，吨熟料余热发电量进一步提高^②。

“十三五”以来，中国水泥工业能耗继续呈逐年下降趋势，煤炭消耗总量从 2016 年的 1.71 亿 tce 下降到 2018 年的 1.56 亿 tce。

表 4-1 水泥工业“十三五”以来能耗统计表

年份	2016	2017	2018
煤耗（亿吨标准煤）	1.71	1.57	1.56
电耗（亿千瓦时）	2,020	1,950	1,860

数据来源：中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目水泥课题组，《水泥行业“十三五”煤控中期评估及后期展望》。

^①煤控研究项目水泥课题组.水泥行业“十三五”煤控中期评估及后期展望[R]. 2019.05.

^②中国水泥协会.《水泥工业“十三五”发展规划》（中水协字[2017]49 号）

2017 年，中国和世界水泥工业 CO₂ 排放情况见下表。

表 4-2 2017 年中国和世界水泥工业 CO₂ 排放情况表

指标	世界所有国家(含中国)	中国
水泥产量（亿 t）	41.77	24
CO ₂ 排放量（亿 t CO ₂ ）	24.6	12
吨水泥 CO ₂ 排放（t CO ₂ /t）	0.589	0.500
吨水泥 CO ₂ 直接排放（工艺加燃煤）（t CO ₂ /t）	0.529	0.450
吨水泥 CO ₂ 间接排放（电耗）（t CO ₂ /t）	0.060	0.050
CO ₂ 直接排放总量（亿 t CO ₂ /a）	22.1	10.8
CO ₂ 间接排放总量（亿 t CO ₂ /a）	2.50	1.20

数据来源：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》[J].水泥,2019(1):4-8.

表 4-3 2012-2017 年中国水泥行业污染物的排放量

污染物种类	单位	2012	2013	2014	2015	2016	2017
氮氧化物（NO _x ）	万吨	222	196.9	191.7	170.6	139	128
二氧化硫（SO ₂ ）	万吨	35	38	47	41	17.3	17
颗粒物（PM）	万吨	61.7	64.9	95.8	83.6	36.8	35

数据来源：中国煤炭消费总量控制方案和政策研究项目水泥课题组. 水泥行业“十三五”煤控中期评估及后期展望[R] 2019.05.

4.2 水泥行业深度脱碳措施初步筛选

4.2.1 措施筛选

根据《重塑能源：面向 2050 年能源消费和生产革命路线图.中国.工业卷》、《国家重点节能低碳技术推广目录》、相关行业规划等资料，行业协会专家访谈调研，筛选出了 24 项水泥行业节能减排措施/技术，见表 4-4。

表 4-4 水泥行业节能减排措施/技术筛选

类别	环节	技术名称	编号
消费减量	消费减量	水泥消费减量	CT1
结构调整	结构调整	压减和置换水泥熟料产能	CT2
		水泥企业错峰生产	CT3
原（燃）料回收与替代	原（燃）料回收与替代	工业废渣替代技术	CT4
		水泥窑协同处置城市生活垃圾技术	CT5
		水泥窑协同处置危险废物技术	CT6
		水泥窑协同处置污泥技术	CT7
		低温预热发电技术	CT8
节能与能效提升	原料预热分解与水泥熟料烧成	高效水泥预热分解技术	CT9
		大力多通道燃烧节能技术	CT10
		高效低氮燃烧器	CT11
		富氧燃烧技术	CT12
		第四代温流行进式水泥熟料冷却技术	CT13
		水泥窑新型耐火材料成套技术	CT14
	生料与水泥粉磨	辊压机终粉磨系统（生料）	CT15
		辊压机半终粉磨系统（水泥）	CT16
		外循环生料立磨技术	CT17
	能源管理优化	新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统技术	CT18
		水泥企业可视化能源管理系统	CT19
末端脱碳	末端脱碳	水泥碳捕集、利用与封存（CCUS）	CT20
		水泥碳捕集与封存（CCS）	CT21
末端减污	末端减污（超低排放）	选择性催化还原技术（SCR）	CT22
		湿法脱硫技术	CT23
		高效布袋除尘技术	CT24

4.2.2 措施属性汇总

各项技术措施的 **2015 年、2020 年** 市场占比数据来自《重塑能源：面向 2050 年能源消费和生产革命路线图.中国.工业卷》、《国家重点节能低碳技术推广目录》（2015-2018）、《水泥行业“十三五”煤控中期评估及后期展望》、《水泥行业大气污染物与温室气体协同控制研究》（生态环境部经济政策研究中心）、相关规划、文献等，**2025 年市场占比数据为参考 2015-2020 年的推广比例变化情况，估算而来。**

根据项目组实地调研所收集的数据资料，结合国内外措施/技术的典型应用、统计数据、相关学术研究成果等资料，可计算出 2025 年各项措施/技术的减排潜力，详见表 4-5。

表 4-5 水泥行业各节能减排措施/技术减排潜力表

类型	措施/技术名称	序号	直接减排潜力 2025(t/a)					间接减排潜力 2025(t/a)					减排潜力 2025(t/a)				
			CO ₂	SO ₂	NO _x	PM	ER-eq	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM	ER-eq	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM	ER-eq
需求 减量	水泥消费减量	CT1	110037755	40918	170834	83552	670563	6001707	3308	2930	662	29196	116039463	44226	173764	84213	699759
结构 调整	压减和置换水泥熟料产能	CT2	28802972	30972	129309	41545	294920	4542790	2504	2218	501	22099	33345762	33476	131526	42046	317019
	水泥企业错峰生产	CT3	176422808	65603	273897	87999	1054028	9622498	5304	4698	1061	46810	186045306	70907	278594	89060	1100838
原 (燃) 料 替代	工业废渣替代技术	CT4	2200715	818	3416	1098	13148	-16458	-9	-8	-2	-80	2184257	809	3408	1096	13068
	水泥窑协同处置城市生活垃圾技术	CT5	1370338	1473	6152	1976	14031	-271475	-150	-133	-30	-1321	1098863	1324	6019	1947	12710
	水泥窑协同处置危险废物技术	CT6	1548271	1664	6945	2231	15845	-254508	-140	-124	-28	-1238	1293763	1523	6821	2203	14607
	水泥窑协同处置污泥技术	CT7	1327645	1426	5953	1913	13584	-488655	-269	-239	-54	-2377	838989	1157	5715	1859	11207
	低温预热发电技术	CT8	0	0	0	0	0	8398764	4629	4100	926	40857	8398764	4629	4100	926	40857
原料 预热 分解 与水 泥熟 料烧	高效水泥预热分解技术	CT9	4420198	4753	19844	5919	45050	763524	421	373	84	3714	5183722	5174	20217	6004	48764
	大力多通道燃烧节能技术	CT10	5304238	5704	23813	7103	54060	0	0	0	0	0	5304238	5704	23813	7103	54060
	高效低氮燃烧器	CT11	2449526	2634	10997	3280	24965	0	0	0	0	0	2449526	2634	10997	3280	24965
	富氧燃烧技术	CT12	4017223	4320	18035	5380	40943	931160	513	455	103	4530	4948383	4833	18490	5482	45473

类型	措施/技术名称	序号	直接减排潜力 2025(t/a)					间接减排潜力 2025(t/a)					减排潜力 2025(t/a)				
			CO ₂	SO ₂	NO _x	PM	ER-eq	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM	ER-eq	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM	ER-eq
成	第四代温流行进式水泥熟料冷却技术	CT13	3889774	4183	17463	5209	39644	509016	281	248	56	2476	4398790	4463	17711	5265	42120
	水泥窑新型耐火材料成套技术	CT14	2946799	3169	13229	3946	30033	678688	374	331	75	3302	3625487	3543	13561	4021	33335
生料与水泥粉磨	辊压机终粉磨系统（生料）	CT15	0	0	0	0	0	6745735	3718	3293	744	32816	6745735	3718	3293	744	32816
	辊压机半终粉磨系统（水泥）	CT16	0	0	0	0	0	8097172	4463	3953	893	39390	8097172	4463	3953	893	39390
	外循环生料立磨技术	CT17	0	0	0	0	0	593852	327	290	65	2889	593852	327	290	65	2889
能源管理优化	新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统技术	CT18	6285466	6759	28218	9066	64358	991353	546	484	109	4823	7276819	7305	28702	9175	69181
	水泥企业可视化能源管理系统	CT19	0	0	0	0	0	1397249	770	682	154	6797	1397249	770	682	154	6797
末端脱碳	水泥碳捕集、利用与封存（CCUS）	CT20	357220	36	88	21	1469	-3979	-2	-2	-0	-19	353241	34	86	21	1449
	水泥碳捕集与封存（CCS）	CT21	178610	18	44	11	734	-1989	-1	-1	-0	-10	176620	17	43	10	725
末端减污（超低排放）	选择性催化还原技术（SCR）	CT22	0	0	921840	0	970358	-702442	-387	-343	-77	-3417	-702442	-387	921497	-77	966941
	湿法脱硫技术	CT23	-223860	217554	0	0	228172	-250266	-138	-122	-28	-1217	-474126	217416	-122	-28	226954
	高效布袋除尘技术	CT24	0	0	0	20842	9560	135738	75	66	15	660	135738	75	66	20857	10221

注：负数代表对应大气污染物或 CO₂ 的增排。

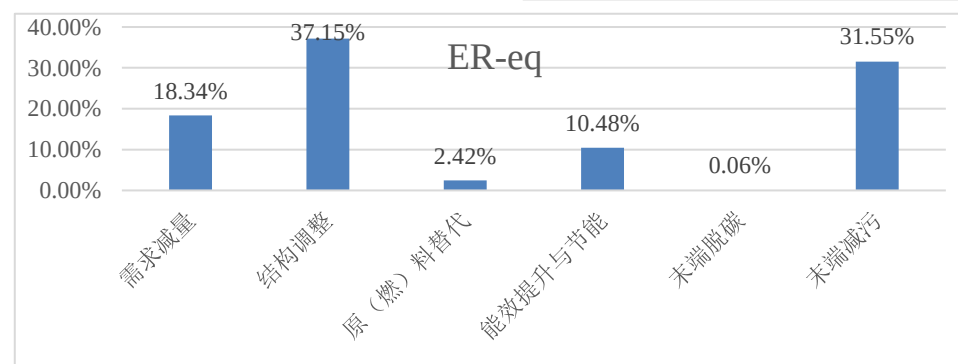
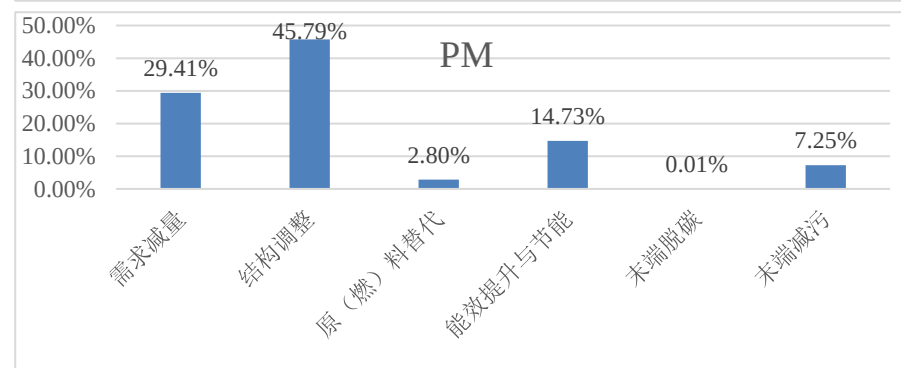
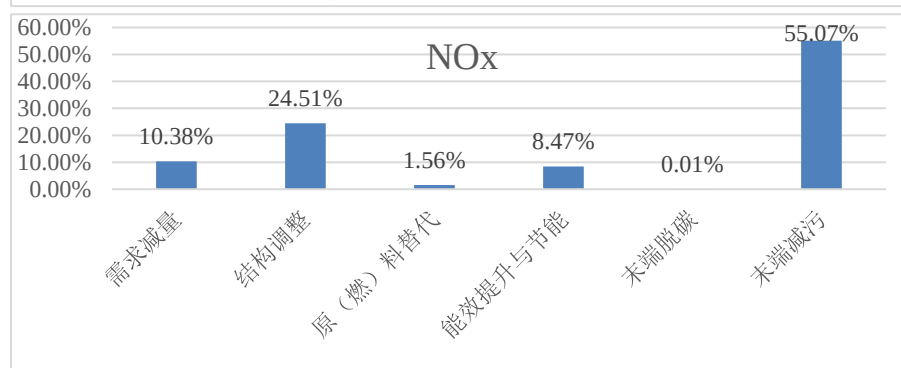
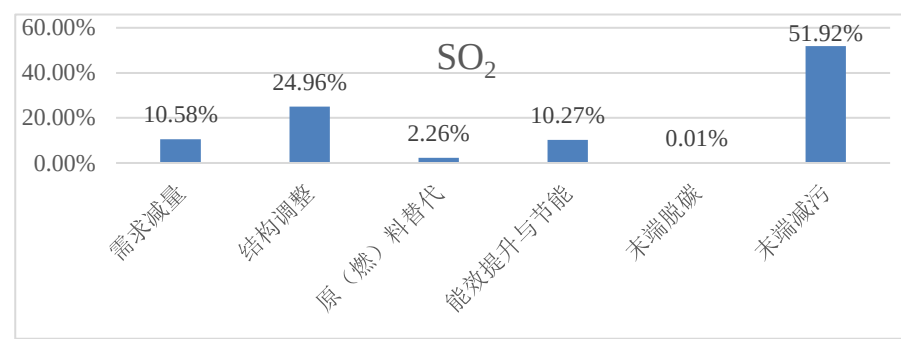
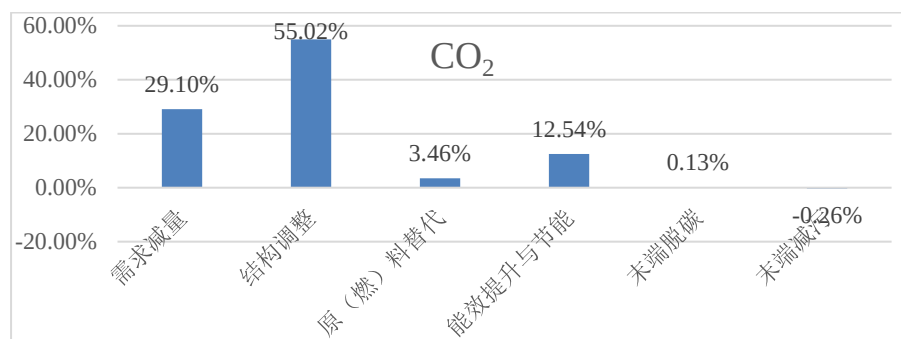


图 4-3 水泥行业各类节能减排措施/技术的减排潜力占比

图 4-3 为各措施/技术的减排潜力占比，可知：

- CO₂ 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 55.02%；其次为需求减量型措施/技术，占 29.10%；第三为能效提升与节能型措施/技术，占 12.54%；末端减污型措施/技术减排潜力为负值，即增排 CO₂。

- SO₂ 减排潜力最大的是末端减污型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 51.92%；其次为结构调整型措施/技术，占 24.96%；第三为需求减量型措施/技术，占 14.73%。

- NO_x 减排潜力最大的是末端减污型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 55.07%；其次为结构调整型措施/技术，占 24.51%；第三为需求减量型措施/技术，占 10.38%。

- PM 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 45.79%；其次为需求减量措施/技术，占 29.41%；第三为能效提升与节能型措施/技术，占 14.73%。

- ER-eq 减排潜力最大的是结构调整型措施/技术，其减排潜力占总潜力的 37.15%；其次为末端减污型措施/技术，占 31.55%；第三为需求减量型措施/技术，占 18.34%。

