

基于STIRPAT模型水泥行业CO₂和大气污染物协同效应研究

杨珍珍

华北水利水电大学生态环境学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年3月1日; 录用日期: 2025年3月14日; 发布日期: 2025年5月29日

摘要

工业快速发展的同时, 导致大气污染和环境治理问题加剧。为早日实现“双碳”目标, 本研究从能源密集型工业出发, 基于STIRPAT模型和协同效应系数, 结合情景分析法对水泥行业大气污染物和CO₂协同减排效应进行研究, 结果表明, (1) 在2023~2060年间二氧化碳和大气污染物在BAU、PS、ES及SES均表现出良好的减排效果, ES情景减排程度最大。(2) 各减排情景均位于第一象限呈现正协同效应; 协同效应系数呈上升趋势。

关键词

水泥行业, STIRPAT模型, 协同效应

Study on the Synergistic Effect of CO₂ and Air Pollutants in the Cement Industry Based on the STIRPAT Model

Zhenzhen Yang

Faculty of Ecology and Environmental Sciences, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 1st, 2025; accepted: Mar. 14th, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

With the rapid development of industry, the problems of air pollution and environmental governance have been exacerbated. In order to achieve the “dual carbon” goals at an early date, this study starts from energy-intensive industries. Based on the STIRPAT model and the synergistic effect

coefficient, and combined with the scenario analysis method, it conducts a study on the synergistic emission reduction effect of air pollutants and CO₂ in the cement industry. The results show that: (1) During the period from 2023 to 2060, both carbon dioxide and air pollutants show good emission reduction effects under the BAU, PS, ES, and SES scenarios, and the ES scenario has the greatest degree of emission reduction. (2) All emission reduction scenarios are located in the first quadrant, presenting a positive synergistic effect; the synergistic effect coefficient shows an upward trend.

Keywords

Cement Industry, STIRPAT Model, Synergistic Effect

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国政府宣布了“在 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值，并尽最大努力尽早达到峰值”的目标。这将要求二氧化碳密集型行业大幅减少其排放量。水泥工业是能源最密集的工业部门之一，也是 CO₂ 排放和大气污染物的最大贡献者之一。中国作为一个发展中国家，已经经历了几十年的工业化和城市化[1][2]。快速的经济扩张导致了化石燃料消费的激增，导致空气污染物和二氧化碳排放量的急剧增加[3]。

长期以来，经济发展与生态环境调控之间的不平衡给中国带来了两个相互关联的挑战：空气质量改善和碳减排的报告。鲍彦荣等[4]构分析上海市 2006 年~2021 年减污降碳协同效应情况，通过构建协同系数和耦合协调度模型，运用 STIRPAT 模型预测 2022~2030 年的温室气体和大气污染物排放量。崔连标等[5]基于基尼系数和 Tobit 回归模型，构建耦合协调度模型测算中部六省 2010~2021 年减污降碳的耦合协调度，结果表明，减污降碳耦合协调度整体偏低，并在 2016 年后出现下降趋势，耦合协调度地区差异明显。周颖等人[6]基于能源环境经济投入产出模型，从技术角度评估减排节能技术大气污染物和温室气体减排的效果，并测算协同作用程度。何峰等[7]利用协同控制效应评价体系，对大气污染物和温室气体协同减排程度进行评估。温宗国等[8]基于 NSGA-II 算法、TOPSIS 方法和多目标优化模型，对水泥行业环境多目标进行评估，研究表明，同时提高能源强度和清洁生产技术经济成本等多个目标时，可实现环境质量和经济绩效内在权衡。

为研究“双碳”目标下我国水泥行业减污降碳协同控制及效益研究，本研究以 2022 年为基准年，运用 STIRPAT 模型，结合情景分析法，设置基准情景、政策情景、节能情景及强化情景，预测各情景下我国水泥行业 2023 年~2060 年二氧化碳及大气污染物排放量，运用协同坐标系及交叉减排协同系数分析二氧化碳和大气污染物协同减排程度，为我国早日实现碳达峰和碳中和目标，提出合理建议。

2. 研究方法与模型

2.1. CO₂ 及大气污染物排放量核算方法

在水泥生产过程中会排放大量的 CO₂，其来源有两种：一是直接排放；二是间接排放。具体公式如下：

$$E_{\text{CO}_2} = E_p + E_f + E_d = M \cdot F_{cl} + H \cdot F_i + D \cdot g$$

式中： E_{CO_2} ：水泥行业 CO₂ 排放总量，万吨； E_p ：水泥煅烧过程中产生的 CO₂ 排放量，万吨； E_f ：燃料

燃烧产生的 CO₂ 排放量, 万吨; E_d : 电力消耗产生的 CO₂ 排放量, 万吨; M : 水泥熟料产量, 万吨; F_{cl} : 熟料碳排放因子; H : 煤炭等化石燃料量, 万吨; F_i : 各燃料的碳排放因子; D : 电力的消耗量, kwh; g : 电力碳排放因子;

