

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载体金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

基于模式过程分析技术天津地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染气象成因分析

郝团^{1,2}, 蔡子颖^{1,2,3*}, 韩素芹^{1,2,3}, 杨旭^{1,2,3}, 樊文雁^{1,2,3}, 姚青^{1,2,3}, 邱晓滨^{1,2,3}

(1. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 2. 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300074; 3. 天津市环境气象中心, 天津 300074)

摘要: 基于 WRF/Chem 数值模式, 通过过程分析技术和标记法源追踪技术解析水平输送、湍流混合、垂直运动、对流作用和区域输送对天津地区地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度影响, 研究 2019 年 6 月~2021 年 5 月天津地区重污染天气成因。结果表明, 基于上述方法可实现重污染天气气象成因定量描述, 从水平输送、湍流混合、垂直运动、对流作用和区域输送角度实现重污染天气成因数值归因分析。天津地区水平输送作用为 $-2.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 、垂直平流为 $-2.24 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 、垂直混合为 $-11.70 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 、对流作用为 $-0.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和区域输送贡献 36.23%, 2019 年 6 月~2021 年 5 月共出现 16 次重污染过程, 除一次沙尘影响和一次烟花爆竹影响外, 均可通过建立数值归因方法, 以水平输送作用变化速指标(α)、对流作用变化速指标、垂直平流作用变化速指标(φ)和湍流混合作用变化速指标(β)以及区域输送百分率指标(τ), 对重污染气象成因进行合理解释, 天津重污染天气解析指标为 $\alpha > -2.0\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\beta > -7.7\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\varphi > 2\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\theta < 12\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\tau > 50\%$ 和 PBL(混合层厚度) $< 250 \text{ m}$ 。解析指标表明湍流混合能力和混合层厚度降低在近年重污染天气形成中有重要影响, 14 次过程均可从指标清晰解析出上述成因, 水平风场辐合和垂直平流输送在部分重污染天气中会叠加在大气垂直扩散条件下降基础上, 进一步触发重污染天气形成, 其出现次数分别为 6 次和 4 次。基于过程分析技术可建立定量化的大气自净能力评估指标, 其与传统的风速系数指标有较好的相关性, 数值模式大气自净能力评估指标 θ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关系数为 0.65, 高于传统指标, $\theta < 12\% \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 表明大气扩散条件极差, 其中 81.25% 的重污染天气符合该指标, $\theta > 30\% \cdot \text{h}^{-1}$ 后, 大气自净能力超过排放影响, 出现污染超标的概率不到 1.5%。

关键词: 过程分析技术; 污染成因; 数值模拟; 重污染天气; 天津

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2373-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109021

Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology

HAO Jian^{1,2}, CAI Zi-ying^{1,2,3*}, HAN Su-qin^{1,2,3}, YANG Xu^{1,2,3}, FAN Wen-yan^{1,2,3}, YAO Qing^{1,2,3}, QIU Xiao-bin^{1,2,3}

(1. Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074, China; 2. CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: Based on the WRF/Chem numerical model, the effects of horizontal transport, turbulent mixing, vertical motion, convection, and regional transport on the surface $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Tianjin were analyzed using process analysis and labeling source tracing techniques, and the causes of heavy pollution weather in Tianjin from June 2019 to May 2021 were studied. The results showed that the meteorological causes of heavy pollution weather can be assessed using this method; the horizontal transport was $-2.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, the vertical advection was $-2.24 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, the vertical mixing was $-11.70 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, the convection was $-0.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, and the contribution of regional transport was 36.23%. For 16 heavy pollution processes, except for dust and fireworks, the numerical attribution method could be established. The meteorological causes of heavy pollution could be reasonably explained by the horizontal transport change rate index (α), convection change rate index, vertical advection change rate index (φ), turbulent mixing change rate index (β), and regional transport percentage index (τ). The analytical indexes of heavy pollution weather in Tianjin were as follows: $\alpha > -2.0\% \cdot \text{h}^{-1}$, $\beta > -7.7\% \cdot \text{h}^{-1}$, $\varphi > 2\% \cdot \text{h}^{-1}$, $\theta < 12\% \cdot \text{h}^{-1}$, $\tau > 50\%$, and PBL (mixed-layer thickness) $< 250 \text{ m}$. The analytical index showed that the turbulent mixing capacity and the decrease in the thickness of the mixing layer had an important influence on the formation of heavy pollution weather in recent years. Horizontal wind field convergence and vertical advection transport will be superimposed on the decline of atmospheric vertical diffusion conditions in some heavy pollution weather, which will further trigger the formation of heavy pollution weather; the occurrence times were 6 and 4, respectively. Based on the process analysis technology, a quantitative evaluation index of atmospheric self-purification capacity could be established, which had a good correlation with the traditional ventilation coefficient index. The correlation coefficient between θ and $\text{PM}_{2.5}$ was 0.65, which was higher than the traditional index. A θ value of less than $12\% \cdot \text{h}^{-1}$ indicated that the atmospheric diffusion condition was very poor. A total of 81.25% of the heavy pollution weather accorded with this index, and θ greater than $30\% \cdot \text{h}^{-1}$ indicated that the atmospheric diffusion condition was very poor. The self-purification capacity of the atmosphere exceeded the impact of emissions, and the probability of excessive pollution was less than 1.5%.

