

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析

常树诚¹, 廖程浩¹, 曾武涛¹, 杨柳林¹, 俞绍才², 陈雪², 郑剑平³

(1. 广东省环境科学研究院, 广东省环境保护大气环境管理与政策模拟重点实验室, 广州 510045; 2. 浙江大学环境与资源学院, 环境污染修复与生态健康教育部重点实验室, 空气污染与健康研究中心, 杭州 310058; 3. 肇庆市环境保护监测站, 肇庆 526000)

摘要: 利用污染物及气象观测数据对肇庆市 2018 年 12 月 17~23 日大气污染过程进行了分析, 采用了 CMAQ-ISAM 模型以及混合受体模型对本次大气污染来源进行了解析研究。结果表明, 12 月 19~21 日肇庆地区受近地面弱气压影响而形成的较为不利的污染物扩散条件, 是肇庆大气污染过程的诱导因素; 在本次污染发生前的清洁时段, 肇庆污染主要来自于本地及清远, 其贡献率分别为 19.2% 和 10.7%, 而受江西、湖南、湖北以及陕西等地的远距离污染物传输作用影响约为 64.5%; 在污染时段, 随着地面高压场南移, 肇庆地区受珠三角主要城市和粤东城市的区域传输贡献明显, 肇庆、佛山、东莞、广州和惠州贡献率依次为 25.5%、14.8%、9.8%、9.5% 和 5.3%, 河源、梅州、汕尾、揭阳、汕头和潮州这 6 个广东省东部城市贡献率共计 13.7%, 而受福建、江西以及长江三角洲等地的远距离污染物传输作用影响约为 32.9%, 且经过海上通道传输的污染物贡献更为显著。因此, 输送到海面上的气溶胶颗粒经吸湿增长后回到陆地, 是本次肇庆污染天气的主要成因之一。

关键词: CMAQ-ISAM 模型; 混合受体模型; 源解析; 细颗粒物; 肇庆

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4310-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903237

Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing

CHANG Shu-cheng¹, LIAO Cheng-hao¹, ZENG Wu-tao¹, YANG Liu-lin¹, YU Shao-cai², CHEN Xue², ZHENG Jian-ping³

(1. Guangdong Provincial Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Environment Management and Policy Simulation, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 2. Key Laboratory of Environment Remediation and Ecological Health, Ministry of Education, Research Center for Air Pollution and Health, College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhaoqing Environmental Protection Monitoring Station, Zhaoqing 526000, China)

Abstract: Based on observational data for pollutants and meteorology, this study analyzed the pollution episode that occurred during Dec 17th to 23th in 2018 in Zhaoqing, Guangdong Province, China. Using the source apportionment model CMAQ-ISAM and the hybrid receptor model, the regional contributions to air pollution were examined. The results showed that low-pressure conditions had an adverse effect on the diffusion of pollutants during this pollution episode in Zhaoqing. Prior to the pollution episode, pollutants were mainly derived from Zhaoqing and Qingyuan, accounting for 19.2% and 10.7% of pollutants, respectively. As well as pollutants from Guangdong Province, long-distance transport of pollutants from Jiangxi, Hunan, Hubei, and Shaanxi accounted for approximately 64.5% of the total during the non-pollution period. During the polluted episode, major cities in Pearl River Delta and the eastern part of Guangdong Province contributed more pollutants as a surface high-pressure field moved southward. Zhaoqing, Foshan, Dongguan, Guangzhou, and Huizhou contributed 25.5%, 14.8%, 9.8%, 9.5%, and 5.3% of the pollutants, respectively. Cities in the eastern part of Guangdong Province including Heyuan, Meizhou, Shanwei, Jieyang, Shantou, and Chaozhou contributed 13.7% of the total pollutants. In addition, pollutants from Fujian, Jiangxi, and the Yangtze River Delta accounted for approximately 32.9%. Furthermore, pollutants transported under marine influences were one of the main causes of this pollution episode in Zhaoqing.

Key words: CMAQ-ISAM model; hybrid receptor model; source apportionment; fine particulate matters; Zhaoqing

经济的快速发展和城镇化程度的提高, 工业、电力、居民生活和车船交通等方面的污染物排放强度往往随之加强^[1], 加之不利气象、地形等影响因素协同作用, 城市空气质量恶化、甚至区域性大气污染现象频发^[2~4]。近年来, 广东省采取了持续而强有力的大气污染物排放控制策略^[5], 全省各项污染物排放量持续降低, 各个城市 PM_{2.5} 等多项污染物的年均浓度呈现出整体下降的趋势, 珠江三角洲 (珠

三角) 各城市 PM_{2.5} 年均浓度自 2015 年起持续达到《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) (见 <http://www.gdep.gov.cn/>)。但由于珠三角城市群人口众多, 工业密集, 排放量基数大, 部分城市在不利气象

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2019-04-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213906)

作者简介: 常树诚 (1993~), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为大气污染控制技术与政策, E-mail: changscgdhky@163.com

条件影响下仍会出现较重的大气污染现象^[6].此外,有研究表明,珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 及其前体污染物主要由该区域内工业发达城市产生^[7],且在特殊气象条件下,具有强烈的区域传输作用^[8].

肇庆常年主导风向为东北风,处于珠三角城市群下风向^[9].如图1所示,肇庆位于珠三角地区西北部,地形东南低,西北高,市中心端州区位于肇庆东南部低洼地区,三面环山,常年风速较小,不利于大气污染物扩散.当风向为东南风时,珠三角城市大气污染物经输送到达肇庆后,由于地势阻断抬升作用,风速降低明显,使得污染物在肇庆城区聚集,极易形成污染天气.

