



济南市温室气体与大气污染物协同控制 研究报告

Report on Synergistic Control of Greenhouse Gases and Air Pollutants in Jinan City

清华大学

济南市环境研究院

2022.4.14

Tsinghua University

Jinan Environmental Research Academy

April 14, 2022

目 录

第1章 研究背景与现状	1
1.1. 工作背景.....	1
1.2. 济南市经济社会发展现状.....	2
1.3. 济南市能源消费情况.....	3
1.3.1. 济南市十三五期间能源消费情况.....	3
1.3.2. 能源产出效率.....	4
1.4. 空气质量现状分析.....	5
1.5. 碳排放现状分析.....	5
1.6. 面临的问题与挑战.....	7
1.6.1. 结构性污染问题依然严峻.....	7
1.6.2. 快速发展带来的环境压力不容忽视.....	7
1.6.3. 空气质量进一步改善压力大.....	8
第2章 研究方法	10
2.1. 目标与技术路线.....	10
2.2. 协同控制量化评估方法.....	11
2.2.1. 协同控制概念.....	11
2.2.2. 国际协同管理经验.....	12
2.2.3. 协同效应评估指数构建.....	13
2.3. 温室气体和大气污染物排放清单构建.....	20
2.3.1. 二氧化排放清单.....	20
2.3.2. 大气污染物排放清单.....	22
2.3.3. 二氧化碳与大气污染物热点排放网格分析.....	25
2.4. 模型设置与模型验证.....	28
2.4.1. 模型设置.....	28
2.4.2. 排放清单.....	31
2.4.3. 模型验证.....	31
2.4.4. 气象模拟分析.....	32
第3章 情景设置及减排潜力分析	35

3.1. 基本假设.....	35
3.1.1. 经济社会发展预测.....	35
3.1.2. 主要污染物新增排放量预测.....	39
3.2. 情景设置.....	42
3.2.1. 情景措施组合.....	42
3.2.2. 能源结构优化措施.....	44
3.2.3. 工业企业转型升级与污染减排.....	45
3.2.4. 运输结构调整及移动源污染防治.....	47
3.2.5. 推动城市精细化环境管理.....	47
3.3. 污染减排潜力分析.....	48
3.3.1. 污染物和二氧化碳减排量.....	48
3.3.2. 空气质量达标分析.....	51
第4章 温室气体与大气污染物协同控制效益评价	57
4.1. 单位减污协同减碳量评估.....	57
4.2. 单位减污成本及费效评估.....	61
4.3. 小结.....	63
第5章 协同控制路径与政策建议	66
5.1. 协同控制目标.....	66
5.2. 促进产业结构优化升级.....	66
5.2.1. 电力热力行业.....	67
5.2.2. 钢铁行业.....	68
5.2.3. 其他行业.....	69
5.3. 推动能源清洁低碳转型.....	70
5.4. 推进交通领域协同增效.....	72
5.5. 有续推进工业源深度治理.....	73
5.6. 优化实施其他减排措施.....	73
5.7. 逐步转向以“碳”为引领设计减排路径	74
5.8. 顶层设计协同增效与保障措施.....	74
5.8.1. 建立数据管理协同体系.....	74

5.8.2.	加强管理政策创新协同.....	74
5.8.3.	推动评价管理统筹融合.....	75
5.8.4.	统筹协同计量监测体系.....	75
5.8.5.	积极争取纳入国家试点示范.....	76

第1章 研究背景与现状

1.1. 工作背景

我国的生态环境保护工作同时面临着传统污染物减排、环境质量改善和全球气候变化应对等多重严峻挑战。统筹协调大气污染物减排与温室气体控制是有效改善国内环境质量、落实《巴黎协定》国际承诺、推动生态文明建设和美丽中国建设的重大战略举措。党的十九大报告提出，中国要持续实施大气污染防治行动，打赢蓝天保卫战，引导应对气候变化国际合作，成为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者、引领者。这对应对气候变化和我国大气环境管理提出了更高的要求。2021年1月，生态环境部印发《关于加强和统筹应对气候变化与环境生态保护相关工作的指导意见》，明确要做好大气污染物和温室气体协同控制，提供政策依据。

环境污染物与温室气体具有一定同根同源性，当前减污与降碳在管控思路、管理手段、任务措施等方面高度一致，需要统筹谋划、一体推进、协同实施，实现降本增效。业界普遍认为如果没有碳达峰、碳中和的推动力，以现有的政策措施，在2030年之后，减污过程会减缓。要想进一步提升空气质量，就需要依靠与双碳工作相结合，协同推进减污降碳。对济南市来说，这一过程会更加靠前。

济南作为山东省省会城市，当前整体处于由经济高速增长向高质量发展的转型攻坚期，生产生活方式变革面临巨大不确定性。大气污染防治工作已经进入攻坚期和深水区，末端治理减排的边际成本越来越高，而深入推进产业、能源、运输、用地等方面的结构调整又存在诸多困难；科学治霾、精准治污的需求日益增长。为了实现空气质量的达标和温室气体减排目标的实现，下一阶段需要对现

行的污染减排政策进行优化调整，更有针对性制定和实施污染防治政策和措施，实现精细管控，精准治理。

济南作为典型的能源密集型工业城市。二氧化碳等温室气体与常规污染物排放具有同根、同源、同过程的特点，协同管理具有很好的理论基础和实践经验。高碳的能源结构，决定了降碳与减污之间可以产生很强的协同效应。为高效配置行政资源，协同实现大气环境质量持续改善和引领气候变化应对的目标，济南亟需开展常规大气污染物与温室气体协同控制顶层设计研究。

1.2. 济南市经济社会发展现状

近年来，济南市经济总体上健康稳定发展，2020 年济南市生产总值为 10140.91 亿元，同比增长 4.9%。一二三产占比分别为 3.57%、34.82% 和 61.62%。常住人口突破 900 万人。济南市坚持了绿色发展理念，提出了持续深化生态济南建设，推动黄河流域生态保护和高质量发展，协同推进社会经济高质量发展和生态环境高水平保护的目标，绿色低碳循环发展取得了积极成效。

济南市提出了 2035 年基本建成新时代现代化强省会的远景目标。初步提出十四五期间地区生产总值年均增长 7% 左右，经济和人口承载能力显著增强，常住人口城镇化率达到 75% 的目标。并将推进绿色低碳循环发展列入国民经济和社会发展第十四个五年规划。

济南市应对气候变化工作起步较早，2017 年 1 月被国家发改委列为第三批国家低碳城市试点，2017 年 2 月被国家发改委、住房城乡建设部列为国家气候适应型城市建设试点，成为山东省唯一的国家“双试点城市”。于 2018 年 11 月出台了《济南市低碳发展工作方案（2018-2020 年）》，提出到 2025 年左右碳排放达到峰值，并力争尽早提前达峰。济南市“十四五”应对气候变化专项规划中，提出统筹有

序做好碳达峰、碳中和工作，争取尽早达峰。

2019 年，济南市碳排放总量为 9064.1 万吨二氧化碳；碳排放强度，即单位 GDP 二氧化碳排放为 1.01 吨二氧化碳/万元，比 2015 年累计下降 31.3%，提前完成《山东省低碳发展工作方案》中明确的“十三五”期间济南市碳排放强度下降 20.5% 的指标。已基本扭转了 CO₂ 排放快速增长的局面。这一良好的发展为济南市实现应对气候变化目标打下了坚实的基础。

1.3. 济南市能源消费情况

1.3.1. 济南市十三五期间能源消费情况

济南市作为全国最早的工业生产基地城市之一，工业发展带动了全市经济发展，同时也带来了能源消费需求的增加。2016 年以前，能源消费总量不断攀升，随后济南市实施了新旧动能转换及能源结构调整等政策，能源消费总量一定程度上有所下降。据初步统计，十三五期间（2016 年到 2020 年），济南市累计消耗能源 1.94 亿吨标煤，其中 2017 年和 2018 年济南市能源消费总量也同比明显下降，主要原因是济钢停产搬迁。2019 年济南市能源消费总量 3703.19 万吨标煤，比 2018 年略有下降；2020 年能源消费总量与 2019 年基本一致。如图 1-1。

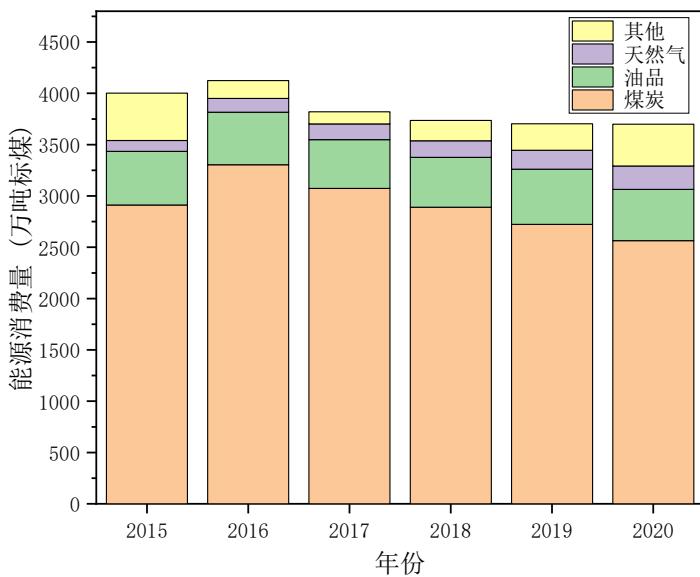


图 1-1 济南市 2015 年-2020 年能源结构

当前，煤炭和油品仍是济南市能源消费的主体。随着近年来节能减煤工作的深入推进，煤炭消费量逐年下降，但至 2020 年，煤炭在能源消费中的比重仍达 70%。油品消费占比整体保持基本稳定，在 12%-15%之间。整体来看，济南市能源消费结构近几年得到了一些改善，但以煤炭为主的情况没有显著改变。

1.3.2. 能源产出效率

能源产出效率是衡量城市发展绿色化水平的重要指标。近年来，济南市深入推进工业、建筑、交通、公共机构等重点领域节能工作，能源消费结构持续改善，优化了济南市的能耗产出效益。“十三五”期间万元 GDP 能耗累计下降 35.8%。如图 1-2。

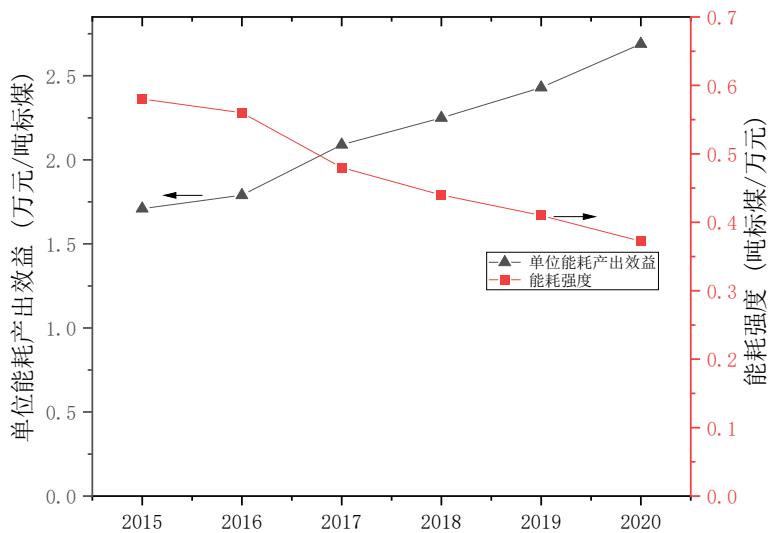


图 1-2 济南市单位能耗 GDP 产出效益和能耗强度

1.4. 空气质量现状分析

十三五期间，济南市采取了一系列扎实有效的工作，实现了环境质量的持续改善。2020 年，济南市城区环境空气中可吸入颗粒物（PM₁₀）、细颗粒物（PM_{2.5}）、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、臭氧年均浓度分别为 86 微克/立方米、47 微克/立方米、12 微克/立方米、35 微克/立方米、1.5 毫克/立方米、184 微克/立方米，其中二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳年均浓度达到《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）二级标准，可吸入颗粒物、细颗粒物、臭氧年均浓度分别超标 0.23 倍、0.34 倍、0.15 倍，细颗粒物年均浓度提前达到《济南市打赢蓝天保卫战三年行动方案暨大气污染防治行动计划（三期）》目标要求。从变化趋势上看，主要污染物浓度进一步下降，但臭氧污染仍较突出。

1.5. 碳排放现状分析

采用 IPCC：2006 年国家温室气体清单指南和省级温室气体清单编制指南推荐的方法，对近年来济南市温室气体排放情况进行计算，

结果如图 1-3。2015-2019 年，由于煤炭消费总量的不断下降，对济南市能源消费领域碳排放的影响十分明显，全市碳排放总量的变化趋势和煤炭消费产生的二氧化碳排放趋势保持了较高的一致性。2016 年，济南市（含原莱芜市）CO₂ 排放量为 10201.5 万吨，是近年来碳排放量最高的年份。此后 2017 年-2018 年全市碳排放总量受产业结构调整及济钢等高能耗企业关停搬迁等因素影响，能源消费出现明显下降。2019 年全市能源消费领域二氧化碳排放 9011.47 万吨，比 2015 年下降了 9.47%。

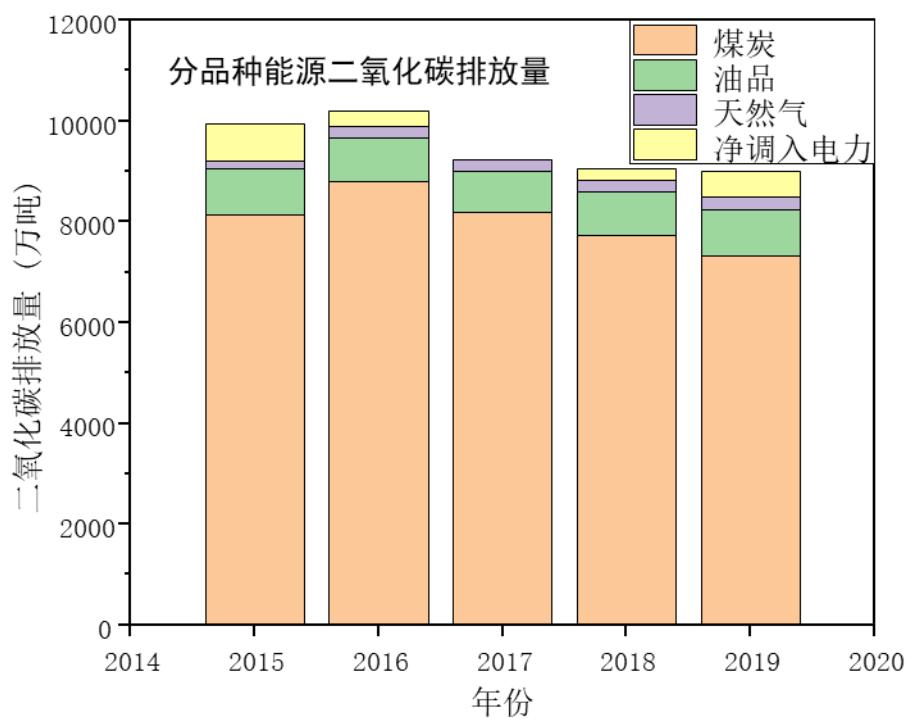


图 1-3 济南市 2015 年-2019 年能源领域二氧化碳排放变化情况

从具体能源看，煤炭仍然是济南市能源消费领域中碳排放的主要来源，虽然其排放总量在近年来不断降低，但煤炭消费产生的碳排放量仍达到了其他能源碳排放总量的 5 倍左右。煤炭消费产生的二氧化碳排放是全市碳排放的最大来源，也是未来减碳的重要着力

点。

1.6. 面临的问题与挑战

1.6.1. 结构性污染问题依然严峻

济南市由传统工业城市发展而来，以煤炭为主体的化石能源一直都是济南市能源供给和消费的主力，以 2015 年-2020 年能源消费结构情况来看，化石能源消费占比平均高达 95%左右，其中煤炭消费所占份额超过 70%，主要为工业能源消耗。随着 2019 年济南市行政区划调整，莱芜作为一个以钢铁和电力生产为主的城市并入济南，带来了大量的煤炭消费量，煤炭总量控制任务进一步加重，减碳压力加大。“十四五”期间，济南市结构性、根源性、趋势性压力总体上仍处于高位。产业结构方面，传统产业占比、高耗能重化工业占工业比重仍然较高，钢铁、水泥、石化等重污染企业布局不够合理，六大高耗能行业能源消费量占规模以上工业能源消费量的比重达 9 成左右，民营经济活力不强、县域经济实力偏弱。运输结构方面，仍以公路运输为主，2019 年公路货运量为 34392.0 万吨，是铁路货运量的 1.65 倍，加之作为省会城市、京沪通道，过境车辆较多，尤其是对于重型柴油货车的监管机制亟待进一步完善。

1.6.2. 快速发展带来的环境压力不容忽视

目前济南市正处于经济社会发展的关键时期，随着济南、莱芜行政区划调整顺利完成，以及济南建设国家中心城市和“大强美富通”现代化国际大都市进程的加快推进，“十四五”期间济南市仍将保持较快的经济增长速度。城市基础设施建设和城市更新压力持续存在，建筑施工带来的建筑扬尘、渣土运输及非道路移动机械的使用强度将高居不下，必将进一步加大颗粒物污染。机动车特别是大排量机动车保有量逐年上升，交通拥堵、交通污染等问题日趋严峻，移动

源污染将为大气污染的重要来源，细颗粒物、光化学烟雾污染面临加重的趋势。

经济社会的快速发展对能源资源的需求将会呈现出明显的刚性增长，而能源需求增长所带来的最直接结果就是二氧化碳排放量的增长。经济社会快速发展与资源环境承载力之间的矛盾存在进一步加大的可能，环境容量对经济社会发展的约束更趋紧张。新冠肺炎疫情仍存在反复的可能，对经济社会发展造成冲击的同时，在一定程度上也影响大气污染防治和碳减排工作的深入推进。

考察济南市的库兹涅茨曲线，绘制现阶段济南市碳排放量与人均GDP的关系图（图1-4），济南市目前正处于“倒U”形曲线的左侧阶段，单纯的依靠放慢经济发展速度以达到降低碳排放的目的是不可取的，必须要寻找新的方法在经济发展的同时实现节能减排目标的实现。如何在实现应对气候引领下的经济高质量发展，推进绿色低碳发展，将成为未来济南市所面临的重大课题。

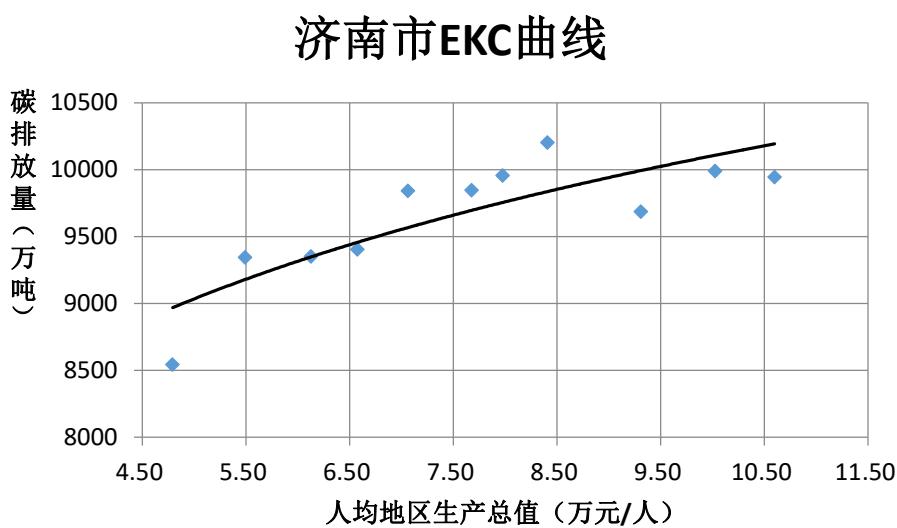


图 1-4 济南市碳排放与人均GDP走势

1.6.3. 空气质量进一步改善压力大

济南市生态环境保护工作取得巨大进步，特别是近几年大气污染防治攻坚战及各级环保督察（查）的开展更极大促进了环境质量

的改善。但环境空气质量距群众期盼仍有较大差距。

主要污染物改善程度不均衡且污染物削减空间逐步收窄，要继续提高治理水平必须走精细化管理路线，需要付出更多的努力，开发新技术、新手段势在必行。

能源与产业结构调整远未到位，机动车污染治理、VOCs治理、O₃治理等新治污攻关难度大。

受黄河河谷和泰山山谷等浅碟状地形影响，扩散条件差。要想进一步提高空气环境质量，必须采取超常规、强有力的污染控制措施。

第2章 研究方法

2.1. 目标与技术路线

(1) 研究目标

本研究通过设计实现空气质量目标的控制路径，深入探讨济南市各种控制措施对减少二氧化碳排放和改善空气质量的共同效益，提出大气污染物和温室气体减排的协同控制策略。研究成果有助于济南市建立“减污降碳”协同控制模式，促进经济社会高质量发展和绿色低碳转型。同时，也为其他城市中长期规划设计提供政策借鉴。

(2) 技术路径

“自下而上”构建济南市大气污染源和二氧化碳排放清单，采用WRF-CMAQ模型预测2025年和2035年不同情景下的空气质量改善情况。建立二氧化碳和大气污染物协同减排量化评估方法，对济南市PM_{2.5}达标情景下不同污染控制措施下的减污降碳协同效益进行量化。根据模型评估结果，提出济南市PM_{2.5}达标和CO₂减排的协同控制方案与政策建议。