水泥行业所产生的大气污染物利用物料衡算法进行核算, 具体公式如下:

$$E_i = G - R = \sum(G_i - R_i) = \sum[P \cdot M_i (1 - n_T \times K_i)]$$

式中: E_i : 污染物排放量, kg; G : 污染物产生量, kg; P : 产污系数, kg/t; M_i : 产品产量, kg; R : 污染物去除量, kg; n_T : 平均去除效率, %; K_i : 某实际运行率, %

2.2. 大气污染当量和减污降碳协同排放当量核算

$$E_{LAP} = \alpha E_{SO_2} + \beta E_{NO_2} + \delta E_{PM_{10}}$$

式中: E_{LAP} : 大气污染当量, t; E_{SO_2} : SO₂ 排放量, t; E_{NO_2} : NO₂ 排放量, t; $E_{PM_{10}}$: 排放量, t; α 、 β 、 δ 分别为 SO₂、NO₂、PM₁₀ 当量系数;

减污降碳协同排放当量计算公式如下:

$$Q = \theta E_{LAP} + KE_{CO_2}$$

式中: Q : 协同排放当量, t; θ : 大气污染当量系数; K : 温室气体当量系数(表 1);

Table 1. Air pollutants and greenhouse gas equivalent coefficients

表 1. 大气污染物及温室气体当量系数

污染物名称	当量系数	当量系数值
SO ₂	α	1/0.95
NO ₂	β	1/0.95
颗粒物	δ	1/2.18
大气污染当量系数	θ	1
温室气体当量系数	k	0.00372

2.3. STIRPAT 模型

STIRPAT 模型来源于 IPAT 等式, 公式如下:

$$I = PAT$$

式中: I : 为环境负荷; P : 人口规模; A : 富裕度; T : 技术水平;

IPAT 等式对环境的影响呈现各因素之间呈现等比例关系, 存在局限性, 为克服 IPAT 等式的不足, 本研究基于 IPAT 模型, 构建了 STIRPAT 模型, 公式如下:

$$I = \alpha \times P^b \times A^c \times T^d \times e$$

式中: α 为常数, P 、 A 和 T 含义同上, b 、 c 和 d 分别为 P 、 A 和 T 的指数项, e 为误差项。

为了消除 STIRPAT 模型中存在的异方差影响, 本研究将所有变量进行对数化处理, 使其变成线性方程, 构建拓展的 STIRPAT 模型如式:

$$\ln I = \ln a + b_1 \ln P_1 + b_2 \ln P_2 + c_1 \ln A_1 + c_2 \ln A_2 + d_1 \ln T_1 + d_2 \ln T_2 + d_3 \ln T_3 + d_4 \ln T_4 + \ln e$$

式中: I 为大气污染物或二氧化碳排放量; P_1 为人口数量、 P_2 为城镇化率; A_1 、 A_2 , 分别表示人均 GDP、第二产业占比, 反映经济水平指标 A ; T_1 单位水泥能源强度、 T_2 水泥产量、 T_3 熟料系数、 T_4 单位水泥能

耗, 反映技术水平指标 T ; a 为常数项; b 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 为指数项; e 为误差项。

由于 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 CO_2 的 VIF 值均大于 10, 存在严重共线问题, 用岭回归的方法来解决这一问题。选取岭回归系数, SO_2 为 0.178, $R^2 = 0.983$; PM_{10} 为 0.15, $R^2 = 0.985$; NO_2 为 0.2, $R^2 = 0.981$; CO_2 为 0.1, $R^2 = 0.981$; 此时, 拟合效果最好, 得到有效的模型公式:

$$\begin{aligned}\text{Ln}_{\text{SO}_2} &= -3.79 + 0.202 \ln P_1 + 0.461 \ln P_2 + 0.075 \ln A_1 + 0.465 \ln A_2 \\ &\quad - 0.022 \ln T_1 + 0.461 \ln T_2 - 0.376 \ln T_3 - 0.492 \ln T_4 \\ \text{Ln}_{\text{NO}_2} &= -4.188 + 0.14 \ln P_1 + 0.418 \ln P_2 + 0.056 \ln A_1 + 0.416 \ln A_2 \\ &\quad + 0.011 \ln T_1 + 0.5851 \ln T_2 - 0.27 \ln T_3 - 0.4 \ln T_4 \\ \text{Ln}_{\text{PM}_{10}} &= -3.738 + 0.238 \ln P_1 + 0.413 \ln P_2 + 0.081 \ln A_1 + 0.467 \ln A_2 \\ &\quad - 0.046 \ln T_1 + 0.398 \ln T_2 - 0.43 \ln T_3 - 0.541 \ln T_4 \\ \text{Ln}_{\text{CO}_2} &= -1.348 + 0.145 \ln P_1 + 0.427 \ln P_2 + 0.051 \ln A_1 + 0.484 \ln A_2 \\ &\quad - 0.012 \ln T_1 + 0.5721 \ln T_2 + 0.567 \ln T_3 - 0.283 \ln T_4\end{aligned}$$

2.4. 数据来源

本文所用数据水泥产量、人口数量、城镇化率、人均 GDP、第二产业占比、均来自《中国统计年鉴》(2000~2023)。熟料系数、单位水泥能源强度根据定义核算得出。对于缺失的数据采用插值法进行补充。

2.5. 情景设置

本文运用情景分析法对 CO_2 和大气污染物问题进行预测研究, 设定基准情景(BAU)、政策情景(PS)、减排情景(ES)、强化减排(SES)情景预测不同减排程度下大气污染物及 CO_2 的协同效应程度。

2.6. 协同效应分析方法

1. 协同效应坐标系分析法

本文利用协同控制效应坐标系, 对 CO_2 和大气污染物协同控制效应进行了分析。

2. 协同效应弹性系数分析法

协同效应弹性系数分析法, 评估温室气体减排幅度对于各种大气污染物减排幅度的敏感程度。本文用 $ELS_{a/b}$ 表示协同减排程度。具体公式如下:

$$ELS_{a/b} = \frac{\Delta \rho_a / \rho_a}{\Delta \rho_b / \rho_b}$$

$ELS_{a/b}$ 表示 a 对 b 的弹性系数, ρ_a 和 ρ_b 分别表示 a 和 b 的总量; $\Delta \rho_a$ 和 $\Delta \rho_b$ 分别表示采取污染物控制措施或政策引起的 a 和 b 的减排量; $\Delta \rho_a / \rho_a$ 表示 a 排放变化率; $\Delta \rho_b / \rho_b$ 表示 b 物排放变化率。

3. 结果与讨论

3.1. 大气污染物和二氧化碳排放概况

从 2000 年至 2022 年, 大气污染物排放总量经历了先增后减再趋于稳定的复杂过程。由于我国城镇化进程的加速, 技术进步和环保意识的相对滞后, 导致大气污染物排放总量逐年增加, 2000 年到 2013 年排放总量从 462,691 t 增长到 1,899,123 t, 增长了约 3.1 倍。2014 年到 2018 年总排放量整体处于下降阶段, 到 2018 年, 排放量降至 1,722,020 t, 降低了 9.4%。2019 年到 2021 年排放量处于平稳波动阶段, 主要得益于国家环保政策的持续实施和技术水平的不断提升。2022 年总排放量降至 1,660,841 t, 相较 2021 年下降了约 5.7%。进一步表明, 随着国家环保政策的不断加强和行业绿色转型的深入推进, 水泥行业的环