表 4-6 展示了各措施/技术实行的成本数据，其中水泥窑协同处置城市生活垃圾技术（CT5）、水泥窑协同处置污泥技术（CT7）、水泥碳捕集与封存（CCS）（CT21）、选择性催化还原技术（SCR）（CT22）、湿法脱硫技术（CT23）、高效布袋除尘技术（CT24）五项措施/技术实现综合减排潜力成本为正值；其他各项措施（除 CT1 和 CT3）成本均为负值，即产生经济效益。

选择性催化还原技术（SCR）（CT22）实现综合减排潜力成本最大，为 86.65 亿元；压减和置换水泥熟料产能（CT2）实现综合减排潜力成本最小，即产生经济效益最大，为 112.48 亿元。

表 4-6 各措施/技术实现综合减排潜力成本表

分类	技术名称	技术编号	实现减排潜力成本（万元/a）
需求减量	水泥消费减量	CT1	0.00
结构调整	压减和置换水泥熟料产能	CT2	-1124760.00
	水泥企业错峰生产	CT3	0.00
原（燃）料替代	工业废渣替代技术	CT4	-17889.04
	水泥窑协同处置城市生活垃圾技术	CT5	25651.20
	水泥窑协同处置危险废物技术	CT6	-55444.00
	水泥窑协同处置污泥技术	CT7	234788.64
	低温预热发电技术	CT8	-616029.60
原料预热分解与水泥熟料烧成	高效水泥预热分解技术	CT9	-74548.80
	大力多通道燃烧节能技术	CT10	-160320.00
	高效低氮燃烧器	CT11	-40213.60
	富氧燃烧技术	CT12	-152998.72
	第四代温流行进式水泥熟料冷却技术	CT13	-56913.60
	水泥窑新型耐火材料成套技术	CT14	-146960.00
生料与水泥粉磨	辊压机终粉磨系统（生料）	CT15	-367934.40
	辊压机半终粉磨系统（水泥）	CT16	-468936.00
	外循环生料立磨技术	CT17	-32331.20
能源管理优化	新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统技术	CT18	-171034.72
	水泥企业可视化能源管理系统	CT19	-133600.00
末端脱碳	水泥碳捕集、利用与封存（CCUS）	CT20	-3553.76
	水泥碳捕集与封存（CCS）	CT21	4342.00
末端减污（超低排放）	选择性催化还原技术（SCR）	CT22	866529.60
	湿法脱硫技术	CT23	413826.00
	高效布袋除尘技术	CT24	29124.80

4.3 水泥行业深度脱碳措施/技术的协同效果评估

4.3.1 协同控制效应坐标系

节能减排措施/技术的协同控制效应二维坐标系如下图所示：

4.3.1.1 CO₂-SO₂ 二维坐标图：

多数措施位于第一象限，说明这些措施/技术可以同时减排 CO₂ 与 SO₂。其中，“水泥消费减量（CT1）”的协同减排效应最优，其次为“水泥企业错峰生产（CT3）”“压减和置换水泥熟料产能（CT2）”。

“选择性催化还原技术（SCR）（CT22）”位于第三象限，说明该措施/技术同时增排 CO₂ 与 SO₂。

“湿法脱硫（CT23）”位于第二象限，说明该措施增排 CO₂，减排 SO₂。

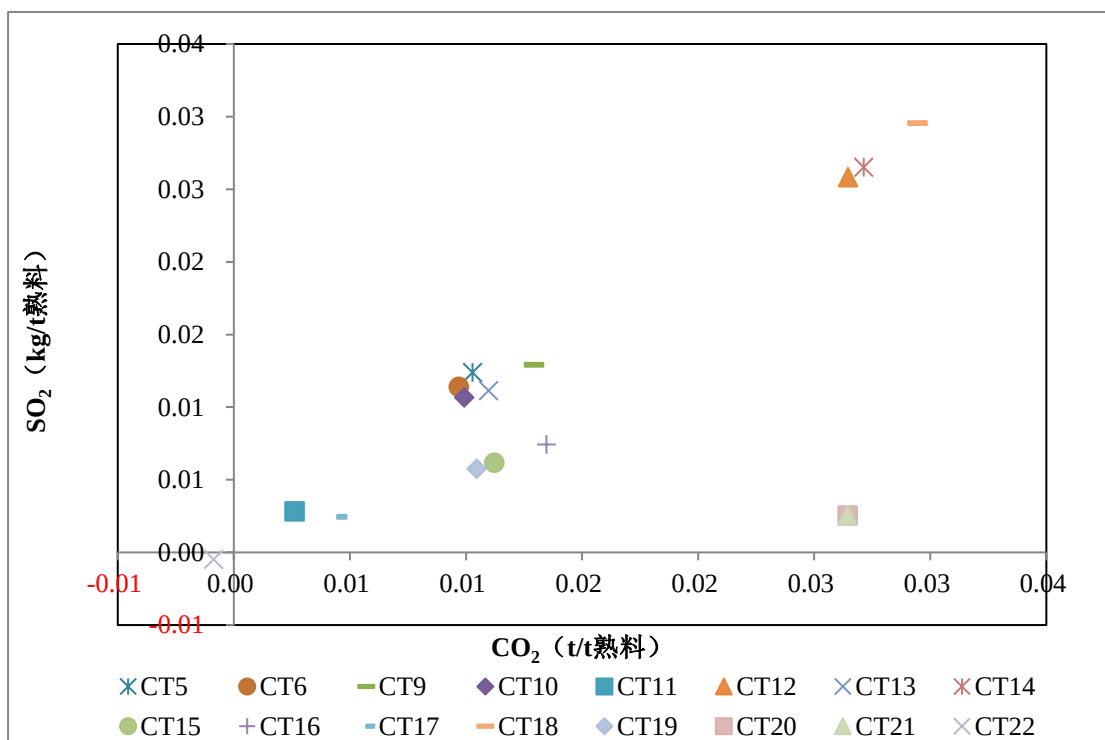
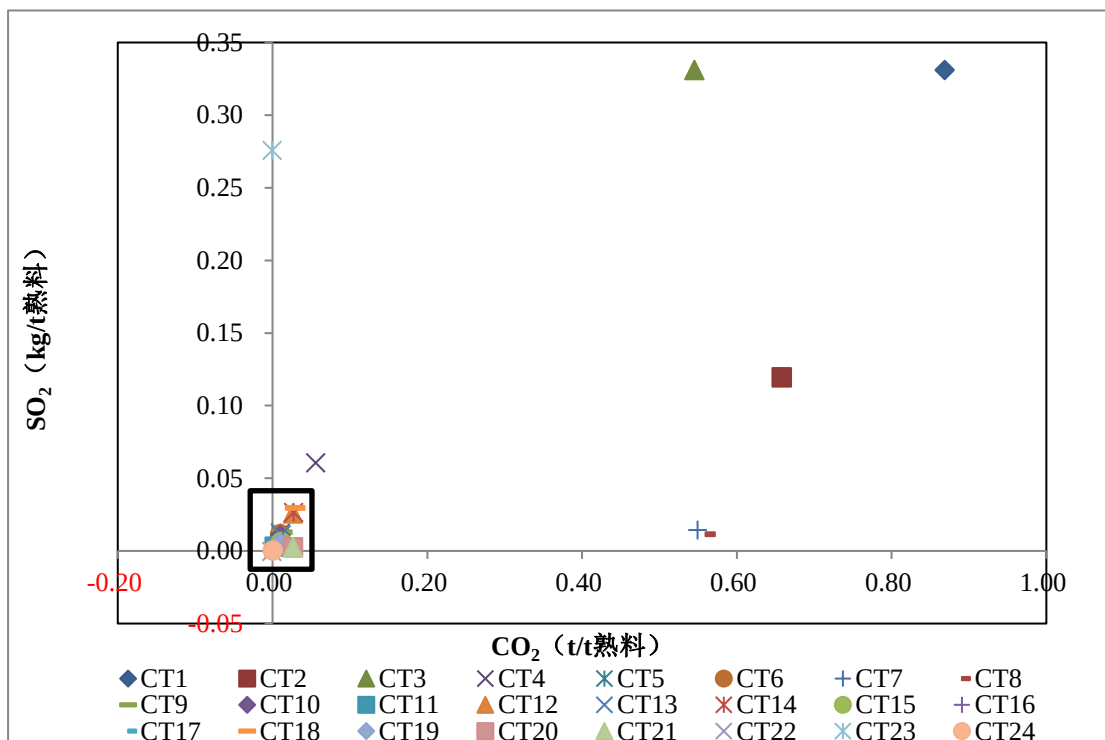


图 4-4 水泥行业 CO₂ 与 SO₂ 协同控制效应二维坐标系及局部放大图

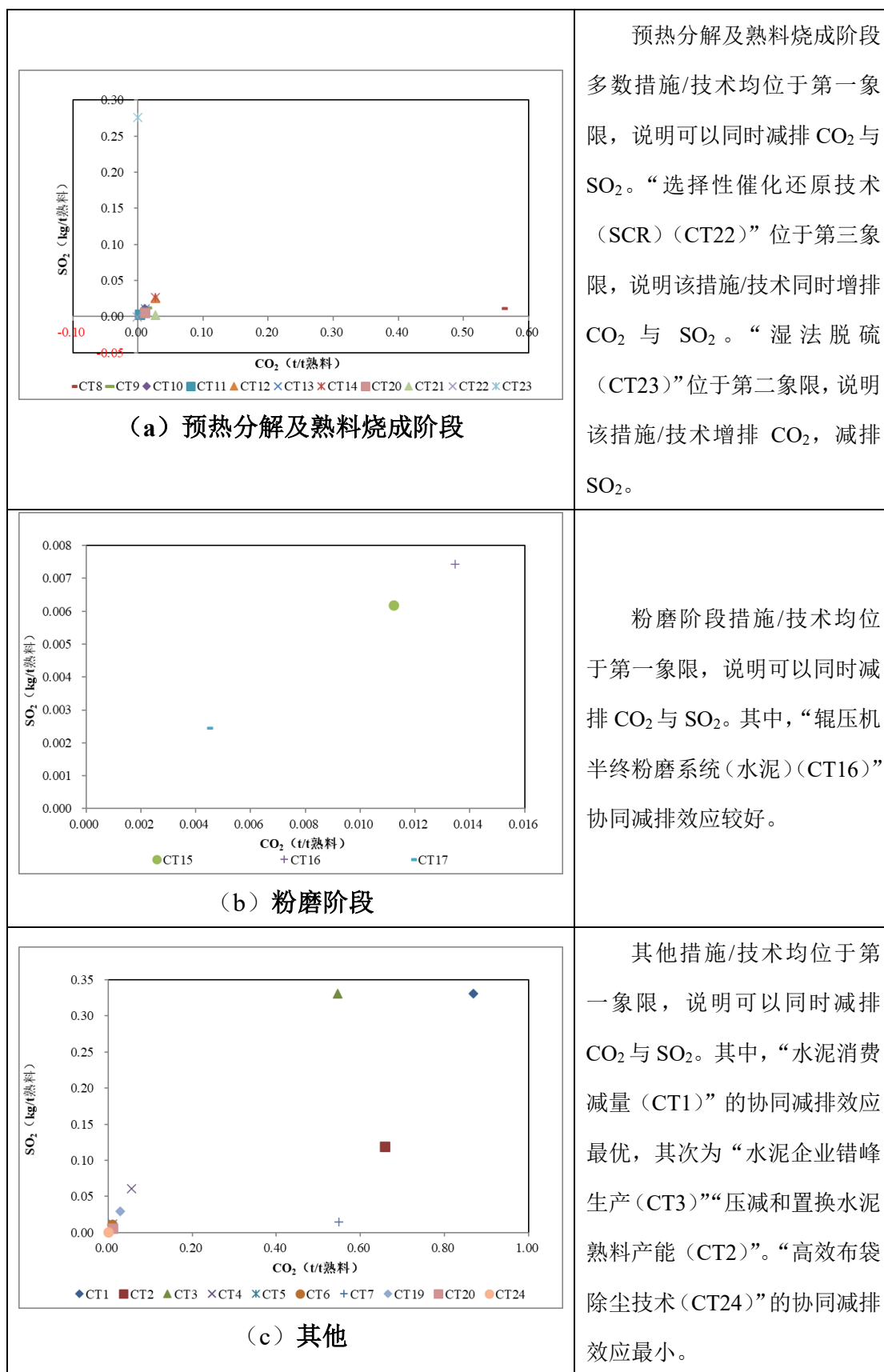


图 4-5 水泥行业分环节 CO₂ 与 SO₂ 协同控制效应二维坐标系

4.3.1.2 CO₂-NO_x 二维坐标图:

多数措施/技术位于第一象限,说明这些可以同时减排 CO₂ 与 NO_x。其中,“水泥消费减量(CT1)”的协同减排效应最优,其次为“水泥企业错峰生产(CT3)”“压减和置换水泥熟料产能(CT2)”。“高效布袋除尘技术(CT24)”的协同减排效应最小。