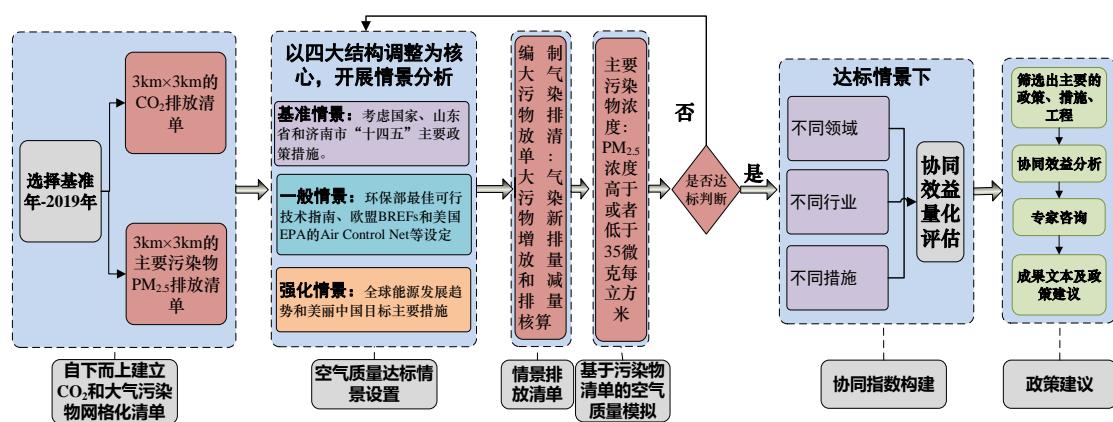


图 2-1 技术路线

2.2. 协同控制量化评估方法

2.2.1. 协同控制概念

基于不同气体排放之间的关联，旨在减少温室气体排放的气候政策与以控制大气污染为目标的大气污染控制政策在某种程度上会互相影响，即在实行其中一类政策时可能对另一类政策目标的实现产生“协同效应”。学界对这种政策协同效应的认知，经历了从次要收益到协同效益的转变。早在 1992 年，David Pearce 首先在论文中提出“次要收益”的概念，认为控制温室气体排放的政策本身不一定是对降低成本有效，但是许多减少 CO₂ 排放的政策具有协助 SO₂、NO_x 等其他污染物减排的次要收益，且这类次要收益可达到温室气体减排主要收益的 10-20 倍。随后，政府间气候变化专门委员会（IPCC）在《第二次评估报告 1995》中引用了次要收益的概念，并于《第三次评估报告 2001》中首次提出了“协同效益”的定义，即减缓温室气体排放的政策所产生的、被纳入政策制定考虑之中的非气候效益。

我国定义的协同效益不仅包含控制温室气体排放过程中减少的其他局域污染物排放，如 SO₂、NO_x、CO、VOC 及 PM 等，还将控制局域的污染物排放及生态建设过程中同时减少或者吸收 CO₂ 及其他温室气体排放的情形列为协同效益的另一个重要方面。中国以化石能源为主的能源结构导致人为二氧化碳（CO₂）排放与主要大气污染物排放具有很强的“同根、同源、同时”特征。一般而言，CO₂ 排放（除土地利用变化和林业排放外）都伴随大气污染物（SO₂、

NO_x 和颗粒物等) 排放, CO_2 排放与其伴随大气污染物排放“同根”(来自化石燃料, 除少量工业过程排放)、“同源”(同一设备和排放口排出)、“同时”(形成于燃烧发生过程中), 其相互之间具有非常紧密的关系。以煤为主的能源结构, 使得中国 SO_2 排放量的 90%、 NO_x 排放量的 67%、烟尘排放量的 70% 及 CO_2 排放量的 70% 都来自于燃煤。所有 CO_2 排放控制措施和技术(除 CO_2 捕集、利用与封存技术) 都会对其伴随的大气污染物产生显著影响。

常规大气污染物与温室气体排放主要源自化石燃料燃烧, 具有“同根同源同步性”。我国能源消费以煤为主, 化石能源消费导致的二氧化碳排放是温室气体排放最主要的来源, 煤炭消费也是导致大气污染最主要的来源。

2.2.2. 国际协同管理经验

IPCC 认为以降低温室气体排放为核心目标的减缓气候变化政策往往会有显著的社会、经济和环境效应, 对于气候政策的环境效应评估非常重要。IPCC 最新版清单指南《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》明确提出协同建设国家温室气体和大气污染物清单具有重要意义。全球尺度的研究认为, 降低温室气体排放的同时往往会显著降低相应污染物的排放, 对于发展中国家, 温室气体减排带来的空气质量改善则更加显著。根据 IPCC 第五次评估报告和国际相关研究, 温室气体和空气质量之间关联紧密, 充分评估和优化以温室气体减排为核心的气候变化减缓政策和空气质量改善政策之间的协同性, 对于降低政策成本、提高政策效率和公众可接受

度都非常重要。温室气体的环境影响是全球性的，不受区域条件的影响，但污染物的环境健康影响更多受区域局部条件诸如气象条件、暴露人口等影响，不同地方温室气体减排战略所产生的空气质量与环境健康效应空间差异性非常显著。因此，在开展温室气体减排与空气质量改善的工作过程中，存在着较大提质增效的协同管理空间。

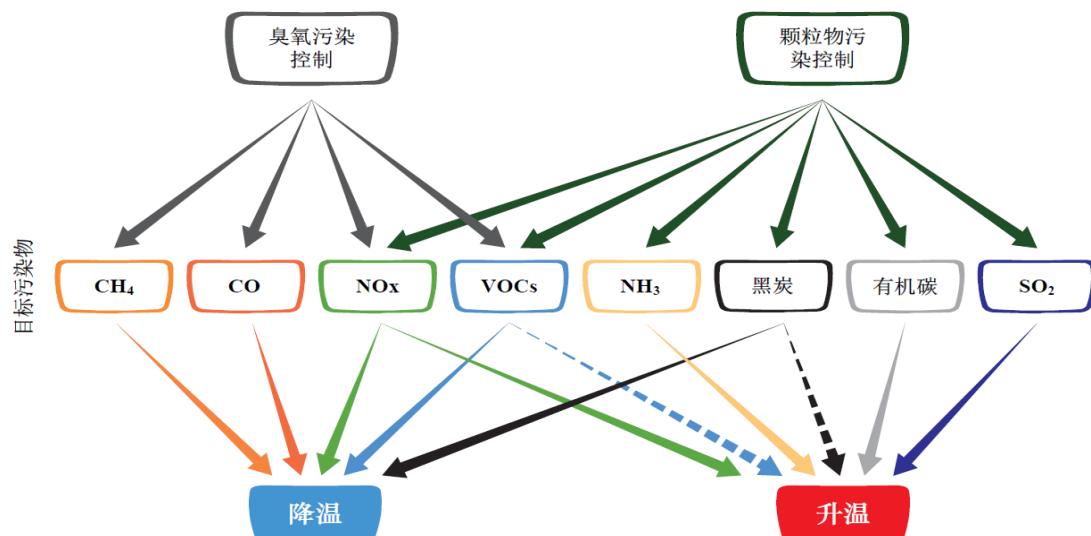


图 2-2 环境管理措施的气候变化效应（数据来源：IPCC AR5）

注：实线表示明确的效应；虚线表示效应尚不明确，有待进一步研究。

2.2.3. 协同效应评估指数构建

(一) 协同指数原理

目前针对温室气体与大气污染物之间的协同减排来说，主要有两个研究方向：一是温室气体减排导致大气污染物减排或增加；二是区域大气污染物减排导致温室气体减排或增加。目前的研究在全球、国家或者区域、城市各个不同尺度上都有开展。根据国内外的学术研究，主要有以下发现：(1) 温室气体和大气污染物的协同效应评估通常借助能源系统模型、空气质量模型、健康影响评价模型

相集成的综合模型，围绕碳交易政策、INDC 目标、电气化、能效提高、行业减缓措施等话题对低碳政策或气候政策的协同效益展开讨论。少部分文献关注了碳排放达峰的协同效益。且大部分文献主要聚焦全球或者国家层面，城市层面研究较少。（2）尽管普遍认为污染物减排或温室气体减排可带来正向协同效益，但不同区域的协同效益不尽相同。以国家层面进行协同管理，有可能带来区域层面的效益损失。协同效益评估和协同管理应综合多种情形进行全面考虑，因地制宜制定管理措施。因此，建立大气环境治理与温室气体协同控制可量化评价方法，是衡量协同效果的重要考量。

通常采用“协同效应系数”表示一定区域实施污染物减排措施，减排单位大气污染物的同时减少的温室气体减排量。“协同效应系数”的具体计算是对于给定的污染物减排措施，用温室气体减排量除以大气污染物的比值。即：

$$\text{协同效应系数} = \frac{\text{二氧化碳减排量}}{\text{常规大气污染物减排量}}$$

较大的协同效应系数意味着减排单位常规大气污染物的同时产生的温室气体减排量较大，也就说明该区域实施的污染物减排措施协同效应较好。从协同效应的角度出发，协同效应系数可以是衡量某项污染物减排措施或技术优劣的一项指标。协同效应系数可以比较同一区域不同污染物减排措施的协同效果，例如某一区域结构调整措施和工程减排措施的协同效应，也可比较不同区域同一污染物减排措施的协同效果。

基于协同效应系数计算原理，早期学者大多采用将大气污染控

制措施所产生的 CO₂ 减排量与大气常规污染物之间的比值作为协同效益量化评估方法，如公式 1 所示。

$$S_1 = \frac{\Delta E_{CO_2}}{\Delta E_P} \quad (1)$$

ΔE_{CO_2} 和 ΔE_P 分别表示 CO₂ 和常规污染物 P 的削减量，单位：吨/年。本研究中 ΔE_P 涉及的常规污染物包括 SO₂、NOx、VOCs、一次 PM_{2.5} 和 NH₃。S₁ 的值越高，表明协同效应越大。在某些情况下，当 ΔE_{CO_2} 和 ΔE_P 均较小时，S₁ 同样可能较大，这实际上意味着 CO₂ 和大气污染物的减排潜力均较小。为避免出现这种情况，引入“相对协同程度”参数，如公式（2）所示。

$$S_2 = \frac{\Delta E_{CO_2}/E_{CO_2}}{\Delta E_P/E_P} \quad (2)$$

E_{CO_2} 和 E_P 分别表示 CO₂ 和常规污染物 P 的排放总量，单位：吨/年。S₂ 越大，表明每减少单位常规污染物排放量的同时，带来较高的 CO₂ 减排潜力。

S₁ 和 S₂ 仅用于估算单一大气污染物减排所带来的 CO₂ 减少量。然而，在管理实践过程中，实施某一减排措施或减排工程时，往往会产生多种污染物同时减排现象，如对钢铁行业开展超低排放改造时，会同时降低 SO₂、NOx、VOCs 等污染物排放。研究表明，并不是所有常规污染减排与二氧化碳均具有较好的协同效应。因此，使用上述单一污染物和二氧化碳减排量比值的方法，很难有效反映不同领域不同减排措施带来的减污降碳协同效应。

（二）协同指数参数化

本研究在“自下而上”构建济南市大气污染物和二氧化碳一体化

排放清单的基础上，借助空气质量模型、RSM 模型等技术手段，建立济南市“协同效应”计算方程，系统量化污染控制措施-污染物减排量-PM_{2.5} 浓度-二氧化碳减排量协同效应。为了可以同时比较多种污染排放量的减少带来 CO₂ 减排效益，同时考虑协同管理应用需求，本研究构建三个减污降碳协同评估指数（SI_{PM} 指数、SI_{cost} 指数和 SI_{BC} 指数），量化济南市 PM_{2.5} 达标情景下，各项控制措施减污降碳协同关系。SI_{PM} 指数表示单位 PM_{2.5} 浓度下降协同减碳量；SI_{cost} 指数表示削减单位 PM_{2.5} 浓度的成本；SI_{BC} 指数表示效益费用比。

SI_{PM} 指数主要基于课题组前期关于“2+26”城市等效排放速率的研究方法，采用 RSM 模型建立济南达标情景下不同控制措施与 PM_{2.5} 浓度间的快速响应关系，量化单位 PM_{2.5} 浓度下降协同减少二氧化碳排放量。SI_{PM} 指数计算方法如公式（3）所示。

$$SI_{PM} = \frac{\Delta E_{CO_2}}{\Delta Conc_{PM_{2.5}}} \quad (3)$$

其中， ΔE_{CO_2} 代表某一减排工程实施后带来的二氧化碳减排量（万吨）； $\Delta Conc_{PM_{2.5}}$ 代表某一减排工程实施后带来的 PM_{2.5} 浓度变化（微克/立方米）， $\Delta Conc_{PM_{2.5}}$ 由 RSM 模型计算而来。RSM 模型是利用等效排放率的方法，将各物种分部门的排放，根据浓度的响应大小，等效为该物种总排放的占比（即映射系数），纳入进已建立的 RSM 模型进行等效替代。建立分行业的响应曲面模型的步骤如下所述。公式（4）是 PM_{2.5} 的浓度关于 SO₂、NOx、NH₃、VOCs 和一次 PM_{2.5} 这五个物种总排放建立的响应曲面模型，自变量为五种污染物的总排放：

$$Conc_{PM_{2.5}} = RSM(Emis_{SO_2}, Emis_{NO_x}, Emis_{NH_3}, Emis_{VOC}, Emis_{PM_{2.5}}) \quad (4)$$

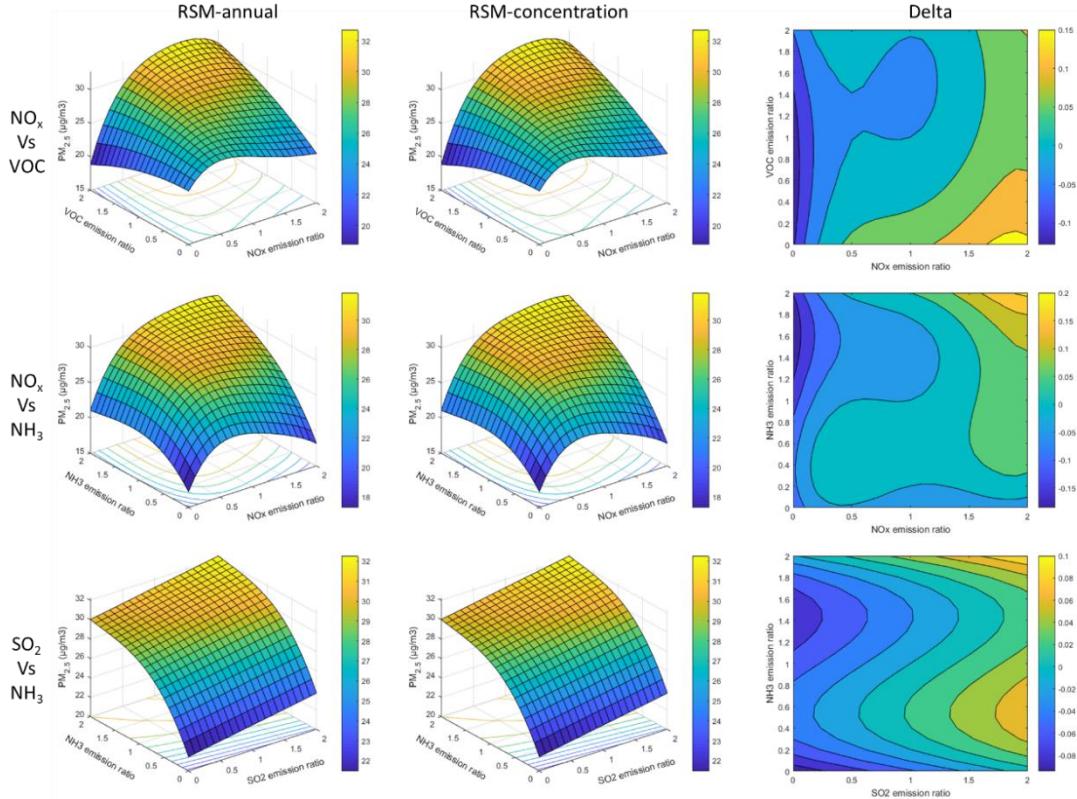


图 2-3 左列为以 $PM_{2.5}$ 年均浓度建立的 RSM (RSM-annual)，中间为以 $PM_{2.5}$ 浓度分组建立的 RSM 的组合 (RSM-concentration)，右列为两者差值，颜色为二次 $PM_{2.5}$ 浓度，横纵坐标为京津冀地区前体物排放率

为了进一步评估减排经济性，构建 SI_{cost} 指数评估 $PM_{2.5}$ 浓度降低的单位成本。指数越大，说明该领域或行业实现 $PM_{2.5}$ 浓度改善的成本越高。

$$SI_{cost} = \frac{ER_{eq}}{\Delta Conc_{PM_{2.5}}} \quad (5)$$

式中 ER_{eq} 表示某一减排工程实施的成本 (万元)。由于不同措施减排成本差异较大，核算方法也不相同。本研究采用课题组早期关

于山东省污染物边际减排成本曲线核算不同措施减排成本¹，山东省边际减排成本曲线如下图所示。

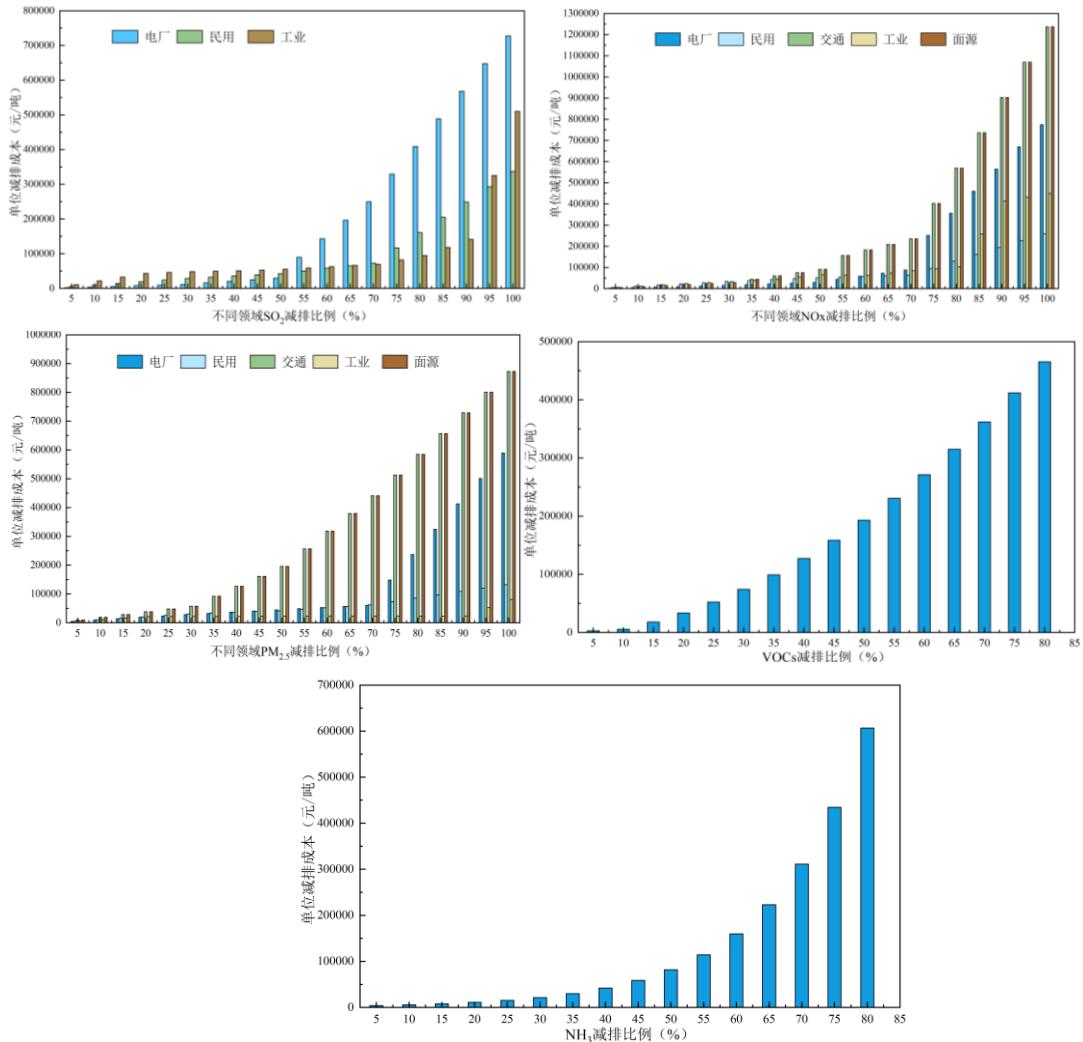


图 2-4 山东省大气污染物边际减排成本曲线

不同措施产生的减污降碳协同效益用 PM_{2.5} 浓度下降带来的健康效益增加（减少经济损失）以及碳减排效益之和来表示。根据效益费用比计算原理，SI_{BC} 指数计算公式如下：

$$SI_{BC} = \frac{HL_{PM_{2.5}} + HL_{CO_2}}{EReq} \quad (9)$$

式中 SI_{BC} 表示产出效益/投入费用。投入少，产出多，效益费用

¹ Zhang F, Xing J, Zhou Y, et al. Estimation of abatement potentials and costs of air pollution emissions in China[J]. Journal of environmental management, 2020, 260: 110069.