Key words: process analytical technology; cause of air pollution; numerical simulation; heavily polluted weather; Tianjin

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2021-09-26

基金项目: 天津市自然科学基金项目(19JCQNJC08000); 国家自然科学基金项目(41771242); 天津市重大专项(18ZXQSF00130, 18ZXSZSF00160); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z034); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-007)

作者简介: 郝团(1989~), 女, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为环境气象预报和评估, E-mail: 824510059@qq.com

* 通信作者, E-mail: 120078030@163.com

PM_{2.5}指悬浮在大气中空气动力学等效直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,对环境质量、大气能见度^[1,2]、人体健康^[3,4]和气候变化均有重要的影响,当其日均浓度 $> 150\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,即出现重污染天气.为降低天津市重污染天气污染峰值、保护公众健康,各城市都制定了重污染天气应急预案,明确预警启动条件和流程,明确响应措施,并在2013~2021年期间通过重污染预警和应急响应,减缓不利气象条件出现时重污染天气的影响^[5].随着重污染天气应对工作逐步深入,科学治污、精准治污和依法治污理念不断突出,重污染天气预警和成因的科学化、精细化成为应需求而产生的一项重要研究.如2017年由环境保护部牵头,多部委和高校协同组织开展了大气重污染成因与治理攻关项目,建立了预测预报-会商分析-预警应急-跟踪评估全过程重污染天气应急技术体系^[6].

重污染天气的发生一般认为是大气污染物过量排放和不利气象条件相互作用的结果^[7,8],气象直接影响可以分为水平输送^[9]、湍流混合^[10,11]、平流输送^[12]和干湿沉降^[13]等,间接影响如气象对二次反应影响和气象-污染反馈^[14]作用等.重污染天气应急技术体系中,很重要的一环即为重污染成因跟踪评估工作,如“2+26”城市“一市一策”专家团队结合当地大气污染特征重污染天气应对工作^[6,15].重污染天气成因评估的方法从技术上可以分为四类,一是气候学方法,从大尺度环流背景分析重污染成因^[16],二是天气学方法,基于高低空天气形势图,气象要素对重污染过程进行成因分析^[17];三是统计指标和试验观测^[18,19],从统计指标和观测数值变化研究重污染成因;四是数值模拟,如CMAx模式PSAT模块^[20,21],CMAQ模式IPR模块^[22,23],CUACE模式的伴随技术^[24]和NAQPMS模式^[25,26]的在线源解析等.在前期研究中,本团队基于WRF/Chem模式的chemdiag模块以CO为示踪物分解水平输送、湍流混合和垂直运动对近地面大气污染的影响,研究2014~2017年天津地区重污染天气成因,实现了重污染天气数值归因^[27].随着技术的发展,通过一定的工作,利用大气化学模式WRF/Chem可以实现基于PM_{2.5}的直接数值归因,如杨旭^[28]的研究通过过程分析技术解析天津2019年1月10~15日重污染成因,杨鹏^[29]的研究解析南京一次夏季PM_{2.5}污染岛污染事件,Chen^[30]的研究分析京津冀地区严重灰霾形成和演变机制等.

华北平原、汾渭盆地、长江中下游平原和四川盆地是我国PM_{2.5}污染较为严重的4个地区^[31],华北平原的京津冀及其周边地区PM_{2.5}浓度为其中最

高.该地区PM_{2.5}污染主要成因:一是污染物排放超出环境容量50%^[6,32,33];二是大气中氮氧化物和VOCs浓度高造成大气氧化性强^[34];三是不利气象条件导致环境容量大幅降低,京津冀及周边地区位于太行山东侧和燕山南侧的半封闭地形中,存在大地形背风坡弱风区及其对流层中层气温距平“暖盖”结构等特征,大气扩散条件先天不足^[35,36];四是区域传输对PM_{2.5}影响显著^[6,37,38],各城市PM_{2.5}受区域传输的影响为20%~30%,大气重污染期间进一步增加到35%~50%.天津位于华北地区中部,2018~2020年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $50.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年发生重污染天气12 d,PM_{2.5}污染仍然是其生态文明建设中突出环境问题,对公众健康产生危害.

基于此,本文基于WRF/Chem数值模式,通过过程分析技术^[39]和标记法源追踪技术^[40~42]解析水平输送、湍流混合、垂直运动、对流作用和区域输送对天津地区地面PM_{2.5}浓度影响,研究2019年6月~2021年5月天津地区重污染天气成因,并定义5个新的变量,水平输送作用变化速指标(α)、对流作用变化速指标、垂直平流作用变化速指标(φ)、湍流混合作用变化速指标(β)和区域输送百分率指标(τ),通过5个变量和查算表实现天津地区重污染天气气象成因数值归因,本研究进一步提高气象部门环境气象评估水平,完善重污染天气应急的跟踪评估环节,以期对地方大气污染防治工作提供积极有效的支撑.

1 材料与方法

1.1 监测数据

监测数据包括2个部分,其中空气质量监测数据为天津市生态环境监测中心发布的27个站逐小时PM_{2.5}质量浓度数据,时间为2019年6月~2021年5月;气象数据和天气形势分析数据来自天津市气象局.以上数据均经过严格质量控制,其中空气质量指数监测数据质控方法参考环境气象指数AQI技术规定(HJ 633-2012).