“湿法脱硫(CT23)”位于第三象限,说明该措施/技术同时增排 CO₂ 与 NO_x。

“选择性催化还原技术(SCR)(CT22)”位于第二象限,说明该措施/技术增排 CO₂, 减排 NO_x。

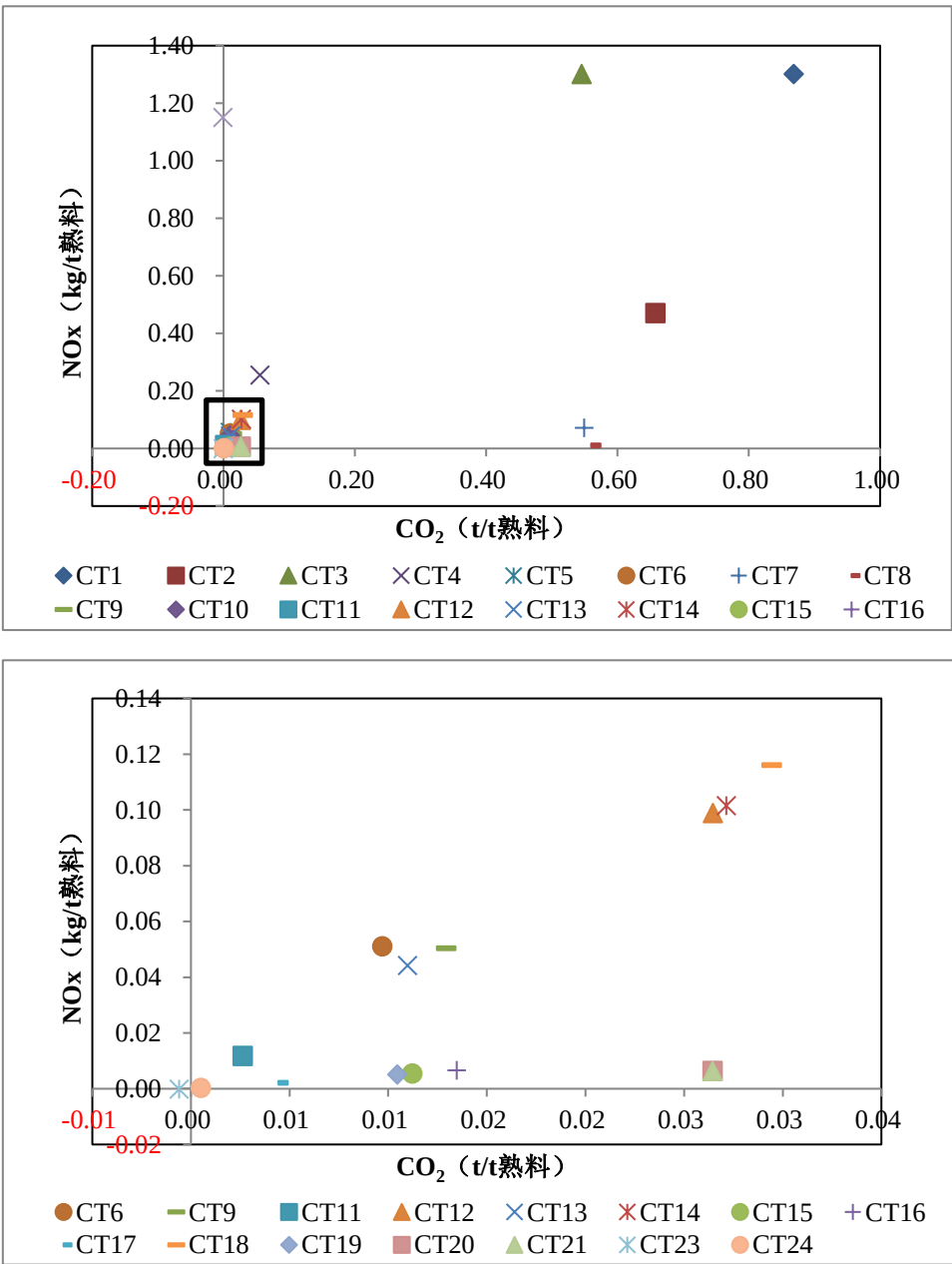


图 4-6 水泥行业 CO₂ 与 NO_x 协同控制效应二维坐标系及局部放大图

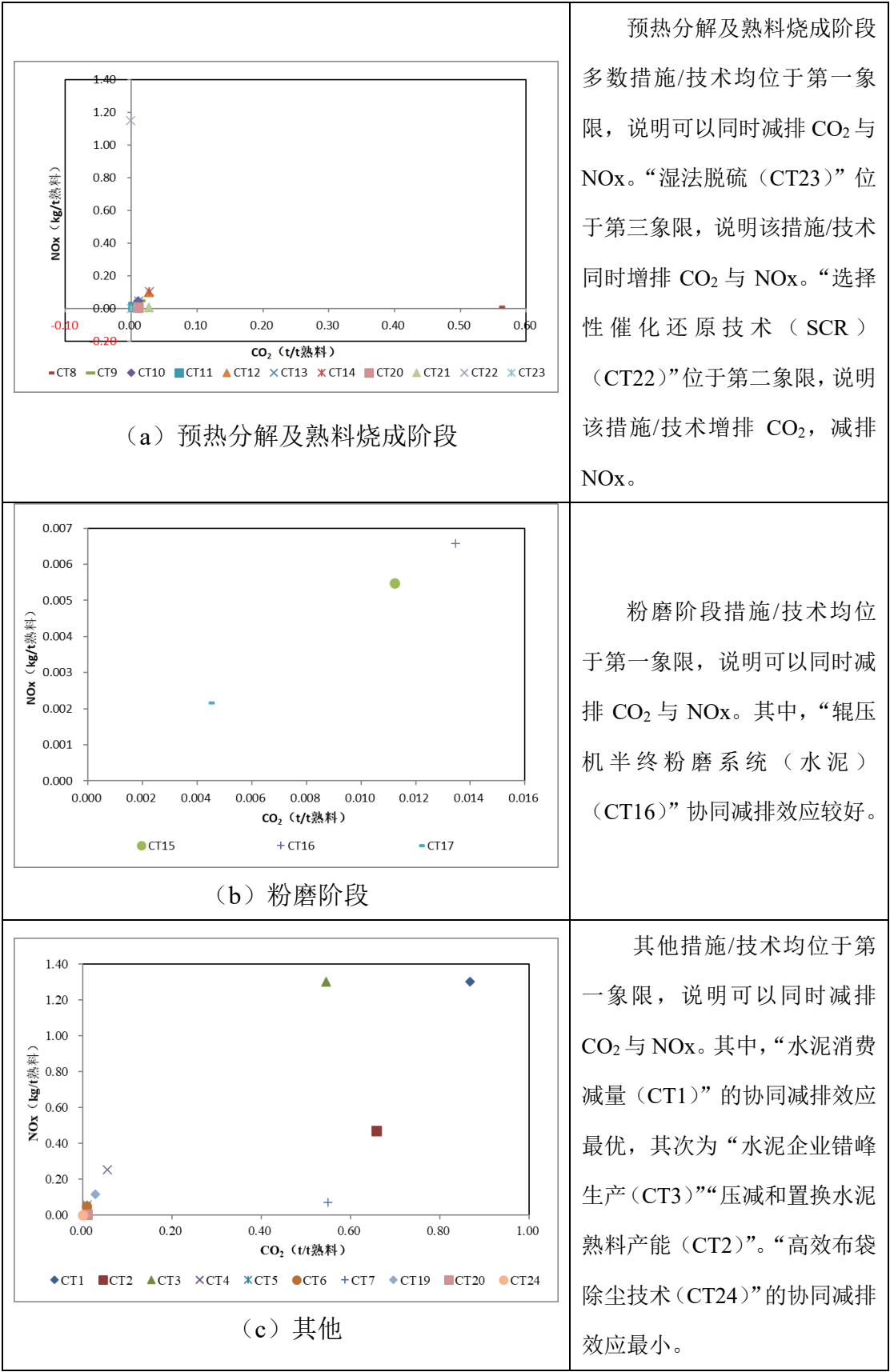


图 4-7 水泥行业分环节 CO₂ 与 NO_x 协同控制效应二维坐标系

4.3.1.3 CO₂-PM 二维坐标图:

多数措施/技术位于第一象限,说明可以同时减排 CO₂ 与 PM。其中,“水泥消费减量 (CT1)”的协同减排效应最优,其次为“水泥企业错峰生产 (CT3)”“压减和置换水泥熟料产能 (CT2)”。

“选择性催化还原技术 (SCR) (CT22)”“湿法脱硫 (CT23)”位于第三象限,说明其同时增排 CO₂ 与 PM。

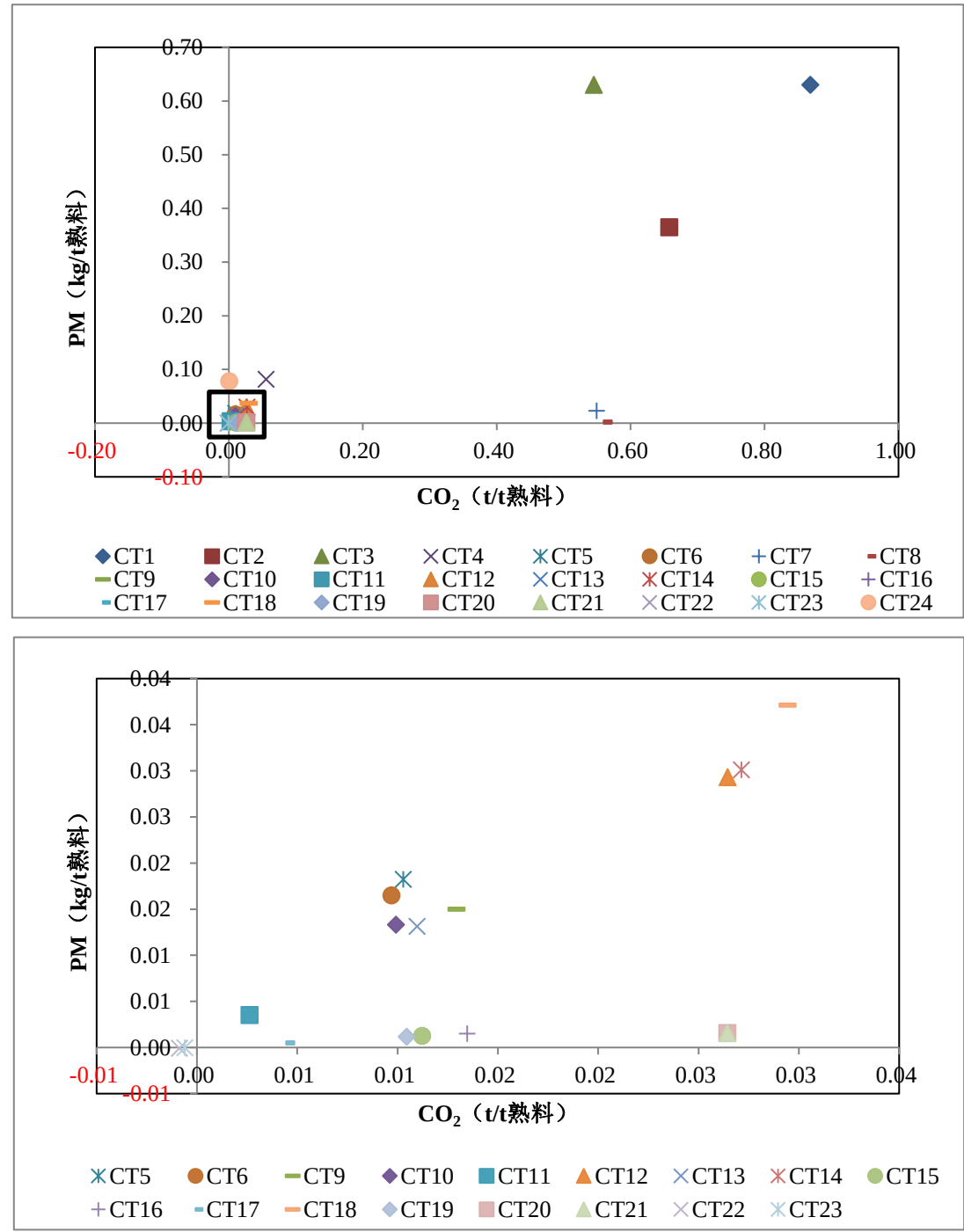


图 4-8 水泥行业 CO₂ 与 PM 协同控制效应二维坐标系及局部放大图

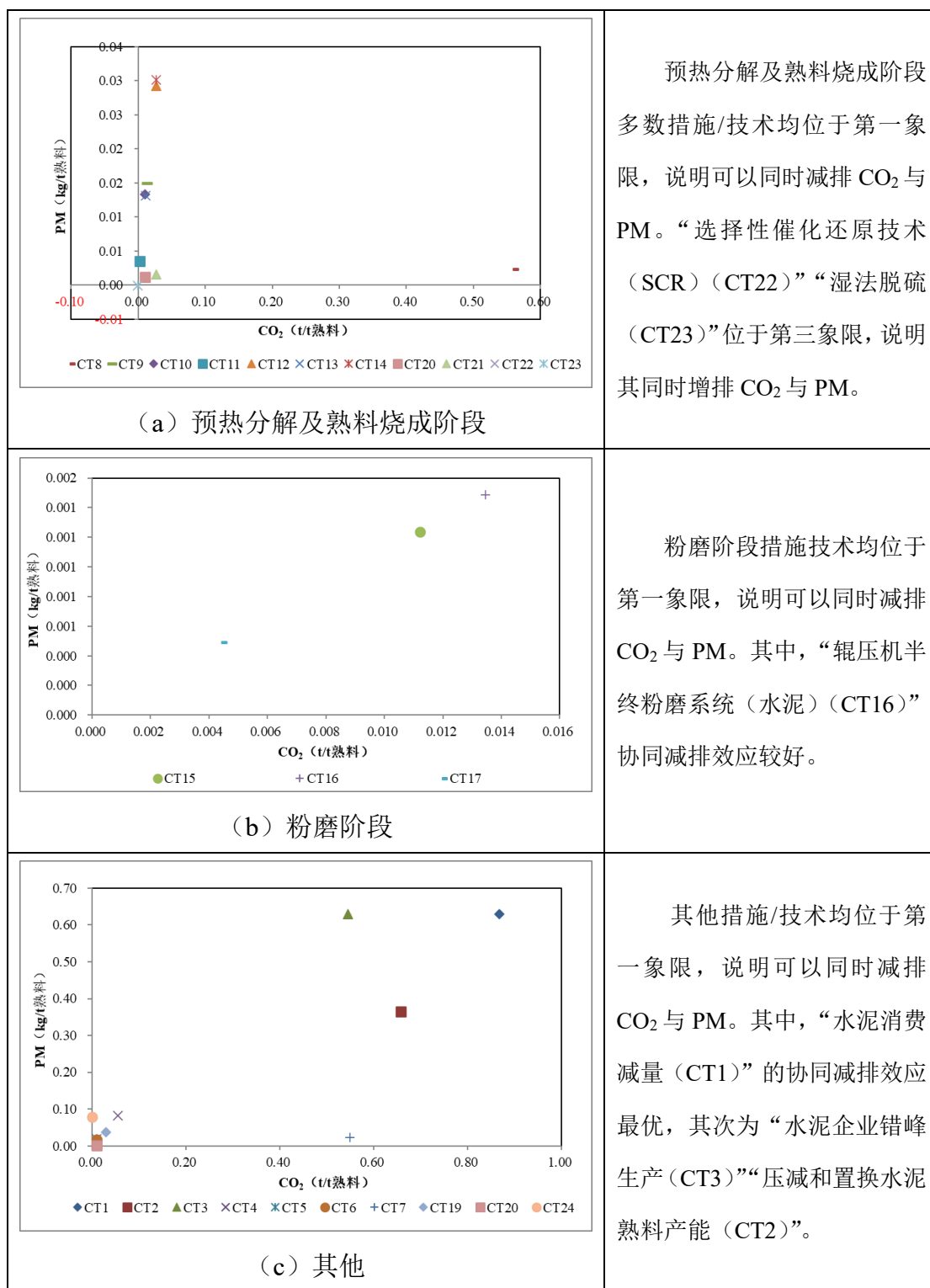


图 4-9 水泥行业分环节 CO₂ 与 PM 协同控制效应二维坐标系

4.3.2 协同效应系数

根据 2.2.2 节“协同效应系数”计算公式，分别计算 SO₂、NO_x 和 PM 相对于 CO₂ 的协同效应系数，结果见下表。

表 4-7 水泥行业各措施协同效应系数表

措施	R_{SO_2/CO_2}	R_{NOx/CO_2}	R_{PM/CO_2}	R_{LAPs/CO_2}
CT1	3.81E-04	1.50E-03	7.26E-04	6.21E-01
CT2	1.82E-04	7.14E-04	5.54E-04	3.22E-01
CT3	6.07E-04	2.39E-03	1.16E-03	9.89E-01
CT4	1.09E-03	4.58E-03	1.47E-03	1.78E+00
CT5	1.20E-03	5.48E-03	1.77E-03	2.11E+00
CT6	1.18E-03	5.27E-03	1.70E-03	2.03E+00
CT7	2.63E-05	1.30E-04	4.22E-05	4.94E-02
CT8	2.06E-05	1.83E-05	4.13E-06	1.15E-02
CT9	9.98E-04	3.90E-03	1.16E-03	1.53E+00
CT10	1.08E-03	4.49E-03	1.34E-03	1.74E+00
CT11	1.08E-03	4.49E-03	1.34E-03	1.74E+00
CT12	9.77E-04	3.74E-03	1.11E-03	1.47E+00
CT13	1.01E-03	4.03E-03	1.20E-03	1.57E+00
CT14	9.77E-04	3.74E-03	1.11E-03	1.47E+00
CT15	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
CT16	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
CT17	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
CT18	1.00E-03	3.94E-03	1.26E-03	1.56E+00
CT19	5.51E-04	4.88E-04	1.10E-04	3.08E-01
CT20	9.57E-05	2.43E-04	5.88E-05	1.03E-01
CT21	9.57E-05	2.43E-04	5.88E-05	1.03E-01
CT22	/	/	/	/
CT23	/	/	/	/
CT24	5.51E-04	4.88E-04	1.54E-01	1.92E+01

“选择性催化还原技术（SCR）（CT22）”“湿法脱硫技术（CT23）”二者均对CO₂有增排作用，因此，在进行协同效应系数分析的过程中将这两类措施剔除。

具有协同效应措施 $R_{a/b}$ 的值均为正，不具有协同效应措施 $R_{a/b}$ 的值均为负。从 $R_{a/b}$ 正负来看，所有措施/技术（除 CT22 和 CT23 外）的 $R_{a/b}$ 均为正值，说明这些措施/技术均具有协同控制效应。

