



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202209057 中图分类号 X502 文献标识码 A

曾张福, 郑雄枫, 王晓峰, 等. “十三五”期间惠州市大气环境质量改善及其成因分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1897-1906. [ZENG Zhangfu, ZHENG Xiongfeng, WANG Xiaofeng, et al. Analysis of the causes of air quality improvement in Huizhou City during the 13th five-year plan[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1897-1906.]

“十三五”期间惠州市大气环境质量改善及其成因分析

曾张福^{1,✉}, 郑雄枫², 王晓峰¹, 张林¹

1. 惠州大亚湾经济技术开发区石化区环境监控中心, 惠州 516086; 2. 惠州大亚湾经济技术开发区环境监测站, 惠州 516081

摘要 2020 年惠州大气环境质量综合指数、优良率分别为 2.77、97.8%，均达到“十三五”期间最佳水平；与 2016 年相比，2020 年惠州市 NO₂、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度分别降低了 18.1%、7.3% 和 20%，这是惠州市本地及其周边城市污染源减排、新冠疫情和气象条件改善等因素共同作用的结果。为提升区域大气环境质量精细化管理水平，利用大气环境质量模型模拟分析这些因素对改善惠州市大气环境质量的贡献。基于 2016 年大气污染源排放清单，模拟结果显示 2020 年整体气象条件较 2016 年更有利于大气污染物的控制，可使 NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 O₃ 质量浓度分别降低 2.6%、4.4%、1.7% 和 0.9%；惠州本地污染源减排措施对降低 NO₂、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度的贡献最大，分别为 10.1%、12.8% 和 4.6%；新冠疫情对 NO₂ 和 PM_{2.5} 质量浓度的降低贡献率分别为 2.6% 和 2.0%；周边城市污染源排放措施对降低惠州市各项污染物质量浓度也有一定的贡献，尤其有利于降低 NO₂ 和 PM_{2.5} 的质量浓度（可分别降低 1.8% 和 0.9%）。本研究可为同类城市大气污染防治提供参考。

关键词 大气污染；减排措施；大气环境质量影响；减排贡献；空气质量模拟

广东省出台《广东省环境保护“十三五”规划》明确了珠三角区域大气污染防治攻坚战的任务目标。作为珠三角区域重要城市，惠州市政府在印发实施《惠州市大气污染防治行动方案（2014—2017 年）》、《惠州市环境保护和生态建设“十三五”规划》的基础上，先后颁布实施了《惠州市大气污染防治强化措施及分工方案》、《惠州市蓝天保卫战目标任务及分工方案（2019—2020 年）》等，并在全市范围内有序开展了电厂超低排放改造、黄标车辆淘汰、扬尘治理、泄漏检测与修复（Leak Detection and Repair, LDAR）技术推广、公交车电动化等工作。城市大气环境质量状况与气象条件、当地产业发展状况、污染物减排及外来污染物传输等多种因素密切相关，分析多因素共同作用下的大气环境质量改善路径成为热点。

房鑫坤^[1]采用在线监测数据和统计方法，对 2016—2020 年间广州市大气环境质量变化情况进行了分析，探讨了气象条件、污染物之间的相互作用及本地政策措施对大气环境质量的影响。徐光仪等^[2]采用 Models-3/CMAQ 模型（third-Generation Air Quality Modeling System/Community Multi-scale Air Quality，即美国环保署研制的第三代空气质量预报和评估系统模型），对“十二五”期间深圳市二十余条政策措施的大气环境质量改善效果进行评估，发现不利气象条件会在一定程度上抵消污染控制措施对大气环境质量的改善效果。周君蕊等^[3]对武汉市大气环境保护措施的成效进行了全面评估，提出未来阶段的空气管理应更加侧重污染物协同治理，从多个方面统筹制定政策措施。2020 年，新冠肺炎疫情爆发，社会生产活动一度停摆，对大气环境质量也起到了一定影响。陈楠

收稿日期：2022-09-09；录用日期：2023-03-27

第一作者：曾张福（1987—），男，硕士，高级工程师，ulxtpy@163.com；✉通信作者

等^[4]研究了2020年疫情管控期间武汉市的大气环境质量变化及改善措施影响研究,发现管控期间机动车排放大幅削减,而工业活动等其他人源的减排幅度有限。

为探讨“十三五”期间惠州市大气环境质量改善成因,基于大气污染源排放清单、国控大气环境质量自动监测站点数据,利用WRF-CMAQ模型,即气象研究和预测(Weather Research and Forecasting)和通用多尺度空气质量(Community Multi-scale Air Quality)模型,以及实测监测数据融合技术,分析气象、疫情及污染物减排对大气环境质量的影响,可为该地区进一步优化大气污染防治策略提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源及评价方法

惠州市环境空气污染物监测数据来源于《广东省空气质量状况》(<https://app.gdeci.cn/StationStatus/AppCheck>),主要包括PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂和O₃等污染物的年均质量浓度、月均质量浓度实况统计数据,并计算了各污染物的单项指数(参考《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)C.1公式计算),分析大气环境质量状况和主要大气污染物浓度的变化趋势,以及影响其变化的可能要素。

1.2 模拟计算技术路线

本研究包含排放清单编制、模型设置与情景模拟、污染贡献分析3个部分,按图1所示技术路线开展。珠三角2016和2020年排放清单由华南理工大学研究团队提供。CMAQ(Community Multi-scale Air Quality,即通用多尺度空气质量)模拟体系中的不同情景方案源于“十三五”期间惠州市大气环境质量改善的主要影响因素设计,用以评估各影响因素对惠州市大气环境质量改善的贡献。为验证模型的可靠性,利用模拟区域内国控站点监测数据进行校验。模型结果经与实际监测数据进行校验满足误差要求后,采用SMAT-CE(Software for Model Attainment Test-Community Edition,即达标评估软件)工具^[5]将模型-监测数据融合处理,以进一步利用监测值减小模拟误差。最后,通过比较不同排放情景与基准情景模拟结果的浓度差异,分析了惠州市大气污染治理措施对大气环境质量改善的影响。