1.2 模式设置

为实现天津地区重污染天气成因分析,采用WRF/Chem模拟2019年6月~2021年5月天津地区空气质量.模式版本采用WRF/Chem3.8.1,气相化学过程采用CBMZ机制,主要物理过程设置如下:积云对流方案采用Grell-3D,微物理过程采用WSM5,长波辐射方案和短波辐射方案均采用RRTMG,边界层方案分别使用YSU方案,模式的人为排放源清单使用清华大学MEIC2016^[43,44],分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,模式采用两层嵌套,水平分辨率

分别为 27 km 和 9 km, 水平网格 91 × 91 和 109 × 109, 中心经纬度为 38.6°N, 116.2°E, 垂直方向分为 27 层, 气象初始场和背景场均使用 NECP 的 FNL 全球 1° × 1° 数据. 模式重新编译过程中将影响一次 PM_{2.5} 的物理化学过程单独输出, 包含垂直平流 (advz)、水平平流 (advh)、垂直混合 (vmix)、对流作用 (conv) 和排放过程 (emis), 同时基于标记法源追踪技术实现京津冀地区不同城市一次 PM_{2.5} 来源追踪解析, 方法见文献[32]. 所用化学机制为 cbmz-mosaic-4bins, 包含气溶胶有: Na⁺、Cl⁻、NH₄⁺、SO₄²⁻、BC、OC 和 OIN, 每一种气溶胶分为 4 档, 8 种气溶胶中前三档相加即为 PM_{2.5} 浓度, 四档全相加为 PM₁₀ 质量浓度. 本研究期间模型可以较好地模拟 PM_{2.5} 质量浓度, 其观测和实况相关系数为 0.76, 相对误差为 35.27%, 模拟 PM_{2.5} 平均值为 50.11 μg·m⁻³, 实况 PM_{2.5} 平均值为 48.14 μg·m⁻³ (表 1).

表 1 天津地区环境模式不同季节 PM_{2.5} 浓度模拟效果检验
Table 1 Test on the effect of PM_{2.5} concentration simulation in Tianjin in different seasons

项目	相对误差	模拟均值	实况均值	相关系数
春季	27.26	47.77	44.21	0.81
夏季	39.85	42.44	37.72	0.41
秋季	32.10	44.15	45.70	0.82
冬季	38.05	66.17	64.91	0.75
年均	35.27	50.11	48.14	0.76

1.3 水平、湍流、垂直平流和排放使得 PM_{2.5} 变化速率计算

基于 WRF/Chem 数值模式, 开启 chemdiag 功能, 修改注册表和代码, 增加过程物理量输出, 分别估算水平输送、湍流混合、垂直平流和排放对一次 PM_{2.5} 浓度的影响. 定义 4 个物理变量, 水平输送导致地面 PM_{2.5} 浓度每小时变化速率 (α)、湍流混合导致地面 PM_{2.5} 浓度每小时变化速率 (β)、垂直平流导致地面 PM_{2.5} 浓度每小时变化速率 (φ) 和大气自净作用导致地面 PM_{2.5} 浓度每小时下降速率 (θ), 其单位为 %·h⁻¹, 计算公式为式 (1) ~ (4).

α = (advh) / (PM - vimx - advz - advh - conv) (1)

β = (vmix) / (PM - vimx - advz - advh - conv) (2)

φ = (advz) / (PM - vimx - advz - advh - conv) (3)

θ = -(advz + advh + vimx + conv) / (PM - vimx - advz - advh - conv) (4)

式中, PM 为 PM_{2.5} 的浓度, 单位 μg·m⁻³, vimx 为垂直混合作用使得地面 PM_{2.5} 浓度变化量, 数值为负时表示降低, advh 为水平输送使得地面 PM_{2.5} 浓度增加

量, advz 为垂直运动使得地面 PM_{2.5} 浓度增加量, conv 为对流作用使得地面 PM_{2.5} 浓度增加量. 式中的分母表示没有水平输送、湍流混合、垂直平流和对流作用等物理过程时大气 PM_{2.5} 浓度.

2 结果与讨论

2.1 2019 年 6 月 ~ 2021 年 5 月天津 PM_{2.5} 浓度变化特征

本研究期间天津地区 ρ(PM_{2.5}) 为 48.14 μg·m⁻³, 平均风速为 2.15 m·s⁻¹, 混合层厚度为 530 m, 相对湿度 58%, 以 PM_{2.5} 浓度判断, 出现重度污染 16 d, 中度污染 25 d, 轻度污染 75 d, 污染天气占所有天数的 15.75%. 各月 PM_{2.5} 平均值如图 1 和图 2 所示, 天津细颗粒物污染主要出现在每年 10 月到次年 3 月, 其中 1 月 ρ(PM_{2.5}) 全年最高, 为 76.26 μg·m⁻³; 其次 2 月和 3 月, 分别为 60.84 μg·m⁻³ 和 58.65 μg·m⁻³. 本研究期间 2 a 出现轻度及以上污染天数: 10 月为 16 d、11 月为 11 d、12 月为 19 d、1 月 22 d、2 月 21 d 和 3 月 20 d, 其余月 1 d 或者少于 1 d; 两年出现 16 d 重污染天气, 主要集中在 12 ~ 3 月, 其中 1 月最多为 9 d.