SO₂ 和 CO₂ 协同效应来说， R_{SO_2/CO_2} 较大的措施/技术有“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术（CT5）”“水泥窑协同处置危险废物技术（CT6）”“工业废渣替代技术（CT4）”“高效低氮燃烧器（CT11）”“大力多通道燃烧节能技术（CT10）”。

NO_x 和 CO₂ 协同效应来说， R_{NO_x/CO_2} 较大的措施/技术有“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术（CT5）”“水泥窑协同处置危险废物技术（CT6）”“工业废渣替代技术（CT4）”“高效低氮燃烧器（CT11）”“大力多通道燃烧节能技术（CT10）”。

PM 和 CO₂ 协同效应来说， R_{PM/CO_2} 较大的措施/技术有“高效布袋除尘技术（CT24）”“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术（CT5）”“水泥窑协同处置危险废物技术（CT6）”“工业废渣替代技术（CT4）”“高效低氮燃烧器（CT11）”。

LAPs 和 CO₂ 协同效应来说， R_{LAPs/CO_2} 较大的措施/技术有“高效布袋除尘技术（CT24）”“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术（CT5）”“水泥窑协同处置危险废物技术（CT6）”“工业废渣替代技术（CT4）”“高效低氮燃烧器（CT11）”。

4.3.3 污染物减排量交叉弹性分析

节能减排措施/技术污染物减排量交叉弹性分析的结果如下表所示：

表 4-8 水泥行业各措施/技术污染物减排量协同度结果汇总

措施	Els_{SO_2/CO_2}	Els_{NO_x/CO_2}	Els_{PM/CO_2}	Els_{LAPs/CO_2}
CT1	1.00	1.00	1.00	1.00
CT2	0.48	0.48	0.76	0.52
CT3	1.59	1.59	1.59	1.59
CT4	2.85	3.06	2.03	2.87
CT5	3.16	3.66	2.44	3.40

措施	Els_{SO_2/CO_2}	Els_{NOx/CO_2}	Els_{PM/CO_2}	Els_{LAPs/CO_2}
CT6	3.09	3.52	2.34	3.27
CT7	0.07	0.09	0.06	0.08
CT8	0.06	0.01	0.01	0.02
CT9	2.66	2.54	2.53	2.56
CT10	2.87	2.93	2.93	2.92
CT11	2.87	2.93	2.93	2.92
CT12	2.60	2.44	2.42	2.46
CT13	2.71	2.62	2.62	2.64
CT14	2.61	2.44	2.43	2.47
CT15	1.00	1.00	0.02	0.26
CT16	1.00	1.00	0.02	0.26
CT17	1.00	1.00	0.02	0.26
CT18	2.63	2.63	1.74	2.50
CT19	1.45	0.33	0.15	0.50
CT20	0.26	0.16	0.13	0.17
CT21	0.26	0.16	0.13	0.17
CT22	1.47	-855.22	0.24	-622.02
CT23	-1222.89	0.17	0.13	-217.40
CT24	1.45	0.33	211.72	30.98

“选择性催化还原技术（SCR）（CT22）”“湿法脱硫技术（CT23）”二者均对CO₂有增排作用，这两个措施/技术的污染物减排量交叉弹性（ Els_{SO_2/CO_2} 、 Els_{NOx/CO_2} 、 Els_{PM/CO_2} 、 Els_{LAPs/CO_2} ）分析为不协同措施技术。

从 $Els_{a/b}$ 的值来看：

SO₂ 和 CO₂ 协同效应来说， Els_{SO_2/CO_2} 较大的技术有“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术（CT5）”“水泥窑协同处置危险废物技术（CT6）”“高效低氮燃烧器（CT11）”“大力多通道燃烧节能技术（CT10）”“工业废渣替代技术（CT4）”。

NO_x 和 CO₂ 协同效应来说, Els_{NOx/CO_2} 较大的措施/技术有“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术 (CT5)”“水泥窑协同处置危险废物技术 (CT6)”“工业废渣替代技术 (CT4)”“高效低氮燃烧器 (CT11)”“大力多通道燃烧节能技术 (CT10)”。

PM 和 CO₂ 协同效应来说, Els_{PM/CO_2} 较大的措施/技术有“高效布袋除尘技术 (CT24)”“高效低氮燃烧器 (CT11)”“大力多通道燃烧节能技术 (CT10)”“第四代温流行进式水泥熟料冷却技术 (CT13)”“高能效水泥预热分解技术 (CT9)”。

LAPs 和 CO₂ 协同效应来说, Els_{LAPs/CO_2} 较大的措施/技术有“高效布袋除尘技术 (CT24)”“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术 (CT5)”“水泥窑协同处置危险废物技术 (CT6)”“高效低氮燃烧器 (CT11)”“大力多通道燃烧节能技术 (CT10)”。

4.3.4 单位污染物减排成本

各措施/技术的单位污染物减排成本及优先度排序结果如下图所示 (若某措施/技术对单位污染物的作用是增排, 则对该措施进行剔除)。

从各项措施成本—效果评价的结果来看, 各措施对 CO₂ (剔除 CT22、CT23)、SO₂ (剔除 CT22)、NO_x (剔除 CT23)、PM (剔除 CT22、CT23) 的单位减排成本区间分别为 -0.96 元/kg~2.80 元/kg、-1734.76 元/kg~3892.86 元/kg、-1958.60 元/kg~4395.16 元/kg、-8673.78 元/kg~4182.30 元/kg。

从综合减排成本来看, 单位 ER-eq 减排成本区间为 -196.55 元/kg~209.51 元/kg。而“水泥企业可视化能源管理系统 (CT19)”“低温余热发电技术 (CT8)”“辊压机半终粉磨系统 (水泥) (CT16)”“辊压机终粉磨系统 (生料) (CT15)”“外循环生料立磨技术 (CT17)”单位 ER-eq 减排成本为负值, 且较低, 综合排序最为靠前; “水泥窑协同处置污泥技术 (CT7)”“水泥碳捕集与封存 (CCS) (CT21)”“高效布袋除尘技术 (CT24)”“水泥窑协同处置城市生活垃圾技术 (CT5)”单位 ER-eq 减排成本为正值, 且较高, 综合排序最为靠后。

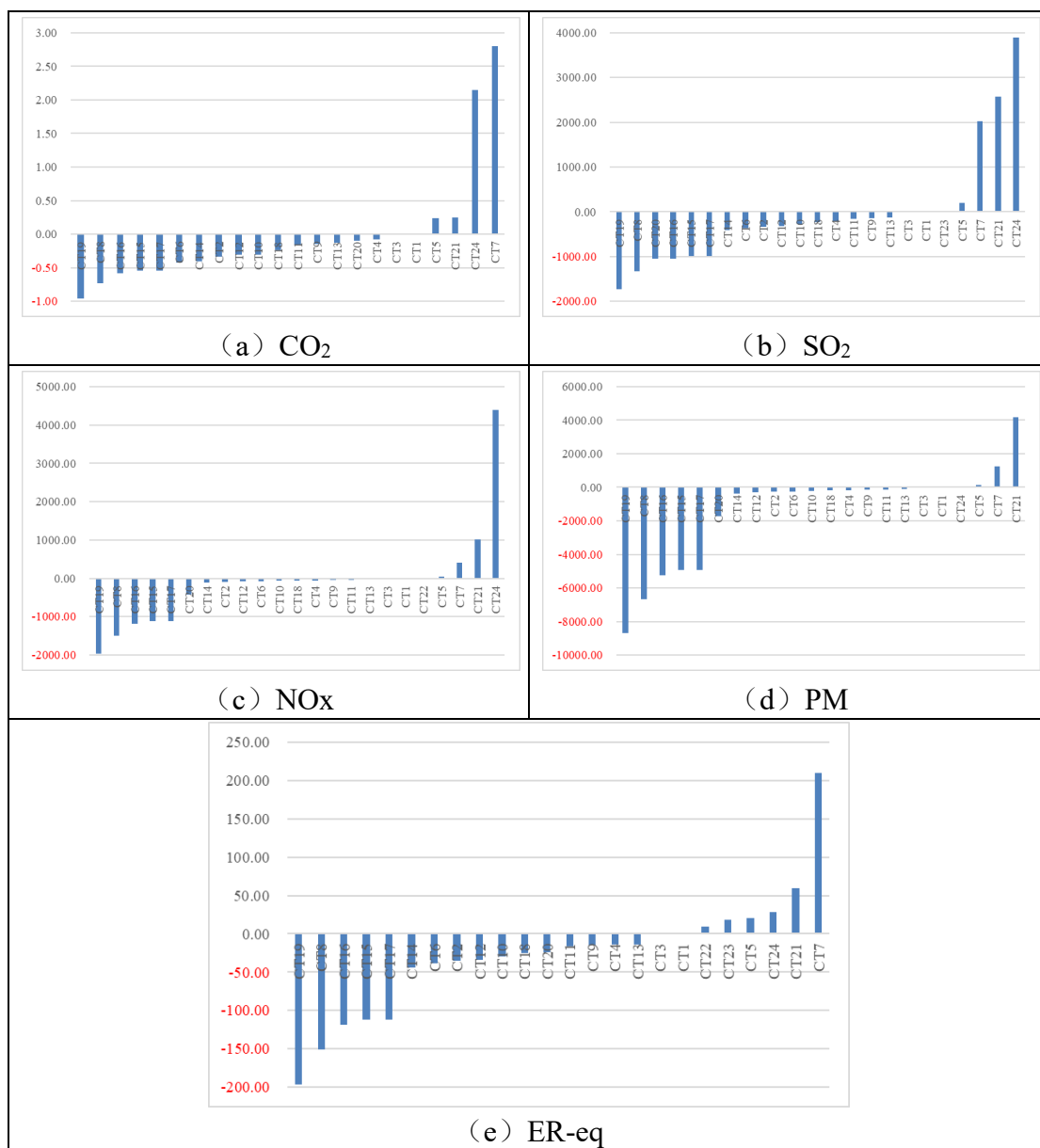


图 4-10 水泥行业各措施/技术单位污染物减排成本及优先度排序 (RMB /kg)

4.3.5 边际减排成本曲线 (MAC)

根据节能减排措施的单位污染物减排成本的排序结果和减排总量, 分别绘制针对 CO₂、SO₂、NO_x、PM 和 ER-eq 的边际减排成本 (MAC) 曲线示意图。

4.3.5.1 CO₂ 单位(边际)减排成本曲线

各措施/技术（CT1-CT21，CT24）的 CO₂ 减排潜力约为 39,993.17 万 t/a，同时能够获得经济收益 332.96 亿元/a，主要是节能带来的收益（CT20、CT21 包括 CO₂ 产品收益）。污染物减排（末端减污）措施/技术“高效布袋除尘技术（CT24）”的 CO₂ 减排潜力为 13.57 万 t/a，能够获得收益 2.91 亿元/a，平均 CO₂ 减排成本为 2,145.67 元/t。相比之下，深度脱碳措施/技术（CT1-CT21）的 CO₂ 减排潜力为 39,979.60 万 t/a，能够获得收益 335.87 亿元/a，平均 CO₂ 减排成本为-80.95 元/t，说明深度脱碳类的措施/技术在 CO₂ 减排潜力和减排成本方面具有优势，而污染物减排措施/技术对 CO₂ 有增排作用。各措施/技术中 CO₂ 减排潜力最大的为“水泥行业错峰生产（CT2）”，其 CO₂ 减排潜力为 18,604.53 万 t/a；单位 CO₂ 减排成本最低（单位 CO₂ 减排效益最高）的为“水泥企业可视化能源管理系统（CT19）”，其单位 CO₂ 减排成本为-956.16 元/t；CO₂ 减排成本最低（CO₂ 减排效益最高）的为“水泥行业错峰生产（CT2）”，其 CO₂ 减排成本为-112.48 亿元/a。

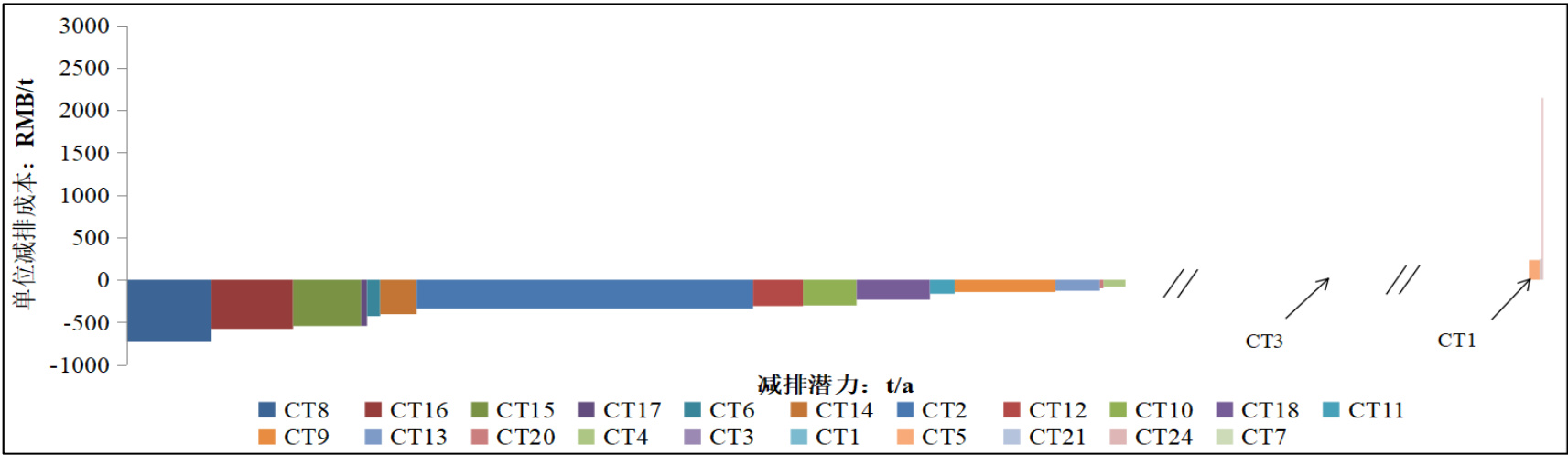


图 4-11 水泥行业节能减排措施/技术 CO₂ 单位(边际)减排成本曲线示意图

4.3.5.2 SO₂ 单位(边际)减排成本曲线

各措施/技术（CT1-CT21，CT23、CT24）SO₂ 减排潜力约为 41.85 万 t/a，同时能够获得收益 291.57 亿元/a，主要是节能带来的收益（CT20、CT21 包括 CO₂ 产品收益）。污染物减排（末端减污）措施/技术“湿法脱硫技术（CT23）”“高效布袋除尘技术（CT24）”的 SO₂ 减排潜力为 21.75 万 t/a，单位 SO₂ 减排成本为 20.37 元/kg，实现 SO₂ 减排潜力付出成本 44.30 亿元/a。相比之下，深度脱碳措施/技术（CT1-CT21）的 SO₂ 减排潜力为 20.10 万 t/a，能够获得收益 355.87 亿元/a，平均 SO₂ 减排成本为-167.07 元/kg，说明深度脱碳类的措施/技术在 SO₂ 减排成本方面具有优势，污染物减排措施/技术在 SO₂ 减排潜力方面具有优势。各措施/技术中 SO₂ 减排潜力最大的为“湿法脱硫技术（CT23）”，其 SO₂ 减排潜力为 21.74 万 t/a；单位 SO₂ 减排成本最低（单位 SO₂ 减排效益最高）的为“水泥企业可视化能源管理系统（CT19）”，其单位 SO₂ 减排成本为-1,734.76 元/kg；SO₂ 减排成本最低（SO₂ 减排效益最高）的为“压减和置换水泥熟料产能（CT2）”，其 SO₂ 减排成本为-112.48 亿元/a。