比越高；投入多，产出少，效益费用比低。效益费用比越高越好。

HL_{CO_2} 表示实施减排措施后 CO_2 减排效益，本研究采用 SCC 进行货币化价值估计。SCC 取值参考美国温室气体社会成本联席工作组的技术报告推荐值（97 元人民币/吨 CO_2e ，以 2020 年价格计）。

$HL_{PM_{2.5}}$ 表示 $PM_{2.5}$ 暴露人群健康损失的经济价值，万元。计算公式如下：

$$HL = \Delta DI \times \sum_{j \in (u, r)} VSL_j \quad (10)$$

ΣVSL 为统计寿命价值 Value of Statistical Life，表征在当前社会经济发展水平下，社会公众为降低死亡风险能够支付的财富金额总和。由于我国没有特定省份或城市的 VSL 预估值，因此采用效益转方法，即在调整人均可支配收入差异后，根据已有城市（如北京）的基准 VSL 推导出济南的 VSL，具体计算方法如下：

$$VSL_{jn} = VSL_{baseline} + (PCDI_{jn} - PCDI_{baseline}) \times MVSL \quad (11)$$

其中 VSL_{jn} 为济南市经过调整后的统计生命价值（万元）； $VSL_{baseline}$ 代表参考地区的 VSL，采用我国本地相关 CV 研究的 VSL 数据²。 $PCDI_{baseline}$ 为参考地区的人均可支配收入（北京 2017 年 VSL 为 541 万元）； $MVSL$ 为边际 VSL，取值为 100。经过计算得出济南 VSL 为 415 万元。

公式 10 中， ΔDI 即为措施实施前后 $PM_{2.5}$ 浓度变化导致的暴露人群死亡增长变化，万人，用来表征健康损失，计算公式如下：

$$DI = P \times BM_{ij} \times \left(1 - \frac{1}{RR_{i,j,k}}\right) \quad (12)$$

² Liang X, Zhang S, Wu Y, et al. Air quality and health benefits from fleet electrification in China[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(10): 962-971

$$RR_{i,j,k} = \exp \left\{ \frac{\theta_j \log \left(\frac{C_{i,k} - C_{cf}}{\alpha_j} + 1 \right)}{1 + \exp \left(- \frac{C_{i,k} - C_{cf} - \mu_j}{\nu_j} \right)} \right\} \quad (13)$$

式中 P 为暴露人口数，本研究基于常住人口计算，万人。根据第七次人口普查结果，济南市人口总数为 920 万人。i 表征疾病种类，j 表征对城市（u）和农村（j）分别计算 DI。BM_{ij} 为第 i 种疾病在城市的基础死亡率，人/10 万人。RR_i 为第 i 种疾病的相对风险系数 Relative Risk，无量纲。C_{i,k} 代表各情景下的 PM_{2.5} 模拟浓度；C_{cf} 为理论最低风险暴露水平，根据 WHO 2021 提供的 PM_{2.5} 空气质量准则值，取 5 μg/m³；θ_j、α_j、μ_j 和 ν_j 为 GEMM 模型相关参数。

2.3. 温室气体和大气污染物排放清单构建

由于碳排放清单和大气污染物排放清单编制技术指南的差异，以及不同类型排放源在碳排放和大气污染物一次排放中重要性的差异，当前济南市两类排放清单在部门划分方面也存在明显差异。为了实现同根同源的量化分析，做到协同减排，首先在济南市 2019 年大气污染物排放清单的基础上，重新收集活动水平数据，自下而上编制济南市大气污染物和二氧化碳一体化排放清单，从排放源头厘清两者间的关联机理，并实现两种清单在统计口径、核算边界、排放来源的统一。

2.3.1. 二氧化排放清单

2019 年济南市 CO₂ 排放量为 1.04 亿吨，其中一级分类源中化石燃料固定燃烧源和工业过程源是其主要排放来源，两者 CO₂ 排放占全市总排放量的 88%。二级分类源中，电力供热排放量最大，占总

排放量的 37.9%；其次为钢铁业行业占总排放量的 17.4%；焦化行业排第三，占总排放量 13.8%；其他行业排放占比均在 10%以下。

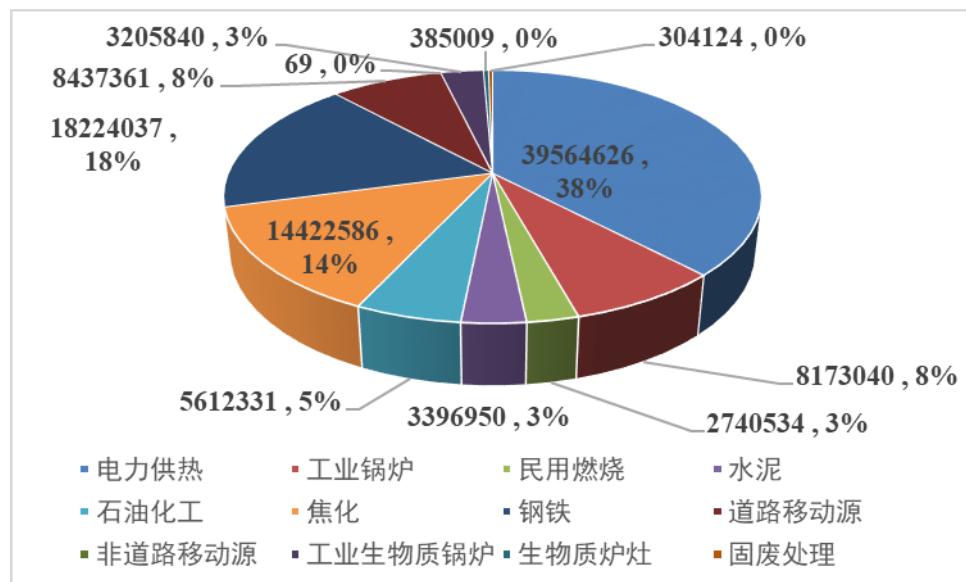


图 2-5 2019 年济南市各行业 CO₂ 排放状况

通过网格化清单空间分配方法，利用 Arc GIS 软件，计算分析得到 1 km×1 km 的济南市高时空分辨率 CO₂ 排放清单空间分布图，如下图所示。除个别网格出现较大排放量的固定燃烧点源外，整体来看，主城区是 CO₂ 排放强度最高的区域。

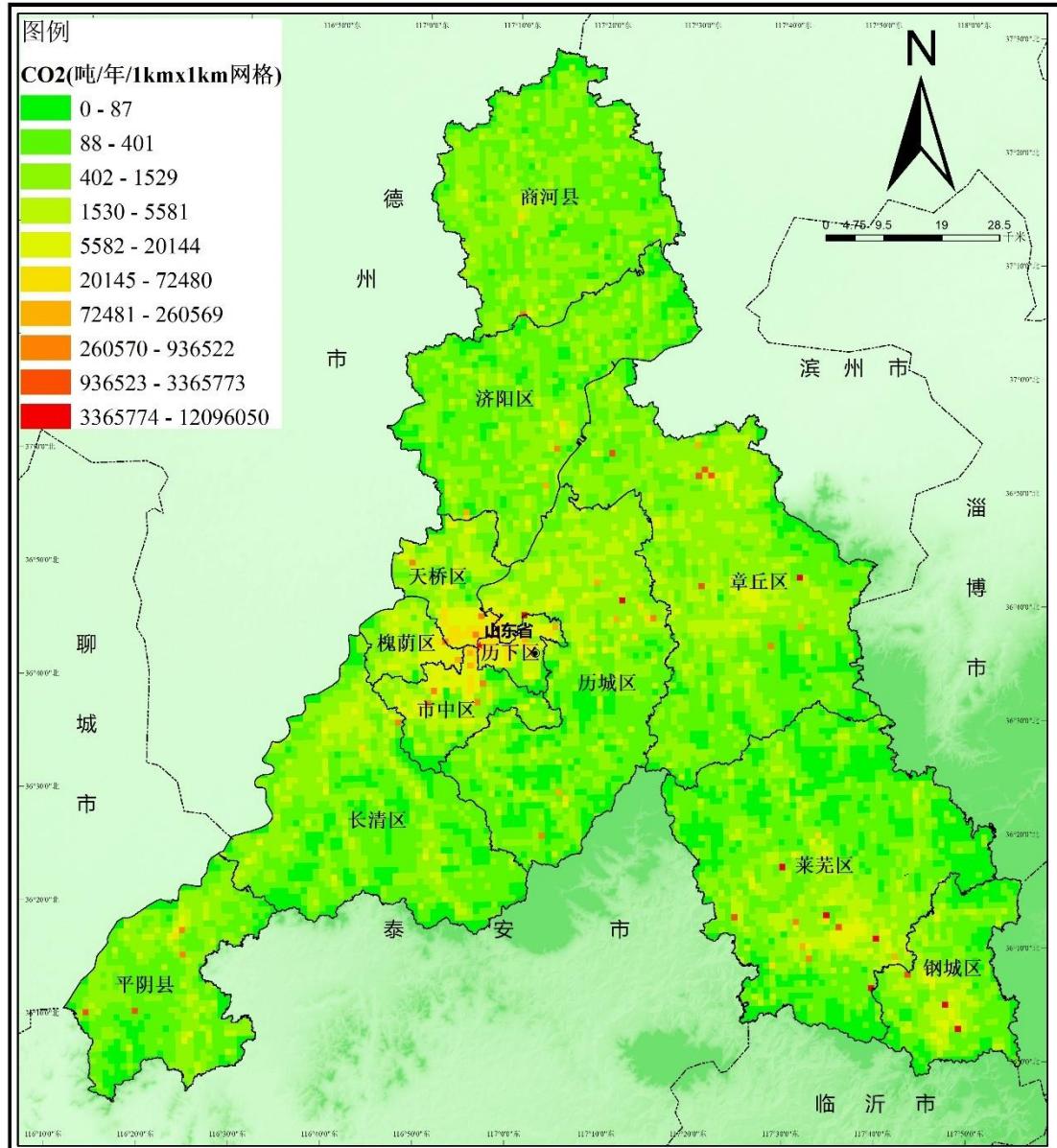


图 2-6 2019 年济南市 CO₂ 排放空间分布

2.3.2. 大气污染物排放清单

本研究大气污染物排放清单以贺克斌院士《城市大气污染物排放清单编制技术手册》为参考，结合济南市本地行业企业特色编制。根据经修正后的济南市大气污染物源排放清单结果，2019 年济南市主要大气污染物 SO₂ 排放量 2.80 万吨，NO_x 排放量 11.23 万吨，VOCs 排放量 11.70 万吨，PM₁₀ 排放量 17.63 万吨，PM_{2.5} 排放量 6.58

万吨，NH₃排放量 5.25 万吨。

其中，化石燃料固定燃烧源、工艺过程源为 SO₂ 的主要排放源，在总排放量中占比为 57.1%、40.1%；移动源、工艺过程源、化石燃料固定燃烧源为 NO_x 的主要排放源，在总排放量中占比分别为 44.1%、37.4%、17.5%；工艺过程源、移动源、溶剂使用源为 VOCs 的主要排放源，在总排放量中分别占比为 57.7%、13.8%、11.9%；扬尘源、工艺过程源、化石固定燃烧源为 PM₁₀ 的主要排放源，在总排放量中占比分别为 62.0%、27.7%、6.7%；工艺过程源、扬尘源、化石燃料固定燃烧源为 PM_{2.5} 的主要排放源，在总排放量中占比分别为 39.7%、38.3%、12.7%；农业源、废弃物处理源、工艺过程源为 NH₃ 的主要排放源，在总排放量中占比为 81.2%、9.2%、7.3%。

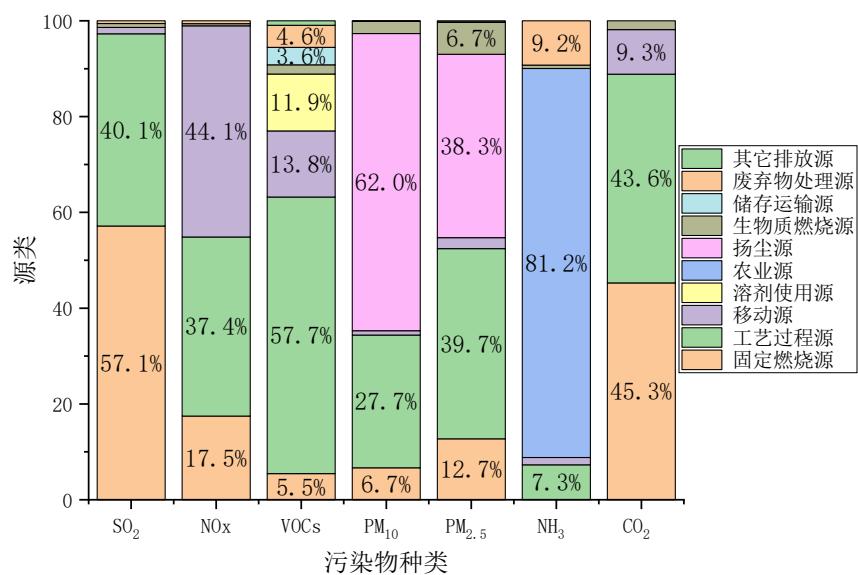
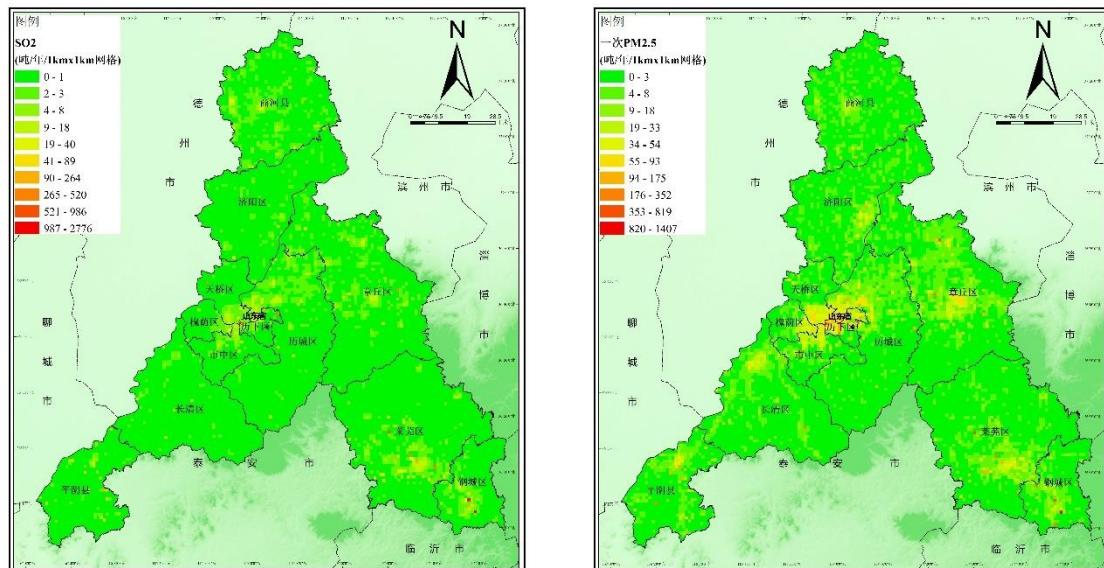


图 2-7 济南市各大气污染物及二氧化碳排放源构成

由于清单并未开展空间分配，本研究重点对清单进行空间分配。首先，对清单中的所有工业企业排放量进行核实，依据企业经纬度

坐标，采用 GIS 空间分析技术，“自下而上”建立高分辨率工业源 SO_2 、 NOx 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOC 网格化排放清单；其次，对于以区县行政区为统计单元的生活源，以 1 km 分辨率人口密度为权重，将生活源排放量分解到 1 km 网格，采用 GIS 空间融合技术得到 1 km 分辨率生活源 SO_2 、 NOx 和 PM 等污染物的网格化排放清单；对于以地级城市为统计单元的移动源，以路网数据为基础，将移动源排放量分解到 1 km 网格，建立 1 km 分辨率移动源 NOx 、 PM 等污染物的网格化排放清单；最后对工业源、生活源、交通源及扬尘排放清单进行空间叠加，得到 2019 年济南市 1 km 空间分辨率人为源 SO_2 、 NOx 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 网格化排放清单。



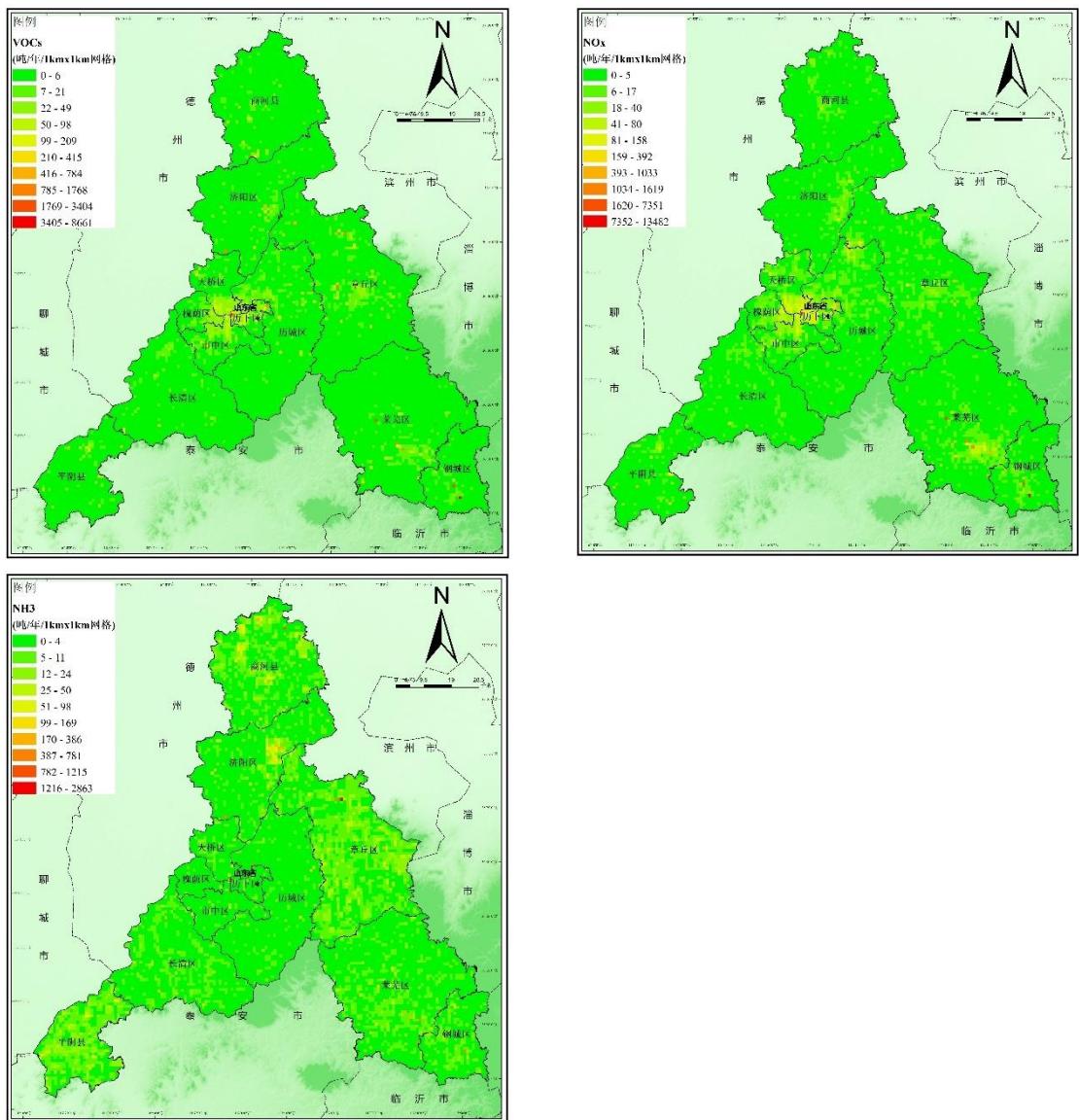


图 2-8 主要污染排放网格化空间分布图

2.3.3. 二氧化碳与大气污染物热点排放网格分析

构建二氧化碳与常规大气污染物排放热点排放网格能够直观展示高排放聚集区域，网格化管理排放量，并进行地理识别造成网格排放量较高的主要原因，精细化实施减排措施。

通过 Arc GIS 软件对网格化 CO_2 排放量进行排序，筛选排放量较大的网格单元作为热点网格，并作为 CO_2 和常规污染物减排潜力

挖掘以及环境监管的重点参考区域。如下图所示，图中筛选出的 400 个 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 热点网格，仅占总网格数的 4%，贡献了全市超过 90% 的 CO_2 排放。对热点网格中的常规污染物排放进行叠加分析发现，网格中 CO 排放占总排放量的比重最高，达到 82%； SO_2 、 NOx 、 VOCs 占比均超过 60%，分别为 64%、63%、60%；其他污染物占比在 30% 左右。说明济南市 CO_2 排放具有更高的空间集聚性，CO、 SO_2 、 NOx 、 VOCs 排放与 CO_2 排放空间分布具有较好的一致性，与 PM_{10} 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 等污染物存在一定的空间错位。