保治理成效显著。水泥行业产生的大气污染物中，NO₂排放量最多，其次是SO₂，PM₁₀最少(图 1)。

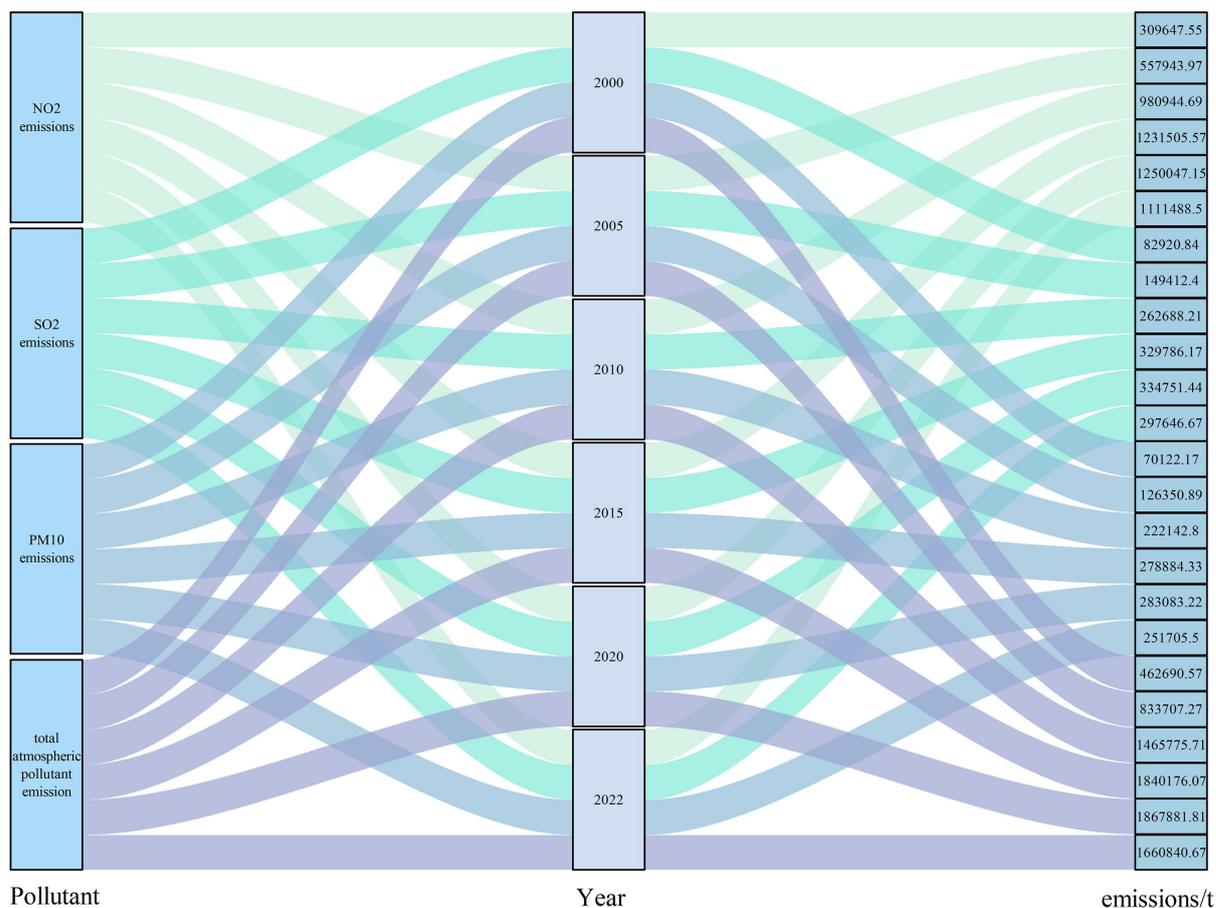


Figure 1. Changes in air pollutant emissions from the cement industry from 2000 to 2022

图 1. 2000 年~2022 年水泥行业大气污染物排放量变化图

水泥行业 CO₂ 排放量是基于水泥行业生产过程中产生的排放、煤炭及电力等能源消耗产生的排放。2000~2022 年我国水泥行业 CO₂ 排放量呈现波动上升变化趋势，2000 年 CO₂ 排放量为 36,737 万吨，2010 年 CO₂ 排放量为 101,636 万吨，2014 年达到峰值为 121,593 万吨，到 2022 年，排放量已降至 109,305 万吨。2014~2022 年 CO₂ 排放量呈现波动下降趋势，自 2014 年起，我国水泥行业 CO₂ 排放总量下降。虽然在 2017 年期间有所反弹，但整体而言，CO₂ 排放量在逐步减少。在总排放量中，间接排放的占比逐渐增加。这可能与水泥生产过程中所使用的能源(如煤炭、电力等)的碳排放量增加有关。同时，也反映了水泥行业在供应链和能源使用方面的碳排放问题日益突出(图 2)。

3.2. 大气污染物和二氧化碳协同减排量分析

基于 STIRPAT 模型公式可知不同情景下 2025~2060 年大气污染物及二氧化碳排放量，如上图所示。由图可知，BAU 情景下整体来看 SO₂ 排放量变化趋势较为平缓；NO₂ 排放量整体呈下降趋势；在整个预测期间内，PM₁₀ 排放量变化并不明显，呈现先上升后下降较为平缓的变化趋势。在 BAU 情景下，NO₂ 排放量下降幅度最高，其次为 SO₂，PM₁₀ 下降速度最慢。CO₂ 排放量下降趋势更为显著且下降速度最快。总体来讲 PS 情景下 CO₂ 和大气污染物排放量均少于基准情景，表现出良好的减排效果。ES 情景中，进一步对 P₁、A₁、A₂、T₁、T₂、T₃、T₄ 进行约束，而 SES 情景中，将有利于大气污染物减排的影响因素改