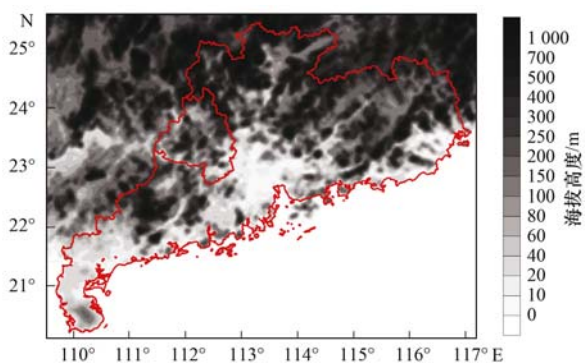


图1 广东省地理高程

Fig. 1 Elevation map of Guangdong Province

目前,空气质量模型已广泛应用于珠三角地区城市群空气质量的研究^[10-13].吴洛林等^[14]利用 WRF-Chem 模型结合四维通量模型对肇庆一次典型重污染过程进行了模拟分析,结果表明,本地污染物排放和不利气象条件是造成肇庆重污染天气的主要原因,且 $\text{PM}_{2.5}$ 以输出为主.王文丁等^[15]利用 NAQPMS 模型对珠三角地区 2013 年 1 月一次重污染过程进行了模拟研究,结果表明,广州和佛山大气污染贡献主要来自于本地污染物排放,中山和珠海大气污染贡献则主要来自于外来传输.沈劲等^[16]利用 WRF-CAMx 模型对广东各地区气象对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响进行了模拟研究,结果表明,相较于 2014 年,2015 年广东省夏季气象条件不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的下降,而春秋季节气象条件相对更有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的下降,且排放源变化对肇庆、揭阳和韶关等城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的降低影响显著. Che 等^[17]运用 Model-3/CMAQ 模型对 2015 年珠三角地区多种移动源控制策略进行了预测模拟,结果表明,实施各控制策略后,珠三角南部各城市的 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 浓度都表现出明显的下降趋势.

监测数据表明,在持续多日的北方干冷气流控制之后,2018 年 12 月 19~21 日,珠三角地区气温明显回升,且伴有较缓的东南风,该时段肇庆出现了

中度到重度污染天气, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续 30 多小时超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.本研究将运用 CMAQ-ISAM 区域传输源解析模型以及混合受体模型对肇庆本次大气污染物的来源进行污染源解析研究,以肇庆本次污染的主要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 为解析对象,分析肇庆本次污染的潜在贡献区域及贡献程度.

1 材料与方法

1.1 源解析模型与源解析方法

1.1.1 CMAQ-ISAM 模型

目前主流的污染源解析方法是以排放源为出发点,利用化学传输模型进行模拟研究,此方法可在不同气象条件下研究不同地区、不同行业对目标区域的污染物贡献.

本次模拟研究所用空气质量模型为 CMAQv5.0.2 模型 (community multiscale air quality modeling system), CMAQ 模型是美国环保署基于“一个大气”的理念开发出的第三代空气质量模型,也是目前应用最为广泛的空气质量模型^[18]. ISAM 模块 (integrated source apportionment method) 是在 CMAQ 模型的基础上附加的以污染物排放源为出发点的溯源追踪模块,可对不同地区不同类型污染源对空气质量的影响进行模拟分析^[19].

1.1.2 模型设置

由图2所示,模型采用三层嵌套进行模拟研究,采用兰伯特投影,三层网格的分辨率分别为 $36 \text{ km} \times 36 \text{ km}$ 、 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ 和 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$,最内层区域包括整个广东省地区及部分邻近城市及海域. ISAM 模块中标记了广东省内 21 个城市,并将模拟区域内省外地区标记为一项.模型垂直方向采用 23 层 sigma 坐标系,本次研究取地面层数据.模型采用的气相化学机制为 CB05,气溶胶化学机制为 AERO6^[20].模型所用气象输入数据为 WRF3.7.1 (the weather research and forecasting model) 模型的输出结果^[21].其中,微物理方案使用 Morrison-2moment^[22],边界层方案使用 ACM2^[23],近地面方案使用 Pleim-Xiu^[24]. WRF 气象模型驱动数据使用美国国家环境预报中心 (NECP) 提供的 FNL 全球气象再分析数据 (final operational global analysis),并使用对应时段的探空观测数据和地面站观测数据同化模拟结果.空气质量模型的人为源排放清单采用 MEICv1.3 (multi-resolution emission inventory) 中国大陆清单^[25, 26]与 EDGARv4.2-HTAPv2 (emission database for global atmospheric research - hemispheric transport of air pollution) 全球清单^[27]构成的耦合清单,其中,中国大陆部分采用基准年为 2016 年的