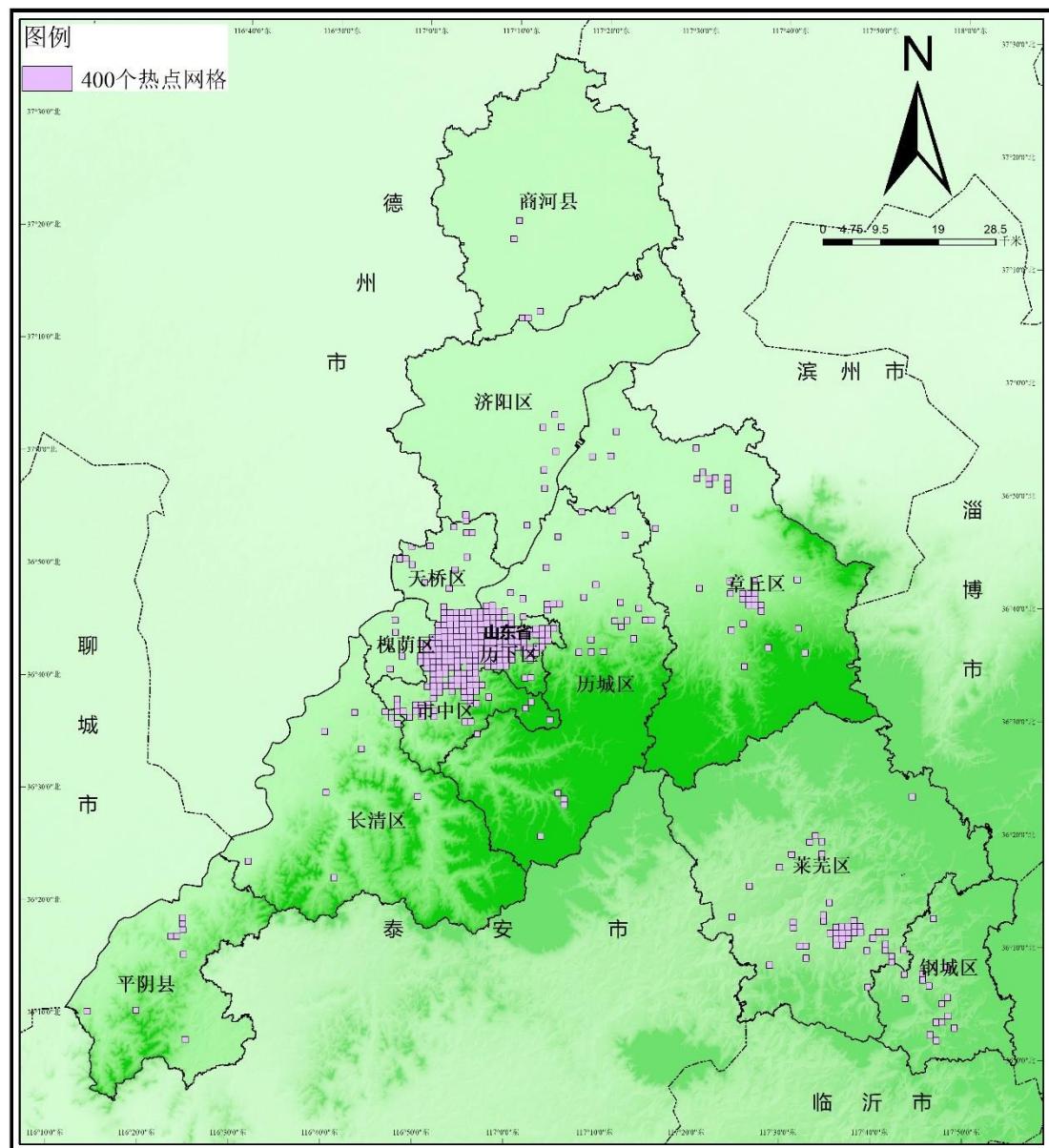


图 2-9 CO₂ 排放热点网格空间分布图

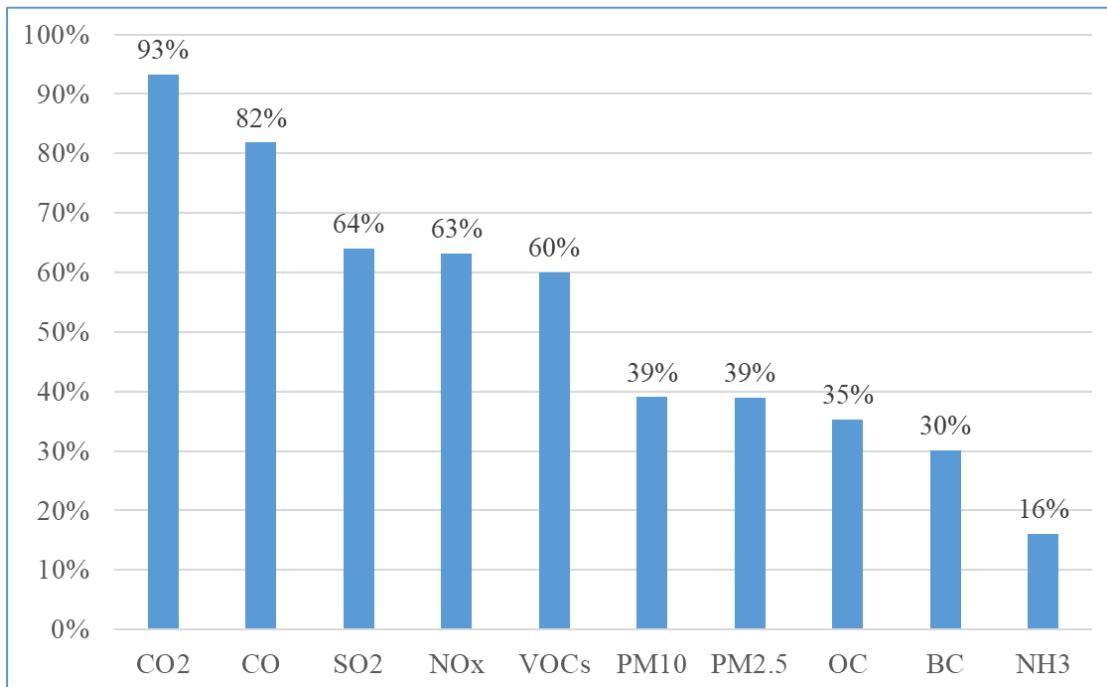


图 2-10 热点网格中各常规污染物排放占总排放量的比重

2.4. 模型设置与模型验证

2.4.1. 模型设置

(1) 模拟范围

模拟区域采用 Lambert 投影坐标系，中心点经度为 113.1°E，中心纬度为 34.9°N。为了平衡模拟精度与计算资源需求，模拟范围采用三层嵌套，空间分辨率分别为 27 km、9 km 和 3 km。第一层网格空间分辨率为 27 km×27 km，网格总数为 4599 个 (63×73)，涵盖了吉林、内蒙古、宁夏、甘肃、辽宁、北京、天津、河北、山西、陕西、河南、山东、江苏、湖北、安徽和上海等全国十六个省市区，综合考虑了外界区域对济南市污染物的传输效果。第二层网格分辨率为 9 km×9 km，网格总数为 8554 个 (94×91)，覆盖山东、河北、天津、河南、安徽、江苏在内的六个省份，且涵盖山东省全境。第三层网格分辨率最高，为 3 km×3 km，网格总数为 13189 个。

(121×109)，涵盖济南及周边城市。垂直方向共设置 14 个气压层，层间距自下而上逐渐增大。采用的化学机制为 CB6 气相化学反应机理和 AERO7 气溶胶反应机理。

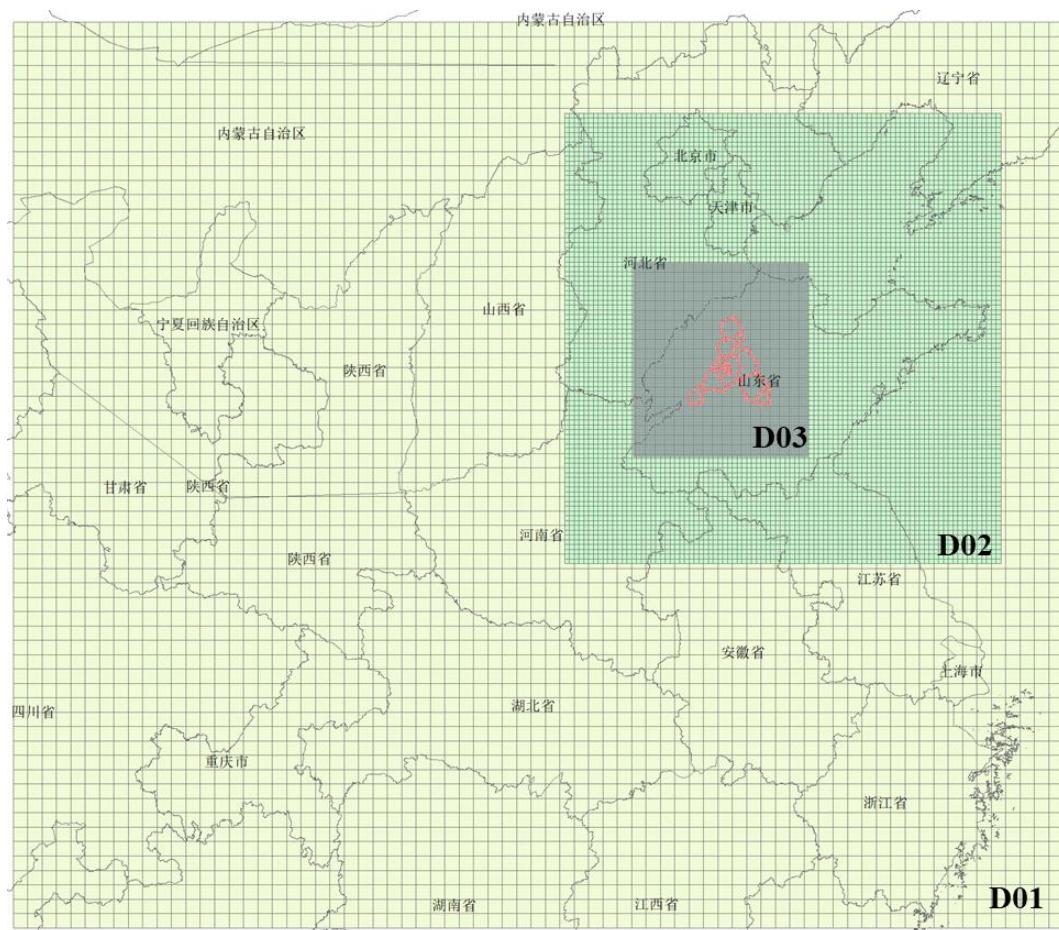


图 2-11 模拟范围

(2) CMAQ 模型

模拟时段为全年逐月，包括基准年 2019 年和减排情景两部分模拟分析，结果输出时间间隔为 1 小时。

采用 CMAQ 空气质量模型模拟污染物排放对空气质量的影响。CMAQ 模型考虑了气象因素对大气中各种污染物的影响，提高了模型的可靠性，还能够实现多尺度、多层次嵌套模拟，增加其在空

间的灵活性和通用性。已经在国际上被广泛应用于大气污染物模拟、大气物种沉降、污染源区域传输、污染物的源和汇等方面。CMAQ 模型主要由边界条件模块（BCON）、初始条件模块（ICON）、光分解率模块（JPROC）、气象-化学预处理模块（MCIP）和化学输送模块（CCTM）构成。化学输送模块（CCTM）是 CMAQ 模型的核心。MCIP 用于将 WRF 生成的气象场转化为 CMAQ 模式可识别的格式，ICON 为模拟区域的所有格点提供初始浓度场，BCON 生成模拟区域所需的边界条件，JPROC 用于生成包含不同高度、纬度和时角的晴空光解率，CCTM 实质是一个大气化学和运输数学模型，污染物在大气中的扩散和输送过程、气相化学过程、气溶胶化学过程、液相化学过程、云化学过程以及动力学过程均由 CCTM 模块模拟完成，CCTM 模块可输出多种气态污染物和气溶胶组分的逐时浓度以及逐时的能见度和干湿沉降，包括每小时瞬时浓度文件（CONC）、重启文件（CGRID）、每日平均浓度文件（ACONC）、干沉降文件（DRYDEP）、湿沉降文件（WETDEP）和每小时瞬时能见度文件（AEROVIS）。

（3）WRF 模型

气象场主要用于为空气质量模型 CMAQ 等提供驱动污染物扩散、传输等物理化学过程的三维气象场数据。CMAQ 模型所需要的气象场由中尺度气象模型 WRF 提供，WRF 模型与 CMAQ 模型采用相同的模拟时段和空间投影坐标系，但模拟范围大于 CMAQ 模拟范围，垂直方向共设置 32 个气压层，层间距自下而上逐渐增大。WRF 模型

的初始输入数据采用美国国家环境预报中心（NCEP）提供的 6 小时一次、 1° 分辨率的 FNL 全球分析资料，每日对初始场进行初始化，每次模拟时长为 30 小时，模拟起转时间设置为 6 小时，并利用 NCEP ADP 观测资料进行四维同化。WRF 模型模拟结果通过 MCIP 程序转换为 CMAQ 模型输入格式。

2.4.2. 排放清单

CMAQ 模型所需排放清单的化学物种主要包括 SO_2 、 NOx 、颗粒物（ PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组份）、 NH_3 和 VOCs（含多种化学组份）等多种污染物。济南市 SO_2 、 NOx 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC、OC、 NH_3 、VOCs 等人为源大气污染物排放清单由济南市生态环境局提供，周边城市排放数据均采用 2019 年清华大学发开的最新全国多尺度排放清单，风沙尘排放基于 CMAQ 在线计算，生物源 VOCs 排放清单利用 MEGAN 天然源排放清单模型计算。

2.4.3. 模型验证

因为排放源清单的不确定性和反应机理的不完整性，CMAQ 模型模拟存在一定的误差，利用济南市域范围内 7 个国控监测站点 2019 年逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据对模型模拟效果进行验证，见下表所示。结果显示模型模拟值与检测值具有较好的相关性，各监测站点 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值和监测值的相关性系数均在 0.6 以上，一致性指数在 0.75 以上，基本满足美国 EPA 关于模型验证的基本要求。综合考虑各项评

估指标，本研究所选用的空气质量模型及模拟参数设置等对 PM_{2.5} 的模拟效果较好，可用于分析济南市 PM_{2.5} 时空分布特征。

表 2-1 PM_{2.5} 模拟值与观测值对比

监测站点	样本数量(个)	标准化平均偏差	相关性系数	一致性指数
济南化工厂	8614	13.7	0.63	0.78
市监测站	8572	18.7	0.70	0.81
省种子仓库	8622	-6.4	0.67	0.80
机床二厂	8571	-26.8	0.64	0.71
科干所	8630	-0.1	0.60	0.76
开发区	8204	-8.3	0.64	0.77
农科所	8560	-23.3	0.67	0.74

2.4.4. 气象模拟分析

气象条件是大气环境中最重要的自然要素，其中风向、风速是气象条件的关键指标。其中风向反映了大气污染的来源、输送过程及归宿的整个流程，是度量污染物输送过程方向的关键指标；风速反映了自然环境对污染物的自净能力，是度量环境自净能力的关键指标。上风向地区的污染排放在气流作用下，易迁移扩散至下风向区域，影响下风向区域空气质量。

济南地形复杂多样，南为泰山山地，北靠黄河，地势南高北低，整体呈浅碟形。常年主导风向为东北风和西南风。根据 2013-2017 年全国空气资源禀赋评估结果，济南都市区属于一般区域，但济南市属于空气资源稀少区域，与我国的四川盆地和关中平原等区域相当。济南都市圈区域全年平均风速较小，不利于扩散。济南四季平均风速 2-5m/s，风速由南向北递减，北部平原冬季风速最低 2m/s，扩散能力较弱。采暖期以下沉气流为主，冬季逆温层长期存在，不利于

污染物垂直扩散。

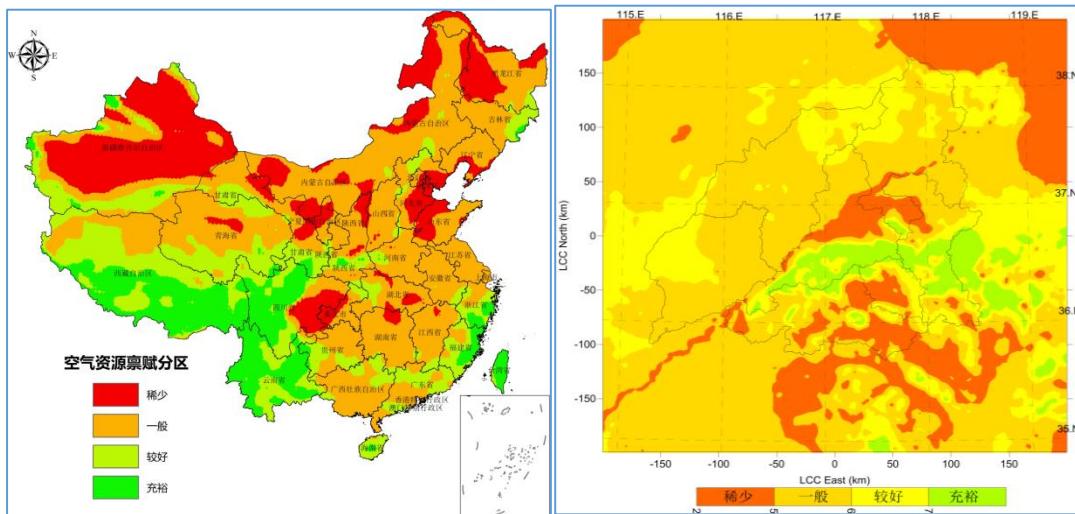


图 2-12 全国（左）和济南及周边区区域（右）空气资源禀赋分布

市区受黄河河谷和泰山山谷等浅碟状地形影响，流经市区气压风速逐渐减弱，常年形成静风小风中心，先天扩散不足。受山谷效应的影响，夜间风由周围的山峰沿山谷吹向平原，受周围开阔地形的影响，风在沿山谷边缘发生水平辐散，风速明显减弱；白天由于山坡加热，山谷周围的山风减弱并发生转向，14时风由平原吹向山顶产生明显的谷风。与夜间相比，白天较大的风速并未形成较好的大气扩散能力，反而将处于河谷城区的部分污染物向南扩散至地形相对较高区域，且风速在地形阻隔的作用下逐渐减少，夜晚再由山风将污染物带回城区，造成局地污染物质的浓度持续累积。

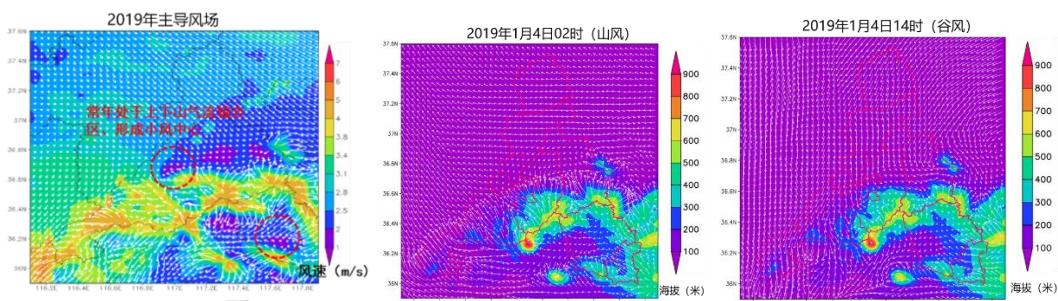


图 2-13 2019 年济南主导风场及典型时刻山谷风环流风场空间分布图

结合排放清单空间分布来看，排放强度较高的区域集中布局于城市静风、小风高发或城市上风向区域，如济南城区、莱芜城区等。大量工业企业分散于莱芜（钢铁、石化、建材）、平阴（炭素、水泥、铸造）等区县城区。

第3章 情景设置及减排潜力分析

大气污染物及温室气体排放量的变化与人口、经济增长速度、产业结构、能源结构、能源强度、城镇化率等因素相关。以上参数作为最主要的社会经济驱动因子，是各协同减排情景的共同基础。由于本研究受时间所限，并不探究全要素对协同减排的影响，所以各减排情景设置时对以上参数采用相同的基本假设。

3.1. 基本假设

3.1.1. 经济社会发展预测

(1) 人口

2020年，济南市总人口920.2万人，近十年年均增长率为13.0%，十三五期间为18%。十四五期间，济南将打造“大强美富通”现代化国际大都市，城市集聚效应增强，人口仍将保持快速增长。根据2005年以来的人口数据，及未来经济社会发展政策，对济南市总人口进行预测。预测到2025年，全市常住人口约1000万人，2030年提升至1047万人，2035年达到约1100万人。

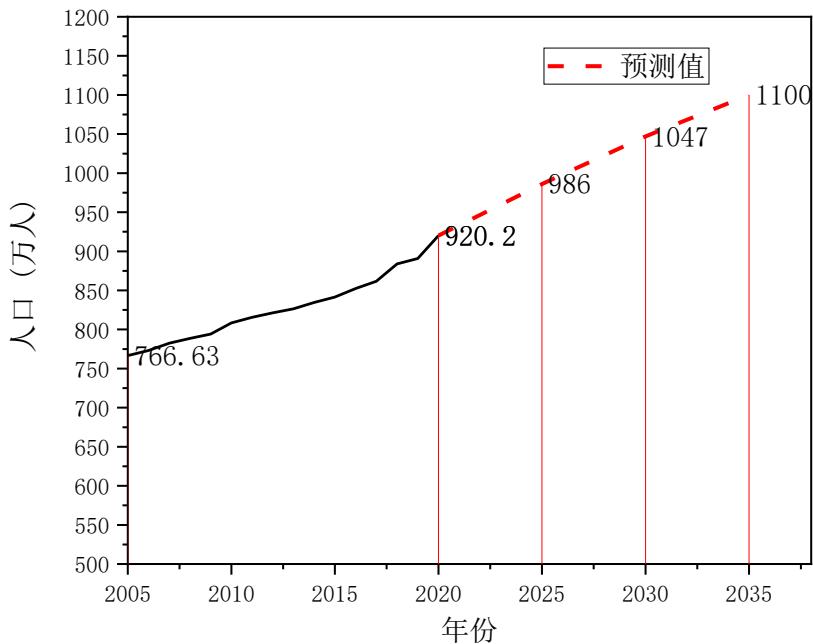


图 3-1 2005-2035 年济南市常住人口及预测（万人）

(2) 经济增长与工业增加值

十三五期间，济南市地区生产总值由 6777.9 亿元增长到 10140.9 亿元，年均增长 8.4%（按当年价格计算）。根据《济南市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中提出 2025 年发展目标，地区生产总值年均增长 7% 左右。预测 2025 年济南市 GDP 达到 14223.2 亿元，若 2026-2030 年、2031-2035 年分别按增长率 6%、5% 估算，则 2030 年、2035 年 GDP 分别达到 19033.7 亿元和 24292.4 亿元。

2015-2018 年，济南市工业增加值由 2162.92 亿元增长到 2670.19 亿元，年均增长 7.3%（当年价格），济莱合并后，按照新统计口径，2020 年工业增加值为 2360.5 亿元，比 2019 年增长 8.9%（当年价格）。2020 年，三次产业比例已达到 3.6: 34.8: 61.6。“十四五”及远期，济南市将实施工业强市发展战略，大力发展先进制造业（大数据与新一代信息技术、智能制造与高端装备、精品钢与先进材料、

生物医药与大健康四大支柱产业）。预计十四五期间及远期，工业增加值年均增长率略高于地区生产总值增长率；由此预测 2025 年济南市工业增加值将达到 3388.8 亿元；预计 2030 和 2035 年将分别达到 4752.97 亿元、6211.94 亿元。

2019 年，济南市规模以上轻、重工业总产值比值约为 15.4:84.6，重工业总产值占比较高，随着济南市工业化进程进入中后期及现行产业政策的影响，远期重工业所占比重可能会出现下降趋势。

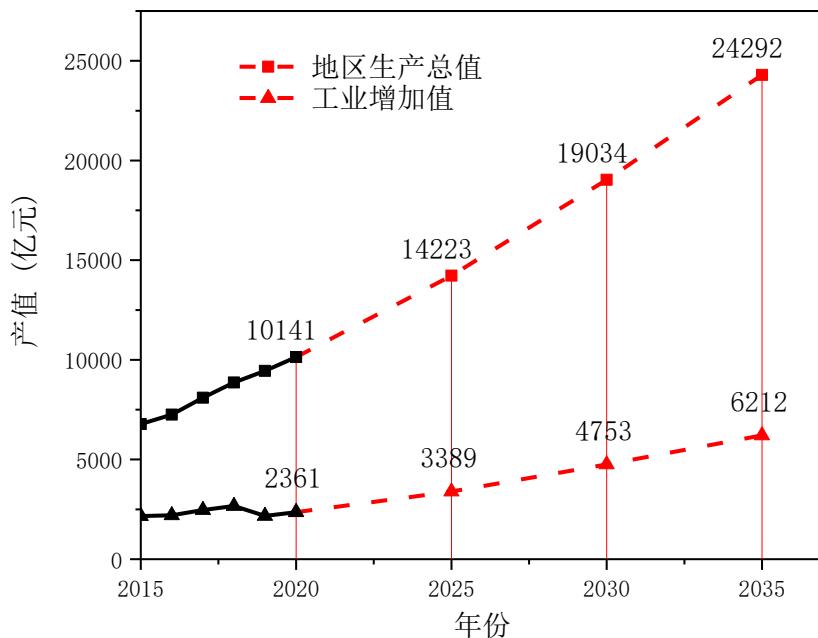


图 3-2 2015-2035 年济南市经济增长与工业增加值及预测（亿元）

(3) 能源

2019 年，济南市全市能源消费总量 3703.19 万吨标准煤，其中，煤炭消费量 3159.73 万吨，石油消费量 537.35 万吨，天然气消费量 14.65 亿立方米。根据济南市人口、经济和产业结构特征，采用 LEAP 模型对济南市能源消费需求进行预测。模型主要分为四大模块：终端能源消费、能源转换、资源、非能源排放。终端能源消费包括