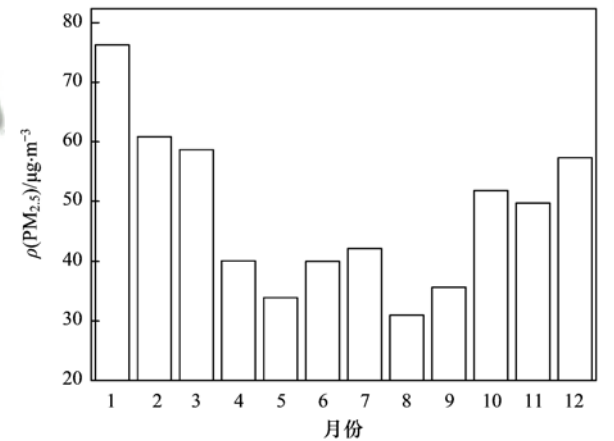


图 1 天津地区 PM_{2.5} 浓度逐月分布

Fig. 1 Monthly distribution of PM_{2.5} concentration in Tianjin area

2.2 基于 vmix 湍流混合作用的分析

年均值分析 (图 3), 水平输送、垂直平流、垂直混合和对流作用对天津 PM_{2.5} 浓度总体起清除作用, 水平输送为 -2.03 μg·(m³·h)⁻¹、垂直平流为 -2.24 μg·(m³·h)⁻¹、垂直混合为 -11.70 μg·(m³·h)⁻¹ 和对流作用为 -0.03 μg·(m³·h)⁻¹. 其中湍流混合作用使近地面 PM_{2.5} 浓度下降占大气自净能力的 68.92%, 是地面 PM_{2.5} 浓度下降的主要影响因素. 其作用体现在两方面, 一是湍流作用使近地面排放和 PM_{2.5} 在大气边界层中充分混合, 降低地面 PM_{2.5} 浓度; 二是湍流作用将地面 PM_{2.5} 带到高

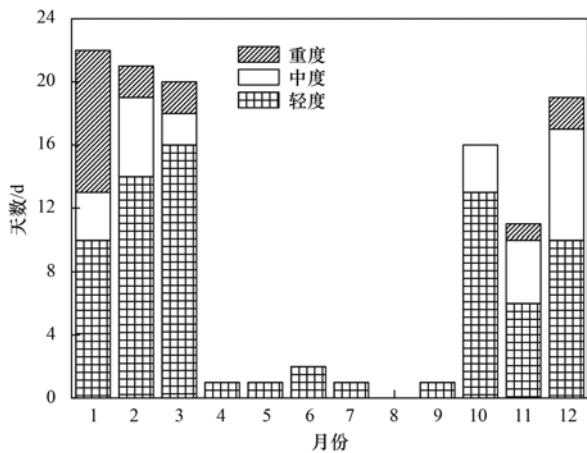


图2 天津地区研究期间轻度、中度和重度污染逐月分布

Fig. 2 Monthly distribution of days of air pollution exceeding the standard in Tianjin area

空,由高空更大的水平风向下游传输扩散,降低地面 $PM_{2.5}$ 浓度。

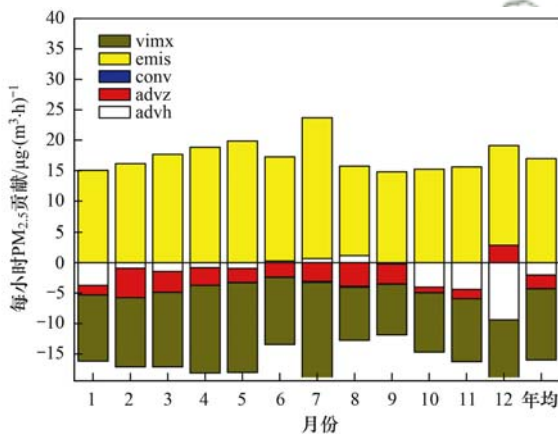
图3 不同月份天津物理化学过程对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献

Fig. 3 Contribution of physical and chemical processes to $PM_{2.5}$ concentration in different months

$vmix$ 月分布呈现夏强冬弱,夏季为 $-12.60 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$,秋冬季为 $-10.27 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$. 通过梯度输送理论可知, $vmix$ 的大小除受湍流扩散系数影响外,也跟高低空 $PM_{2.5}$ 浓度差有关,由于夏季高低空 $PM_{2.5}$ 浓度差小于秋冬季,所以 $vmix$ 季节变化幅度要小于湍流变化幅度. 以 β 表征湍流混合作用使得地面 $PM_{2.5}$ 浓度变化速率,图4显示夏季为 $26.71\% \cdot h^{-1}$,秋冬季为 $16.79\% \cdot h^{-1}$,即湍流混合作用对于地面 $PM_{2.5}$ 的影响秋冬季仅为夏季 62.86%,其也是秋冬季多 $PM_{2.5}$ 污染的重要原因. 高低空 $PM_{2.5}$ 浓度差和湍流对于 $vmix$ 的综合影响,也表现在 $vmix$ 指标和 β 指标对于 $PM_{2.5}$ 污染的指示能力. 重度污染时, $vmix$ 均值为 $-9.41 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$,分布范围为在 $-14 \sim -4 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$ 之间,中度及以上污染时 $vmix$ 为 $-9.77 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$,分布范围为 $-14 \sim -4 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$,基本可以认为湍流

混合作用使得 $PM_{2.5}$ 浓度下降 $< 14 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$,湍流混合作用较弱,易于出现中-重污染,而超过该数值以后,出现中-重度污染概率较低.