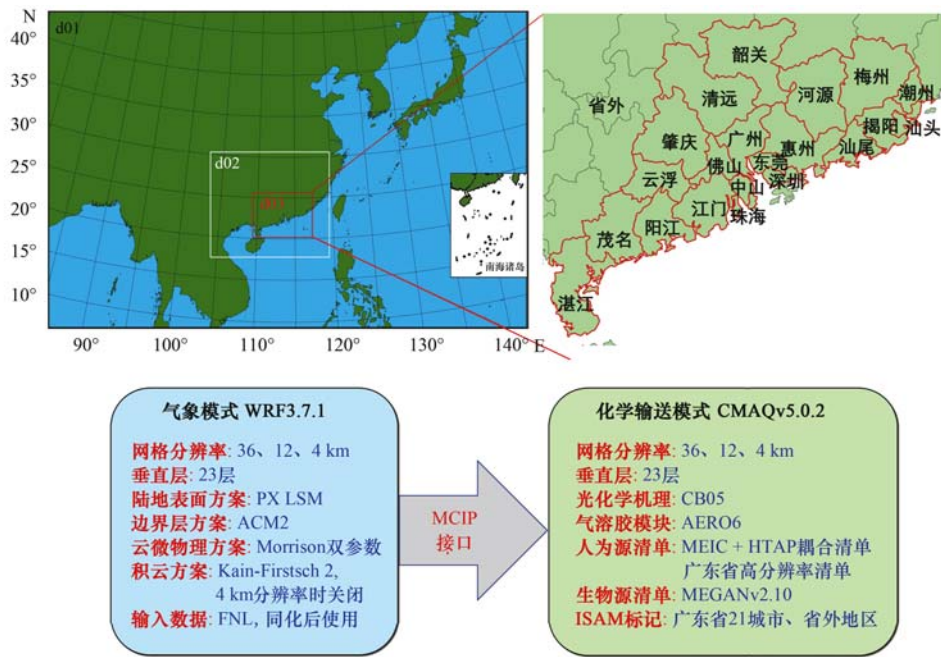


图2 模型构建示意

Fig. 2 Model schematic

MEICv1.3 清单,大陆以外地区采用基准年为 2010 年的 EDGARv4.2-HTAPv2 清单.第三层模拟区域使用本研究团队自制的 2017 年广东省高分辨率人为源大气污染物排放清单^[28],清单中广东省 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 BC 、 OC 、 VOCs 和 NH_3 的排放总量分别为 37、87、48、143、581、6、6、162 和 50 万 t.模型自然源输入数据均由 MEGANv2.10 制作^[29].

1.1.3 模拟评估方法

本文使用归一化平均偏差 NMB (normalized mean bias)、均方根误差 RMSE (root mean squared error) 以及相关性系数 r 作为衡量模拟效果与监测数据之间准确性的指标^[30],具体公式如下:

$$B_{\text{NMB}} = \frac{\sum (M_i - O_i)}{\sum O_i} = \left(\frac{\bar{M}}{\bar{O}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \left[\frac{1}{N} \sum (M_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\left[\sum (M_i - \bar{M})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中, O_i 为监测站点的某一时间点的监测浓度值, M_i 为该时间点监测站点对应模拟结果网格的模拟值, $\bar{M}$ 为模拟平均值, $\bar{O}$ 为监测平均值, N 为样本量.

1.2 混合受体模型

HYSPLIT (hybrid sigle-particle lagrangian integrated trajectory) 模型是一种用于计算和分析大气污染物来源、长距离输送和扩散情况的综合模

型,具有模拟精度高、时间变化连续等优点^[31].本研究将肇庆市大气边界层的平均流场高度设置为 100 m,模型运算时间步长为 1 h.气象数据采用 NOAA 全球资料同化系统提供的 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 气象数据 (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).采用浓度权重轨迹分析 (concentration weighted trajectory, CWT) 方法计算轨迹权重浓度,反映不同轨迹的污染程度^[32, 33].本研究中网格划分为 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$,每个网格 (i, j) 的 CWT 值可以通过计算经过某一网格的气流轨迹所对应的受体区域污染物浓度加权平均值得到, CWT 计算公式如下:

$$\text{CWT}_{ij} = \frac{1}{\sum_{L=1}^M \tau_{ijL}} \sum_{L=1}^M C_L \tau_{ijL} \quad (4)$$

式中, L 为轨迹; M 为轨迹数; C_L 为轨迹 L 经过网格 (i, j) 时对应的肇庆区域污染物浓度; τ_{ijL} 为轨迹 L 在网格 (i, j) 中的停留时间.平均权重浓度 C_{ij} 数值越大,则说明网格 (i, j) 所在的区域对受体区域的污染物的潜在贡献能力越大.

1.3 监测数据

本研究所用空气质量与气象条件监测数据均由中国空气质量在线监测分析平台 (<https://www.aqistudy.cn/>) 提供.选取肇庆市的 3 个国控监测站点监测数据用于空气质量模型模拟结果的验证,具体位置如图 3 所示,监测站点 A 为睦岗子站,监测站点 B 为城中子站,监测站点 C 为坑口子站.



图3 肇庆市国控监测站点位置分布示意
Fig. 3 Spatial distribution of monitoring stations in Zhaoqing

表1 肇庆市气象条件及污染物浓度日均值

Table 1 Daily averaged meteorological conditions and pollutant concentrations in Zhaoqing

日期(月-日)	温度/℃	相对湿度/%	风级	主导风向	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	PM ₁₀ /μg·m ⁻³	NO ₂ /μg·m ⁻³	AQI
12-17	14	56	2	北	24	43	37	47
12-18	13	58	1	东北	33	55	57	72
12-19	16	76	1	东北	91	125	110	120
12-20	20	84	1	东南	139	177	111	185
12-21	22	84	2	东	71	108	55	95
12-22	22	82	1	东北	47	60	44	65
12-23	19	81	3	北	30	37	27	43

由于气压坡度较缓,肇庆当地主导风向为东南风,风级为1级,当日PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂的浓度分别达到了139、177和111 μg·m⁻³,首要污染物为PM_{2.5}.当日22:00三项污染物浓度达到峰值,分别为166、214和136 μg·m⁻³.

12月21~22日期间,由于华南地区持续高温,广西北部地区地面形成较强的低气压场,肇庆等地区空气扩散条件转好,主导风向转为东北风,肇庆市PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂的浓度分别降至47、60和44 μg·m⁻³,三项污染物浓度均达到《环境空气质量标准》(GB 3095_2012)的24 h平均浓度限值.

12月23日起,肇庆等地回到北方强冷空气控制下,各项污染物浓度继续降低,肇庆市本次大气污染过程结束.

2.2 模拟结果验证

模拟结果中,污染时段PM_{2.5}浓度小时均值为44.27 μg·m⁻³,对应的PM_{2.5}监测值小时浓度均值为56.90 μg·m⁻³,得出NMB值为-22.20%,RMSE值为33.64,相关性系数r=0.77.由图5和图6可知,模拟时段主要气象参数模拟结果与监测值较吻合,在12月16日部分时段,PM_{2.5}模拟值存在偏高情

2 结果与讨论

2.1 污染天气过程描述

如图4和表1所示,2018年12月17日前,广东省在北方干冷空气控制之下,肇庆市各项大气污染物浓度低,无污染状况.