工业部门（主要是钢铁、水泥、化学品、建筑业）、农业、交通、居民消费（分为城镇和农村），以及其他未归类的能源消耗。能源转换模块包括电力生产（煤电、油电、气电以及可再生能源发电）、炼焦、采矿与洗选和热力生产。资源模块包括一次和二次能源的进出口。非能源排放模块主要包括水泥生产的过程排放。

在减污降碳的大背景下，“十四五”及未来，济南市煤炭消费量将继续呈现下降趋势；能源消费总量的增速也将进一步放缓，随着经济的转型发展、节能提效达到先进水平和能源消费结构的不断优化，经济发展逐步摆脱对高碳能源的依赖。预计到 2025 年全市能源消费总量达到 4295 万吨标准煤，2030 年和 2035 年预计分别达到 4682 万吨标准煤、4956 万吨标准煤。

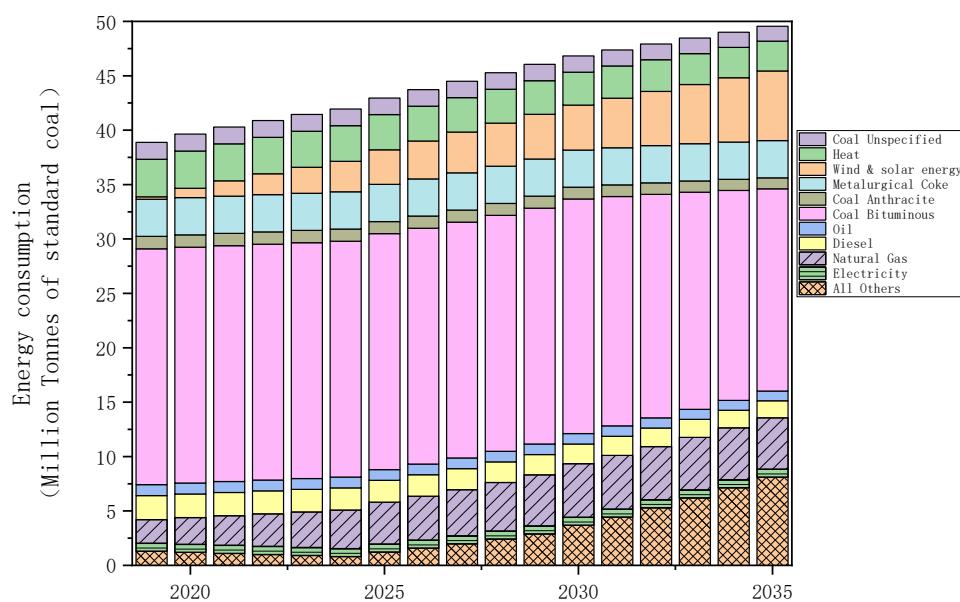


图 3-3 济南市能源消费总量预测（基本假设）

（4）基本假设条件下碳排放量预测

对基本假设条件下，济南市未来碳排放总量进行预测，结果见图3-4。2035年前，碳排放几乎无差异，主要原因进行分析一是济南市出台了严格的煤炭消费减量替代政策，导致增量减少；二是济南

市电力生产依赖火电，新能源电力生产仍处于起步阶段，因为风能、光伏等可再生能源项目周期较长，导致减排替代量短期内较难体现。

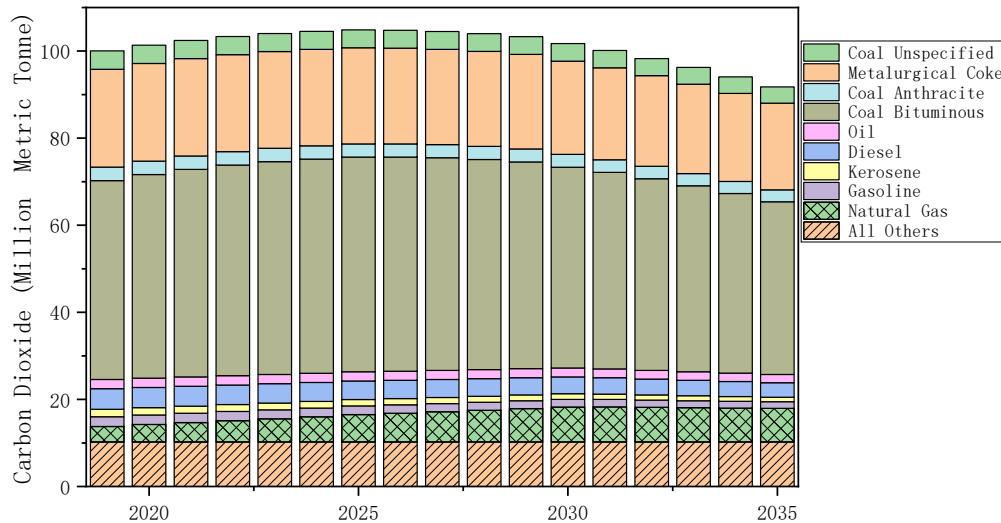


图 3-4 基本假设条件下济南市碳排放总量预测

3.1.2. 主要污染物新增排放量预测

根据社会经济发展预测结果，十四五期间及远期，济南市仍将面临着较大的环境压力。济南市将聚焦大数据与新一代信息技术、智能制造与高端装备、精品钢与先进材料、生物医药与大健康四大支柱产业集群，促进产业链集群化、规模化发展。考虑到济南市将开展能源结构调整，煤炭耗量逐年降低，钢铁、水泥、焦化等高污染行业产能、产量将逐步下降。因此污染物新增排放量将集中在装备制造、先进材料、医药制造等行业。

1.二氧化硫新增量

二氧化硫主要来源于化石燃料燃烧，在煤炭消费总量控制持续深入开展的大背景下，济南市煤炭在能源消费中比重将进一步下降，不会因经济增长或人口增加而增加煤炭消费，故本研究不再考虑新增SO₂排放。

2. 氮氧化物新增量

氮氧化物新增量主要包括工业源和移动源新增排放。其中，工业行业包括电力供热、其他工业；移动源包括机动车和非道路移动机械。

(1) 电力供热

济南市将进一步提高外电比例，并增加一次电力发电量；充分利用电厂、工业余热以及外电、外热进行供暖，故不考虑电力供热氮氧化物新增量。

(2) 工业燃烧

济南市工业新增能源将以电力和天然气为主，根据地区生产总值及万元GDP能耗下降率的预测，2025年将新增使用天然气9.7亿立方米，按照烟气NO_x 50 mg/m³估算，2025年比2020年增加氮氧化物排放约682.7吨；预估2030年比2025年增加约382.4吨。

(3) 机动车

在交通运输结构公转铁大背景下，济南市新增机动车主要为民用载客汽车，以小型载客汽车为主，根据《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）》（国办发〔2020〕39号），到2025年，新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的20%左右，假设2025年比2020年净增传统燃料车约60万辆，2030年比2020年净增传统燃料车约90万辆。按照济南市年均使用强度及国6新车排放标准，预计2025年氮氧化物排放比2020年增加约1484.3吨；2030年比2025年增加约519.5吨。

(4) 非道路移动机械

考虑到未来城市建设，预计未来新增工程机械约10%左右，预计2025年比2020年新增氮氧化物排放约369.5吨左右，2030年不再新

增。

3.颗粒物新增量

(1) 电力供热

不考虑电力供热颗粒物新增量。

(2) 工业燃烧

济南市工业新增能源将以天然气为主，鉴于天然气颗粒物排放较少，不考虑工业燃烧颗粒物新增量。

(3) 机动车

济南市新增机动车主要为民用载客汽车，以小型载客汽车为主，按照济南市年均使用强度及国6新车排放标准，预计2025年比2020年增加PM₁₀排放约20.2吨、PM_{2.5}约排放20吨；2030比2025年增加PM₁₀排放7.1吨，PM_{2.5}排放约7吨。

(4) 非道路移动机械

预计2025年新增PM₁₀排放约3.7吨，PM_{2.5}排放约3.5吨；2030年不再新增。

4.挥发性有机物新增量

(1) 电力供热

不考虑电力供热挥发性有机物新增量。

(2) 工业燃烧

预计2025年比2020年增加VOCs排放约136.5吨；2030比2025年增加VOCs排放约76.5吨。

(3) 工业VOCs

根据工业增加值预测，综合考虑挥发性有机物末端治理和源头替代，预计2025年比2020年增加VOCs排放约1273.4吨；2030比2025年增加VOCs排放约687.8吨。

(4) 机动车

预计2025年比2020年增加VOCs排放约790.4吨；2030年比2025年增加VOCs排放约276.6吨。

(5) 非道路移动机械

预计2025年比2020年增加VOCs排放100.6吨；2030年将不再增加。

综上，预计到2025年及远期大气污染物新增量情况如表 3-1所示。

表 3-1 济南市大气污染物新增量预测

行业	2025年大气污染物新增量预测					2030年大气污染物新增量预测				
	SO ₂	NOx	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	SO ₂	NOx	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs
电力供热	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
工业燃烧	—	682.7	—	—	136.5	—	382.4	—	—	76.5
其他工业 VOCs	—	—	—	—	1273.4	—	—	—	—	687.8
机动车	—	1484.3	20.2	20	790.4	—	519.5	7.1	7	276.6
非道路移动源	—	369.5	3.7	3.5	100.6	—	0	0	0	0
合计	—	2536.5	23.9	23.5	2300.9	—	901.9	7.1	7	1040.9

3.2. 情景设置

3.2.1. 情景措施组合

近年来，济南市紧紧围绕改善大气环境质量，从结构调整，污染防治和城市管理等方面开展了多项工作。包括：一是优化产业结构。大力推进东部老工业区搬迁改造，将污染源搬离人口密集区。压减高污染、高耗能行业，清理整治违法违规企业，从源头上做好防控。二是提升能源结构。实施煤炭消费总量控制，开展燃煤锅炉淘汰工作，减少燃煤污染，加快天然气引进利用，推进清洁取暖，改善全社会的能源消费结构。三是深化工业治理，加快钢铁超低排

放改造，开展企业无组织扬尘整治和挥发性有机物整治。四是加强移动源防治。加快推进“公转铁”，调整货物运输结构。推动车辆结构升级，加快新能源汽车推广。推进非道路移动机械污染防治，开展编码登记工作，对高排放机械限制使用。五是精细管理城市：狠抓施工扬尘治理，开展烟花爆竹禁放，划定高污染燃料禁燃区，加强高污染燃料控制。六是创新监管机制：构建大环保格局，结合属地监管责任的落实，构建各部门齐抓共管、全社会共同努力的大环保格局。开展空气质量考核与补偿工作，推进网格化环境监管体系，构建国内先进的智慧环保大数据监管平台大幅提升科学治污水平。

十四五及之后，济南市提出了深入落实可持续发展战略，实施产业发展绿色化改造，引导全社会践行绿色生活、绿色消费理念，加快形成绿色发展方式的发展思路。计划采取的措施包括：实施空气质量攻坚行动，从严格环境准入要求，加快落后低效和过剩产能淘汰，实施重点行业产能控制，推动传统行业绿色化改造等方面优化提升产业结构；从能耗总量和强度“双控”，严控新上高耗能项目，推动煤炭清洁利用，大力发展清洁低碳能源，开展重点用能单位节能降耗行动，等方面推动能源消费结构调整；通过加快推动大宗货物“公转铁”，鼓励使用节能和新能源汽车，加快发展大运量公共交通，鼓励绿色出行等方面升级交通运输结构。同时，实施火电、钢铁、化工等行业大气污染物特别排放限值制度，开展重点行业工业源深度治理，大力推进重点行业挥发性有机物（VOCs）治理。

为了探究温室气体减排和污染物减排之间的协同效益，本研究针对产业结构调整、能源结构优化、运输结构调整、移动源污染防治、工业污染治理、城市精细化环境管理等重要措施，从电力、钢铁、氮肥、石化、煤炭、水泥、铸造、交通、建筑等行业提出潜在

减排措施，设置了三种能源与污染控制情景：基准情景、一般情景、强化情景。

（1）基准情景

基准情景主要是对照已经公布的《济南市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》及各专项规划，在新旧动能转换深入开展的背景下，按照现有政策和技术水平进行提升，主要围绕产业结构调整、能源结构优化、工业污染治理、运输结构调整、移动源污染防治、扬尘及其他面源治理等方面展开。

（2）一般情景

一般情景是在基准情景的基础上，更加强调产业结构的深入优化和各类污染源的深度治理。包括工业内部转型升级，前端能源需求的优化升级，运输行业的深度新能源化等措施。

（3）强化情景

强化情景是在一般情景的基础上，强化节能减排先进技术的应用，包括提高工业设备前沿技术的应用水平，进一步提高交通电动化水平等。

3.2.2. 能源结构优化措施

能源开发利用结构转型是当前实现经济社会高效率、低污染、高产出、可持续发展的重要环节。对济南来说，能源结构优化是中近期应对气候变化和提高空气质量的重要政策目标，其中煤炭是当前能源转型中最关键的因素。预计在未来一定时间内，济南将持续采取措施，煤炭消费总量不断减少。

（一）基准情景：以十四五规划草案拟提出的各项举措为基础，并结合近期出台的《山东省人民政府办公厅关于加强“两高”项目管理的通知》、《山东省能源消费总量和强度“双控”工作总体方案

(2021—2022年)》等要求，提出能源结构优化的主要措施。包括从严控制新建、改建、扩建耗煤项目，坚决淘汰落后产能，加快煤炭清洁高效利用，持续优化能源结构；强化能源消费总量和强度双控，推广先进节能技术，加强工业、建筑、交通等重点领域节能，不断提高再生能源消纳比例等。

(二)一般情景：在完成基准情况的基础上，采取更加严格的煤炭压减措施，并持续增加清洁能源生产供给能力（需做深入调研，评估全市清洁能源可开发利用潜力）。

(三)强化情景：能源结构进一步优化。采用的措施包括：提高煤炭热值，加大老旧设备改造力度，推广新型水煤浆、煤粉锅炉，提高能源利用效率；提高高效大容量机组发电利用率，减少低效小机组运行时间；风电、光伏、地热达到可经济开发利用上限，新能源成为电力主体，辅以外调电力，多元化灵活性资源广泛部署，先进信息技术与电力系统深度融合等。

3.2.3. 工业企业转型升级与污染减排

根据大气污染物及温室气体排放情况，对济南市来说，电力热力供应行业和钢铁工业是最大排放源，也是实施减排政策最关键、最有效的行业。从长远来看，以碳中和引领下的济南市新发展模式必然会导致化石能源的使用量大幅减少，电代煤、电代油等政策的实施将促使大部分的用能需求将由清洁能源以电能的形式来满足。

3.2.3.1. 电力热力供应

电力行业支撑整个社会低碳转型，责任重大，角色特殊，是“净零排放”的排头兵。

(一)基准情景：以十四五规划各项举措为基础。加快淘汰落后燃煤机组，逐步退役正常燃煤机组，降低煤电装机规模。不再增

加燃煤机组装机规模，新增用电需求主要由清洁能源发电和外输电满足。通过充分利用工业余热、实施外热入济、发展新能源供热等方式，逐步整合济南市城区内热电联产和供暖企业。新能源实现全面开发，开发源网荷储灵活产品组合，完善电力市场机制，实施火电行业碳排放权交易。

(二) 一般情景：深入整合济南市城区内热电联产和供暖企业，在热源保障充足条件下，将建成区内燃煤热电联产及热源厂逐步淘汰或转为备用热源。电力部门开展更深度的低碳转型，新能源快速增长，电化学等新型储能设备在电力系统全面部署。

3.2.3.2. 钢铁行业

(一) 基准情景：基准情景围绕已经公示的产能置换项目以及长流程钢铁产能置换项目、短流程钢铁置换项目和烧结球团焦化升级项目为主。开展超低排放改造项目。

(二) 一般情景：在完成基准情景各项措施基础上，对剩余产能采取更深一步的管控措施。配套的焦化、烧结、球团等产能按照“以钢定产”的原则进行淘汰，保留的置换为先进装备。提升先进技术的应用比例，包括提高工业设备前沿技术的应用水平。

(三) 强化情景：在一般情景基础上，采取更加激进的节能减排技术应用推广措施。将保留的烧结、球团进行产能置换，对剩余炼铁产能进行节能降耗改造。

3.2.3.3. 水泥行业

(一) 基准情景：根据现有工作计划，退出3.2米及以下水泥磨机及位于城市建成区的粉磨站，并按照2:1进行产能置换。

(二) 一般情景：在基准情景基础上，进一步压减水泥产量及消费量。

3.2.3.4. 其他行业措施

(一) 基准情景：包括按照山东省人民政府《关于加快七大高耗能行业高质量发展的实施方案》(鲁政字〔2018〕248号)要求淘汰尿素生产企业固定床气化炉；持续推动“散乱污”企业及产业集群清理整治。根据山东省《全省落实“三个坚决”行动方案（2021—2022年）》要求，关闭产能30万吨/年及以下煤矿、采深超千米冲击地压煤矿；发展新型建材，开展兼并重组和减量置换，对现有砖瓦窑进行整合升级，逐步淘汰现有砖瓦窑中限制类产能并按照2:1进行产能置换，提高产业集中度等措施等。

(二) 一般情景：在基准情景基础上，进一步压减高能耗产业产能，采取更加激进的污染防治措施。

3.2.4. 运输结构调整及移动源污染防治

济南市当前货物运输结构以公路运输为主，推动大宗货物“公转铁”可以有效降低因燃油货车运输过程产生的大气污染物和碳排放。其他措施包括推进新能源或清洁能源汽车使用淘汰老旧车辆，以及引导老旧非道路移动机械报废等。

3.2.5. 推动城市精细化环境管理

主要包括以下措施：加强施工扬尘、道路扬尘和裸地扬尘污染防治和监管；落实加油站、储油库、油品运输新标准要求，推进油品储运销 VOCs 综合治理与管控，规范油气回收设施运行等措施；加强联合执法检查，应用在线监控和治污设施电量监控加强监管；推进秸秆机械还田和秸秆肥料化、原料化、饲料化、基料化、能源化等综合利用；优化农药施用量，鼓励使用低 VOCs 含量溶剂；强化道路扬尘污染治理，实施深度保洁，加强渣土等运输管控等措施；加强裸地扬尘控制；进一步采取全面推进绿色施工，推动装配式建

筑发展，推进施工扬尘精细化管理等。

3.3. 污染减排潜力分析

3.3.1. 污染物和二氧化碳减排量

图 3-4 展示了三种不同情景的大气污染物和 CO₂ 减排潜力的对比。在基准情景下主要大气污染物均有明显的减排潜力，主要来自于民用散煤替代、能源结构调整和 2020 年度已基本完成的钢铁行业超低排放改造、工业炉窑整治提升、VOCs 综合整治等措施，说明当前济南市正在谋划的主要政策组合工具具有较好的减排潜力。相较于基准情景，除 NO_x 外，主要大气污染物在一般情景中减排潜力弱化，说明对济南市来说，随着工业企业深度治理和煤炭压减等减排潜力较大的措施实施完成，进一步深挖潜力难度加大，进一步减排需要依靠深层次的结构升级措施。NO_x 在一般情景中有一定的减排潜力，主要来自于交通运输结构的调整和移动源污染防治。对于颗粒物，在强化情景中有较强的减排措施，包括各类扬尘控制措施及工业源颗粒物减排措施等。济南市 VOCs 来源复杂，控制难度不一，因此在三个情景中均有一定的减排潜力，其中一般情景在移动源污染防治方面采取了更加严格的措施，包括国四及以下柴油车、国三及以下汽油车的淘汰以及引导过 II 及以下标准的非道路移动机械提前报废等具体措施，对 VOCs 减排潜力的提升有较大贡献。强化情景在碳减排、VOCs 及二氧化硫减排方面的减排潜力则主要来自于先进节能减排先进技术的应用，包括提高工业设备前沿技术的应用水平。由于济南市十三五期间加强了重点点源的污染控制，SO₂ 的减排潜力得到了提前释放，故各情景 SO₂ 潜排潜力均相对较小。