1.3 WRF-CMAQ 模拟体系

使用WRF-CMAQ三层嵌套模拟体系,模拟区域如图2所示。三层嵌套网格分辨率从外至内分别为27 km×27 km、9 km×9 km和3×3 km。各层网格行列数分别为175×124、133×133、106×130,模拟域垂直方向分为14层。最外层初始文件和边界文件为CMAQ的默认配置文件;第2层和第3层的初始文件和边界文件均来自上层网格的模拟结果;第3层网格区域是研究区域,经纬度为114.281°E~114.782°E,22.582°N~22.910°N,分

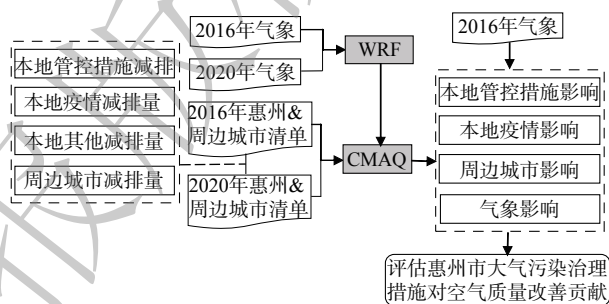


图1 研究技术路线

Fig. 1 Technical route of the research



图2 模型模拟区域

Fig. 2 Domain of the modelling area

为惠州市、周边城市和域内其他城市(不包含在排放情景内)3类。图2中五角星形是惠州市5个国控大气环境质量站点(河南岸金山湖子站、下埔横江三路子站、江北云山西路子站、惠阳区承修路船湖子站和大亚湾管委会子站)所在位置,其数据代表了惠州市大气环境质量状况。为减小初始条件误差影响,提前5d进行WRF-CMAQ模拟。

WRF模型版本为v3.9.1,气象驱动数据来自美国国家环境预报中心(the National Center for Environmental Forecasting, NCEP)提供的气象再分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL),时间间隔为6h,分辨率 $1(^{\circ})\times 1(^{\circ})$,包含位势高度、海平面气压、地面气压、海面温度、温度、相对湿度、冰层覆盖、垂直运动和涡度等气象参数。此外,本研究还使用NCEP自动化数据处理(automated data processing, ADP)全球地表观测数据和探空观测数据进行网格四维数据同化。WRF主要物理过程参数见表1,参数化方案与已有研究报道相同^[6],模拟区域与CMAQ模型网格重合,但在其基础上各添加上下3行和左右3列。CMAQ是美国环保署开发的第3代模式,WRF模型的输出结果为CMAQ模型提供气象场。使用CMAQ v5.2(即CMAQ模型版本为v5.2)基于污染源排放清单、气象数据等输入资料,可得到模拟区域主要大气污染物浓度。参考上述已有研究和惠州市大气环境质量实测数据,选取2016和2020年1、4、7、10月作为典型模拟时段,以模拟结果均值代表惠州市2016和2020年大气污染物的年际浓度;模拟气相化学反应与气溶胶反应分别采用CB6和AERO6机理。

1.4 模拟情景

为评估主要因素对惠州市大气环境质量改善影响,设置了5组模拟情景。表2列出了各模拟场情景细节。1)基准情景2016-BASE和2020-BASE,分别表征惠州市2016年和2020年的大气环境质量实际情况。2)气象因素情景(MET),基于同一份2016-BASE清单,输入不同年份(2016和2020年)气象,评估气象变化的影响。3)疫情情景(COV),基于2020年活动水平数据、各排放源相关参数及文献调研等资料,估算2020年疫情影响情况下各类人为源的排放水平作为输入,评估疫情对大

表1 WRF模型主要物理过程参数

Table 1 Main physical process parameters of WRF model

物理过程	参数化方案
陆面过程方案	Pleim-Xiu方案
边界层方案	ACM2 PBL方案
积云对流方案	Kain-Fritsch方案
微物理过程	Morrison方案
长波辐射	RRTM长波辐射方案
短波辐射	RRTM短波辐射方案

表2 CMAQ模拟系列情景设置

Table 2 Description of modeling scenarios

情景类型	排放特征	气象条件	备注
2016-BASE	2016年所有源(包括人为源、自然源)、初始条件和边界条件排放量	2016年气象	基准场景
2020-BASE	2020年所有源(包括人为源、自然源)、初始条件和边界条件排放量	2020年气象	—
MET	2016年所有源(包括人为源、自然源)、初始条件和边界条件排放量	2020年气象	—
HZC	与2020-BASE相同,但只有惠州实施减排	2020年气象	气象影响
SURC	与2016-BASE相同,但只有周边城市实施减排	2016年气象	—
COV	与2016-BASE相同,2020年较2016年增加了疫情影响清单输入	2016年气象	—
PSC	除设置燃煤电厂减排外,与HZC情景相同	2016年气象	空气污染控制措施效果
TRA	除设置交通源减排外,与HZC情景相同	2016年气象	空气污染控制措施效果
DSC	除设置扬尘源减排外,与HZC情景相同	2016年气象	空气污染控制措施效果
VOCs_PRC	除设置VOCs相关源减排外,与HZC情景相同	2016年气象	空气污染控制措施效果

注:2016-BASE是指2016年基准情景;2020-BASE是指2020年基准情景;MET是指气象因素情景;HZC是指惠州排放控制情景;SURC是指周边城市排放控制情景;COV是指疫情情景;PSC是指燃煤电厂减排情景;TRA是指交通运输源减排情景;DSC是指扬尘源减排情景;VOCs_PRC是指VOCs相关源减排情景。