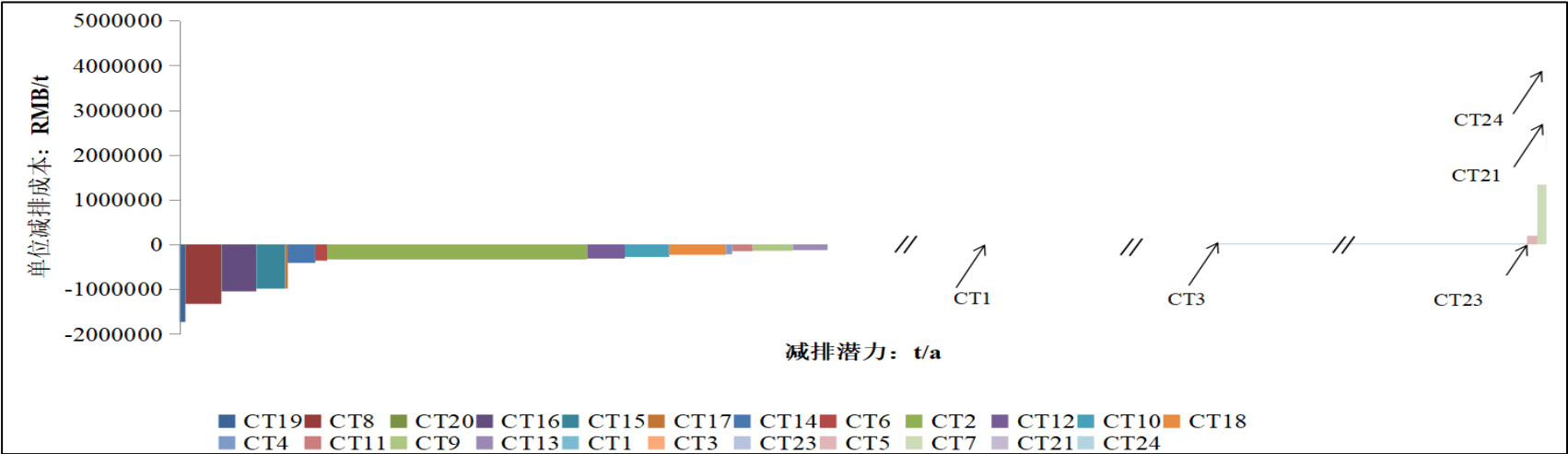


图 4-12 水泥行业节能减排措施/技术 SO₂ 单位(边际)减排成本曲线示意图

4.3.5.3 NO_x 单位(边际)减排成本曲线

各措施/技术（CT1-CT22、CT24）的 NO_x 减排潜力约为 167.33 万 t/a，同时能够获得收益 246.30 亿元/a，主要是节能带来的收益（CT20、CT21 包括 CO₂ 产品收益）。污染物减排（末端减污）措施“选择性催化还原技术（SCR）（CT22）”“高效布袋除尘技术（CT24）”的 NO_x 减排潜力为 92.16 万 t/a，单位 NO_x 减排成本为 9.72 元/kg，实现 NO_x 减排潜力付出成本 89.57 亿元/a。相比之下，深度脱碳措施/技术（CT1-CT21）的 NO_x 减排潜力为 75.18 万 t/a，能够获得收益 335.87 亿元/a，平均 NO_x 减排成本为-44.68 元/kg，说明深度脱碳措施/技术在 NO_x 减排潜力和减排成本方面具有优势。各措施/技术中 NO_x 减排潜力最大的为“选择性催化还原技术（SCR）（CT22）”，其 NO_x 减排潜力为 92.15 万吨 t/a；单位 NO_x 减排成本最低（单位 NO_x 减排效益最高）的为“水泥企业可视化能源管理系统（CT19）”，其单位 NO_x 减排成本为-1,958.60 元/kg；NO_x 减排成本最低（NO_x 减排效益最高）的为“压减和置换水泥熟料产能（CT2）”，其 NO_x 减排成本为-112.47 亿元/a。

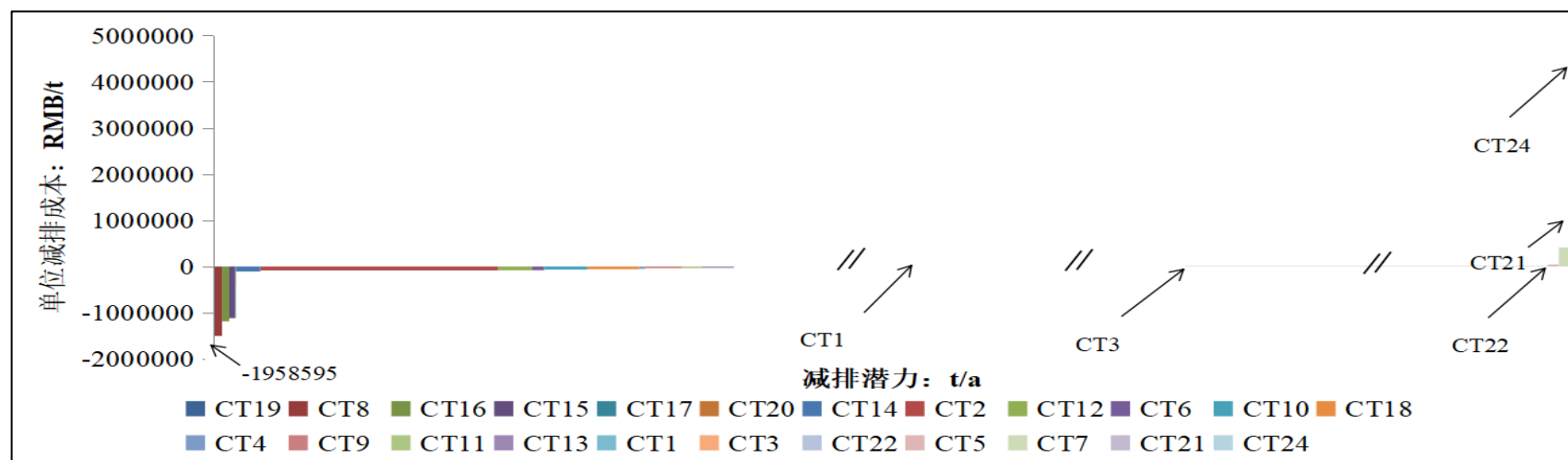


图 4-13 水泥行业节能减排措施/技术 NO_x 单位(边际)减排成本曲线示意图

4.3.5.4 PM 单位(边际)减排成本曲线

各措施/技术（CT1-CT21、CT24）的 PM 减排潜力约为 28.64 万 t/a，同时能够获得收益 332.96 亿元/a，主要是节能带来的收益（CT20、CT21 包括 CO₂ 产品收益）。污染物减排（末端减污）措施/技术“高效布袋除尘技术（CT24）”的 PM 减排潜力为 2.09 万 t/a，单位 PM 减排成本为 13.96 元/kg，实现 PM 减排潜力付出成本 2.91 亿元/a。相比之下，深度脱碳措施/技术（CT1-CT21）的 PM 减排潜力为 26.56 万 t/a，能够获得收益 335.87 亿元/a，平均 PM 减排成本为-126.47 元/kg，说明深度脱碳措施/技术在 PM 减排潜力方面具有优势和减排成本方面具有优势。各措施/技术中 PM 减排潜力最大的为“水泥行业错峰生产（CT3）”，其 PM 减排潜力为 8.91 万 t/a；单位 PM 减排成本最低（单位 PM 减排效益最高）的为“水泥企业可视化能源管理系统（CT19）”，其单位 PM 减排成本为-8,673.78 元/kg；PM 减排成本最低（PM 减排效益最高）的为“压减和置换水泥熟料产能（CT2）”，其 PM 减排成本为-112.48 亿元/a。

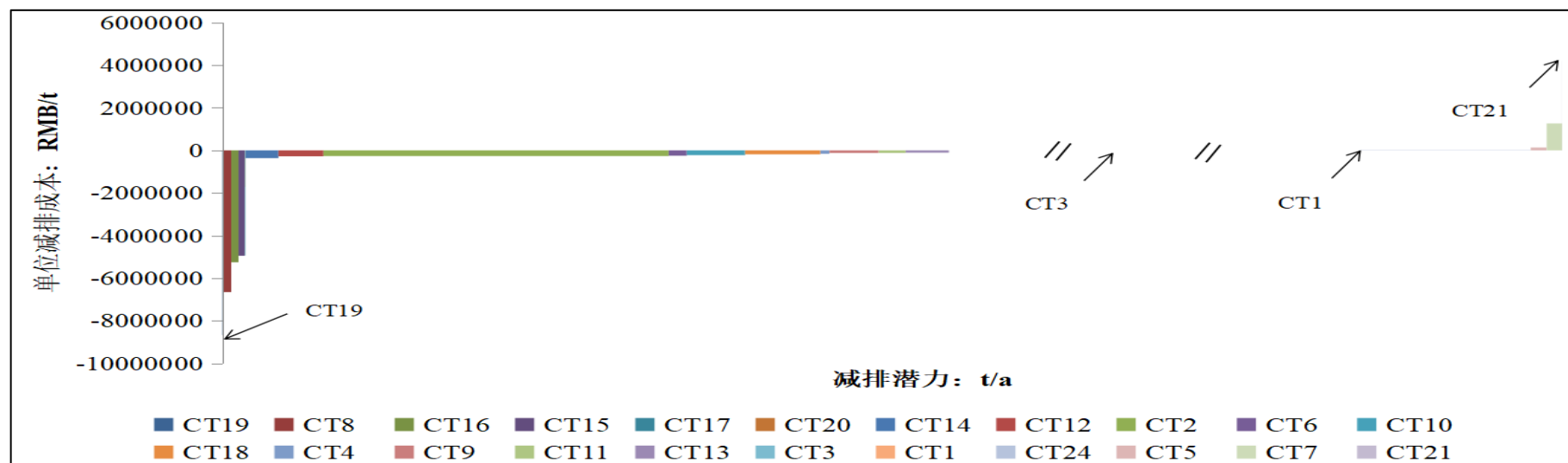


图 4-14 水泥行业节能减排措施/技术 PM 单位(边际)减排成本曲线示意图

4.3.5.5 ER-eq 单位(边际)减排成本曲线

各措施/技术(CT1-CT24)的 ER-eq 减排潜力约为 381.61 万 t/a (CO₂ 占 38.87%、SO₂ 占 11.53%、NO_x 占 46.15%, PM 占 3.44%), 同时能够获得收益 204.92 亿元/a, 主要是节能带来的收益(CT20、CT21 包括 CO₂ 产品收益)。污染物减排(末端减污)措施/技术“选择性催化还原技术(SCR)(CT22)”“湿法脱硫技术(CT23)”“高效布袋除尘技术(CT24)”的 ER-eq 减排潜力为 120.41 万 t/a (CO₂ 占 -0.32%、SO₂ 占 18.98%、NO_x 占 80.55%, PM 占 0.79%), 单位 ER-eq 减排成本为 10.88 元/kg, 实现 ER-eq 减排潜力付出成本 130.95 亿元/a。相比之下, 深度脱碳措施/技术(CT1-CT21)的 ER-eq 减排潜力为 261.20 万 t/a (CO₂ 占 55.94%、SO₂ 占 8.10%、NO_x 占 30.30%, PM 占 4.66%), 平均 ER-eq 减排成本为 -12.86 元/kg, 实现 ER-eq 减排潜力能够获得收益 335.87 亿元/a, 说明深度脱碳类的措施/技术在 ER-eq 减排潜力方面具有成本—效益优势。各措施/技术中 ER-eq 减排潜力最大的为“水泥行业错峰生产(CT3)”, 其 ER-eq 减排潜力为 110.08 万 t/a; 单位 ER-eq 减排成本最低(单位 ER-eq 减排效益最高)的为“水泥企业可视化能源管理系统(CT19)”, 其单位 ER-eq 减排成本为 -196.55 元/kg; ER-eq 减排成本最低(ER-eq 减排效益最高)的为“压减和置换水泥熟料产能(CT2)”, 其 ER-eq 减排成本为 -112.48 亿元/a。