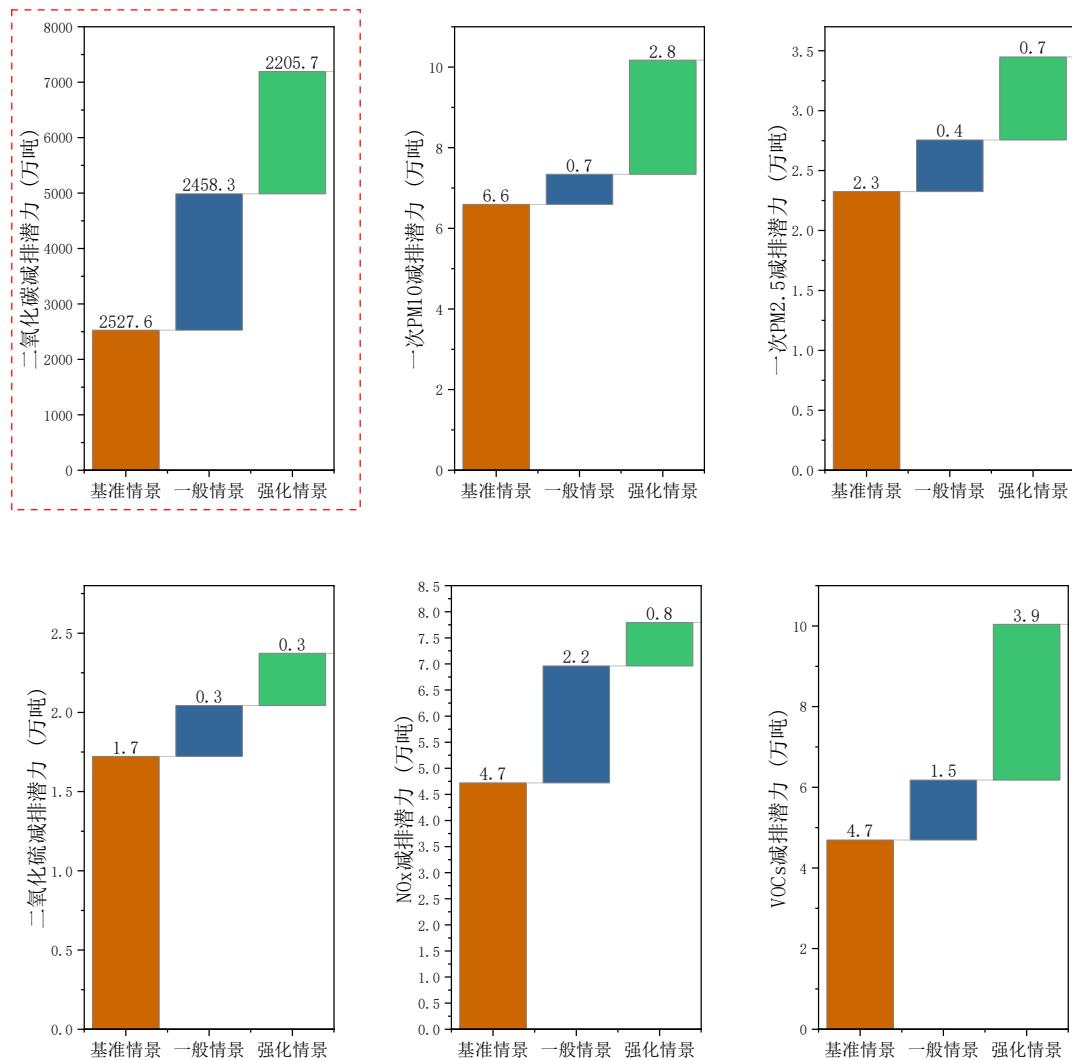


图 3-5 三种不同情景减排降污潜力

图 3-6 和图 3-7 分别为各项措施的大气污染物减排潜力和 CO₂ 减排潜力。能源结构调整在大气污染物和 CO₂ 减排方面均有较大的减排效应，能源结构调整相关措施包括：民用散煤替代、工业煤炭压减、热电联产及供暖企业整合等，工业用煤和取暖用煤是实现“双达”的关键部门。为实现“双达”目标，除末端治理外，必须进行能源结构的深度调整。除了能源结构调整外，大气污染物减排的其他措施在不同污染物方面的减排潜力各不相同，因此未来实现空气质量达标，济南市还应针对不同的大气污染物采取相应的针对性的措施。如对于 NO_x 的减排，钢铁行业产业优化升级和移动源污染防治措施

减排效应较好；针对颗粒物减排，采取扬尘及其他面源治理措施具有较好的减排效应；针对 VOCs 减排，工业污染治理措施减排效应明显。此外，产能升级和产能淘汰政策在 CO₂ 减排方面的优势明显，其在减少空气污染物方面也有较好的效果。

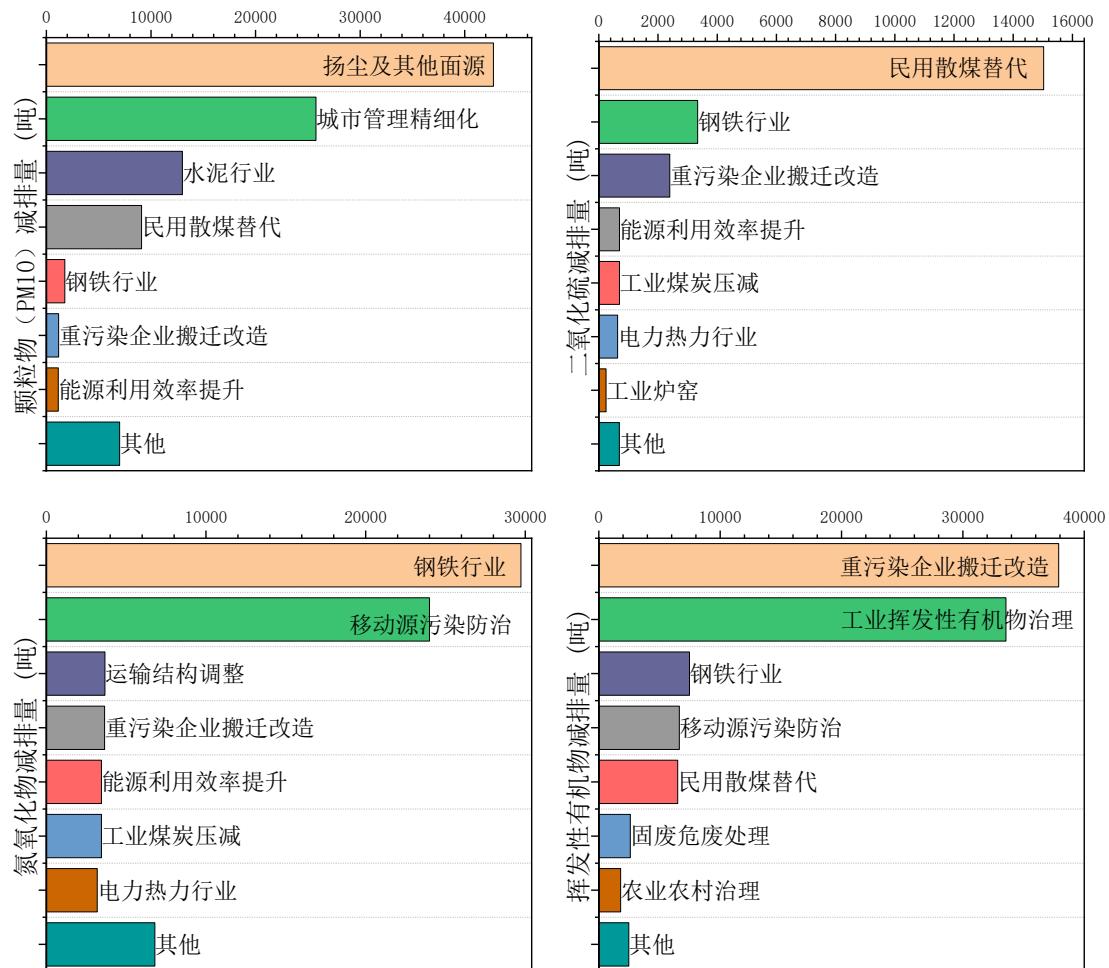


图 3-6 主要措施大气污染物减排潜力

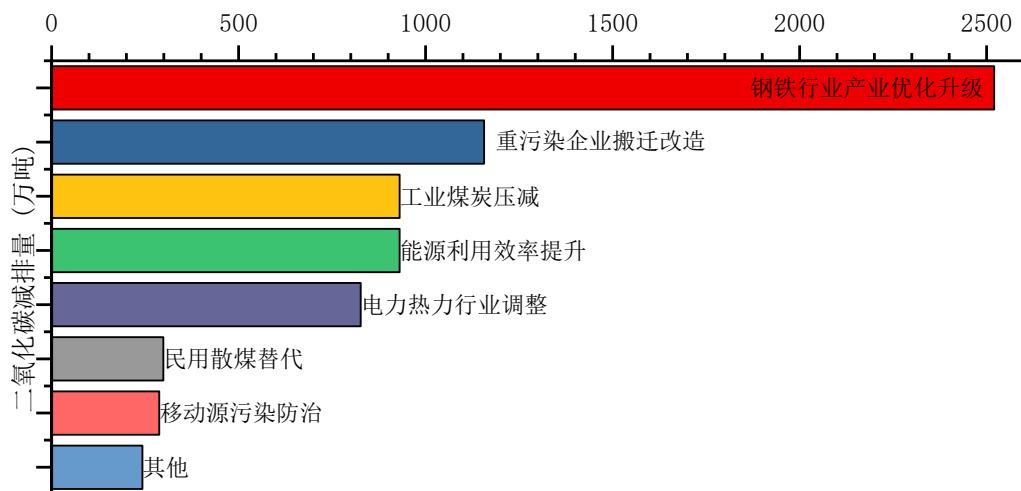


图 3-7 主要措施 CO₂减排潜力

3.3.2. 空气质量达标分析

(1) 基准年模拟分析

2019 年基准年份下，济南市 PM_{2.5} 年平均浓度为 53 μg/m³，高于国家空气质量年平均二级标准限值《环境空气质量标准》（GB3095-2012）的 35 μg/m³。从污染物浓度空间分布来看，受泰山山脉地形和黄河河谷地形影响，济南市 PM_{2.5} 在市区累积形成高浓度区域，并以此中心向周边区域呈现污染程度逐渐减轻的趋势；整体来看，以黄河为分界线，济南南部区域 PM_{2.5} 浓度显著优于北部，两区域间 PM_{2.5} 年均浓度相差近 1 倍。

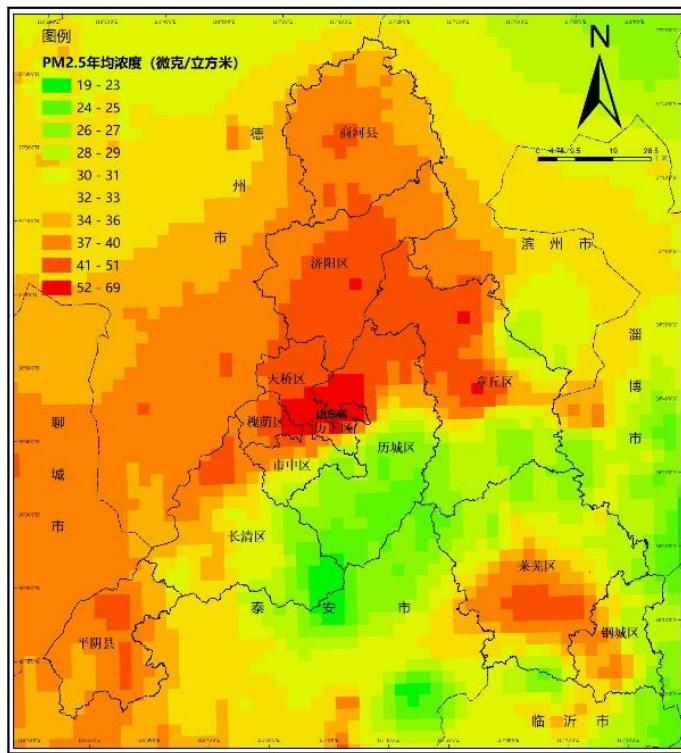


图 3-8 2019 年济南市 PM_{2.5} 浓度空间分布

(2) 不同情景下 PM_{2.5} 浓度变化

不同控制情景下 PM_{2.5} 浓度模拟结果表明，PM_{2.5} 年均浓度均呈现大幅下降的趋势。其中，基准情景、一般情景、强化情景 PM_{2.5} 年均浓度分别为 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 2019 年分别下降 15%、29% 和 33%。总体来看，仅强化控制情景下的控制措施能够实现济南市 PM_{2.5} 年均浓度达标。

从各区县来看，强化控制情景下，仍然有近一半的区县 PM_{2.5} 年均浓度轻微超标。其中，平阴县浓度最高，为 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这表明，实施现有可预见污染控制技术和措施，很难让济南 PM_{2.5} 实现所有区县全面达标，未来仍需深入调整能源结构、产业结构，并强化农业 NH₃ 减排力度。