进，因此在 ES 情景下大气污染物及 CO₂ 排放量，与 PS 情景相比均有下降(图 3)。

总体来说，各情景下 SO₂、NO₂、PM₁₀ 预测排放量均低于基准年，随着政策的约束，节能减排技术的推广及节能力度的加大，在同一约束情景下，NO₂ 降低幅度最大，SO₂ 排放量下降幅度大于 PM₁₀。其中 ES 及 SES 情景中各年份 CO₂ 排放量显著降低，说明对 A₂、T₂ 以及 T₄ 约束足以抵消由 A₁ 及 P₂ 提高所产生的 CO₂ 排放。

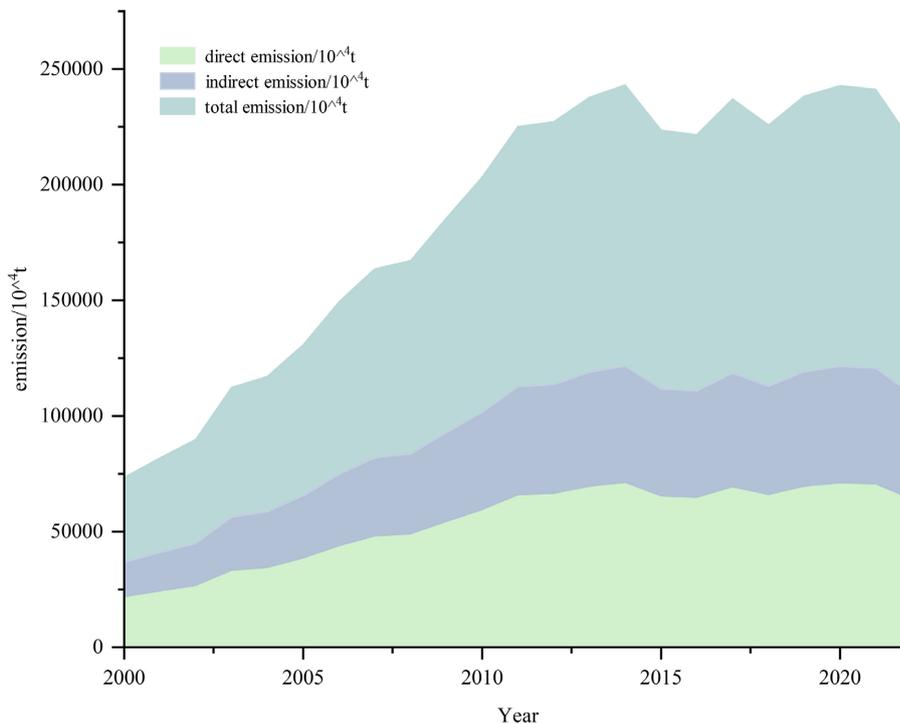
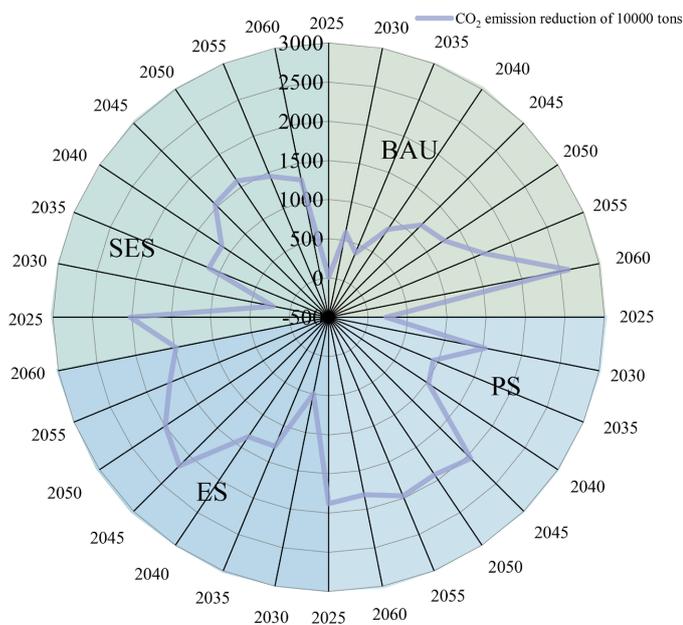


Figure 2. Changes in greenhouse gas emissions from the cement industry from 2000 to 2022
图 2. 2000 年~2022 年水泥行业温室气体排放量变化图