12月18~19日期间,地面高压场逐渐向东南移动,珠三角地区气压坡度平缓,造成肇庆地区水平扩散条件较差,易形成污染物聚集现象,而PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂的浓度由12月17日的24、43和37 μg·m⁻³增至12月19日的91、125和110 μg·m⁻³,肇庆市进入污染时段.

12月20日,地面高压场移动到粤东、福建南部等地区,地面低压场位于广西中部地区,受暖湿气流影响,肇庆市温度明显回升,同时湿度达到了84%.

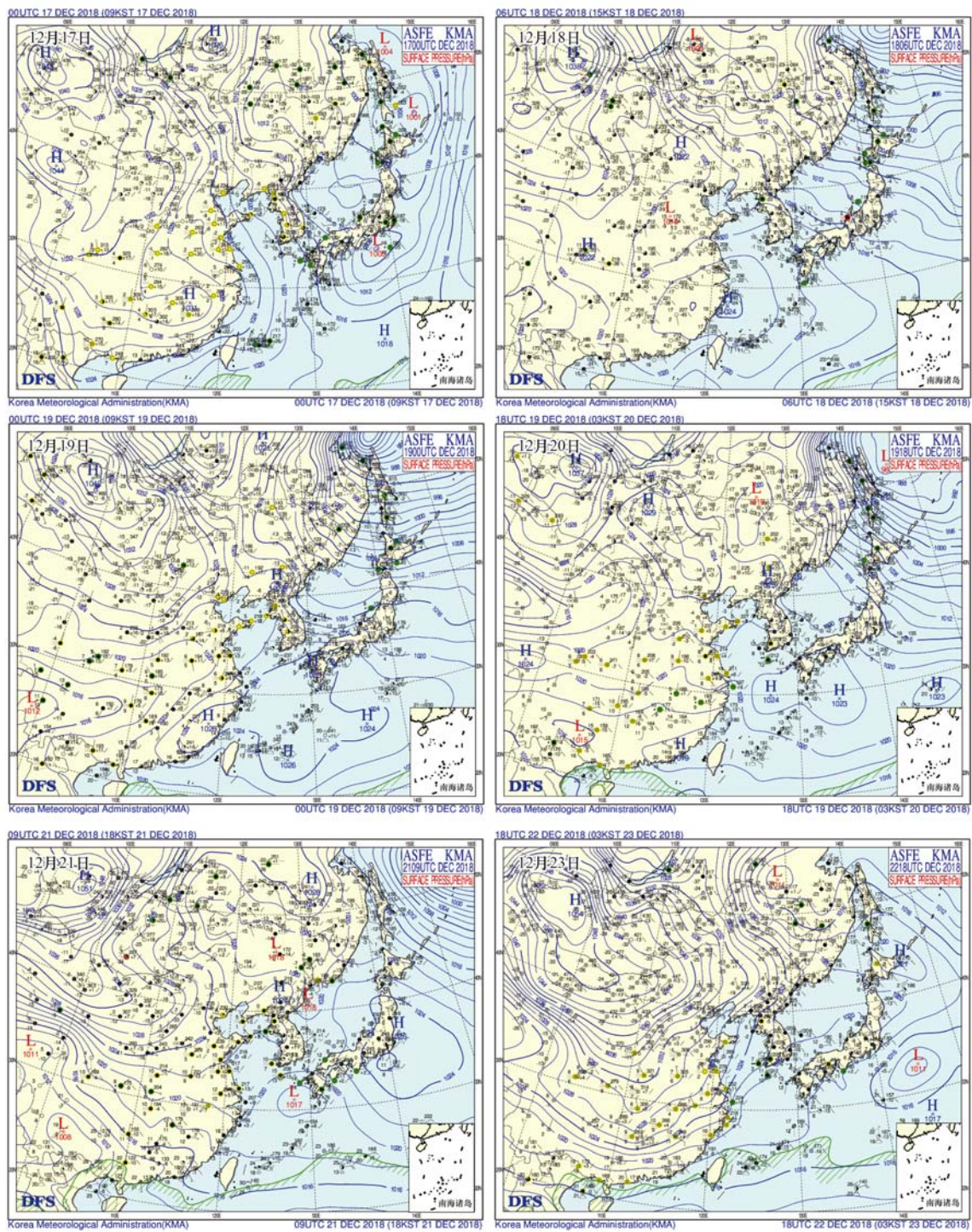
况,而在12月20日部分高浓度时段,PM_{2.5}模拟值存在偏低情况,此现象主要由气象模拟结果误差以及排放清单的总量、时空分布存在的误差所致.但整体而言,各项模拟验证参数均在合理范围之内^[34],模拟结果相对较好,模型系统可靠性较强.

2.3 PM_{2.5}来源解析

2.3.1 污染过程解析

本次模拟时段为2018年12月13~23日,截取12月17日~21日污染时段PM_{2.5}小时浓度值,并将肇庆市睦岗子站、城中子站和坑口子站这3个站点作为受体,取3个站点的浓度平均值后的结果用于此次肇庆市大气污染来源解析研究.此外,将河源、梅州、汕尾、揭阳、汕头和潮州等6个贡献特征相似的广东省东部城市作为一个地区进行分析,将湛江、茂名、阳江、云浮、江门、珠海、深圳和韶关等8个在肇庆本次污染过程中贡献较小的城市列为“其他”项进行分析.