相比 $vmix$ 指标, β 指标更清晰地表征垂直扩散条件与近地面 $PM_{2.5}$ 浓度关系,两者呈现较好的指数关系,全年 R 值为 0.61,秋冬季为 0.72. 当 β 越接近 $0\% \cdot h^{-1}$ 时,近地面 $PM_{2.5}$ 浓度越大,出现重污染概率较高. 重度污染时期 β 平均数为 $-5.22\% \cdot h^{-1}$,中度及以上污染时 β 平均数为 $-6.28\% \cdot h^{-1}$. 由图5和统计数据分析,可定义 $\beta > -7.7\% \cdot h^{-1}$ 为中-重度污染的湍流识别指标(湍流混合能力弱),即湍流使得 $PM_{2.5}$ 浓度每小时下降速率 $< 7.7\%$ 时湍流混合能力弱,易出现大气污染过程. 符合该指标的天气两年秋冬季一共出现了 87 d,出现重度污染 14 d,中度污染 20 d,轻度污染 28 d,识别出 87.5% 的重污染(未识别的 2 次重污染过程,一次受到烟花爆竹影响,一次受到沙尘天气影响),85% 的中-重度污染,体现 β 指标在秋冬季中-重度污染预报预警中的意义,也体现出湍流混合能力下降对秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染形成的重要影响.

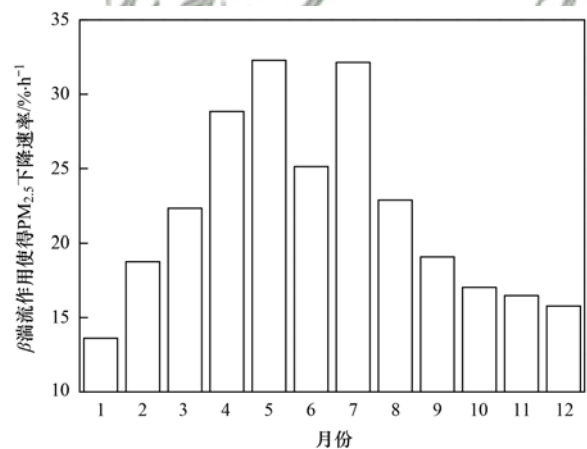
图4 不同月份天津湍流混合作用使得地面 $PM_{2.5}$ 浓度下降速率

Fig. 4 Decreasing rate of $PM_{2.5}$ concentration caused by turbulent mixing in Tianjin in different months

2.3 基于 $advh$ 水平输送作用的分析

表2显示,水平输送年均值为 $-2.03 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$,占大气自净能力的 11.96%. 天津对于区域是 $PM_{2.5}$ 源区,尤其 10~3 月,平均输出强度达到 $-3.99 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$,即水平输送可使得天津 $PM_{2.5}$ 每小时平均下降 $3.99 \mu g \cdot m^{-3}$,6~8 月天津由源区变为汇区,水平输送使得 $PM_{2.5}$ 浓度增加 $0.72 \mu g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$. 不同风速分析,风速 $< 1 m \cdot s^{-1}$ 时, α 均值为 $-2.65\% \cdot h^{-1}$,即每小时水平输送使天津 $PM_{2.5}$ 浓度下降 2.65%; 风速为 $1 \sim 2 m \cdot s^{-1}$ 时, α 为 $-3.31\% \cdot h^{-1}$; 风速为 $2 \sim 3 m \cdot s^{-1}$ 时, α 为 $-3.43\% \cdot h^{-1}$,水平输送能力增加不明显; 风速为 3

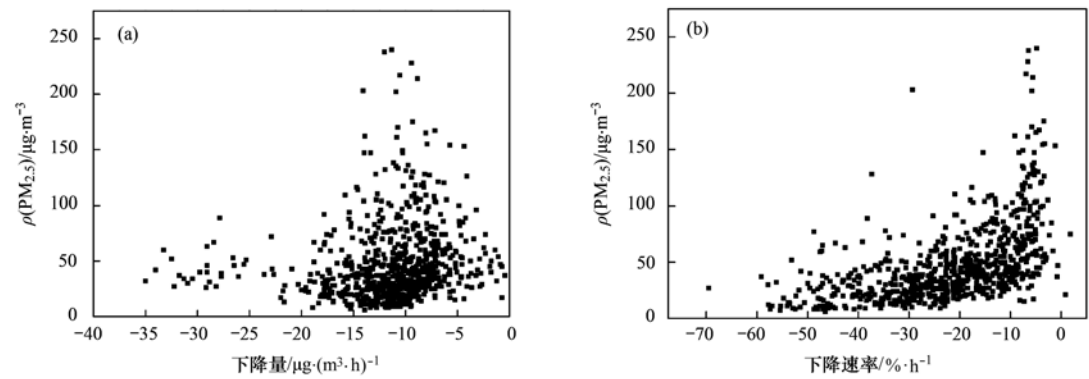


图5 湍流混合作用使得地面 PM_{2.5} 浓度下降量和下降速率

Fig. 5 Decrease in PM_{2.5} concentration and rate caused by turbulent mixing

~4 m·s⁻¹时, α 为 $-7.33\% \cdot \text{h}^{-1}$, 大气水平输送扩散能力显著的增强; 风速 $> 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, α 为 $-13.64\% \cdot \text{h}^{-1}$, 极有利于 PM_{2.5} 的水平扩散. 统计数据分析表明, 30.86% 的天数天津 advh 为正值, 此时水平输送使得天津 PM_{2.5} 浓度增加, 47.87% 的天数水平扩散使得 PM_{2.5} 浓度下降 $< 4.11\% \cdot \text{h}^{-1}$, 参考风速 $< 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件, 可定义 $\alpha > -2.65\% \cdot \text{h}^{-1}$ 为水平输送扩散能力较差, 这样的天数占总天数的 41.4%.