气环境质量的影 响；4) 以 2016-BASE 为基准，设计惠州排放控制情景 (HZC) 和周边城市排放控制情景 (SURC)，分别研究本地减排控制和周边地区减排控制的效果；5) 设计燃煤电厂减排情景 (PSC)、交通运输源减排情景 (TRA)、扬尘源减排情景 (DSC) 和 VOCs 相关源减排情景 (VOCs_PRC) 4 个本地减排情景，研究惠州市主要减排政策对大气环境质量影响。系列控制情景 MET、HZC、SURC、PSC、TRA、DSC 和 VOCs_PRC 的自然排放、初始和边界条件与 2020-BASE 情景相同，仅人为排放和气象条件有所变化。

1.5 排放清单

模拟区域第 1 层和第 2 层的人为排放清单来自清华大学 MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China, 即中国多尺度排放清单模型) 全国排放清单，第 3 层采用华南理工大学开发的 2016 和 2020 年广东省排放清单。清单编制采用排放因子法^[7]，根据编制年份的活动水平和排放因子数据，计算并建立空间分辨率 3 km×3 km 的大气污染源排放清单，涵盖 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs、CO、NH₃ 等 7 种污染物。活动水平数据来源于广东省统计年鉴和《中国能源统计年鉴》，排放因子来自技术指南和文献资料等。

清单结果显示 2020 年惠州市人为排放 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs 和 CO 分别为 1.7×10⁴、5.9×10⁴、3.5×10⁴、10.9×10⁴、8.1×10⁴ 和 24.6×10⁴ t。与 2016 年相比，2020 年惠州 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs、CO 排放量分别下降了 53.6%、48.3%、41.7%、30.5%、38.6% 和 29.2%。周边 6 个城市 (广州、河源、深圳、汕尾、东莞、韶关) SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs、CO 排放量相比 2016 年分别减少了 35.2%、37.9%、32.6%、22.4%、30.5% 和 33.4%。图 3 显示虽然惠州各个空气污染物的减排总量低于周边城市，但具有较高的减排比例。

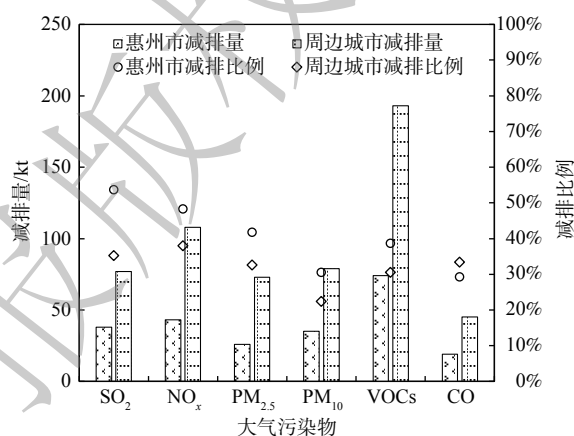


图 3 2016 年和 2020 年惠州市及周边城市 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs、CO 的总减排量和减排比

Fig. 3 Total emissions reductions and reduction ratios for SO₂, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, VOCs, and CO in Huizhou and surrounding cities in 2016 and 2020

2 结果与讨论

2.1 大气环境质量实测数据分析

2.1.1 大气环境质量年际变化特征

图 4 表明，2020 年惠州市大气环境质量整体改善明显，环境空气质量综合指数及优良率均达到“十三五”时期的最优水平，扭转了 2016—2019 年大气环境质量总体下滑的局面。从单项污染指标来看，影响环境空气质量综合指数的主要污染物是 O₃、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NO₂；与 2016 相比，2017—2019 年惠州市大气环境质量综合指数呈波动上升趋势，2017、2018 和 2019 年 O₃、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NO₂ 质量浓度均呈波动上升的态势；而 2020 年环境空气质量综合指数则改善 7%，主要是由于 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NO₂ 均有不同程度的改善，尽管 O₃ 质量浓度上升 13%，但 PM_{2.5}、

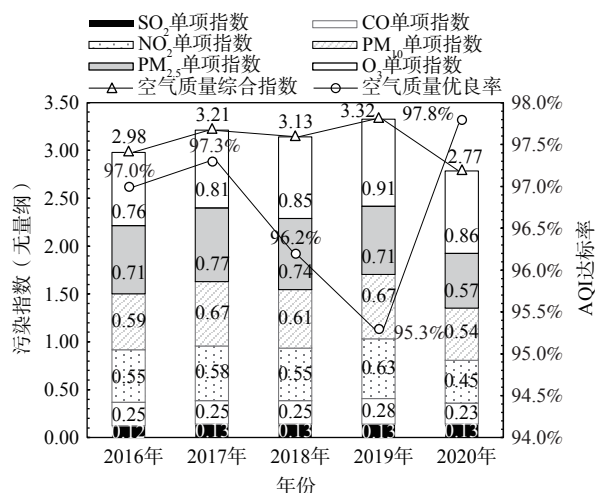


图 4 惠州市“十三五”期间大气环境质量年变化

Fig. 4 Interannual variation of air quality in Huizhou during the “13th Five-Year Plan” period

PM₁₀和NO₂质量浓度分别下降了20%、7%和18%。2016—2020年惠州市空气质量优良率保持在95%以上，2020年达到五年内最佳(97.8%)。因此，研究“十三五”期间惠州市大气环境质量的改善策略，可基于2016和2020年的对比，使用大气环境质量模型模拟进一步分析气象条件变化、疫情影响和大气污染治理减排等因素与大气环境质量状况的关联性影响。

2.1.2 主要污染物季节变化特征

图5表明，“十三五”期间惠州市SO₂与CO质量浓度保持在低位，PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和O₃质量浓度月变化特征较为显著，每年大气环境质量季节性的波动大体可用1、4、7和10月的数据变化来表征。O₃质量浓度峰值主要出现在4—10月，这跟高温、低湿、强辐射等气象条件在一年中的分布变化情况密切相关。同一年度PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂质量浓度月变化趋势大体一致，其中颗粒物污染物浓度峰值出现在秋冬季，这跟秋冬季干燥少雨易引发颗粒物特别是扬尘污染有关。