各标记区域对肇庆市的影响百分比结果以及对应时段的监测值浓度如图7所示.从中可知,12月17~18日期间,污染过程尚未开始,PM_{2.5}浓度较低,此阶段边界场贡献比例最大,其次为肇庆本地以及



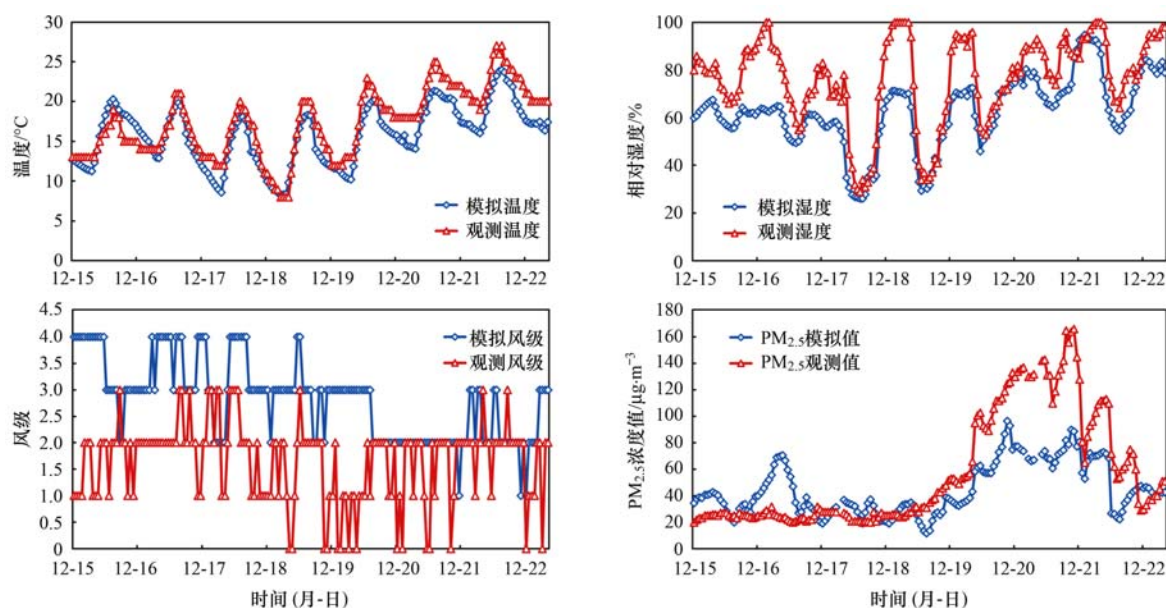
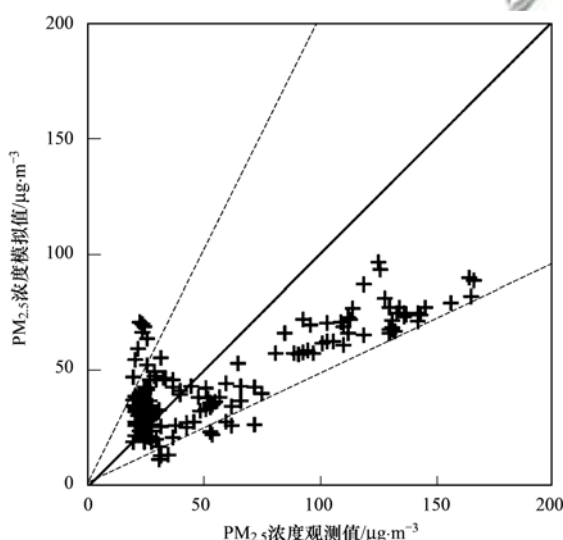
图片引自韩国气象局气象分析数据

图4 肇庆污染过程地面气压场

Fig. 4 Surface low-pressure field during the pollution episode in Zhaoqing

清远,其他地区贡献不明显.肇庆本地贡献比例在每日早晚居民出行高峰时段出现波动,且于12月18日20:00,肇庆本地贡献达到最高,约为50%.但此时 $PM_{2.5}$ 监测值浓度仅为 $43 \mu g \cdot m^{-3}$,肇庆本地实际浓度贡献仍然处于较低水平.至12月19日后,由于地面气压场向东南移动,位于肇庆东北部的城市清远贡献率逐步降低,而广州、佛山、东莞以及粤东地区对肇庆的影响突增,肇庆 $PM_{2.5}$ 监测值浓度也随

之迅速上升.至12月20日,污染程度达到中度污染至重度污染,全天 $PM_{2.5}$ 的小时浓度均在 $100 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上,与12月19日相同,在09:00~19:00前后,受肇庆当地居民活动排放影响,肇庆本地污染贡献比例明显增大,而在东南风影响下,广州、佛山、东莞、惠州等地在当日不同时间点均出现了10%以上贡献率,尤其在12月20日夜间至12月21日凌晨时段,佛山市贡献率突增,在22:00和23:00

图5 气象因子和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的模拟结果验证Fig. 5 Verification of simulated results for meteorological factors and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations图6 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟结果与监测值对比散点Fig. 6 Scatter plot for simulated results and observational values for $\text{PM}_{2.5}$ concentrations

贡献率接近 50%, 且此时 $\text{PM}_{2.5}$ 监测值浓度达最高点, 说明佛山此时的实际浓度贡献值大. 12 月 21 日起, 由于风力增强, 扩散条件改善, 当日肇庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈逐渐下降趋势, 但在居民出行高峰时段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同样存在上升现象, 此外, 受持续的东风影响, 当日来自粤东城市贡献比例明显增长, 最高时刻可达 32%. 至 12 月 22 日, 肇庆本次污染过程结束.

根据污染物小时浓度监测值, 将 12 月 17 ~ 18 日定为本次污染发生前的清洁时期, 将 12 月 19 ~ 21 日定为污染时期, 由图 8 可知, 在不同阶段肇庆市污染物来源存在较大差异. 在清洁阶段, 污染物来源贡献比率由大到小依次为边界场 (64.5%)、肇庆

(19.2%)、清远 (10.7%)、佛山 (1.7%) 和广州 (1.2%). 在污染阶段, 贡献率由大到小依次为边界场 (32.9%)、肇庆 (25.5%)、佛山 (14.8%)、粤东 (13.7%)、东莞 (9.8%)、广州 (9.5%)、惠州 (5.3%)、清远 (4.1%)、省外 (1.9%)、中山 (1.7%) 和深圳 (1.7%).