不同污染强度水平输送对于近地面 PM_{2.5} 浓度累积作用存在差异, 与文献[45]的结论一致, 虽然风速越小越不利气团迁移, 但由于风速较小时, 大气中累积的 PM_{2.5} 较多, 气团迁移后输送影响明显, 所以轻度~重度 PM_{2.5} 污染, 天津区域输送的影响更明显, 约在 45% 左右, 是优良天气输送影响占比的 130%. α 值分析, 空气质量为优时, α 值可以到 $-6.42\% \cdot \text{h}^{-1}$, 即水平输送使地面 PM_{2.5} 浓度每小时下降 6.42%, 空气质量为良时 α 均值仅为 $-2.01\% \cdot \text{h}^{-1}$, 轻度和中度污染, 其值在 $3 \sim 4\% \cdot \text{h}^{-1}$ 之间, 重污染天气时, α 值为 $-1.84\% \cdot \text{h}^{-1}$, 是平均值 $-4.11\% \cdot \text{h}^{-1}$ 的 44.72%, 两年 16 次重污染过程, 水平输送使得 PM_{2.5} 浓度上升 7 次, $-2.0\% \cdot \text{h}^{-1} < \alpha < 0\% \cdot \text{h}^{-1}$ 为 1 次, 合计占重污染天气的 50%, 40 次中-重度污染过程, 17 次水平输送使得 PM_{2.5} 浓度上升, $-2.0\% \cdot \text{h}^{-1} < \alpha < 0\% \cdot \text{h}^{-1}$ 为 4 次, 占中-重污染天气的 52.5%.

2.4 基于 advz 垂直平流作用分析

advz 垂直平流相比 vmix 湍流混合作用明显偏小, 其也是边界层大气在垂直方向上扩散的基本规律. 天津地区 advz 的年均值为 $-2.24 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 与水平输送作用相当, 日值波动范围为 $-23 \sim 23 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 其中 66.16% 的数据集中在 $-4 \sim 4 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. 不同月份分析, 10 月~次年 1 月的 advz 的数值明显高于其它月份, 其中 12

表2 不同等级污染的区域输送和水平输送贡献量

Table 2 Contribution of regional transport and horizontal transport on different levels of pollution

项目	优	良	轻度	中度	重度
区域输送贡献/%	32.48	36.91	43.85	46.16	48.95
advh/ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$	-2.55	-1.16	-2.86	-4.25	-3.12
$\alpha/\% \cdot \text{h}^{-1}$	-6.42	-2.01	-3.08	-3.55	-1.84

月出现正贡献, 即垂直平流使得地面 PM_{2.5} 浓度呈现上升趋势, 这与控制的地面形势气象场密切相关, 当弱高压天气控制较多时, 下沉运动使得地面 PM_{2.5} 浓度增加. advz 垂直平流对于中-重度污染天气的影响, 主要集中在弱高空压控制的过程中, 本研究期间 16 次重污染过程, advz 有显著影响的并不多, 大概 4 次, 分别为 2019 年 12 月 8~9 日, 2020 年 1 月的 15 日和 18 日, 其 φ 分别为 10.81、3.99、3.67 和 2.48%·h⁻¹, 其影响的概念的模型为北部弱高压型, 与基于 CO 示踪的研究是相似的^[27].

2.5 大气自净能力分析

定义水平输送、垂直平流、垂直混合和对流作用使得地面 PM_{2.5} 浓度下降速率为本文大气自净能力, 即前文定义 θ , 其年均值为 $29.98\% \cdot \text{h}^{-1}$, 水平输送、垂直平流、垂直混合和对流作用绝对量之和为 $-15.64 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, θ 与观测 PM_{2.5} 浓度的指数关系清晰, 当大气自净能力越强时, PM_{2.5} 浓度越低(图 6), 其相关系数为 0.65(秋冬季为 0.71). 16 次重污染天气 θ 的均值为 $8.95\% \cdot \text{h}^{-1}$, 范围为 5%~16%, 40 次中-重污染过程, θ 的均值为 $12.63\% \cdot \text{h}^{-1}$, 轻度污染 θ 的均值为 $18.24\% \cdot \text{h}^{-1}$, 空气质量为良时 θ 的均值为 $25.90\% \cdot \text{h}^{-1}$, 空气质量为优时 θ 的均值为 $39.01\% \cdot \text{h}^{-1}$. 基于统计数据依据 θ 的数值划分大气自净能力, $\theta < 12\% \cdot \text{h}^{-1}$, 定义为极不利于污染物扩散, 占总样本的 10%, 重污染天气的 81.25% 都覆盖其中; $12.0\% \cdot \text{h}^{-1} \leq \theta < 20\% \cdot \text{h}^{-1}$ 定义为不利于污染物扩散, 占总样本的 20%, 中-重度

污染天气的 87.5%,轻度污染天气的 64%,其对应的 θ 均值 $<20\% \cdot \text{h}^{-1}$; $20.0\% \cdot \text{h}^{-1} \leq \theta < 30\% \cdot \text{h}^{-1}$ 定义为扩散条件一般,占总样本 25%, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $49.12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,与天津年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差不多; $30.0\% \cdot \text{h}^{-1} \leq \theta < 50\% \cdot \text{h}^{-1}$ 定义为扩散条件有利,占总样本 35%,该区间仅出现 3 次轻度及以上污染过程,89 次空气质量为良,171 次为优; $\theta \geq 50.0\% \cdot \text{h}^{-1}$ 定义为扩散条件非常有利,该区间平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 仅为 $23.98 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,82.76% 的天气空气