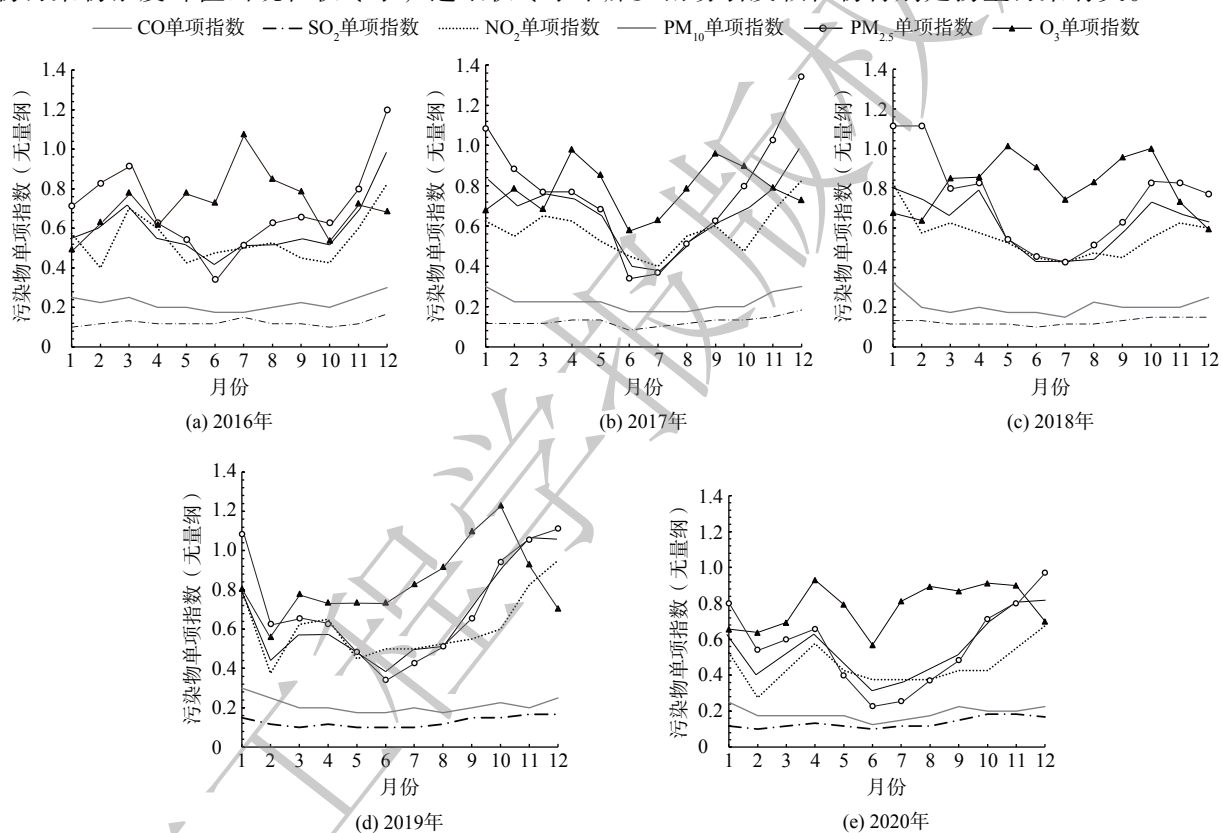


图5 “十三五”期间惠州市环境空气中PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、O₃、SO₂和CO单项指数月变化

Fig. 5 Monthly variation of PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃, SO₂, and CO Single pollution index in ambient air of Huizhou during the 13th Five-Year Plan period

2.1.3 臭氧超标与评价浓度变化特征

“十三五”期间，惠州市共有超标天数60d，其中臭氧超标天数55d，PM_{2.5}超标天数5d(2016年2月和3月各1d，2017年1月和12月各1d，2018年2月1d)，2019年起通过春节期间烟花爆竹禁燃等大气环境质量保障行动，消除了PM_{2.5}超标天数。惠州市大气环境质量超标主要由臭氧污染造成，尤其是2019年以来臭氧污染导致的超标天比例达到100%，表明臭氧已成为影响惠州市大气环境质量优良率提高的关键污染物。图6表明惠州市臭氧超标天出现在4—12月，主要集中在7—9月。

近年来，珠三角臭氧浓度呈波动上升的趋势^[8-9]，夏秋季频频出现长时间、大范围、高浓度的区域性臭氧污染过程。尤其是在2019年秋季，全国大范围出现高温晴热静稳天气，我国中东部大

部分地区均出现了不同程度的臭氧污染；与此同时，控制广东省大部分地区的副高强度大，控制时间长；特别是9月份，在副热带高压控制以及热带气旋外围的双重作用下，广东的下沉气流加强，高温酷热天气加剧，O₃污染严重，导致珠三角9月大气环境质量优良率仅为47.4%^[10-12]。这些不利的气象条件已成为制约珠三角大气环境质量进一步改善的关键瓶颈。图7显示惠州市和珠三角每月臭氧浓度变化趋势大体一致，说明臭氧污染受区域性的影响明显。

在上述背景下，2016—2020年惠州市臭氧浓度总体呈上升态势，然而2020年大气环境质量优良率较2016年仍有所改善。2020年臭氧污染对应不同时间阶段呈现出不同的污染特征。

1) 疫情管控期间(1月23日—3月31日)。社会经济活动下降显著，除部分工序流程不可中断的行业外，珠三角工业生产活动总体放缓，交通运输活动水平大幅降低，以上因素导致臭氧前体物NO_x和VOCs等大气污染物排放明显减少，1—3月惠州市臭氧、NO₂、PM_{2.5}和PM₁₀等污染物质量浓度处于“十三五”期间同期低位，未出现大气环境质量超标天。