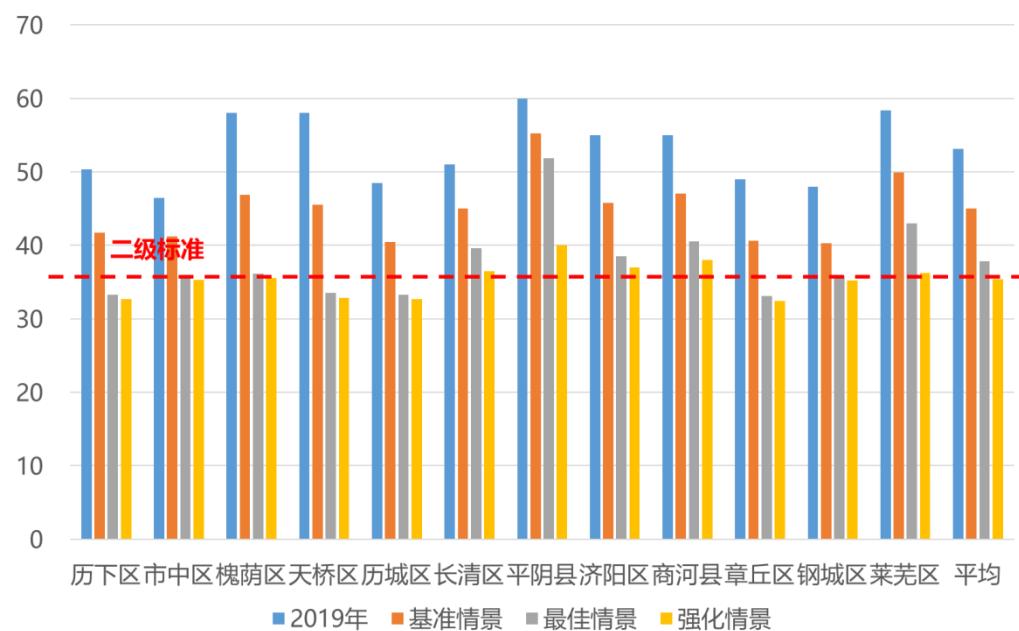


图 3-9 不同控制情景下各区县 PM_{2.5} 年均浓度达标情况

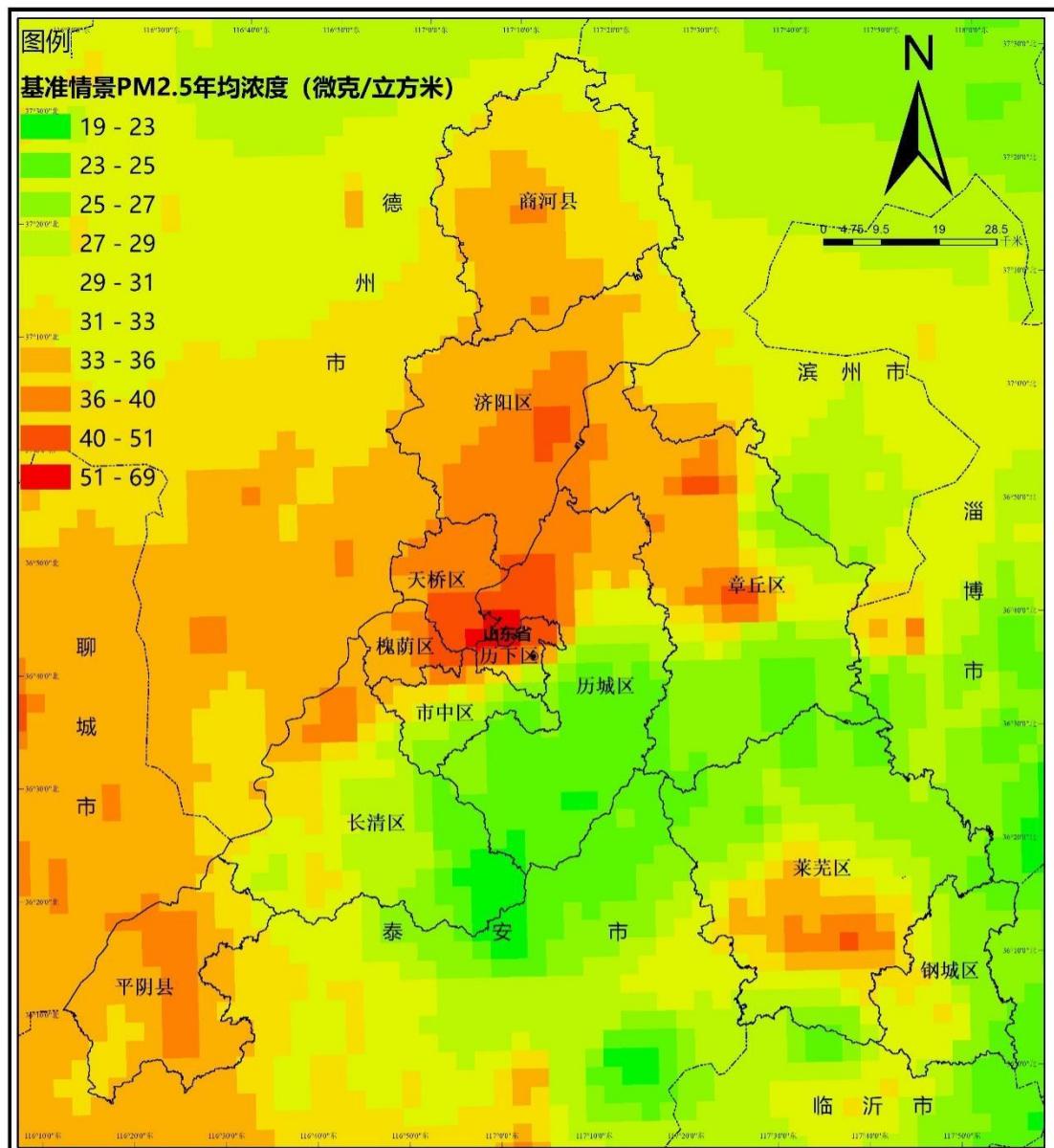


图 3-10 基准情景下 PM_{2.5} 浓度空间分布

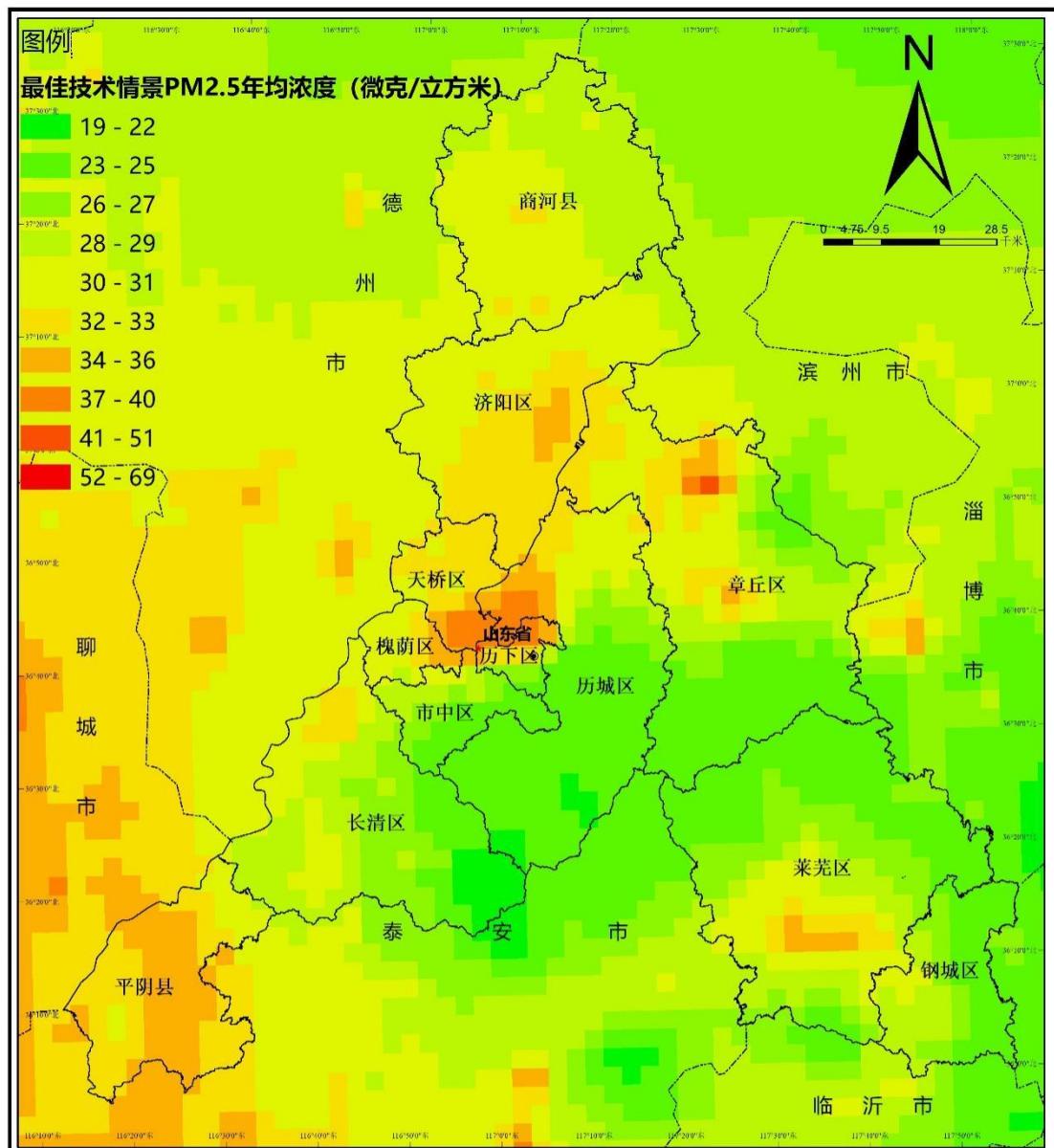


图 3-11 一般情景下 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布

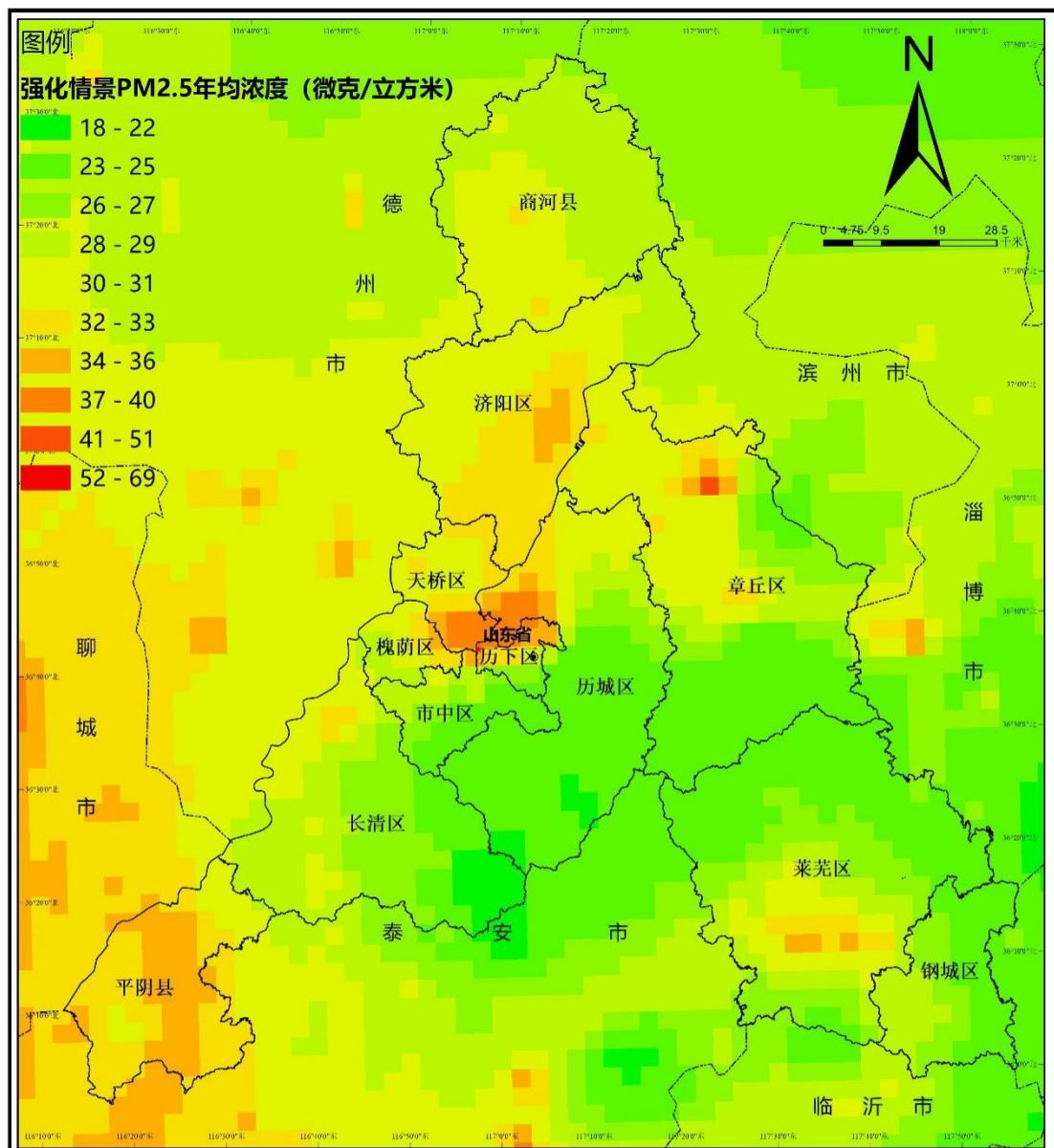


图 3-12 强化情景下 PM_{2.5} 浓度空间分布

第4章 温室气体与大气污染物协同控制效益评价

4.1. 单位减污协同减碳量评估

为科学评估和准确理解济南市不同领域减污效益和降碳效益之间的关系，支撑和识别达标情景下的低碳发展路径，选取产业结构调整、能源结构优化、运输结构调整、移动源污染防治、工业污染治理、扬尘及其他面源治理、农业源污染防治七大领域以及 20 个细分行业和措施，开展单位 $PM_{2.5}$ 浓度下降协同减碳量分析。由图 4-1 可以看出，济南市达标情景下不同领域控制措施带来的减污效益和减碳效益呈现显著差异性，甚至出现错位现象。总体来看，通过燃烧环节产生的大气污染物和二氧化碳，两者间同根同源性较好，大气污染治理政策和措施的实施均呈现较强的减污降碳协同效应；其他非燃烧环节产生的污染物，如扬尘、农业面源等，协同降碳效益不显著或者两者不存在协同关系。

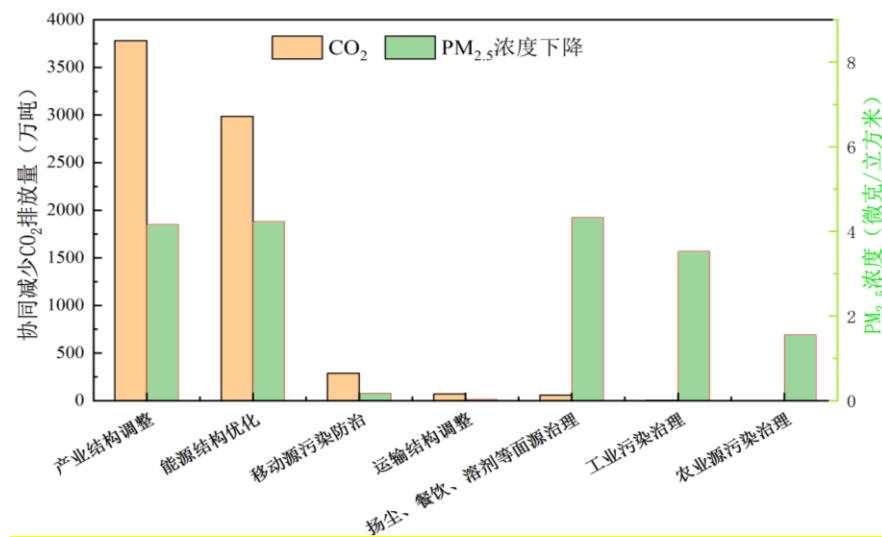


图 4-1 不同领域减污效益和降碳效益

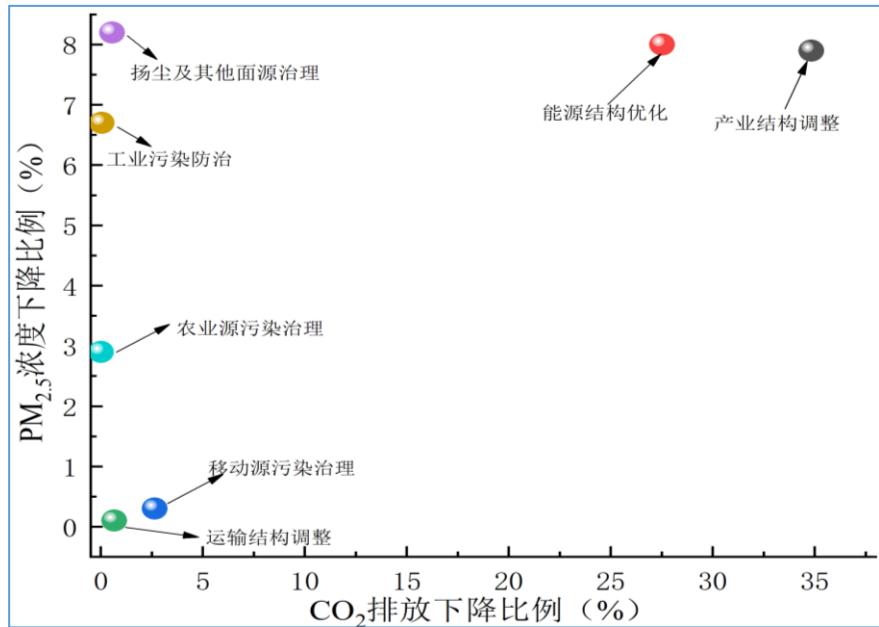


图 4-2 CO_2 下降比例和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降比例二维坐标系

从单位 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降协同减碳量 (SI_{PM}) 来看，运输结构调整>移动源污染防治>产业结构调整>能源结构优化>扬尘等面源治理>工业污染治理>农业面源治理。运输结构调整和移动源污染防治协同指数较大，单位 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降带来超过 1500 万吨二氧化协同发展减排量；值得注意的是，图 4-2 显示两者单独对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降和 CO_2 减排的贡献均较小，这说明济南市达标情景下运输结构调整和移动源污染防治的力度依然偏弱，导致该措施减污效益和降碳效益均不显著。产业结构调整、能源结构优化 SI_{PM} 指数分别为 907、705。另外，工业污染防治、农业源、扬尘等面源协同降碳效益最小。

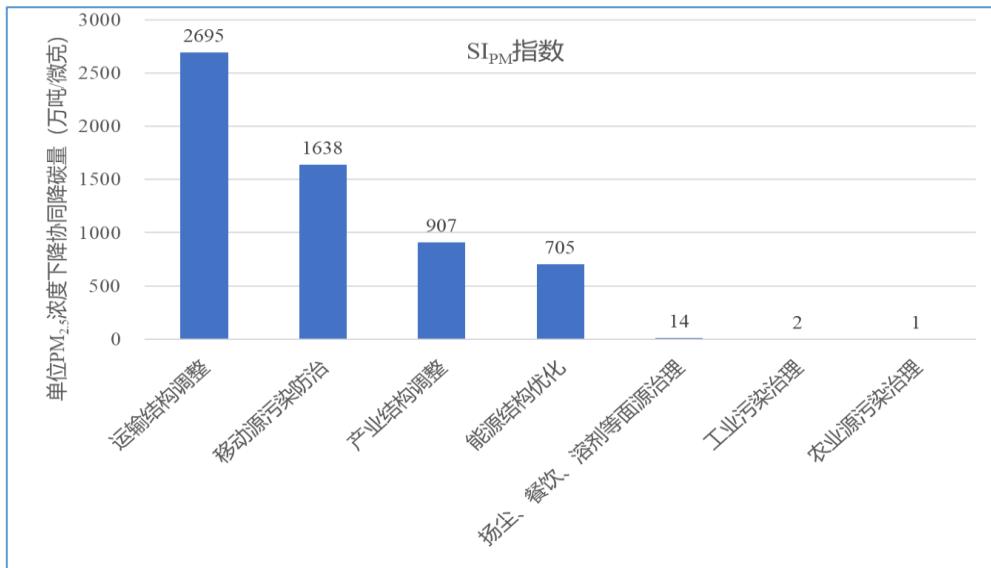


图 4-3 不同领域削减单位 PM_{2.5} 浓度协同减碳指数 (SI_{PM} 指数)

从二氧化碳减排来看，产业结构调整>能源结构优化>移动源污染防治。其中，产业结构优化和能源结构调整分别贡献了全市 53% 和 41% 的二氧化碳减排量，移动源污染防治、运输结构调整等其他领域对二氧化碳减排量累积贡献在 6% 以内。工业污染治理、扬尘及其他面源、农业源污染治理等末端治理措施基本不会带来二氧化碳减排。

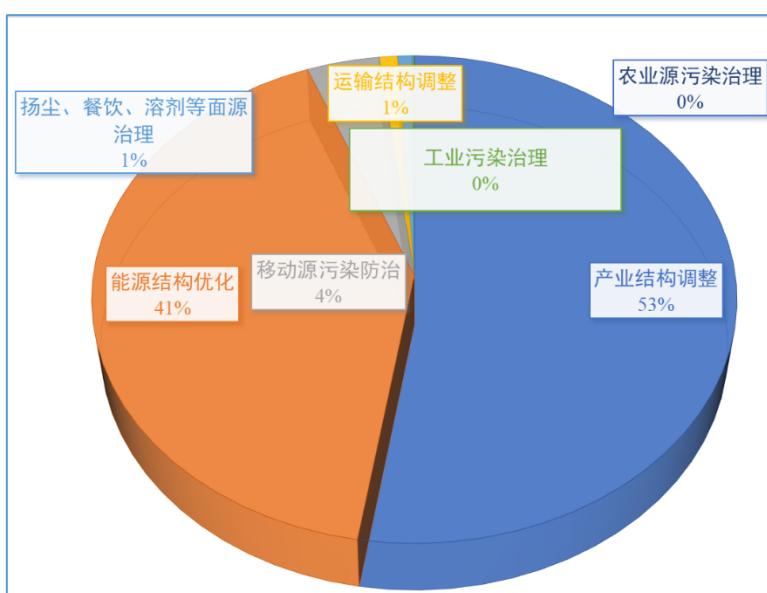


图 4-4 不同领域对 CO₂ 减排贡献

从 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降比例来看，扬尘及其他面源治理>能源结构优化>产业结构调整>工业污染治理>农业源污染治理>移动源污染防治>运输结构调整。RSM 模型模拟表明，扬尘及其他面源治理对全市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降贡献 24%，能源结构调整和产业结构优化分别贡献了 23% 和 23%，工业和农业污染治理分别贡献 20% 和 9%，其他领域贡献不显著。

另外，能源结构优化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献稍微大于产业结构调整，这与二氧化碳减排评估结果相反。这说明尽管能源结构调整带来的二氧化碳和大气污染物排放同根同源性较好，分别采用 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和污染物排放量来评估不同领域调控措施，结果仍然会产生一定的差别。因此，在核算减排量的基础上，仍需引入空气质量模型对减排措施的总量、空间分布、非线性光化学反应等作进一步量化分析。

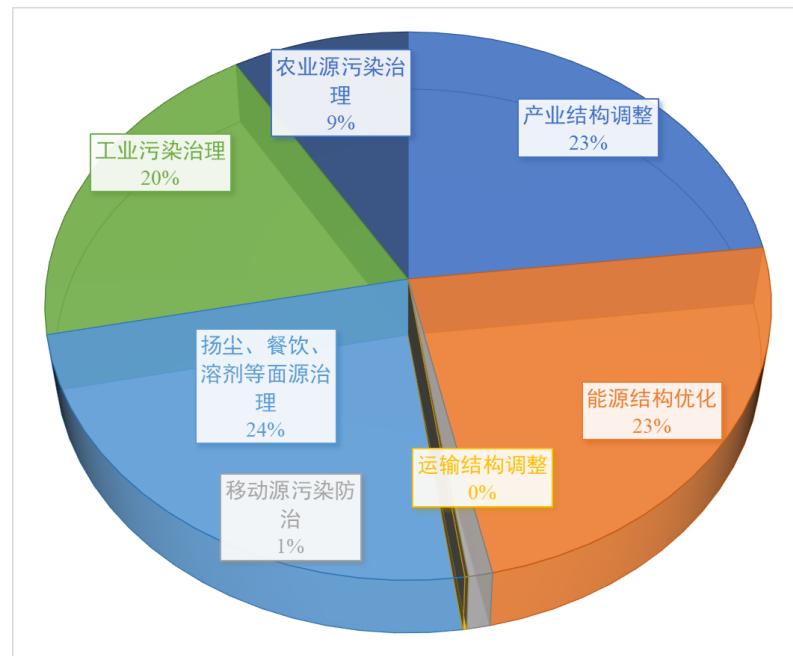


图 4-5 不同领域对削减 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献

对达标情景下 20 个主要行业和措施进一步分析发现，减污效益

最大的五个行业分别为扬尘等面源治理、民用散煤替代、水泥行业产能压减与深度治理、工业无组织排放管控、畜禽养殖治理；协同降碳效益最大的五个行业分别为钢铁行业、工业煤炭压减及能源利用效率提升、石化电厂搬迁、电力热力行业产能压减与改造、民用散煤替代。

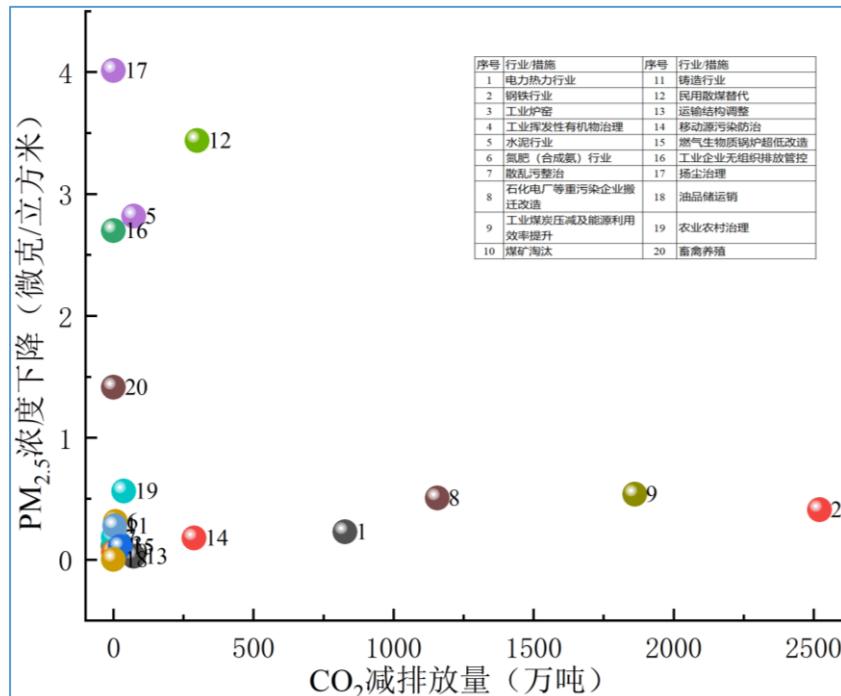


图 4-6 不同行业和措施对减污效益和降碳效益

4.2. 单位减污成本及费效评估

在上述协同降碳效益分析的基础上，从治理成本的角度进一步筛选和识别济南市 PM_{2.5} 达标情景下优先控制的行业和实施的降碳措施。

基于污染物边际减排成本曲线评估削减单位 PM_{2.5} 浓度的成本，如图 4-7 所示。不同行业和措施削减单位 PM_{2.5} 浓度的成本差异较大，成本较低的为畜禽养殖、扬尘治理、煤矿淘汰、工业企业无组织排

放管控、水泥行业等污染治理，削减单位 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的减排成本在 2 亿元以内；石化电厂等重污染企业搬迁改造、移动源污染防治、运输结构调整、工业挥发性有机物治理、油品储运销等行业和措施削减单位 $\text{PM}_{2.5}$ 成本超过 10 亿元。

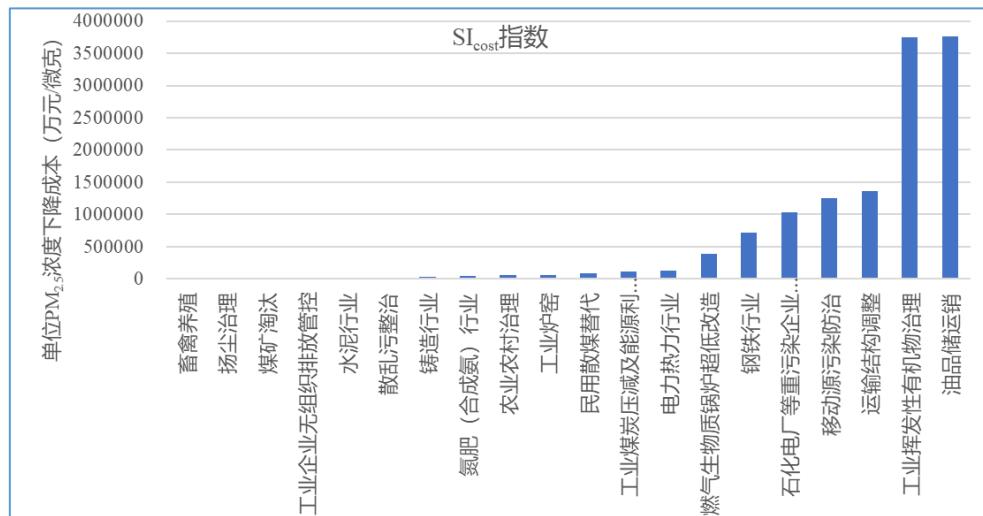


图 4-7 不同行业和措施降低单位 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的减排成本

在减排成本分析的基础上，引入效益费用比来评估达标情景下不同领域和行业效益费用比，如图 4-8 所示。达标情景下各项减污降碳措施的总效益费用比为 1.2。不同领域和行业效益费用比分布与减排成本分布趋势较为相似，其中煤矿产能压减与淘汰、散乱污综合整治、铸造行业升级改造、畜禽养殖治理等 4 个行业效益费用比大于 20，工业炉窑、油品储运销、氮肥（合成氨）行业 3 个行业效益费用比大于 10，其中移动源污染防治、石化电厂等重污染企业搬迁改造、工业挥发性有机物治理 3 个行业效益费用比小于 1。

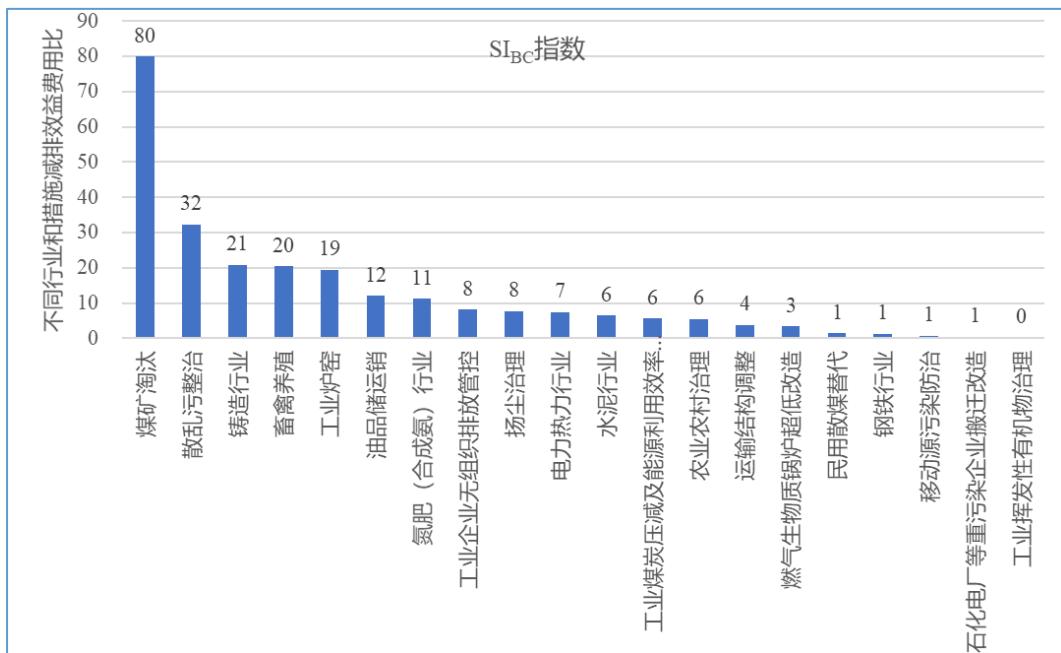


图 4-8 不同行业和领域减排效益费用比

4.3. 小结

由于在不同驱动因素作用下，各领域和行业减污效益和降碳效益不相同，减污带来的协同降碳效果亦相差较大。在环境管理实践中，物理协同效益和成本的经济效益同样需要考虑。因此，我们分别计算了单位 $\text{PM}_{2.5}$ 协同减碳量 (SI_{PM} 指数)、削减 $\text{PM}_{2.5}$ 单位成本 (SI_{cost} 指数) 和效益费用比 (SI_{BC} 指数)，并基于三种分指数各自排序加和得出减污降碳协同综合推荐序列，如表 4-1 所示。