2.3.2 区域传输对肇庆的影响

由 2.3.1 节分析可知, 肇庆本次污染过程除本地及佛山、广州等邻近城市影响强烈, 还受边界场、粤东城市影响较大. 因此, 研究中将采用混合受体模型对本次污染过程的区域传输作用进行分析. 混合受体模型模拟受体点为肇庆市睦岗子站、城中子站和坑口子站这 3 个国控监测站点, 模拟时段为 12 月 17 ~ 21 日, 后向追溯时间为 72 h.

由图 9 所示, 12 月 17 ~ 21 日肇庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 的区域传输来源主要为东北和东南两条传输通道. 依据后向轨迹图及污染物观测数据, 将清洁时期和污染时期分别做浓度权重分析. 由图 10(a) 可知, 清洁阶段肇庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 的潜在贡献区包括赣州、长沙、南昌、武汉、荆州和西安等地区, 与后向轨迹图中东北传输通道拟合紧密, 但由于在此期间 C_L 值相对较低, 由公式 (4) 计算得出的 CWT 值几乎都处于 45 以下, 表明区域传输实际贡献的浓度值较低. 由图 10(b) 可知, 污染阶段肇庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 的潜在贡献区为珠三角南部城市、粤东地区、福建和江西部分地区以及长江三角洲地区. 且经过海上通道传输的污染物贡献更为明显, CWT 值达到了 140 以上, 是因为来自海面的气团会使肇庆市增暖增湿, 并加速气溶胶的吸湿增长过程^[35]. 结合 2.1 节气象分析可知,

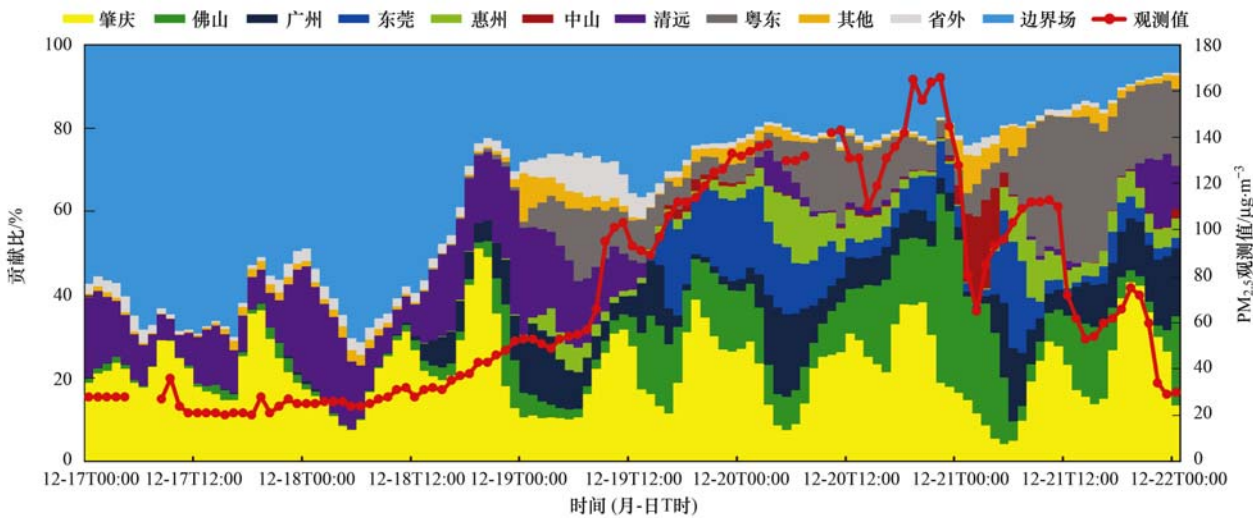


图7 细颗粒物来源贡献解析时间序列

Fig. 7 Time series plot of source contributions of fine particulate matter

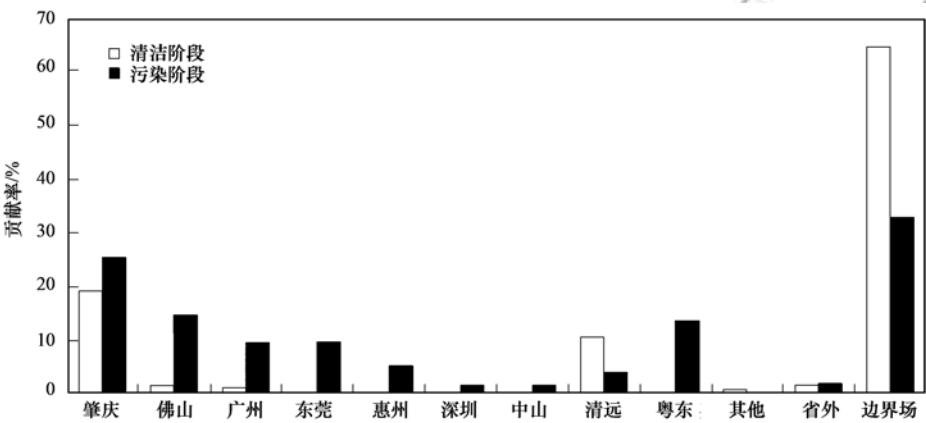


图8 不同阶段下 $PM_{2.5}$ 区域贡献

Fig. 8 Regional contributions of $PM_{2.5}$ during different periods

在地面高压场南移的情况下,输送到海面上的污染物经吸湿增长后回到陆地,是本次肇庆污染天气的主要成因之一。

有细颗粒物成分的来源解析。

3 结论

(1)2018 年 12 月 19 ~ 21 日肇庆市发生的空气污染事件,其主要诱导因素为地面气压场由强转弱并形成了较为不利的扩散条件.而在 12 月 22 日后,肇庆再次由北方强冷气空气控制,有效地清除了肇庆空气中的污染物,空气质量改善。