2) 全面复工复产阶段(4月)。广东省众多行业恢复正常化，大气污染物排放增加，多项污染物浓度接近历史同期水平，广州、东莞与中山等地的VOCs质量浓度同比上升7%~31%，加上广东出现了高温、强日照等不利气象条件，2020年4月珠三角日照时数达到同比增长56%，也明显高于2017—2019年同期的水平^[13]，珠三角和惠州市臭氧浓度均达到年度峰值，4月惠州市臭氧超标2 d。

3) 大气污染防治攻坚阶段(5月底至年终)。广东省生态环境厅先后出台了《2020年夏秋挥发性有机物治理达标排放百日服务行动方案》、《关于开展蓝天保卫战百日冲刺工作强化督导帮扶的通知》，广东省大范围实施了臭氧前体物协同治理，包括惠州市在内的珠三角城市加强了工业污染源废气排放综合治理“三率”(治污设施收集率、运行率和去除率)及污染天气预警期间启动错峰或减荷生产等应对措施，区域联防联控有助于减少臭氧高峰时段(10时至18时)NO_x和VOCs排放，2020年8—11月珠三角和惠州市臭氧质量浓度峰值均较2017、2018和2019年同期下降明显，2020年5—12月惠州市超标天数也降至“十三五”期间同期最低值(6 d)。

2.2 WRF-CMAQ 模拟分析大气环境质量改善因素

根据实测数据，2020年惠州市NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}质量浓度为18、38和20 μg·m⁻³，较2016年分别下降18.1%、7.3%和20%；O₃质量浓度为138 μg·m⁻³，较2016年上升13.1%。为进一步探究2020年惠州市大气环境质量较2016年整体改善的原因，利用WRF-CMAQ模拟结果，进一步分析了惠州市本地减排措施(燃煤电厂减排、交通运输源减排、扬尘源减排和VOCs相关源减排)、周

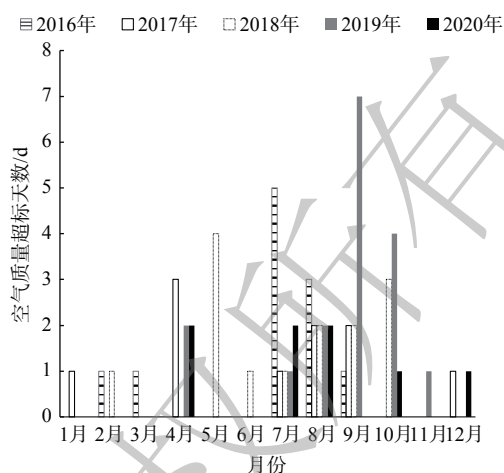


图6 “十三五”期间惠州市月度大气环境质量超标天数

Fig. 6 Days when the air quality in Huizhou exceeded the standard during the 13th Five-Year Plan period

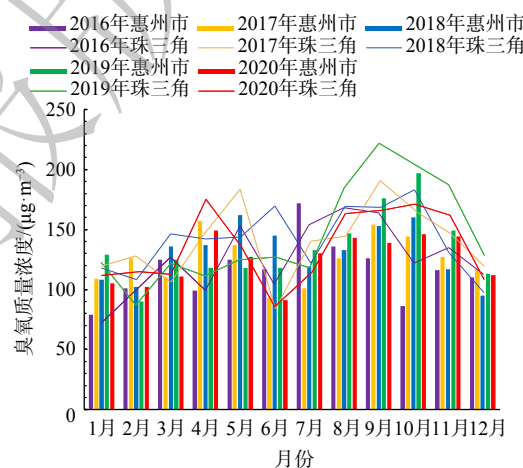


图7 “十三五”期间惠州市和珠三角大气环境质量O₃浓度月际变化

Fig. 7 Monthly variation of O₃ concentrations between Huizhou and the Pearl River Delta during the 13th Five-Year Plan period

边城市排放控制、气象条件变化和新冠疫情等因素对惠州市大气环境质量的关联性影响。WRF-CMAQ 模拟结果表明 (表 3), 扬尘源减排、VOCs 相关源减排、交通运输源减排、燃煤电厂减排、新冠疫情影响、周边城市减排和较为有利的气象条件均可降低大气污染物浓度, 其中综合减排更有利于大幅度降低 NO_2 和 PM_{10} 质量浓度。

表 3 不同因素对惠州市 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 减排贡献比

Table 3 Contributions of the different emission scenarios to NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 concentrations at surrounding stations

序号	减排情景	对降低大气环境质量主要指标浓度贡献比例			
		NO_2	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	O_3
1	扬尘源减排	/	2.40%	6.40%	/
2	VOCs 相关源减排	/	/	/	6.40%
3	交通运输源减排	5.70%	1.20%	3.60%	-8%*
4	燃煤电厂减排	4.50%	2.50%	/	-4%*
5	新冠疫情影响	2.60%	/	2.00%	-9.20%*
6	周边城市减排	1.80%	/	0.90%	0.70%
7	气象条件变化	2.60%	1.70%	4.40%	0.90%
8	综合措施 ^a	10.10%	12.80%	4.60%	—

注：“/”影响较小，可忽略不计；“*”因氮氧化物减排带来 NO 滴定效应，导致臭氧浓度不降反升；“^a”模拟分析本地扬尘源、VOCs 相关源、交通运输源、燃煤电厂减排等综合因素的影响；“—”综合措施对臭氧浓度的影响仍待进一步研究。