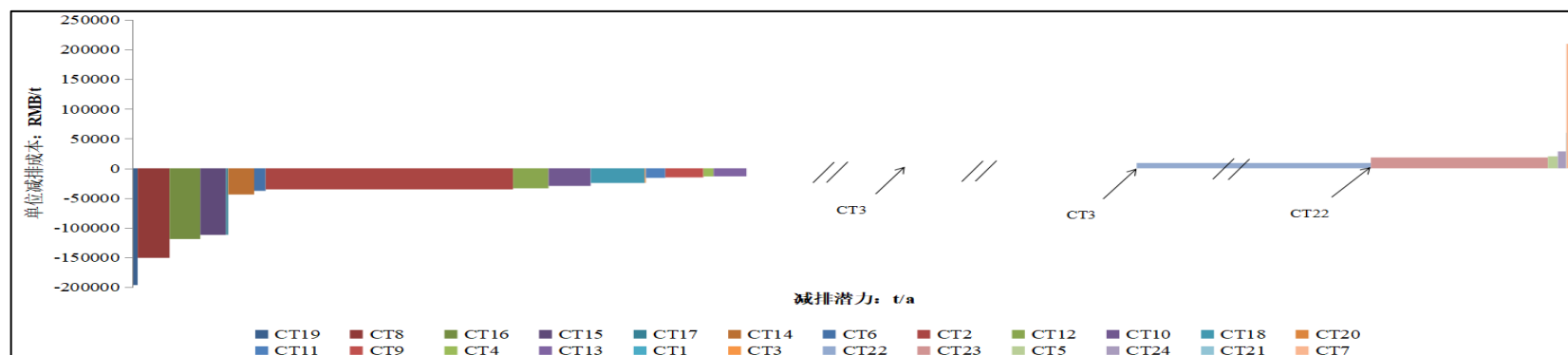


图 4-15 水泥行业节能减排措施/技术 ER-eq 单位(边际)减排成本曲线示意图

4.3.6 水泥行业协同控制措施/技术直接减排效果小结

水泥行业 2015 年 CO₂ 和大气污染物的直接排放量与预测的 2025 年直接排放量见下图。

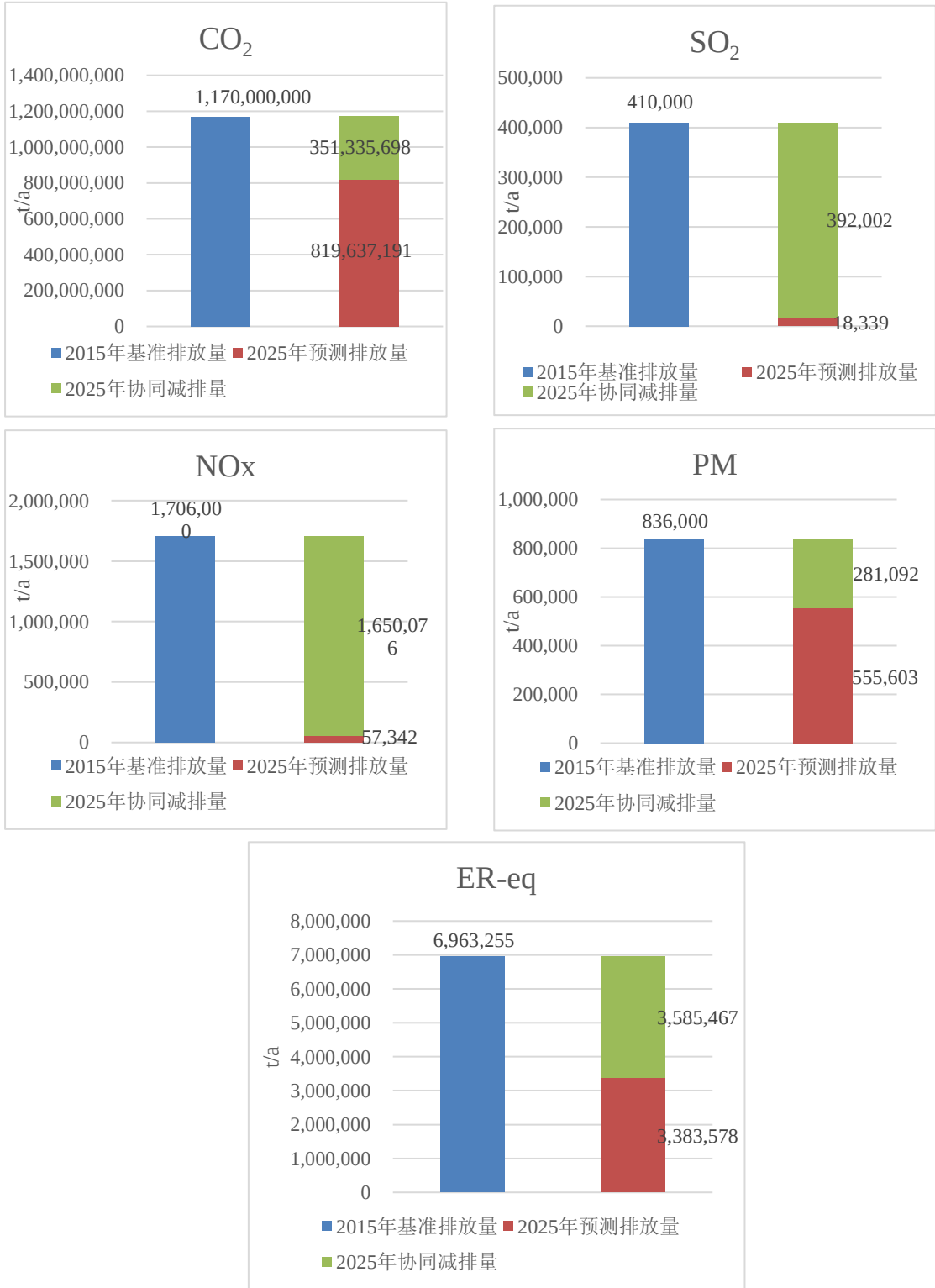


图 4-16 2015 年排放量、2025 年协同减排量、2025 年预测排放量

注：这里的“协同减排量”指“直接减排量”，未涵盖因节电等带来的“间接减排”。

可以看出，2015 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 的直接排放量分别为 11.70 亿 t/a、41.00 万 t/a、170.60 万 t/a、83.60 万 t/a、696.33 万 t/a。根据预测 2025 年水泥熟料产量（13.36 亿 t）和 2015 年水泥行业排放系数，估算 2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 的基线直接排放量分别为 11.71 亿 t/a、41.03 万 t/a、170.74 万 t/a、83.67 万 t/a、696.90 万 t/a。24 项措施/技术 2025 年的 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 直接协同减排潜力分别为 3.51 亿吨/a、39.20 万 t/a、165.01 万 t/a、28.11 万 t/a、358.55 万 t/a。在采取系列协同控制措施/技术后，即减去协同减排潜力后，2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM、ER-eq 预测排放量分别为 8.20 亿 t/a、1.83 万 t/a、5.73 万 t/a、55.56 万 t/a、338.36 万 t/a。

2025 年 24 项措施/技术分类型的 ER-eq 直接协同减排潜力见下图，消费减量的 ER-eq 直接协同减排潜力为 670,563 t/a，结构调整 1,348,948 t/a，原料燃料替代为 56,608 t/a，能效提升与节能 299,055 t/a，末端脱碳 2,203 t/a，末端减污为 1,208,090 t/a。

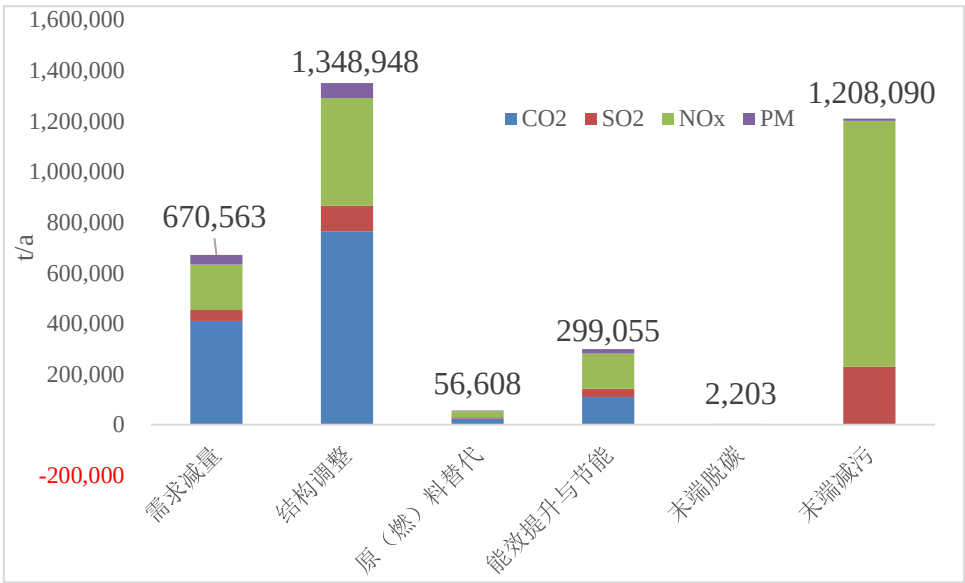


图 4-17 水泥行业 2025 年措施/技术分类型 ER-eq 直接协同减排潜力

2025 年 24 项措施/技术分类型的 ER-eq 综合协同减排潜力见下图，消费减量的 ER-eq 直接协同减排潜力为 699,759 t/a，结构调整 1,417,857 t/a，原料燃料替代为 92,449 t/a，能效提升为 399,791 t/a，末端脱碳 2,174 t/a，末端减污为 1,204,116 t/a。

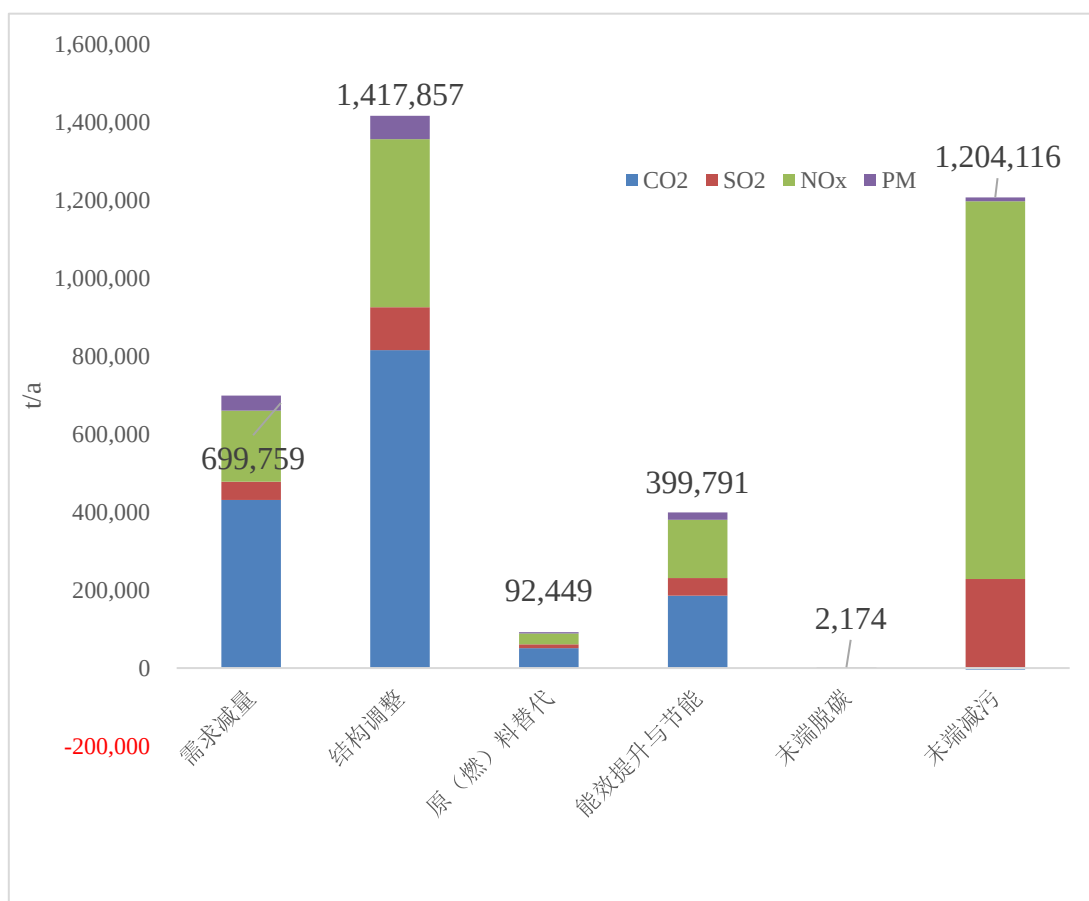


图 4-18 水泥行业 2025 年分类型措施/技术 ER-eq 综合协同减排潜力

5 钢铁、水泥行业 CGE-CIMS 模拟分析

5.1 钢铁行业 CGE-CIMS 模拟结果分析

5.1.1 钢铁行业发展规模及技术竞争

根据 CGE 模型模拟结果，2017-2050 年中国粗钢产量预测结果见图 5-1。

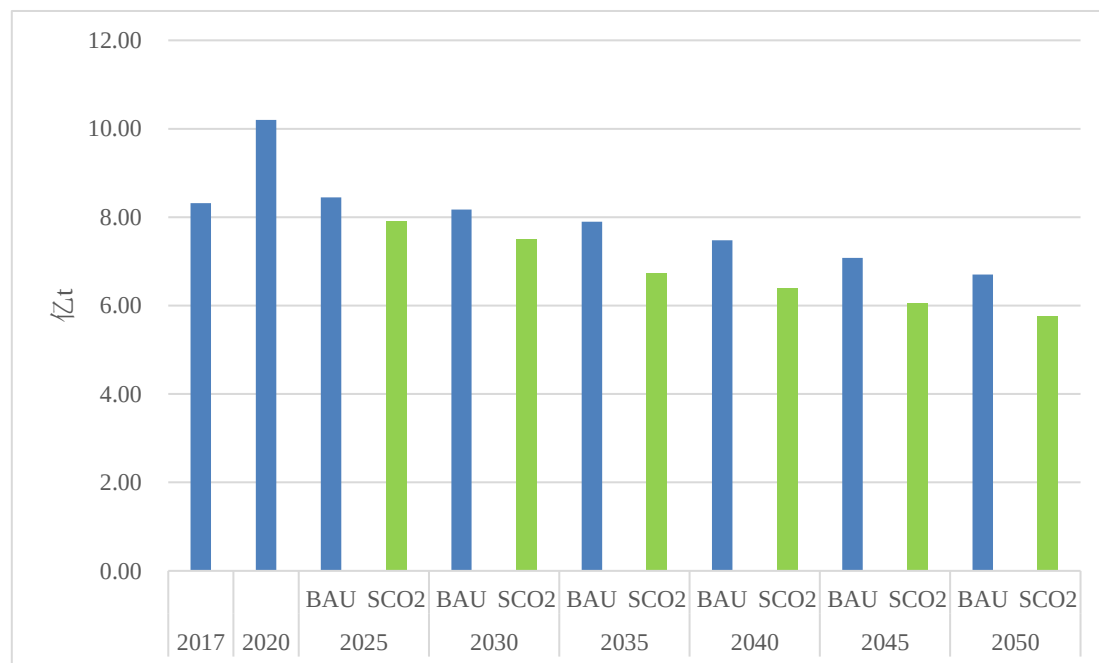


图 5-1 2020-2050 年粗钢产量预测结果

从图 5-1 可以看出：

（1）粗钢产量：2017-2050 年期间，BAU 情景和碳税情景下我国粗钢产量均呈先增后减趋势，2020 年产量均为 10.20 亿 t（较 2017 年增长 22.69%），2025 年产量分别为 8.45 亿 t（较 2017 年增加 1.68%）和 7.91 亿 t（较 2017 年减少 4.81%），2050 年产量分别为 6.70 亿 t 钢（较 2017 年减少 19.41%）和 5.75 亿 t（较 2017 年减少 30.87%），其中 2050 年碳税情景下粗钢产量较 BAU 情景减少 14.22%。

（2）各环节主要产品产量技术竞争：

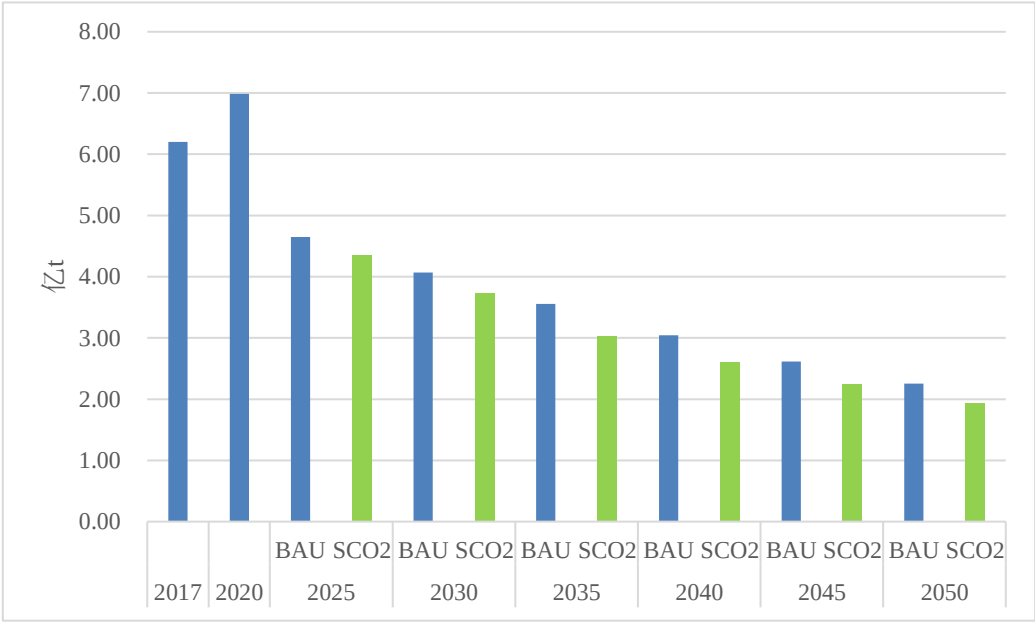
①BAU 情景下和碳税情景下，电炉炼钢占比均不断提高，从 2017 年的 9.32% 均逐步提高至 2025 年的 30%、2050 年的 50%；钢铁行业各环节来看，随着产能的优化调整，落后产能逐步退出市场，钢铁产业清洁生产水平进一步提高，2025 年炭化室高度<4.3m、高炉容积<450m³、烧结机≤35m²、转炉容积≤49t 退出市场；2030 年 50<转炉容积<119tons 退出市场；2035 年 450 m³<高炉容积<1200m³、