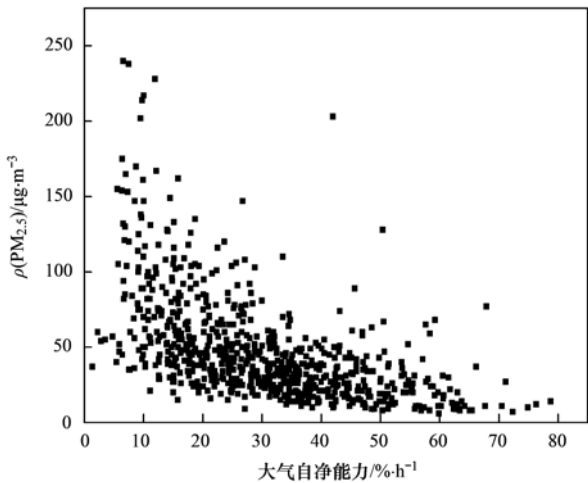


图 6 大气自净能力和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系
Fig. 6 Relationship between atmospheric self-purification capacity and $\text{PM}_{2.5}$ concentration

质量为优.与传统表征大气自净能力的通风系数相比, θ 与通风系数相关系数为 0.65,但通风系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关系数仅为 0.40, θ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数 0.65, θ 指标不仅具有大气自净能力定量分解描述能力,其整体指示性也更好.

2.6 湍流、水平输送、对流运动和垂直运动对地面 $\text{PM}_{2.5}$ 影响季节差异性分析

基于表 3 分析,湍流、水平输送、对流运动和垂直运动对地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化存在季节影响差异.湍流作用总是一个负贡献,使得地面 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现下降趋势,其作用春夏强,秋冬弱.水平输送夏季天津为汇区,其余季节为源区,尤其是秋冬季,水平输送是地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的一个很重要影响因素.夏季为汇区,则可能跟该季节沿海地区海陆风多发导致辐合风场增加有一定的关系.垂直运动总体来说,使得天津地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现下降趋势,其中夏季由于气温高,低压控制系统多,上升运动活跃,表现得更为明显一些,垂直运动使得天津地区地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现下降趋势;对应的冬季,弱高压控制大陆,虽从平均状态分析,垂直运动仍然使得地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现下降趋势,但高压控制下的下沉气流也多使得地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加,从而作用均值数值更接近 0.区域输送的影响季节变动是非常大的,秋冬季区域输送强,夏季本地贡献大.

表 3 不同季节天津湍流、水平输送和垂直运动对地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响

项目	春	夏	秋	冬	年均
湍流作用/ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$	-13.28	-12.60	-9.15	-10.27	-11.70
水平输送/ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$	-1.23	0.72	-3.02	-4.59	-2.03
垂直运动/ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$	-2.73	-2.99	-1.76	-1.19	-2.24
对流运用/ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$	-0.01	-0.10	-0.03	0.00	-0.03
区域输送百分率/%	32.02	29.95	37.18	45.66	36.24

2.7 2019~2021 年天津重污染原因解析和讨论
有研究表明^[27],基于 CO 作为示踪物解析了 2014~2017 年重污染天气成因,期间 116 次重污染过程除了 2016 年 11 月 30 日无法归因解析以外,其余均显示出某一方面因素的不利条件对其产生显著影响(水平、湍流、混合层和下沉运动等).相比 CO 作为示踪物解析,基于 $\text{PM}_{2.5}$ 过程分析解析技术更直接,但需要对大气化学模式程序进行一部分补充增加.在 2.1~2.4 节分析的基础上,基于 $\text{PM}_{2.5}$ 过程分析技术解析 2019 年 6 月~2021 年 5 月重污染天气成因,共 16 次过程(表 4 和表 5).分析显示:①基于过程分析技术可以较好地解析重污染过程成因,16 次过程 14 次合理解析,仅 2020 年 1 月 23 日和 2021 年 3 月 15 日两次过程无法用过程解析技术分析出

原因,而这两次污染过程一次为春节除夕,受到烟花爆竹燃放影响,一次是沙尘天气过程,沙尘带来了大量的细粒子.②重污染天气形成一般是多方共同作用的结果,以大气自净能力极差和区域输送为两大类指标分析,大气自净能力极差的过程 13 次,基本覆盖剩下所有的 14 次过程的绝大部分,仅有的一次为 2021 年 2 月 12 日, θ 为 $12.15\% \cdot \text{h}^{-1}$,与指标 $<12\% \cdot \text{h}^{-1}$ 也相差无几,区域输送影响非常大的有 5 次.在影响大气自净能力 3 个物理过程中,湍流混合能力极差和混合层厚度下降出现次数最多,分别出现 14 次和 13 次,说明近年重污染天气的形成与大气垂直扩散能力下降是密切相关的,水平上的辐合、垂直上的下沉气流和弱风场产生显著影响分别为 6、4 和 2 次,其叠加上不佳的垂直扩散条件,导

致重污染天气出现. ③数值解析重污染天气成因与天气形势和污染类型密切相关,天津重污染天气分为五类,为均压场、低压槽区、北部弱高压、锋前低压转高压前和持续入海高压后,近年伴随排放量降

低,研究期间高压后污染类型未出现,均压场污染 4 次,北部弱高压 3 次,锋前低压或高压前 7 次,低压槽区 2 次. 北部弱高压天气受高压下沉气流控制,数值解析往往显示出垂直运动的不利影响;锋前低压