1) 气象条件的影响。2016 和 2020 年惠州市主要气象因素见表 4, 2020 年平均风速和总降水量较 2016 年分别增加 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 211.9 mm , 温度相差不大。较高的风速和更多的降雨量有利于污染物扩散, 能够有效稀释污染物浓度^[14]。已有研究发现, 相对湿度、云量和太阳辐射是 O_3 化学反应的重要因素^[15], 较低的相对湿度、较少的云量和较高的太阳净辐射有利于光化学反应, 导致 O_3 生成增多^[16]。2020 年相对湿度较 2016 年增加了 2.9%, 云率增加 9.1%, 太阳净辐射减少 $11.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。模拟情景 MET 用于评估气象条件对惠州市大气环境质量的影响, 结果显示在人为排放相同时, 在 2020 年气象条件的影响下, NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 质量浓度分别降低了 2.6%、4.4%、1.7% 和 0.9%。

表 4 2016 年和 2020 年主要气象因素

Table 4 Meteorology conditions in 2016 and 2020

年份	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度	降水量/ mm	风速/ $(\text{mg}\cdot\text{s}^{-1})$	云量	太阳辐射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
2016	22.6	79.6%	2036.2	2.4	60.4%	167.3
2020	22.8	82.5%	2248.1	2.7	65.9%	155.4

注：气温、相对湿度和风速为 2016 年和 2020 年的年平均值，降水为 2016 年和 2020 年的总降雨量，数据来源于《广东省统计年鉴》；云量和太阳辐射的年平均值来自 WRF 模式模拟结果。

2) 惠州市本地减排措施的影响。图 8 是各污染源减排情景下的大气污染物空间分布差值图 (包含 SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3)。其中, 扬尘源情景 (DSC) 下惠州市西北部、中部和南部颗粒物减排效果较明显, 对应的博罗县、惠城区和惠阳区是惠州市的中心区域, 建筑施工场地和道路路网相对密集。扬尘减排措施重点聚焦建筑工地扬尘污染防治, 同时强化道路清洁、洒水频次, 能够有效防尘抑尘、净化空气。

在 O_3 污染缓解方面, VOCs 相关源情景 (VOCs_PRC) 对于惠州市中心及西部城区的影响较为突出, 而燃煤电厂源情景下 (PSC 情景, 主要削减 NO_x 与 SO_2) O_3 质量浓度不降反升。尽管 O_3 前体物 NO_x 和 VOCs 排放质量浓度均有下降, 但 NO_x 排放的削减会造成本地 NO 滴定作用的减弱, 不利

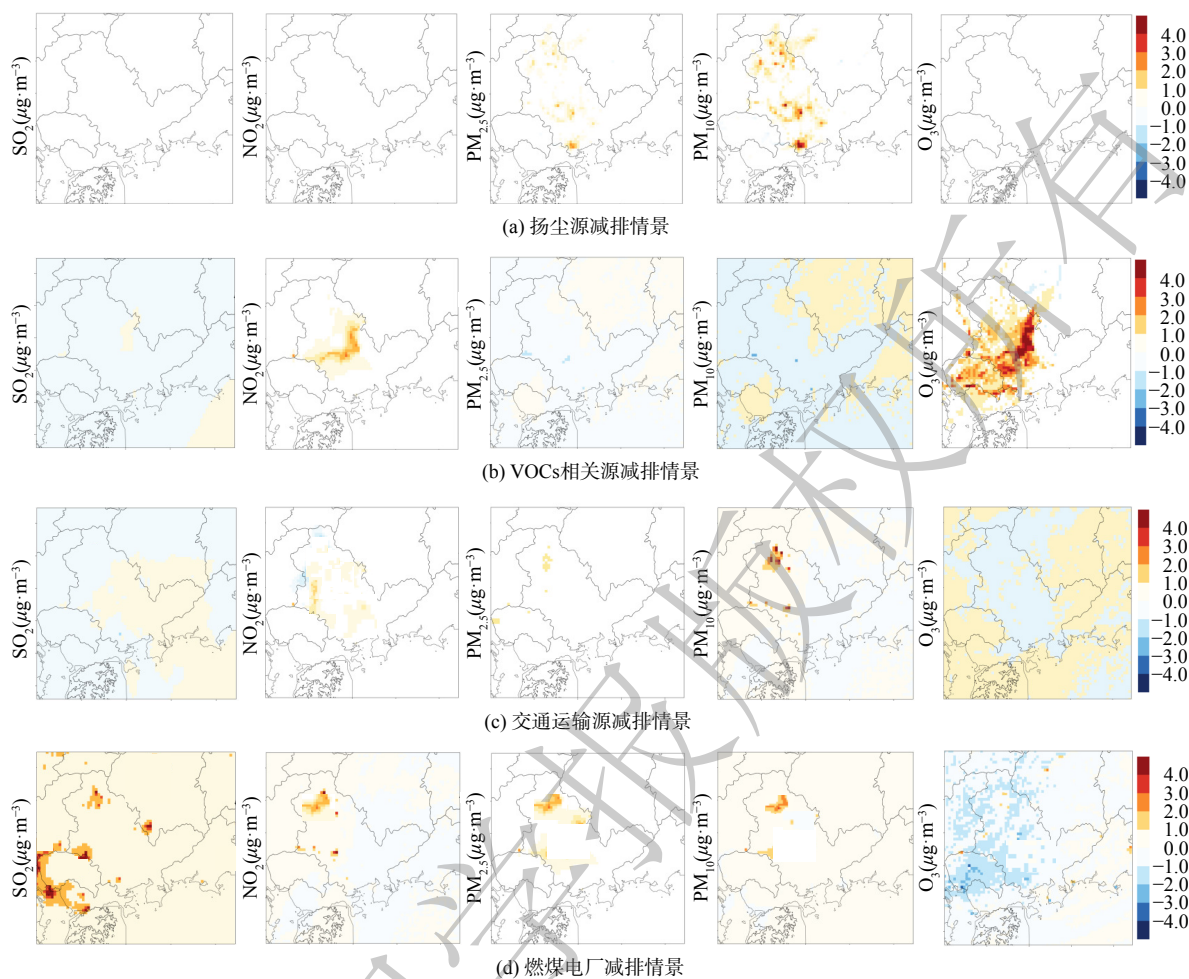


图8 基准情景与不同排放情景 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 质量浓度的差值分布

Fig. 8 Changes in the concentrations of SO_2 , NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , and O_3 due to the reduction of different source emissions and base