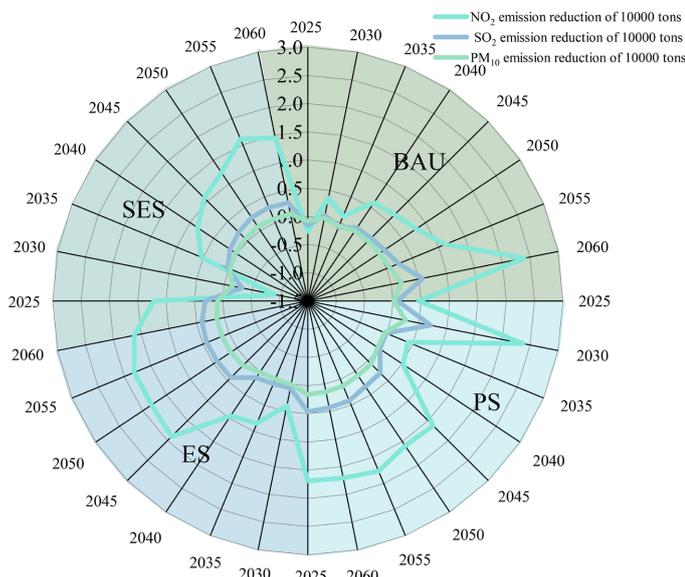


Figure 3. Emission reductions of air pollutants and greenhouse gases under different scenarios
图 3. 各情景下大气污染物和温室气体减排量

3.3. 大气污染物和 CO₂ 协同效应分析

各项情景协同控制效应坐标系如图所示。各减排情景均位于第一象限，说明减排情景及其他控制情景呈现正协同效应。协同减排综合控制情景中，ES 情景距离原点最远，说明该情景对大气污染物和 CO₂ 的减排效果都最明显，协同减排效能最大，PS 情景次之；ES 情景对大气污染物和 CO₂ 减排效果优于其他情景。ES 情景协同效应程度较高，能在一定程度上实现大气污染物以及温室气体协同减排，则说明水泥行业在大气污染协同治理中具有一定的减排潜力(图 4)。

采用上述公式计算各情景中各年份大气污染物和温室气体的协同效应弹性系数 $E_{(LAP/GHG)}$ ，本文中 LAP 代表 SO₂、NO₂、PM₁₀，GHG 代表 CO₂，将各情景中的每种大气污染物及二氧化碳排放量降幅之比作为减污降碳弹性系数，分析方法与其他弹性系数分析一致，如果某一情景中 $E_{(LAP/GHG)}$ 小于 0，则不具备协同效应，如果 $E_{(LAP/GHG)}$ 大于 0，则具有协同效应，协同效应系数越接近于 1，协同效应程度越高(图 5)。

在 BAU 情景中弹性系数 $E_{(NO_2/CO_2)}$ 在研究时段内均大于 0，则表明该情景下均产生减排，具备协同控制效应。在 PS 情景中，弹性系数 $E_{(NO_2/CO_2)}$ 和 $E_{(SO_2/CO_2)}$ 均大于 0，说明进行大气污染物减排的同时，CO₂ 排放量也会随之减少，具有减污降碳正向协同控制效应。并且大气污染物和温室气体弹性系数较基准情景均有所提升，说明随着政策的出台和规划严格把控，协同控制效应正在向着好的态势发展。在 ES 情景和 SES 情景中，弹性系数均大于 0，说明在 PS 情景之外，其他情景在大气污染物减排的同时，CO₂ 的排放量也会随之减小，对大气污染物和 CO₂ 均存在正向协同控制效应。在减排情景中，弹性系数均大于 0，弹性系数 $E_{(NO_2/CO_2)}$ 、 $E_{(SO_2/CO_2)}$ 及 $E_{(PM/CO_2)}$ 相较于 BAU 情景均呈上升趋势，弹性系数 $E_{(PM/CO_2)}$ 在 2030 年存在正向协同控制效应，在 2050 年弹性系数最高分别为 $E_{(NO_2/CO_2)} = 0.86$ 、 $E_{(SO_2/CO_2)} = 0.51$ 、 $E_{(PM/CO_2)} = 0.32$ ；在 SES 情景中弹性系数均呈上升趋势，在 2050 年弹性系数最高分别为 $E_{(NO_2/CO_2)} = 0.86$ ，而在 2060 年 $E_{(SO_2/CO_2)}$ 和 $E_{(PM/CO_2)}$ 正向协同效应最大， $E_{(SO_2/CO_2)} = 0.64$ 、 $E_{(PM/CO_2)} = 0.5$ ，可以看出各项污染物的减排效果均低于 CO₂，且在 ES 情景及 SES 情境中，NO₂ 和 CO₂ 减排速度相当，说明随着减排措施的更加完善以及减排手段的不断的加强，大气污染物及 CO₂ 协同效应程度也会提高。总体来看 ES 和 SES 情景对水泥行业协同减排贡献力度最大，PS 情景次之。