(2)利用 CMAQ 模型的 ISAM 源解析模块模拟分析发现,在清洁时段,受北方冷空气影响,肇庆市污染主要来自于本地及清远,污染物贡献率分别为 19.2% 和 10.7%,而省内其他地区贡献较少.在污染时段,受地面高压场南移影响,来自于佛山和广州等珠三角核心城市以及粤东城市群的区域传输贡献增大,肇庆、佛山、粤东城市、东莞、广州和惠州的贡献率依次为 25.5%、14.8%、13.7%、9.8%、9.5% 和 5.3%。此外,污染物的超远距离传输在肇庆此次污染过程中影响较大,在清洁和污染两个阶

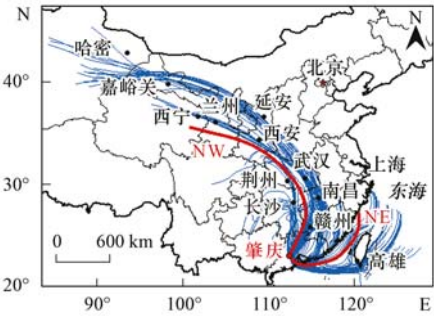


图9 12 月 17 ~ 21 日 $PM_{2.5}$ 来源后向轨迹

Fig. 9 Back trajectory of sources of $PM_{2.5}$ during Dec. 17th-21th

2.4 不确定性分析

由于 ISAM 系统在进行颗粒物源解析时仅可标记黑碳、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、一次有机碳以及一次有机物 (POA) 等,不能对二次有机气溶胶 (SOA) 等进行源解析,因此,本研究解析结果并非所

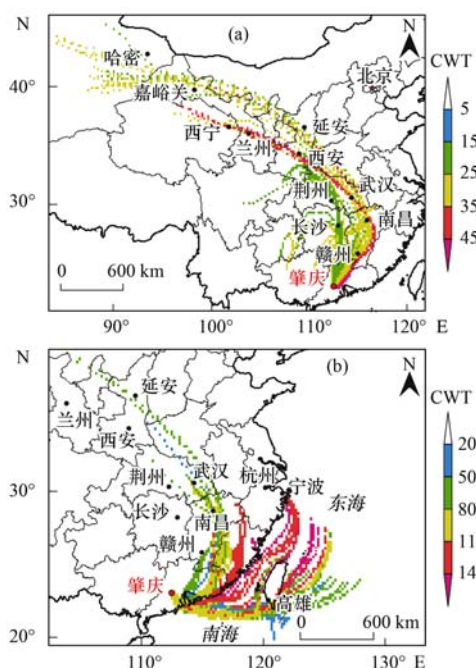


图 10 清洁时期和污染时期 $PM_{2.5}$ 来源浓度权重分析

Fig. 10 Concentration weighted analysis for the sources of $PM_{2.5}$ during non-polluted and polluted periods

段中,来自于模拟区域边界以外的贡献比例分别为 64.5% 和 32.9%。

(3)利用混合受体模型模拟发现,在污染发生前的清洁阶段,肇庆市污染物的潜在贡献区域为江西、湖南、湖北以及陕西等地区。而在污染阶段,除珠三角城市以外,肇庆本次污染的潜在贡献区域还包括了粤东、福建和江西部分地区以及长江三角洲地区,且经过海上通道传输的污染物贡献更为明显。输送到海面上的污染物经吸湿增长后回到陆地,是本次肇庆污染天气的主要成因之一。

参考文献:

- [1] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [2] 翟华, 朱彬, 赵雪婷, 等. 长江三角洲初冬一次重污染天气成因分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(11): 4001-4009.
Zhai H, Zhu B, Zhao X T, *et al.* Analysis of a heavy air pollution event in early winter in the Yangtze River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(11): 4001-4009.
- [3] 崔萌, 安兴琴, 范广洲, 等. 北京一次重污染过程的天气成因及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(10): 3628-3638.
Cui M, An X Q, Fan G Z, *et al.* The analysis of weather causes and sources of a heavy pollution process in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3628-3638.
- [4] 刘爱君, 杜尧东, 王惠英. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. *气象*, 2004, **30**(12): 68-71.
Liu A J, Du Y D, Wang H Y. Climatic characteristics of haze in Guangzhou[J]. *Meteorological Monthly*, 2004, **30**(12): 68-71.
- [5] 赵卉卉, 王明旭, 张永波. 广东省“十三五”环境保护战略思考[J]. *环境保护科学*, 2016, **42**(1): 28-32.
Zhao H H, Wang M X, Zhang Y B. Strategic ideas of the 13th five-year environmental protection plan in Guangdong province[J]. *Environmental Protection Science*, 2016, **42**(1): 28-32.
- [6] 潘月云, 陈多宏, 叶斯琪, 等. 2015 年 9 月珠江三角洲一次区域大气污染过程特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(1): 188-192.
Pan Y Y, Chen D H, Ye S Q, *et al.* Analysis on characteristics of a regional air pollution incident in Pearl River Delta[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(1): 188-192.
- [7] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [8] 张浩月, 王雪松, 陆克定, 等. 珠江三角洲秋季典型气象条件对 O_3 和 PM_{10} 污染的影响[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(3): 565-576.
Zhang H Y, Wang X S, Lu K D, *et al.* Impact of typical meteorological conditions on the O_3 and PM_{10} pollution episodes in the pearl river delta in autumn[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(3): 565-576.
- [9] 郭媚媚, 范绍佳, 李文辉, 等. 三种方法统计肇庆灰霾日数的结果比较和特征分析[J]. *广东气象*, 2017, **39**(4): 28-32.
Guo M M, Fan S J, Li W H, *et al.* Comparison of the results of hazy days of Zhaoqing by three methods and analysis of their characteristics[J]. *Guangdong Meteorology*, 2017, **39**(4): 28-32.
- [10] Huang Z J, Hu Y T, Zheng J Y, *et al.* An optimized data fusion method and its application to improve lateral boundary conditions in winter for Pearl River Delta regional $PM_{2.5}$ modeling, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **180**: 59-68.
- [11] Zhang Q, Chang M, Zhou S Z, *et al.* Evaluate dry deposition velocity of the nitrogen oxides using Noah-MP physics ensemble simulations for the Dinghushan Forest, Southern China[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **53**(4): 519-536.
- [12] 赖安琪, 陈晓阳, 刘一鸣, 等. 珠江三角洲 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染过程的数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4022-4031.
Lai A Q, Chen X Y, Liu Y M, *et al.* Numerical simulation of a complex pollution episode with high concentrations of $PM_{2.5}$ and O_3 over the Pearl River Delta region, China[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4022-4031.
- [13] 沈劲, 王雪松, 李金凤, 等. Models-3/CMAQ 和 CAMx 对珠江三角洲臭氧污染模拟的比较分析[J]. *中国科学: 化学*, 2011, **41**(11): 1750-1762.
Shen J, Wang X S, Li J F, *et al.* Evaluation and intercomparison of ozone simulations by Models-3/CMAQ and CAMx over the Pearl River Delta[J]. *Science China Chemistry*, 2011, **54**(11): 1789-1800.
- [14] 吴洛林, 周柳艺, 王雪梅, 等. 肇庆市 $PM_{2.5}$ 重污染天气形势及冬季典型污染过程输送特征研究[J]. *热带气象学报*, 2017, **33**(5): 782-792.
Wu L L, Zhou L Y, Wang X M, *et al.* Synoptic situations of $PM_{2.5}$ pollution episodes and transportation characteristics during a typical winter severe pollution event in Zhaoqing[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, **33**(5): 782-792.
- [15] 王文丁, 陈焕盛, 吴其重, 等. 珠三角冬季 $PM_{2.5}$ 重污染区域输送特征数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8):