于 O_3 的消耗，其副作用超出了 VOCs 减排对降低 O_3 质量浓度的促进作用，导致 O_3 总体质量浓度升高^[17-19]。

对于 SO_2 而言，燃煤电厂减排情景的贡献较大，归因于燃煤电厂是 SO_2 的主要污染源。燃煤电厂情景 (PSC) 对于 NO_x 的减排同样贡献较大，主要由于燃煤电厂实施的超低排放改造严格限制了 NO_x 和 SO_2 排放标准。据测算超低排放改造工作完成后，以各燃煤电厂 2013 年排放总量为基数，每年氮氧化物和 SO_2 削减比例均超过 50%，减排效果显著。交通源情景对于颗粒物和 NO_x 的减排具有一定贡献，但贡献幅度相对较低，随着下阶段更严格机动车污染排放标准的实施与新能源车辆的推广，交通源仍有较大的减排潜力。

经上述情景模拟测算，惠州市本地减排措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 PM_{10} 等主要污染物质量浓度的降低均起到了促进效果。1) 燃煤电厂超低排放改造严格限制了氮氧化物和颗粒物排放标准，对于 NO_2 质量浓度贡献比达到 4.5%，是除交通源减排措施外影响 NO_2 减排的第二大因素，对 PM_{10} 减排也有一定贡献率 (2.5%)；2) 交通源减排措施对于 NO_2 和颗粒物减排具有一定贡献，贡献比分别为 5.7% (NO_2)、1.2% (PM_{10}) 和 3.6% ($\text{PM}_{2.5}$)；3) 扬尘源减排对降低 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度的贡献比分别达到了 6.4% 和 2.4%，是颗粒物减排的首要贡献因素。

3) 新冠肺炎疫情的影响。疫情期间政府采取了限制人口聚集、关闭学校和 12 路段封锁等措施^[20]，从源头上降低了污染物排放源的活动水平，社会活动大幅减弱，有利于大气环境质量改善^[4]。模拟结果显示，除 O_3 外，疫情对降低其他污染物的质量浓度均有一定程度的贡献，其中对于降低

NO₂和PM_{2.5}质量浓度的贡献较大,分别为2.6%和2.0%。2020年惠州市疫情带来的减排影响主要发生在2—3月(2—3月为当地防疫严控期,3月之后社会生产活动恢复正常),且2月也叠加了春节、元宵节带来的减排影响,这说明疫情不是影响惠州市2020年全年大气环境质量的主要因素。

4) 周边城市减排的影响。2020年,在广东省生态环境厅的部署下,全省大范围特别是珠三角在大气污染防治攻坚阶段步调一致的采取了一系列减排措施。这些周边城市减排与惠州市本地减排形成了协同效应,对降低惠州市各项污染物质量浓度也起到了一定的作用,尤其对于一次污染源为主的污染物NO₂(1.8%)和PM_{2.5}(0.9%)改善幅度较大。这说明对机动车、扬尘等重点污染源应当开展区域联防联控,共同提升区域环境大气环境质量^[14]。

5) 臭氧质量浓度变化分析。近年来臭氧污染日益凸显,PM_{2.5}和O₃具有共同的前体物,能通过一系列复杂的光化学反应彼此影响^[21-22],如何协同控制颗粒物和臭氧已成为管理部门制定减排政策的一项挑战。惠州市本地VOCs相关源减排、气象条件改善和周边城市减排均有效削减了臭氧前体物VOCs等污染物质量浓度,对降低臭氧浓度贡献比分别为6.4%、0.9%和0.7%;但疫情对惠州市的影响、惠州市本地交通源减排和燃煤电厂减排在降低PM_{2.5}和NO₂等污染物质量浓度的同时,也降低了局地NO的排放质量浓度,导致对臭氧滴定作用减弱,故O₃质量浓度不降反升;经测算,疫情、交通源减排和燃煤电厂减排对臭氧质量浓度上升的贡献比分别为9.2%、8%和4%。NO局地滴定效应对臭氧浓度的影响程度与当地处于何种臭氧前体物(NO_x或VOCs)控制区有关,且气象条件的多变性也增加了不确定因素,因此仍需进一步研究,以增进对城市臭氧污染的科学认识。

3 结论

1) 2020年惠州大气环境质量综合指数、优良率分别为2.77、97.8%,均到“十三五”期间最佳水平;与2016年相比,2020年惠州市NO₂、PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度分别降低了18.1%、7.3%和20%,这是惠州市本地污染源减排、周边城市污染源减排、新冠疫情和气象条件改善等因素共同作用的结果。模拟结果表明,基于2016年大气污染源排放清单,2020年的气象条件更有利于NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀和O₃质量浓度的降低,可分别减低2.6%、4.4%、1.7%和0.9%;惠州本地污染源减排措施对NO₂、PM_{2.5}和PM₁₀的降低贡献最大,贡献率分别为10.1%、12.8%和4.6%;新冠疫情对降低NO₂和PM_{2.5}质量浓度的贡献率分别为2.6%和2.0%;周边城市污染源排放措施对降低惠州市各项污染物质量浓度也有一定的贡献,尤其有利于降低NO₂(1.8%)和PM_{2.5}(0.9%)的质量浓度。

2) “十三五”期间惠州市臭氧浓度呈波动上升趋势,这与珠三角近年来臭氧污染加重的大环境背景有关;惠州市臭氧超标天出现在4—12月,主要集中在7—9月;2020年8—11月惠州市臭氧质量浓度峰值较2017、2018和2019年同期均有下降,臭氧污染的减轻明显减少了大气环境质量超标天数;臭氧已成为改善惠州市大气环境质量优良率最关键的污染物。