电炉容积 $\leq 49\text{tons}$ 退出市场。

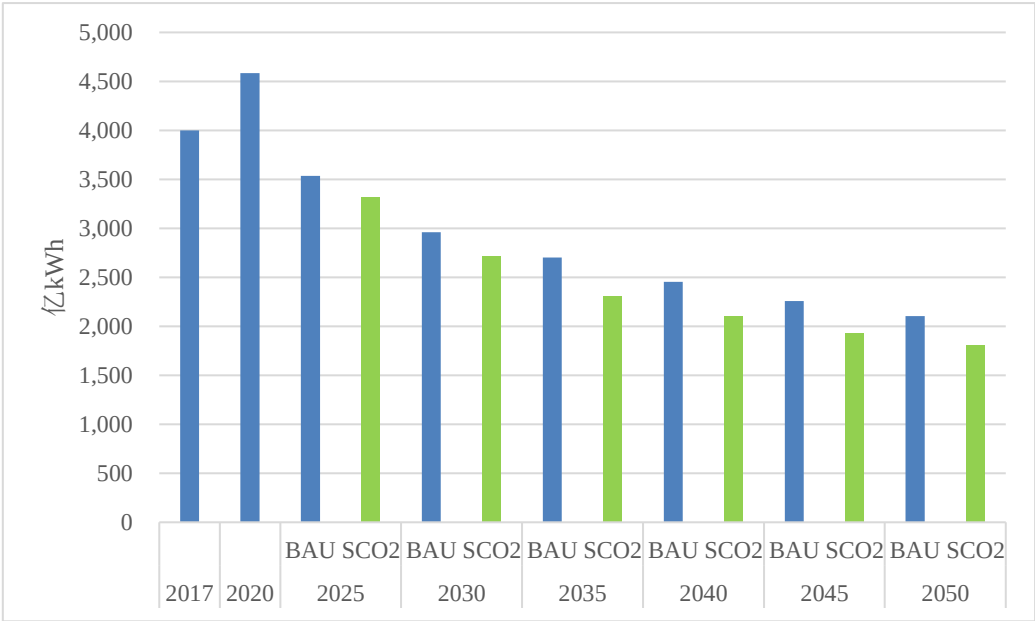
②与 BAU 情景相比，碳税情景下对同一中间产品而言，大规模（如炭化室高度 $>6.25\text{m}$ 和高炉容积 $>3000\text{m}^3$ ）的生产线市场占比略有提高。

5.1.2 钢铁行业能源消费

2020-2050 年钢铁行业煤炭、电力消费预测结果见图 5-2。



(a) 煤炭消费量



(b) 电力消费量

图 5-2 2020-2050 年钢铁行业能源消费预测结果

从图 5-2 可以看出：

(1) BAU 情景下，在规模削减、结构优化、技术进步的共同作用下，钢铁行业煤炭、电力消费量均逐渐减少，2025 年煤炭、电力消费量分别为 4.65 亿 t 和 3,536.43 亿 kWh，较 2017 年分别减少 25.03%和 11.59%；2050 年煤炭、电力消费量分别为 2.25 亿 t 和 2,104.22 亿 kWh，较 2017 年分别减少 63.64%和 47.39%；

(2) 碳税情景下，钢铁行业煤炭、电力消费量均有小幅下降，2025 年煤炭、电力消费量分别为 4.35 亿 t 和 3,313.09 亿 kWh，较 BAU 情景分别减少 6.40%和 6.32%；2050 年煤炭、电力消费量分别为 1.93 亿 t 和 1,805.30 亿 kWh，较 BAU 情景分别减少 14.23%和 14.21%。

5.1.3 钢铁行业污染排放

2020-2050 年钢铁行业 CO₂ 和大气污染物排放预测结果见图 5-3。

从图 5-3 可以看出：

(1) 受粗钢产量增长影响，2020 年钢铁行业温室气体和大气污染物排放量略有增加，2020 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 14.79 亿 t、48.38 万 t、82.04 万 t、51.40 万 t，分别比 2017 年增长 7.19%、7.77%、10.88%、4.79%；相应的 2020 年 ER-eq 排放量为 711.17 万 t，较 2017 年增长 7.58%。

(2) BAU 情景下，2021-2050 年间在规模削减、结构优化、技术进步的共同作用下，钢铁行业温室气体和大气污染物排放量均逐渐减少，2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 9.33 亿 t、29.64 万 t、52.61 万 t、32.82 万 t，分别比 2017 年削减 69.10%、71.02%、67.59%、63.07%，相应的 2025 年 ER-eq 排放量为 448.66 万 t，较 2017 年削减 32.13%，从削减贡献来看 CO₂ 占 78.33%、SO₂ 占 7.56%、NO_x 占 10.60%、PM 占 3.51%；2050 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 4.26 亿 t、13.01 万 t、23.98 万 t、18.12 万 t，分别比 2017 年削减 69.10%、71.02%、67.59%、63.07%，相应的 2050 年 ER-eq 排放量为 205.88 万 t，较 2017 年削减 68.85%，从削减贡献来看 CO₂ 占 77.94%、SO₂ 占 7.37%、NO_x 占 11.57%、PM 占 3.12%。

(2) 与 BAU 情景相比，碳税情景下钢铁行业温室气体和大气污染物排放量均进一步削减，2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 8.74 亿吨、27.77 万吨、49.25 万吨、30.74 万吨，分别比 BAU 情景削减 6.29%、6.28%、6.38%、6.33%，

相应的 2025 年 ER-eq 排放量为 420.40 万 t，较 2017 年削减 36.40%，从削减贡献来看 CO₂ 占 78.20%、SO₂ 占 7.49%、NO_x 占 10.82%，PM 占 3.49%，较 BAU 情景进一步削减 6.30%；2050 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 3.66 亿 t、11.15 万 t、20.57 万 t、15.53 万 t，分别比 BAU 情景削减 14.22%、14.29%、14.24%、14.29%，相应的 2050 年 ER-eq 排放量为 176.58 万 t，较 2017 年削减 73.29%，从削减贡献来看 CO₂ 占 77.89%、SO₂ 占 7.33%、NO_x 占 11.61%，PM 占 3.17%，较 BAU 情景进一步削减 14.23%。

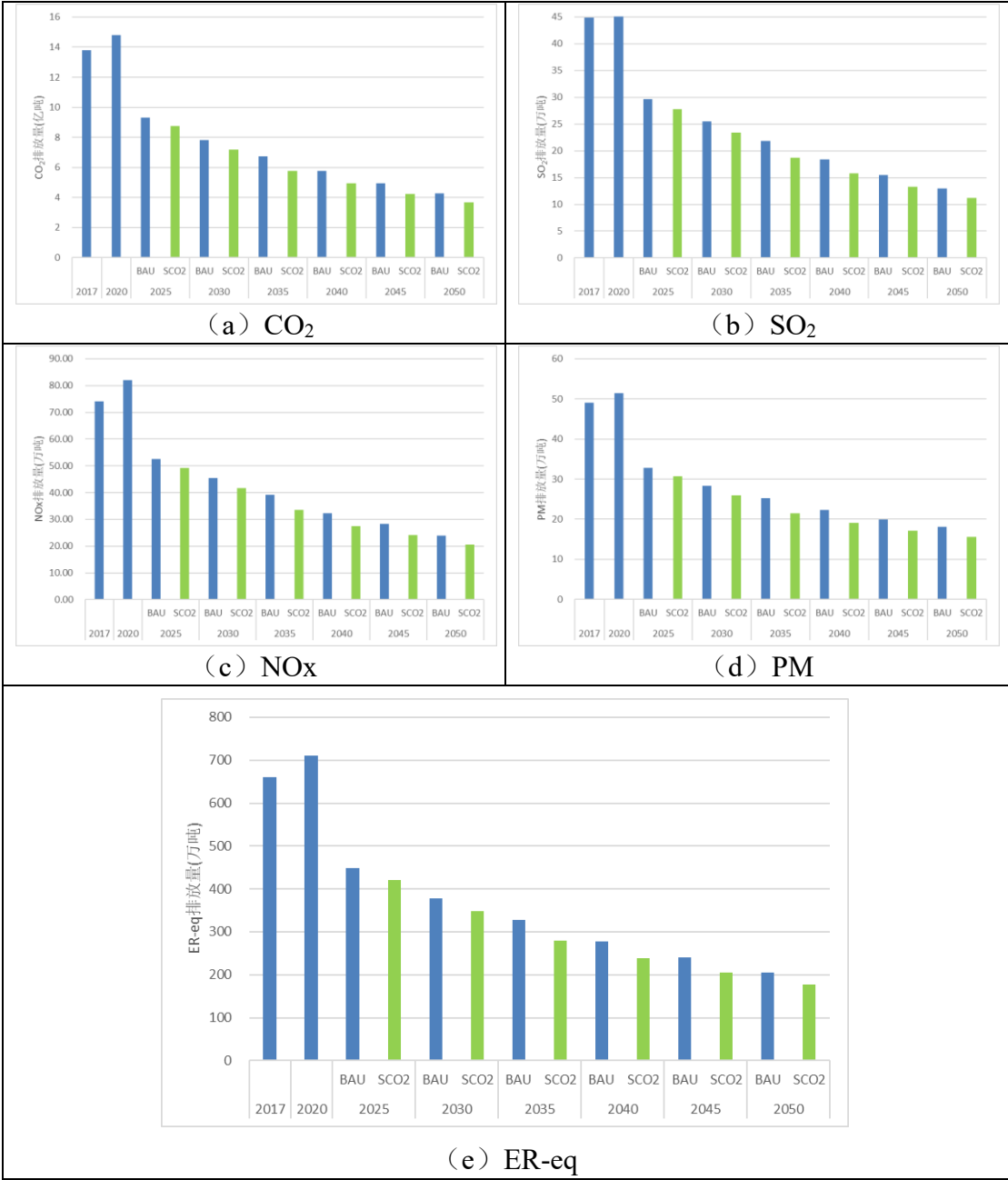


图 5-3 2020-2050 年钢铁行业 CO₂ 和大气污染物排放预测结果

5.2 水泥行业 CIMS 模型模拟结果分析

5.2.1 水泥行业发展规模及技术竞争

根据 CGE 模型模拟结果，2020-2050 年中国水泥行业熟料产量及构成预测结果见图 5-4。

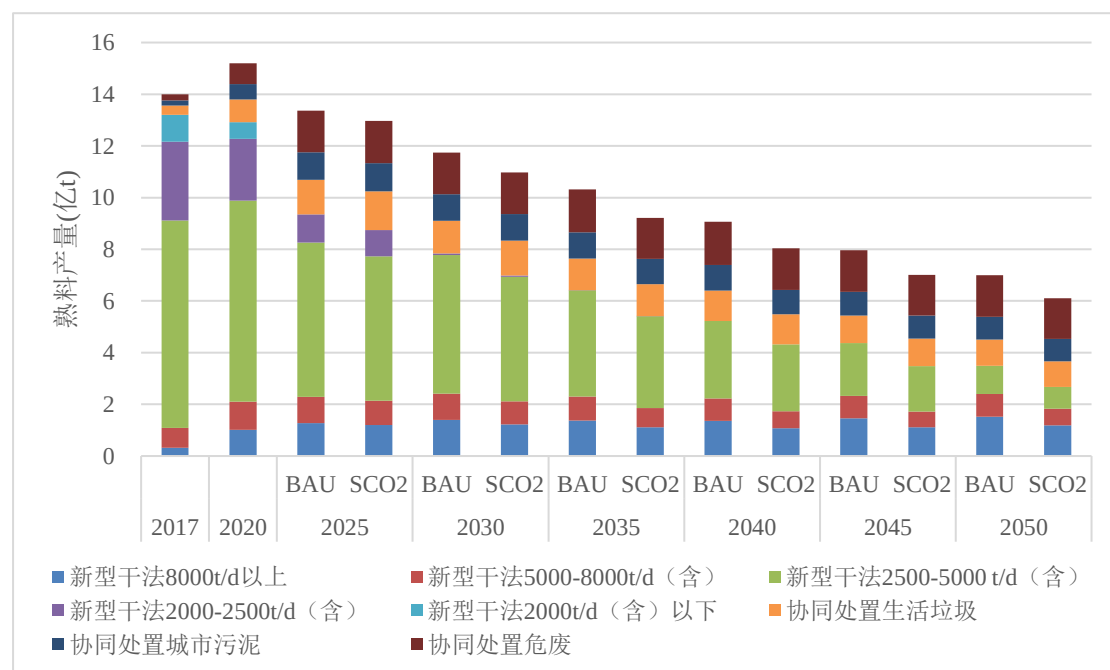


图 5-4 2020-2050 年水泥行业技术竞争预测结果

从图 5-4 可以看出：

（1）熟料产量：2020 年以前在经济社会发展和“新基建”等因素的共同的驱动下，水泥熟料产量呈增加趋势，2020 年产量达到 15.20 亿 t，较 2017 年增加 8.57%；此后受产业结构调整等因素影响，BAU 情景和碳税情景水泥行业熟料产量均将呈逐步减少趋势，2025 年 BAU 情景和碳税情景下产量为 13.26 亿 t 和 12.96 亿 t，分别较 2017 年减少 4.59%和 7.42%，其中 2050 年碳税情景下熟料产量较基准情景减少 2.97%；2050 年 BAU 情景和碳税情景下产量为 7.00 亿 t 和 6.11 亿 t，分别较 2017 年减少 50.00%和 56.36%，其中 2050 年碳税情景下熟料产量较基准情景减少 12.72%。

（2）技术竞争：

①BAU 情景下，水泥窑协同处置固体废物占比逐步提高，由 2017 年的 5.66% 提高至 2030 年的 30%和 2050 年的 50.07%；新型干法生产线向大型化发展，2025 年“2000t/d（含）以下新型干法生产线”完全淘汰，2035 年“2000-2500t/d（含）

新型干法生产线”基本退出市场；“8000t/d 以上新型干法生产线”有较大幅度增长，2050 年市场占比为 43.44%。

②与 BAU 情景相比，碳税情景下水泥窑协同处置固体废物占比进一步提高，2025 年和 2050 年分别为 32.51%和 56.32%（分别较 BAU 情景提高 2.51 个百分点和 6.25 个百分点）；新型干法 8000t/d 以上因单位产品 CO₂ 排放强度较低具有较强的竞争优势，2050 年碳税情景下市场份额占比为 44.66%（较 BAU 情景提高 1.21 个百分点）。

5.2.2 水泥行业能源消费

2020-2050 年水泥行业煤炭、电力消费预测结果见图 5-5。

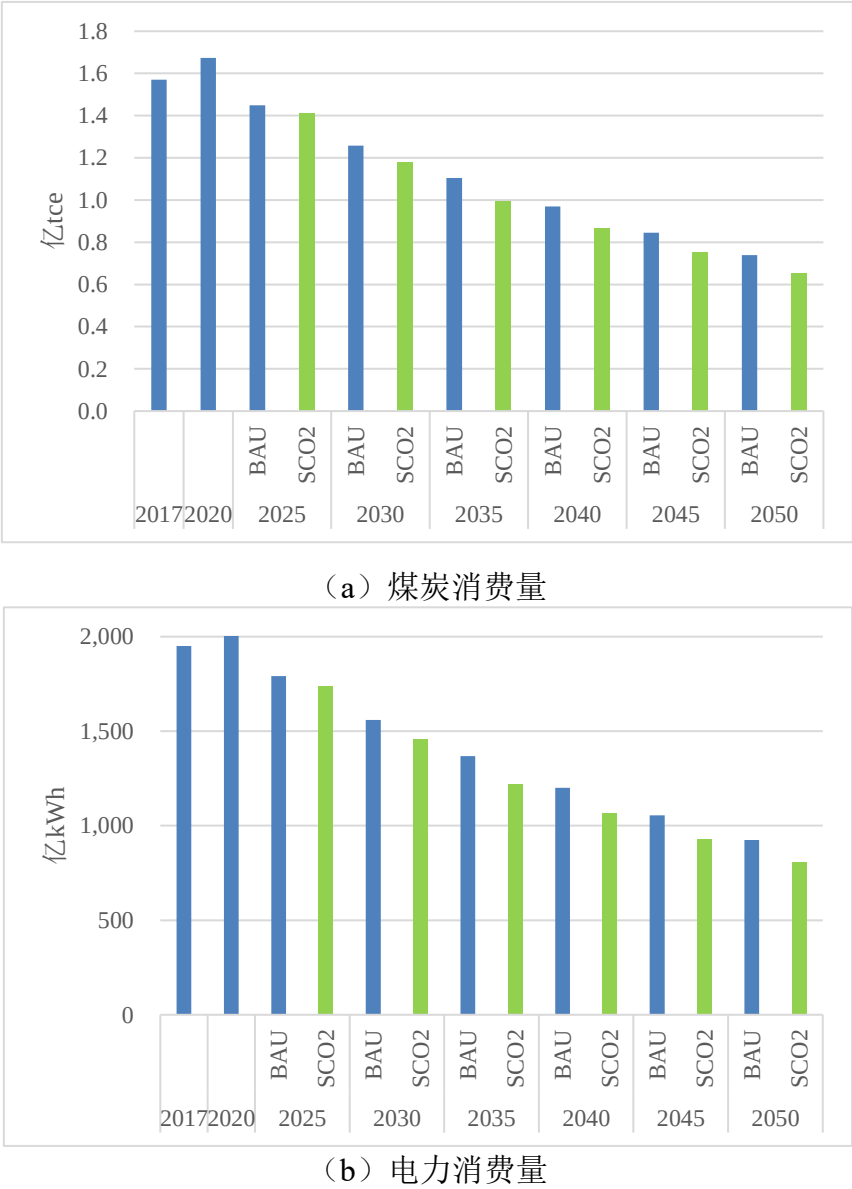


图 5-5 2020-2050 年水泥行业能源消费预测结果

从图 5-5 可以看出：

（1）BAU 情景下，在规模削减、结构优化、技术进步的共同作用下，水泥行业煤炭、电力消费量均逐渐减少，2025 年煤炭、电力消费量分别为 1.45 亿 tce 和 1,791.98 亿 kWh，较 2017 年分别减少 7.66%和 8.10%；2050 年煤炭、电力消费量分别为 0.74 亿 tce 和 924.85 亿 kWh，较 2017 年分别减少 52.95%和 52.57%。