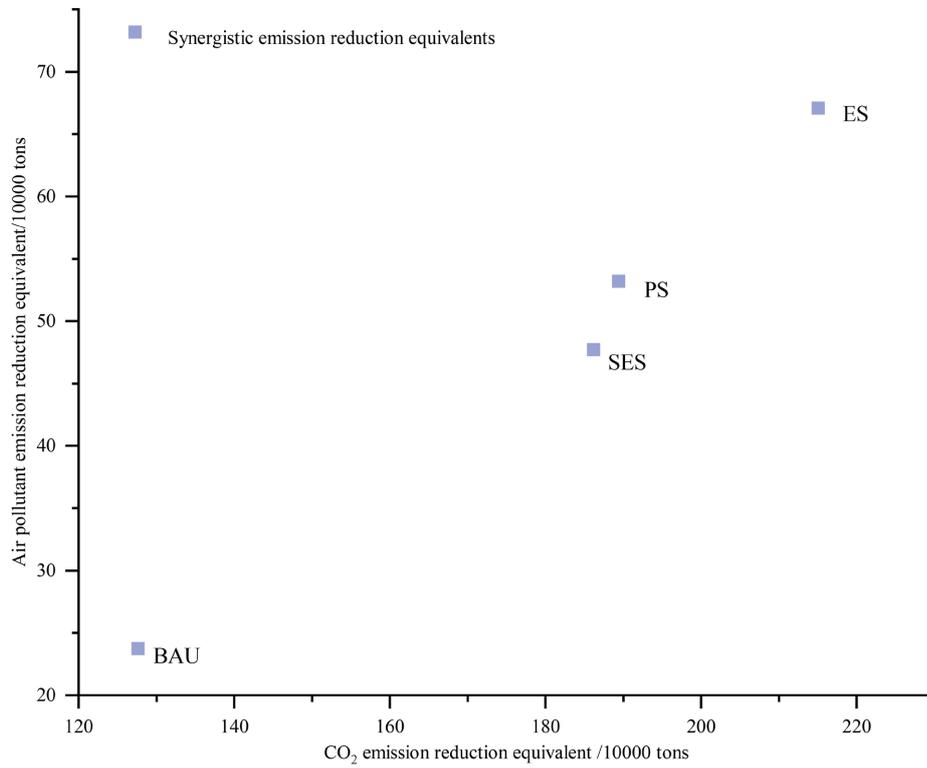


Figure 4. Coordinate system of coordinated emission reduction of air pollutants and CO₂
图 4. 大气污染物和 CO₂ 协同减排坐标系

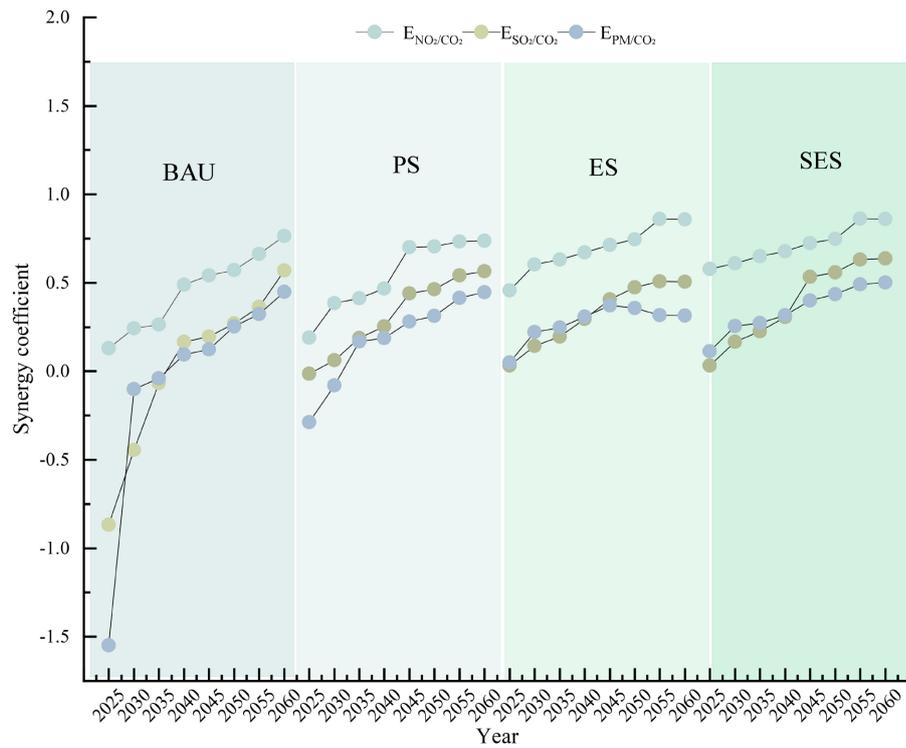


Figure 5. Coefficients of synergistic effects of air pollutants and CO₂
图 5. 大气污染物和 CO₂ 协同效应系数