3) 局地NO滴定效应对臭氧污染的影响仍有待进一步定量分析,但2020年下半年惠州市与周边城市采取的污染防控政策在一定程度上减少了臭氧超标天数。这说明继续加强NO_x和VOCs等臭氧前体物区域性协同减排研究,对改善城市大气环境质量有重要意见。

参 考 文 献

- [1] 房鑫坤. 政策因素对城市空气质量的影响[J]. 化工管理, 2021, 614(35): 53-54.
- [2] 徐光仪, 黄晓波, 颜敏, 等. “十二五”期间大气污染治理措施对深圳市空气质量改善效果评估[J]. 广东化工, 2018, 45(5): 75-76.
- [3] 周君蕊, 邱培培, 刘浩, 等. 武汉市大气环境保护“十三五”评估及“十四五”规划的初步思考[J]. 绿色科技, 2021, 23(14): 102-106.
- [4] 陈楠, 张周祥, 李涛, 等. 武汉地区疫情管控期间空气质量变化及改善措施研究[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(2): 217-226.
- [5] DING D, ZHU Y, JANG C, et al. Evaluation of health benefit using BenMAP-CE with an integrated scheme of model and monitor data during Guangzhou Asian Games[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 42(4): 9-18.
- [6] 余美芳. 顺德区非道路移动机械排放及尾气后处理装置试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [7] 柯伯俊. 四川省大气污染源排放清单研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [8] 沈劲, 杨士士, 晏平仲, 等. 广东省臭氧污染特征及其成因分析[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(12): 90-95.

- [9] 曹梅, 范绍佳, 靳春, 等. 2015-2020年广东臭氧污染特征、污染天气分型及局地气象要素影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(1): 19-31.
- [10] 陈迎, 朱波, 黄沛荣, 等. 深圳市东部沿海地区大气挥发性有机物污染若干特征[J]. 环境科学学报, 2022, 42(6): 295-305.
- [11] 广东省生态环境厅. 广东省城市环境空气质量状况(2019年9月)[OL]. 2019-10-23. http://gdee.gd.gov.cn/xwfb4199/content/post_2652582.html.
- [12] 李婷苑, 陈靖扬, 翁佳烽, 等. 广东省臭氧污染天气型及其变化特征[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2015-2024.
- [13] 陈多宏, 沈劲, 陈瑶瑶, 等. 2020年珠三角区域臭氧污染特征及主要成因分析[J/OL]. 中国环境科学: 1-10
3-04-25. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220616.007>.
- [14] HUANG Q, WANG T, CHEN P, et al. Impacts of emission reduction and meteorological conditions on air quality improvement during the 2014 Youth Olympic Games in Nanjing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(21): 13457-13471.
- [15] KATRAGKOU E, ZANIS P, KIOUSIOUKIS I, et al. Future climate change impacts on summer surface ozone from regional climate-air quality simulations over Europe[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2011, 116.
- [16] PU X, WANG T J, HUANG X, et al. Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 603: 807-816.
- [17] TAN Z, LU K, JIANG M, et al. Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: A case study from radical chemistry to O₃-VOC-NO_x sensitivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 775-786.
- [18] XUE L K, WANG T, GAO J, et al. Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 13175-13188.
- [19] 赵延云. 城市典型区域臭氧污染特征、生成机制及管控策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [20] 鲁肖麟, 边燕杰. 疫情风险治理的双重动力——政府防控措施与网络公众参与[J]. *江苏社会科学*, 2021, 319(6): 61-71.
- [21] 白志鹏, 李伟芳. 二次有机气溶胶的特征和形成机制[J]. *过程工程学报*, 2008, 8(1): 202-208.
- [22] 方文政. 大气氧化及光氧化挥发性有机物生成二次有机气溶胶的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- (责任编辑: 靳炜)

Analysis of the causes of air quality improvement in Huizhou City during the 13th five-year plan

ZENG Zhangfu^{1,*}, ZHENG Xiongfeng², WANG Xiaofeng¹, ZHANG Lin¹

1. Environmental Supervision Center of Petrochemical Industrial Park, Huizhou Daya Bay Economic and Technological Development Zone, Huizhou 516086, China; 2. Environmental Monitoring Station of Huizhou Daya Bay Economic and Technological Development Zone, Huizhou 516081, China

*Corresponding author, E-mail: ulxtpy@163.com

Abstract In 2020, the air quality composite index and the AQI compliance rate in Huizhou were 2.77 and 97.8%, respectively, both reaching the best level during the 13th Five-Year Plan period. Compared with 2016, the concentrations of NO₂, PM_{2.5}, and PM₁₀ were decreased by 18.1%, 7.3%, and 20% respectively in 2020, which was the result of the emission reduction of local and surrounding cities pollution sources, COVID-19 pandemic, and the improvement of meteorological conditions. In order to improve fine management level of regional ambient air quality, the contributions of these factors to the improvement of air quality in Huizhou were simulated using an air quality model. Based on the emission inventory of air pollution sources in 2016, simulation results showed that the overall meteorological conditions in 2020 were more conducive to the reduction of atmospheric pollutants concentrations than in 2016, which can reduce the concentrations of NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, and O₃ by 2.6%, 4.4%, 1.7%, and 0.9%, respectively. The local emission control measures were the most effective ways, which contributed for 10.1%, 12.8%, and 4.6% of the emission reductions in NO₂, PM_{2.5}, and PM₁₀, respectively. The contribution of COVID-19 pandemic to the reduction of NO₂ and PM_{2.5} concentrations was 2.6% and 2.0%, respectively. The emission measures of pollution sources in surrounding cities also made a certain contribution to the reduction of the concentrations of various pollutants in Huizhou, especially to the concentrations of NO₂ and PM_{2.5}, which decreased by 1.8% and 0.9% respectively. This study can provide reference for the prevention and control of air pollution in similar cities.

Keywords air pollution; emission reduction measures; air quality impacts; emission reduction contribution; air quality simulation