（2）与 BAU 情景相比，碳税情景下水泥行业煤炭、电力消费量均进一步减少，2025 年煤炭、电力消费量分别为 1.41 亿 tce 和 1,736.68 亿 kWh，较 BAU 情景分别减少 2.76%和 3.09%；2050 年煤炭、电力消费量分别为 0.65 亿 tce 和 805.47 亿 kWh，较 BAU 情景分别减少 11.77%和 12.91%。

5.2.3 水泥行业污染排放

2020-2050 年水泥行业 CO₂ 和大气污染物排放预测结果见图 5-6。

从图 5-6 可以看出：

（1）BAU 情景下，在规模削减、结构优化、技术进步的共同作用下，水泥行业温室气体和大气污染物排放量均逐渐减少，2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 9.77 亿 t、12.27 万 t、107.22 万 t、18.29 万 t，分别比 2017 年削减 9.50%、27.85%、16.23%、47.74%，相应的 2025 年 ER-eq 排放量为 497.77 万吨，较 2017 年削减 12.74%，从削减贡献来看 CO₂ 占 52.50%、SO₂ 占 6.86%、NO_x 占 30.10%、PM 占 10.55%；2050 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 4.89 亿 t、5.41 万 t、50.26 万 t、4.91 万 t，分别比 2017 年削减 54.71%、68.18%、60.73%、85.96%，相应的 2050 年 ER-eq 排放量为 242.81 万 t，较 2017 年削减 57.43%，从削减贡献来看 CO₂ 占 67.09%、SO₂ 占 3.72%、NO_x 占 24.98%、PM 占 4.21%。

（2）与 BAU 情景相比，碳税情景下水泥行业温室气体和大气污染物排放量均进一步削减，2025 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 9.49 亿 t、11.73 万 t、102.72 万 t、17.45 万 t，分别比 BAU 情景削减 2.94%、4.39%、4.20%、4.59%，相应的 2025 年 ER-eq 排放量为 481.38 万 t，比 2017 年削减 15.61%，从削减贡献来看 CO₂ 占 54.85%（较 BAU 情景提高 2.36 个百分点）、SO₂ 占 6.23%、NO_x 占 29.88%，PM 占 9.04%，较 BAU 情景进一步削减 3.29%；2050 年 CO₂、SO₂、NO_x、PM 排放量分别为 4.29 亿 t、4.55 万 t、42.34 万 t、4.77 万 t，分别比

BAU 情景削减 12.20%、15.89%、15.75%、2.88%，相应的 2050 年 ER-eq 排放量为 211.31 万 t，比 2017 年削减 62.96%，从削减贡献来来看 CO₂ 占 67.38%（较 BAU 情景提高 0.3 个百分点）、SO₂ 占 3.65%、NO_x 占 25.11%，PM 占 3.86%，较 BAU 情景进一步削减 12.97%。

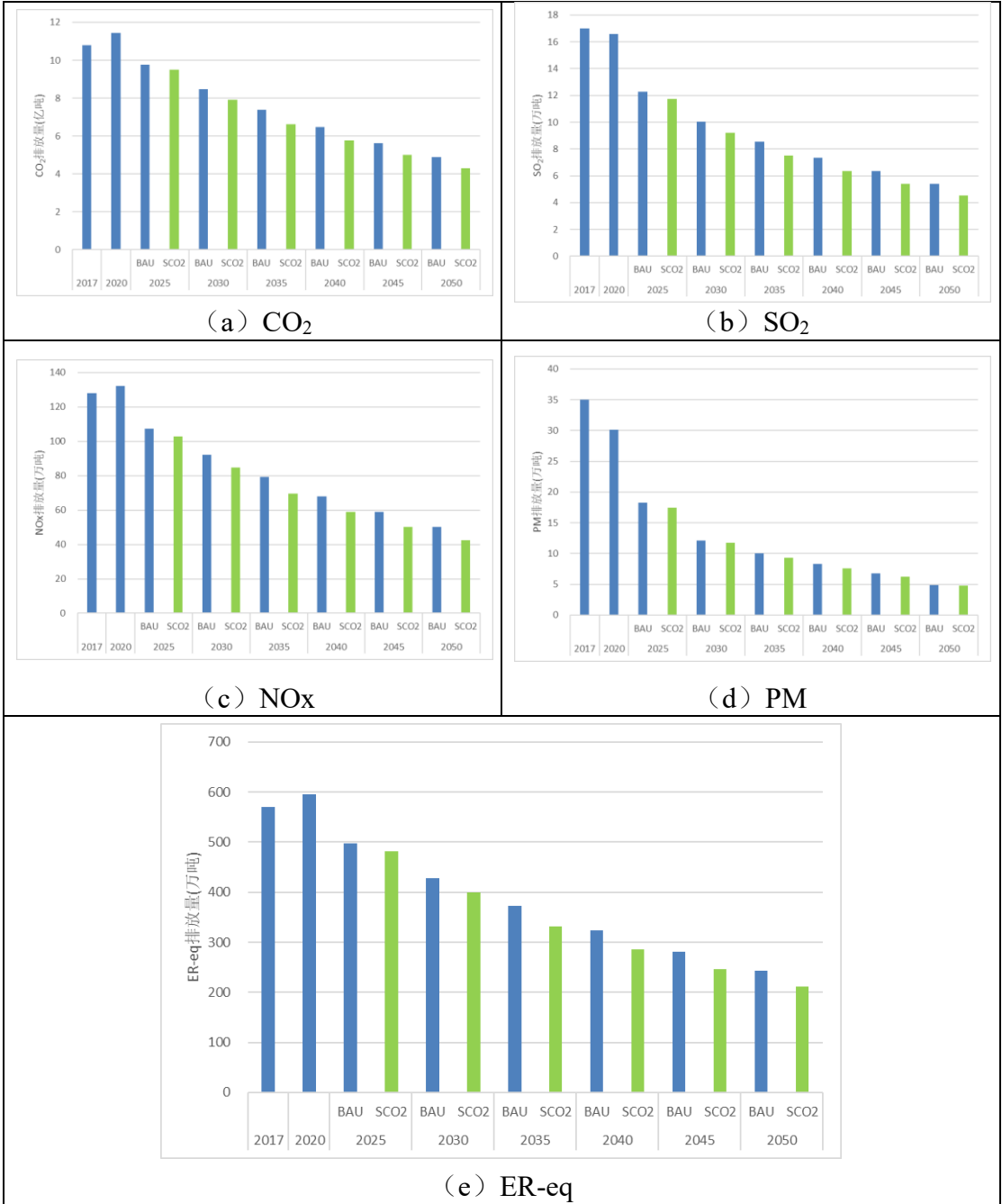


图 5-6 2020-2050 年水泥行业 CO₂ 和大气污染物排放预测结果

6 结论与促进钢铁行业、水泥行业温室气体与大气污染物协同控制措施建议

6.1 结论

(1) 绝大多数深度脱碳措施/技术具有协同控制大气污染效果

从协同控制效果评估结果来看,本研究所筛选的钢铁行业、水泥行业大多深度脱碳措施/技术(包括节能及能效提升、结构调整、需求减量、原(燃)料回收和替代等)都具有协同减排大气污染物的效果(钢铁行业 CCS、CCUS-EOR 和超低排放改造措施除外,水泥行业 SCR、湿法脱硫措施除外),其中需求减量和结构调整措施的协同控制效果显著,减排潜力较大。

(2) 优先选择节能及能效提升、原(燃)料回收和替代类措施

从单位污染物减排成本来看,大多数节能及能效提升、原(燃)料回收和替代类措施/技术,可以通过节能或燃料与原料替代带来收益(或降低成本),企业认可度较高。钢铁行业中,“高温高压干熄焦(T4)”成本最低,综合排序最为靠前,“烧结余热发电技术(T7)”、“燃气轮机值班燃料替代(T13)”、“大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术(T21)”等次之。水泥行业中,“水泥企业可视化能源管理系统(CT19)”“低温余热发电技术(CT8)”成本最低,综合排序最为靠前,“辊压机半终粉磨系统(水泥)(CT16)”“辊压机终粉磨系统(生料)(CT15)”“外循环生料立磨技术(CT17)”等次之。这些措施协同性较好,属于应优先选择的协同控制措施。

(3) 碳税政策有助于钢铁、水泥行业协同控制发展

从 CGE-CIMS 复合模型模拟结果来看,与 BAU 情景相比,实施碳税政策既有助于优化钢铁和水泥行业发展规模,也有助于增强低碳技术的竞争力,提高其市场占比,促进钢铁行业、水泥行业结构调整,进而促进温室气体减排;此外,在规模效应、结构和技术效应(低碳技术大多为新技术或大规模生产线,具备低碳、低污染排放效果,其市场占比提高可带来结构和技术效应)共同作用下,可以实现钢铁和水泥行业的大气污染物协同减排。

(4) 末端大气污染控制措施/技术仍是现阶段的必要措施/技术

深度脱碳措施/技术可以在一定程度上实现钢铁和水泥行业的大气污染物协

同减排，但钢铁和水泥行业都是能源和原材料消耗较多的行业，大气污染物排放节点较多，排放量较大。因此，尽管脱硫、脱硝、除尘等末端大气污染控制措施/技术针对单一大气污染物有显著的减排效果（尽管与深度脱碳措施/技术相比，由于末端污染物治理设备增加了能耗，带来了一定的温室气体增排，例如钢铁行业“超低排放改造（T29）”和水泥行业“湿法脱硫技术（CT23）”，而且减排成本高，协同控制效果弱），但在现阶段仍是钢铁、水泥行业实现大气污染控制目标、促进区域空气质量达标的必要措施/技术。

6.2 促进温室气体与大气污染物协同控制措施建议

（1）推动将钢铁、水泥行业协同控制写入相关规划

2020 年既是“十三五”的收官之年也是“十四五”相关规划的筹备和前期研究阶段，2018 年国务院机构改革将应对气候变化职能纳入了生态环境部，为协同控制工作的深入开展提供了体制机制保障，应对气候变化相关工作内容将成为《十四五生态环境保护规划》的重要组成部分。钢铁和水泥作为温室气体减排和大气污染控制的重点行业，将该两行业的协同控制要求写入生态环境保护规划，不仅对本行业温室气体和大气污染物协同控制具有指导意义，也可以为其他行业开展协同控制提供思路 and 参考。

（2）优先选择节能和能效提升、原（燃）料回收与替代类措施/技术

钢铁、水泥行业大多数节能和能效提升、原（燃）料回收与替代类措施/技术，可以通过节能或燃料与原料替代带来收益（或降低成本），企业认可度较高。从 MAC 曲线上可以看出，节能与能效提升类措施/技术的经济效益比较好，污染物和温室气体协同减排效果也比较好，但是与结构调整和需求减量措施/技术相比，节能与能效提升类措施/技术的减排潜力相对较小，可选择单位 ER-eq 减排成本相对适中且减排潜力大的协同控制措施/技术加以补充。具体建议如下：

① 企业优先选择单位 ER-eq 减排成本较低能效提升类措施/技术，并根据国家政策和企业自身情况，选择适合的末端治理措施/技术，因地制宜进行超低排放改造。

② 国家继续推行和推进结构调整类措施/技术（压减和置换水泥熟料产能、水泥行业错峰生产等），提升水泥行业总体协同减排效果。

③ 建议大力提供水泥协同处置垃圾、协同处置污泥等措施/技术的政策支持，

保证水泥企业协同处置垃圾、污泥的可持续性。

(3) 重点关注结构调整和需求减量化类措施/技术

虽然结构调整和需求减量化类深度脱碳措施/技术的单位 ER-eq 减排成本较高，排序相对靠后，但是减排潜力巨大，仍然是钢铁行业、水泥行业应该重点关注的协同控制措施/技术。

钢铁行业：T1（减少不合理钢铁消费需求）、T2（淘汰落后产能）、T3（增加短流程炼钢比例）、T4（提高高炉入炉球团比）等。

水泥行业：CT1（水泥消费减量）、CT2（压减和置换水泥熟料产能）、CT3（水泥行业错峰生产）。

(4) 不断提高大气污染控制措施/技术的能效和处理效率

钢铁行业超低排放标准已经发布并实施，尽管国家层面尚未正式发布水泥行业超低排放标准，但河北、四川、河南等地已经出台了地方标准并逐步在当地企业推广实施。为满足新的超低排放要求，脱硫、脱硝、除尘等末端治理措施仍是钢铁、水泥行业必不可少的。“十四五”时期及以后，可通过加强大气污染控制措施/技术的研发与实践，以更低的处理成本和更低的能耗实现更高的处理效率，进而可以提高大气污染控制措施/技术协同减排温室气体的效果。

(5) 推动环境经济政策措施的出台和实施

目前，钢铁、水泥行业均未纳入全国碳排放权交易体系，我国的碳税政策仍处于理论研究和探讨阶段。碳税等环境经济政策有助于将温室气体和大气污染物排放的成本内部化，以市场经济的手段淘汰高碳、高污染的落后产能，促使钢铁、水泥企业实施节能、减碳、大气污染控制等措施/技术，助推钢铁、水泥行业的协同控制发展。

6.3 关于今后协同控制研究工作的思考

目前，协同控制的理念已经得到广泛的认可，相关研究主要聚焦于温室气体（以 CO₂ 为主）和大气污染物（以 SO₂、NO_x 和 PM 常规大气污染物为主）之间的协同控制。但协同控制的对象温室气体不应局限于 CO₂，对象污染物也不应仅限于大气污染物。协同控制的研究范围应及时拓展，如温室气体应扩展到 CH₄、N₂O、碳黑等；大气污染物应将 VOC（O₃ 前体物之一）、CO、NH₃、重金属（如

Hg)等纳入；另外，还应涵盖废水及水污染指标（COD、氨氮），固废（含一般工业固体废物、危险废物），乃至各类资源，如水资源、土地资源等。这样，才能够适应更复杂的应对气候变化和生态环境保护工作要求，为政策制定者提供更好的决策支持服务。