4. 结论与建议

4.1. 结论

本研究以 2022 年为基准年, 运用 STIRPAT 模型, 结合情景分析法, 设置基准情景、政策情景、节能情景及强化情景, 预测各情景下我国水泥行业 2023 年~2060 年二氧化碳及大气污染物排放量, 运用协同坐标系及交叉减排协同系数分析二氧化碳和大气污染物协同减排程度, 得出结论如下:

(1) 在 2000~2022 年我国水泥产量整体呈现先上升后下降变化趋势; 大气污染物排放总量表现为先增后减再趋于稳定的状态。二氧化碳排放量整体呈现先上升后下降趋势。

(2) 在 2023~2060 年间二氧化碳和大气污染物在 BAU、PS、ES 及 SES 均表现出良好的减排效果, ES 情景减排程度最大。各情景下 CO₂ 排放量预测结果显示, 不同情景预测量均小于基准年排放量, 在 ES 及 SES 中 CO₂ 排放量减排效果更为显著。

(3) 协同减排坐标系分析表明, 各减排情景均位于第一象限, 说明减排情景及其他控制情景均呈现正协同效应。从协同减排交叉弹性系数分析, 各情景下协同效应系数呈上升趋势, 大气污染物减排速度略小于温室气体。

4.2. 建议

随着经济发展和城镇化的推进, 大规模的基础设施建设需要大量的水泥和钢材, 城镇化对高耗能产品的刚性需求, 并不能完全由技术进步来抵消。因此, 能源短缺、大气污染物和二氧化碳排放等挑战不可避免, 为实现高质量发展提出以下建议:

为了实现“低碳”水泥工业, 应采用更多节能技术, 随着全球对减排的关注, 我国水泥工业应借鉴发达国家的经验, 采用替代燃料, 特别是工业废弃物和生物质燃料, 从传统的碳密集型化石燃料向环境友好型可再生能源的转变。

改进相关政策规划措施, 推动加强协同减排政策产生发展的先决条件。加强政策创新, 鼓励和控制技术发展, 改善排污权交易制度, 加大宣传力度。

参考文献

- [1] Dong, F., Yu, B. and Pan, Y. (2019) Examining the Synergistic Effect of CO₂ Emissions on PM_{2.5} Emissions Reduction: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, **223**, 759-771. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.152>
- [2] Liu, Z., Deng, Z., He, G., Wang, H., Zhang, X., Lin, J., et al. (2021) Challenges and Opportunities for Carbon Neutrality in China. *Nature Reviews Earth & Environment*, **3**, 141-155. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00244-x>
- [3] Shu, Y., Hu, J., Zhang, S., Schöpp, W., Tang, W., Du, J., et al. (2022) Analysis of the Air Pollution Reduction and Climate Change Mitigation Effects of the Three-Year Action Plan for Blue Skies on the “2 + 26” Cities in China. *Journal of Environmental Management*, **317**, Article ID: 115455. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115455>
- [4] 鲍彦荣, 何建佳, 何胜学, 等. 上海市减污降碳协同效应分析与预测[J/OL]. 资源开发与市场, 1-14. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X7jC3qydZ59UqrEvU0wthSDGK1liSCpyP0X5T-xlYHvZgLCHehwr0lpNNdDtIC5HckUNb0W-TFmUekJwaPLINZGvYBMAfhfnU2suMzcZyPN5xRvEzY_IH2QBDC_b-VD6-VESxqTooZ6gO7jpCLesEBVK5LFKMGaUMu7V_DQIR2h7ZkTsMSIRNA=&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2025-03-01.
- [5] 崔连标, 李宇, 段梅. 中部六省减污降碳时空演变特征及驱动因素研究[J]. 郑州轻工业大学学报(社会科学版), 2025, 26(1): 39-49.
- [6] 周颖, 张宏伟, 蔡博峰, 等. 水泥行业常规污染物和二氧化碳协同减排研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 164-168.
- [7] 何峰, 刘峥延, 邢有凯, 等. 中国水泥行业节能减排措施的协同控制效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 400-409.
- [8] 温宗国, 黄达, 丁加, 等. 基于 NSGA-II 和混合加权算法的环境管理多目标优化——以中国水泥行业为例[J]. 环境经济研究, 2021, 6(4): 8-21.