- 2741-2751.
- Wang W D, Chen H S, Wu Q Z, *et al.* Numerical study of PM_{2.5} regional transport over Pearl River Delta during a winter heavy haze event[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36** (8): 2741-2751.
- [16] 沈劲, 汪宇, 潘月云, 等. 广东省气象与源排放因素对 PM_{2.5} 浓度影响的数值模拟研究[J]. *安全与环境工程*, 2017, **24** (1): 45-50.
- Shen J, Wang Y, Pan Y Y, *et al.* Numerical simulation of the impact of meteorology and emission on PM_{2.5} concentration in Guangdong province[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, **24**(1): 45-50.
- [17] Che W W, Zheng J Y, Wang S S, *et al.* Assessment of motor vehicle emission control policies using Model-3/CMAQ model for the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(9): 1740-1751.
- [18] Qin M M, Wang X S, Hu Y T, *et al.* Formation of particulate sulfate and nitrate over the Pearl River Delta in the fall: diagnostic analysis using the Community Multiscale Air Quality model[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **112**: 81-89.
- [19] Kwok R H F, Napelenok S L, Baker K R. Implementation and evaluation of PM_{2.5} source contribution analysis in a photochemical model[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 398-407.
- [20] Foley K M, Roselle S J, Appel K W, *et al.* Incremental testing of the community multiscale air quality (CMAQ) modeling system version 4.7 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2010, **3**(1): 205-226.
- [21] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, *et al.* A description of the advanced research WRF version 3 [R]. Boulder: NCAR, 2008.
- [22] Morrison H, Gettelman A. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the community atmosphere model, version 3 (CAM3). Part I: description and numerical tests[J]. *Journal of Climate*, 2008, **21**(15): 3642-3659.
- [23] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: model description and testing [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, **46** (9): 1383-1395.
- [24] Xiu A J, Pleim J E. Development of a land surface model. Part I: application in a mesoscale meteorological model[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, **40**(2): 192-209.
- [25] Zhang Q, He K B, Huo H. Policy: cleaning China's air[J]. *Nature*, 2012, **484**(7393): 161-162.
- [26] Zheng B, Zhang Q, Zhang Y, *et al.* Heterogeneous chemistry: a mechanism missing in current models to explain secondary inorganic aerosol formation during the January 2013 haze episode in North China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(4): 2031-2049.
- [27] Sala S, Benini L, Mancini L, *et al.* Integrated assessment of environmental impact of Europe in 2010: data sources and extrapolation strategies for calculating normalisation factors[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, **20** (11): 1568-1585.
- [28] 杨柳林, 曾武涛, 张永波, 等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3521-3534.
- Yang L L, Zeng W T, Zhang Y B, *et al.* Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3521-3534.
- [29] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, *et al.* A global model of natural volatile organic compound emissions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D5): 8873-8892.
- [30] Yu S C, Eder B, Dennis R, *et al.* New unbiased symmetric metrics for evaluation of air quality models [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2006, **7**(1): 26-34.
- [31] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM₁₀ 和 NO₂ 输送路径及潜在源区研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- Wang G C, Wang J, Xin Y J, *et al.* Transportation pathways and potential source areas of PM₁₀ and NO₂ in Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- [32] Yu S C, Zhang Q Y, Yan R C, *et al.* Origin of air pollution during a weekly heavy haze episode in Hangzhou, China[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, **12**(4): 543-550.
- [33] 王斯. 应用观测数据及三维空气质量模型研究灰霾污染特征及成因——以南京为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Wang S. Characteristics and origins of haze pollution studied with observations and 3-D air quality model-taking Nanjing as an example[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [34] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [35] 王渝, 吴志军, 胡敏. 我国不同大气环境下亚微米颗粒物吸湿特性[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1601-1609.
- Wang Y, Wu Z J, Hu M. Hygroscopicity of atmospheric sub-micrometer particles in various environments in China[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1601-1609.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)