从协同降碳 (SI_{PM} 指数) 来看，钢铁行业、电力热力行业、工业煤炭压减及能源利用效率提升、运输结构调整、石化电厂等重污染企业搬迁改造等单位 $\text{PM}_{2.5}$ 协同减碳量超过 2000 万吨；移动源污染防治、燃气生物质锅炉超低改造、工业炉窑、民用散煤替代、农业农村治理等协同减碳量在 50 万吨以上。

从削减单位 $\text{PM}_{2.5}$ 成本 (SI_{cost} 指数) 来看，成本较低的为畜禽养

殖、扬尘治理、煤矿淘汰、工业企业无组织排放管控、水泥行业等污染治理，单位成本在 2 亿元以内；石化电厂等重污染企业搬迁改造、移动源污染防治、运输结构调整、工业挥发性有机物治理、油品储运销等行业和产措施削减单位 $PM_{2.5}$ 成本超过 10 亿元。

从效益费用比（ SI_{BC} 指数）来看，达标情景下各项减污降碳措施的总效益费用比为 1.2。其中，煤矿淘汰、散乱污整治、铸造行业、畜禽养殖等领域治理的效益费用比超过 20，是济南市减污降碳综合效益最好的领域；移动源污染防治、石化电厂等重污染企业搬迁改造、工业挥发性有机物治理等领域效益费用比小于 1。其他行业和措施费效比均大于 1。

从协同控制优先序列来看，煤矿淘汰、畜禽养殖、散乱污整治、铸造行业、工业炉窑等领域措施，既具有较大的减排潜力，同时减排的经济成本相对较低，建议优先实施。电力、钢铁、交通运输等减排潜力逐渐由末端治理向能源结构、产业结构等前端结构调整转变，虽然单位减排成本远高于其他领域，但协同降碳效果同样显著。移动源污染防治、工业挥发性有机物治理、钢铁、石化行业搬迁等领域优先级较低，该领域以 NO_x 、 $VOCs$ 排放为主，对济南市 O_3 的影响较大，未来在统筹考虑 O_3 治理过程中，需要进一步调整优化。

表 4-1 不同领域和行业减污降碳协同指数及优先序

行业类别	SI_{PM} (万吨/微克)	SI_{cost} (万元/微克)	SI_{BC}	优先序列
煤矿淘汰	0	13109	80	1
畜禽养殖	0	7655	20	2
散乱污整治	3	23954	32	3
铸造行业	16	25586	21	4
工业炉窑	205	57401	19	5

行业类别	SI _{PM} (万吨/微克)	SI _{cost} (万元/微克)	SI _{BC}	优先序列
电力热力行业	3643	132796	7	6
氮肥（合成氨）行业	23	42727	11	7
水泥行业	26	17644	6	8
工业煤炭压减及能源 利用效率提升	3468	112907	6	9
扬尘治理	0	12829	8	10
工业企业无组织排放 管控	0	14062	8	11
农业农村治理	65	54147	6	12
钢铁行业	6162	720802	1	13
运输结构调整	2676	1363215	4	14
燃气生物质锅炉超低 改造	229	382884	3	15
民用散煤替代	87	79183	1	16
石化电厂等重污染企 业搬迁改造	2292	1038349	1	17
移动源污染防治	1627	1253085	1	18
油品储运销	0	3760504	12	19
工业挥发性有机物治 理	-14	3748208	0	20

第5章 协同控制路径与政策建议

对济南市来说，从减污降碳协同效果来看，运输结构调整具有最大的协同减碳指数，其次是产业结构调整、移动源污染防治和能源结构优化。但目前条件下运输结构调整各政策措施减污降碳绝对值较弱，且减排成本较高。从协同降碳量来看，产业结构调整和能源结构优化具有最大的减排量，其次是移动源污染防治和运输结构调整。综合考虑协同减污降碳指数、单位减排成本以及减排效益费用比，建议优先实施煤炭产能压减、农业面源防治、重点行业转型升级、民用散煤替代、扬尘面源治理等精细化管控。同时，强化能源结构、产业结构、交通运输结构等协同降碳能力。

5.1. 协同控制目标

总体目标：到 2025 年，减污降碳协同管理机制初步建立，统筹融合的工作格局基本形成，减污降碳协同度有效提升，空气质量持续改善逐渐由末端治理驱动转向“碳减排”驱动。

到 2030 年，减污降碳协同管理体系更加完善，协同实现“双碳”目标能力显著提升，PM_{2.5} 年平均浓度达到《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）二级标准要求（35 μg/m³），碳减排政策对空气质量改善的累计贡献超过 40%。

5.2. 促进产业结构优化升级

从协同降碳指数来看，产业结构调整各项措施的协同控制效果显著，大气污染物和二氧化碳的减排潜力较大。目前，济南市为了实现产业结构优化升级，制定和实施了一系列产业政策和专项规划，包括严格环境准入要求、加快落后低效和过剩产能淘汰、实施重点行业产能控制、优化产业空间布局等。建议在按期完成相关任务部署的前提下，针对减污降碳协同效果较好的钢铁（含焦化）、电力热

力、水泥及铸造行业等环节，进一步加快推进、强化落实。

5.2.1. 电力热力行业

电力热力行业是济南市碳排量最大的行业，也是实现减污降碳协同目标的核心行业之一。电力热力行业产业结构调整的重点是各类燃煤锅炉的产能控制和清洁能源替代。目前济南市已制定了严格的燃煤机组装机规模控制措施及落后燃煤机组淘汰措施。下一步建议，一是合理调控燃煤电厂用煤，控制发电用煤总量。2030 年煤电发电量控制在 60%以下。同时通过实施节能改造，降低现役燃煤发电机组供电煤耗。到 2023 年，现役燃煤机组改造后平均供电煤耗力争降至 302 克标准煤/千瓦时。二是开展热电联产及供暖企业整合，即通过充分利用工业余热、实施外热入济、发展新能源供热等方式，逐步整合济南市城区内热电联产和供暖企业。在热源保障充足条件下，将建成区内燃煤热电联产及热源厂逐步淘汰或转为备用热源。三是分阶段推进 CCUS 相关技术应用，以配套难以淘汰的煤电机组。开展 CCUS 潜力勘察及部署方案研究，推动示范项目尽快上线。四是加快部署可再生能源取代化石能源，尤其大力开发分布式光伏，着力推进屋顶光伏工程建设，配套优先用地审批、拓宽企业准入等激励保障政策，提高清洁能源调入率；开发生物质能、地热能等其他形式新能源，重点建设一批生物质热电联产等示范项目。到 2025 年，新能源和可再生能源消费比例达到国家和省要求，可再生能源发电装机占电力总装机的比重提高到 23%以上。五是加快建设各种储能设施。积极推进莱芜抽水蓄能电站（预计装机 2×100 万千瓦）建设投用，推进氢储能研究应用，提高可再生能源电力消纳水平。

与此同时，济南市已完成燃煤小锅炉淘汰及超低排放改造，目前剩余工业锅炉或电站锅炉/燃气轮机除燃气锅炉外，均已采用各类

高效污染防治措施。在现有技术经济条件下，电力行业通过升级污染防治措施可挖掘的大气污染物减排潜力较小，进一步降低排放成本较高，且会带来一定的大气污染物或温室气体增排，属于非协同减排措施。

5.2.2. 钢铁行业

钢铁行业既是济南市重要的基础性产业，也是能源消耗和温室气体排放的重点行业，是产业结构调整的重点行业。

钢铁行业的各项减污降碳措施中，落后产能淘汰及产量控制协同控制效果评估综合排序最为靠前。主要措施包括制定钢铁（含焦化）产能优化整合方案，通过产能置换、发展短流程钢铁等方式压减炼铁、炼钢产能，并按照“以需定产”的原则压减烧结、球团工序和焦化行业等产能，逐步退出独立烧结（球团）、独立轧钢产能，全面淘汰半封闭式镍铁、铬铁、锰铁电炉。2025 年前，将现有全市炼铁产能压减 20%以上，电炉钢占比不小于 20%；2030 年前压减 33%以上，电炉钢占比不小于 25%；对保留的烧结、球团设备和焦炉实施置换升级，新置换焦炉炭化室不低于 7.0 米。《济南市钢铁产业“十四五”发展规划(审议稿)》提出了“绿色化”发展目标，建议强化督导，严格实施。

近年来钢铁行业新技术涌现较快，部分技术具有较好的协同减污降碳效果，建议推广应用。主要包括两类：一是各类先进节能降耗技术。包括采用降低各类设备和管线漏风率、合理的烧结返矿率、降低高炉吨铁风耗以及鼓风含湿量等降低能耗措施；采用钢铁行业能源管控技术和高辐射覆层技术对钢铁行业进行整体节能；采用环冷机液密封、蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌或类似技术进行烧结、球团能效提升改造；采用冷捣糊整体优化成型筑炉节能技术、

钢水真空循环脱气工艺干式（机械）真空系统应用技术、加热炉黑体强化辐射节能等对炼钢环节进行升级改造。二是原（燃）料替代或消耗减少措施。包括炼焦工序高温高压干熄焦、炼焦煤调湿风选技术、焦炉荒煤气显热回收利用技术等；烧结工序烧结余热发电技术烧结余热能量回收驱动技术、烧结废气余热循环利用工艺技术等；炼铁工序提高高炉入炉球团比、高炉冲渣水直接换热回收余热技术、燃气-蒸汽联合循环发电技术、燃气轮机值班燃料替代技术、煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术或类似技术。

建议强化绿色钢材产品生命周期制造理念，远期可根据技术进步情况，探索发展直接还原铁，氢能冶炼，碳捕获、利用与封存等绿色低碳冶炼技术。

5.2.3. 其他行业

其他行业中，铸造行业产业结构调整协同控制效果评估综合排序较为靠前。主要措施包括铸造行业淘汰使用煤炭及其制品（焦炭、兰炭）的冲天炉，对整个行业完成整合升级；推动铸造等行业使用天然气的熔化炉实施气改电，2025年前削减30%燃气量，2030年前进一步完成35%燃气量削减。

其次是工业炉窑产能压减和整合升级，主要措施包括氮肥（合成氨）行业淘汰固定床气化炉，采用水煤浆等先进气化炉进行替代，基本实现第三代洁净煤气化；根据济南市冶金、建筑行业等需求，压减整合石灰产能，以及对石灰炉窑进行整合升级，置换为麦尔兹窑等较先进的装备；发展新型建材，开展兼并重组和减量置换，对现有砖瓦窑进行整合升级，逐步淘汰现有砖瓦窑中限制类产能，提高产业集中度等。

另外，水泥行业水泥熟料及水泥产能产量压减，落后产能淘汰

搬迁同样具有较高的协同控制优先级。主要措施包括通过产能置换，淘汰小于 2500 吨/天水泥熟料产能；2025 年底前，退出 3.2 米及以下水泥磨机及位于城市建成区的粉磨站，并按照 2:1 进行置换；2026-2030 年，进一步压减水泥产量及消费量，力争再减少 25% 产量。同时，采用余热利用、粉磨新技术、高能效烧成系统等措施提升水泥行业整体能效。采用原料、燃料替代措施，包括电石渣等工业废渣替代、水泥窑协同处置城市生活垃圾、减少燃煤用量，使用清洁燃料替代等措施。

5.3. 推动能源清洁低碳转型

能源结构优化各项措施中，煤炭消费压减、民用散煤替代、提高能源利用效率等协同控制综合评估效果最为靠前，推荐优先实施。

煤炭压减措施建议分阶段完成，2025 年底前以消减工业用煤为重点，关停部分落后燃煤设施，力争完成 10% 约 270 万吨的煤炭削减任务。至 2030 年，在完成 270 万吨工业用煤压减任务基础上，进一步压减工业燃煤使用量 10%。持续增加清洁能源生产供给能力，以光伏为重点，以生物质能、地热能为补充，大力推进可再生能源开发利用，统筹可再生能源和乡村振兴融合发展，开展整县（区）分布式光伏规模化开发试点，深入推进绿色能源示范村镇等建设，因地制宜发展可再生能源供暖，到 2025 年，全市新能源和可再生能源装机达到 430 万千瓦左右；新能源和可再生能源供暖面积达到 1000 万平方米。加快天然气引进利用，到 2025 年，力争全市天然气消费量在能源消费总量中的比重提高到 9%。

提高能源利用效率对降低能源消耗有非常大的促进作用。可采取的措施包括加大老旧设备改造力度，推广新型水煤浆、煤粉锅炉等节能设备；提高高效大容量机组发电利用率，减少低效小机组运

行时间；将煤炭热值标准由 3700-4300 千卡提高到 5000 千卡左右等。

民用散煤替代措施包括开展清洁取暖查缺补漏摸底排查，因地制宜推行气代煤、电代煤、热代煤、集中生物质等清洁取暖方式。农村地区具有资源丰富的清洁能源，如太阳能、生物质能、小型风电等，建议增加基础设施配套，协同推动农村地区能源低碳化。2025 年底前，基本完成农业种养业及农副产品加工业燃煤设施清洁能源替代。

目前济南市正在推行电能替代措施可有效降低大气污染物排放，主要措施包括积极倡导“以电代煤、以电代油”的能源消费新模式，推进工业、建筑、交通等领域电能替代，提高电能在终端能源消费中的比重。建议优先实施以下措施：工业领域，加大电锅炉、电窑炉等电能装备推广，实现“以电代煤”，提高综合能效和绿色用能水平；建筑领域，积极推进建筑供冷供暖电气化，推广使用低谷电蓄热、地源热泵、空气源热泵等电采暖方式，鼓励利用建筑屋顶建设“自发自用，余电上网”的分布式光伏，提升建筑电气化水平；交通领域，积极发展轨道交通、机场桥电系统等，加快推广电动汽车，推进停车场与充换电基础设施一体化建设等。

值得注意的是终端用能电气化对碳排放的减排效应与电能生产中清洁能源占比情况密切相关。但相对而言，目前技术条件下，济南市可开发的清洁电能有限。下一步，一是重点关注清洁能源技术、储能设备技术进步情况；二是加强清洁电能的开发，对济南市来说，包括地热能、分布式光伏、风能、氢能和外调绿色电力等；三是做好配套建设，包括在光伏、风力高密度建设或负荷高密度区域，建立蓄电池系统进行削峰填谷和可再生能源消纳。

5.4. 推进交通领域协同增效

对济南市来说，运输结构调整及移动源污染防治在各项措施中，具有最大的协同指数。其中各类燃油车的新能源化对 NO_x 和 CO₂ 的协同减排效应显著，建议从公共领域用车、公交车、网约车、物流配送车辆开始实施，逐步推行燃油车新能源化，最终推广到民用车领域。同时加快车用液化天然气(LNG)加气站、充电桩、加氢站布局，重点在交通枢纽、批发市场、快递转运中心、物流园区等建设充电等基础设施，提高充电桩建设密度，扩大分布范围。争取到 2023 年底前，公交车全面实现新能源化，中心城区电动汽车充电设施服务半径小于 3 公里。到 2030 年，新能源汽车占新销售车辆 50% 左右。建议将燃油车的电动化替代与电能的清洁化措施相结合，进一步发挥两者的协同减污降碳效果，如利用电动交通工具 V2G 技术，实现交通清洁化的同时，对风电、光电等进行储能调节，提升清洁能源利用效率。

运输结构调整及移动源污染防治其他可采取的措施中，建议优先实施可降低燃油消耗的措施。包括推广交通运输智能管理，构建高效集约的绿色流通体系等。实施老旧车淘汰措施，2021-2025 年，采取国三及以下老旧柴油车淘汰、国四及以下重型营运柴油货车淘汰、国二及以下汽油车淘汰，引导国一及以下标准的非道路移动机械提前报废；2026-2030 年，推动国四柴油车淘汰、国三及以下汽油车淘汰，引导国二及以下标准的非道路移动机械淘汰。完善铁路路网和货运场站布局，加快推动大宗货物“公转铁”。到 2023 年，已建成铁路专用线的，大宗货物绿色运输方式比例力争达到 90% 以上；2025 年前，基本形成大宗货物和集装箱中长距离运输以铁路运输为主的格局。

值得注意的是，从减排绝对值来看，目前的运输结构调整措施对PM_{2.5}浓度下降和CO₂减排的贡献均较小，这说明济南市达标情景下运输结构调整的力度依然偏弱，导致该措施减污降碳效益不显著。亟需探索设计更加严格的减排措施。

5.5. 有续推进工业源深度治理

各项工业污染源深度治理措施（如超低排放措施）在降低污染物排放的同时，多数情况下会增加碳排放，因而具有较低的协同控制评价。但考虑到强化大气污染物末端控制的措施有明显的大气污染物减排效果，且短期内对碳排放的影响不显著（一般小于2%），前期已在实施的末端控制措施可按计划有续推进。但从长期来看，应将碳排放指标纳入大气污染控制措施评价体系，逐步实施重点点源末端治理设施“协同双控”。建议首先鼓励排污单位采用低碳污染控制措施，如源头替代、CFB干法脱硫等，推广节能风机、高效换热器和变压器等节能设备使用；逐步淘汰高碳排放、较低大气污染物去除的工艺设施，如无热量回收的 VOCs 直接燃烧工艺、部分氧化法脱硝工艺等；限制使用高碳排放、高大气污染物去除率的治理工艺，如烟气加温法 SCR、超大液气比湿法脱硫等。对现有大气污染治理设施，建议开展碳排放评估，有针对性的采取低碳改造，如通过优化烟气流场避免催化还原法脱硝工艺氨氮比过高；改进燃烧法 VOCs 治理工艺温度控制，避免辅助能源消耗过大；改进湿法脱硫工艺尾部除雾工艺，降低因烟气含湿率过高带来的能源资源损耗。同步强化运行过程监管。

5.6. 优化实施其他减排措施

其他各项措施中，在扬尘面源治理和农业面源治理等领域，虽然相关措施协同降碳能力较低，但由于具有非常大的大气污染物减

排潜力，同时减排的经济成本相对较低，建议优先实施。

5.7. 逐步转向以“碳”为引领设计减排路径

建议逐步减污降碳重要约束条件由空气质量持续改善转向“碳减排”。在十四五前期，将推动空气质量持续改善作为碳达峰与碳中和技术路径选择的重要约束条件，在设计各类降碳措施时，充分考虑不同技术路径对大气污染减排的协同效应。在十四五中后期，随着济南市各项工作的推进，全市大气污染物减排也将从重点点源控制转向以结构化减排和精细化管理为主。建议逐步转向以“碳减排”作为重要约束条件来设计大气污染物减排路径，以最大限度实现“减污降碳”协同效应。

5.8. 顶层设计协同增效与保障措施

5.8.1. 建立数据管理协同体系

加强减污与降碳在统计、核算和报告制度、数据信息应用方面的协同。针对本研究过程中自下而上建立的大气污染源和二氧化碳排放协同清单，进一步从排放源头厘清两者间的关联机理，实现两种清单在统计口径、核算边界、排放来源的深入统一。建立碳排放总量控制制度，加强碳排放管理与排污许可管理制度深度融合，逐步统一管控名录，匹配行业和产品代码标识，对接数据系统，推进温室气体与大气污染物排放相关数据统一采集、相互补充、交叉校核。

5.8.2. 加强管理政策创新协同

建议加强政策创新，促进污染减排与应对气候变化的协同融合。建立跨部门协调机制，统筹推进协同控制工作。加强部门间联合调查、联合执法、信息共享，增强部门间法律法规协调和制度衔接。建立专家委员会，强化治理跨部门综合决策咨询与技术支撑。深入

贯彻落实《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》，强化一体化协同管控，切实做到战略规划、政策法规、制度体系、试点示范等的统筹融和。聚焦产业结构与能源结构调整，深化“三线一单”生态环境分区管控中协同减污降碳要求，推动构建促进减污降碳协同管控的生态环境保护空间格局。推广应用已有的污染物与温室气体协同控制效果好的技术。加强新协同控制技术、新装备的研发和应用，从科研、金融和税收方面予以支持。

5.8.3. 推动评价管理统筹融合

建议将减污降碳协同度评价技术方法体系，融入到日常环境管理工作。强调全过程管理，积极推进环境与碳双评价制度。注重从源头上对污染物与温室气体进行协同管控。开展重大政策措施出台前的协同效应评估，选择成本低、污染物与温室气体综合减排效果好的最优协同控制措施。通过规划环评、项目环评推动区域、行业和企业落实煤炭消费削减替代、温室气体排放控制等政策要求，推动将温室气体排放影响纳入环境影响评价。进一步完善“污染控制措施-污染物排放量-CO₂排放量-PM_{2.5}浓度”的协同效益评价技术体系，将协同度指数（SI 指数）作为不同措施、不同领域、不同行业协同效益评估的指示性指标，纳入日常环境管理工作。

5.8.4. 统筹协同计量监测体系

进一步围绕大气污染物和温室气体协同减排，强化监测机制建立、技术研究、监测设备研发等支持和保障。充分依托济南市已建成的污染物监测体系，统筹温室气体与大气污染物排放协同计量监测。加强碳排放关键计量测试技术研究和应用，强化碳计量在碳足迹核算、碳追踪中的应用。建立碳排放计量审查制度，强化重点排放单位的碳计量要求，在碳排放重点管控园区开展低碳计量试点。

鼓励企业定期开展碳审计工作，完善全生命周期监管政策。

5.8.5. 积极争取纳入国家试点示范

建议要充分认识减污降碳协同增效的重要地位和作用，积极争取纳入国家试点示范。“十四五”时期，我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。实施减污降碳协同增效已经上升为国家意志。济南作为京津冀及周边大气联防联控重点城市和典型工业城市，积极探索温室气体与大气污染物协同控制的典型模式、技术路径和实施方案，对国家制定减污降碳协同增效行动方案、技术指南、标准等顶层设计具有较好的借鉴意义。同时，对加快建设“大强美富通”现代化国际大都市、引领全省新旧动能转换、促进黄河流域生态保护和高质量发展具有较好的示范效应。