表 4 重污染天气成因分析标准¹⁾

Table 4 Genetic analysis criteria of heavy pollution weather

项目	水平扩散	湍流混合	垂直平流	混合层厚度	区域输送	大气自净能力
首要影响因素	1	1	1	1	1	1
次要影响	2	2	2	2	2	2

1) 水平扩散:1 表示水平扩散条件极差,有明显的输入或者辐合风场正贡献, $\alpha > 2\% \cdot h^{-1}$, 2 表示水平扩散条件差,风场弱, $-2\% \cdot h^{-1} \leq \alpha < 2\% \cdot h^{-1}$; 湍流扩散:1 表示湍流混合能力极差, $\beta > -7.7\% \cdot h^{-1}$, 2 表示湍流混合能力较差, $-7.7\% \cdot h^{-1} \leq \beta < 10\% \cdot h^{-1}$; 垂直运动:1 表示垂直运动非常不利于污染物扩散, $\varphi > 2\% \cdot h^{-1}$, 2 表示垂直运动较不利于污染物扩散, $0\% \cdot h^{-1} \leq \varphi < 2\% \cdot h^{-1}$; 混合层厚度:1 表示非常不利于污染物扩散, PBL(混合层厚度) < 250 m, 2 表示较不利于污染物扩散, $250 < PBL \leq 400$ m; 区域输送:1 表示区域输送影响非常大($>$ 平均数据的 140%), $\tau > 50\%$, 2 区域输送影响较大(大于平均数据的 120%, 小于平均数的 140%), $45\% < \tau \leq 50\%$; 大气自净能力:1 表示大气自净能力极差, $\theta < 12\% \cdot h^{-1}$; 2 大气自净能力较差, $12\% \cdot h^{-1} \leq \theta < 20\% \cdot h^{-1}$ 记录水平、湍流、垂直平流、混合层、区域输送和大气自净能力对重污染过程形成影响程度,当某个重污染过程出现首要影响因素时,解析为首要因素影响,当没有首要影响因素,解析为次要影响因素,如果没有首要影响因素和次要影响因素,设定为无法解析

表 5 2019 年 6 月~2021 年 5 月重污染天气成因解析

Table 5 Analysis of the causes of heavy pollution weather from June 2019 to May 2021

日期 (年-月-日)	$\rho(PM_{2.5})$ / $\mu g \cdot m^{-3}$	水平 扩散	湍流 混合	垂直 平流	混合层 厚度	区域 输送	大气自 净能力	过程分析原因描述	污染类型和 其它原因
2019-11-09	154	2.10	-3.68	-4.74	250	58.32	6.32	大气自净能力极差,区域输送影响非常大,水平扩散条件极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低	均压场
2019-12-08	153	-16.92	-1.19	10.81	142	51.85	7.30	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,垂直运动非常不利扩散,混合层厚度低	北部弱高压
2019-12-09	175	-6.63	-3.42	3.68	131	61.41	6.37	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,垂直运动非常不利扩散,混合层厚度低,区域输送影响非常大.	锋前低压
2020-01-15	165	-6.03	-4.95	3.99	158	41.67	6.99	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,垂直运动非常不利扩散,混合层厚度低	北部弱高压
2020-01-16	228	-4.08	-6.58	-1.25	203	55.41	11.92	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低,区域输送影响非常大	北部弱高压 转高压前
2020-01-17	217	-1.54	-6.88	-1.57	148	45.61	9.99	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低	低压槽
2020-01-18	240	-4.19	-4.79	2.48	195	78.83	6.49	大气自净能力极差,区域输送影响非常大	锋前低压
2020-01-22	155	3.74	-3.27	-6.02	110	38.03	5.55	大气自净能力极差,水平扩散条件极差,湍流混合能力极差,混合层厚度	锋前低压
2020-01-23	162	-5.28	-9.14	-1.39	282	62.83	15.80	区域输送影响非常大,其余无法解析	锋前低压转高压前 烟花爆竹燃放
2020-01-26	214	0.49	-5.57	-4.71	236	52.83	9.78	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低	均压场
2020-01-27	238	1.87	-6.41	-2.94	162	35.44	7.48	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低,水平扩散条件差	北部弱高压
2020-01-28	202	0.06	-5.78	-3.74	254	53.41	9.46	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,区域输送影响较大	高压前
2020-02-10	170	6.08	-5.80	-8.97	162	40.11	8.70	大气自净能力极差,水平扩散条件极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低	低压槽
2021-02-12	167	3.07	-4.33	-10.89	206	38.19	12.15	水平扩散条件极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低	均压场
2021-03-09	161	9.70	-6.57	-13.00	233	41.17	9.87	大气自净能力极差,湍流混合能力极差,混合层厚度低	均压场
2021-03-15	203	-11.84	-29.32	-0.79	644	28.03	41.95	无法解析	高压前 沙尘天气

或者高压前,在污染的最后阶段,一般伴有污染气团的移动,7次过程5次解析出区域输送影响显著;低压槽和均压场6次过程,多伴有弱风场和辐合风场,3次解析出水平扩散条件较差;而湍流混合能力极差和混合层厚度降低则出现在了绝大部分的重污染过程中。

3 结论

(1) 基于 WRF/Chem 数值模式和过程分析技术,通过 chemdiag 功能和模式中间输出量增加,实现定量估算水平输送、湍流混合、垂直平流、对流过程和排放过程对地面一次 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响。天津水平输送作用为 $-2.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 、垂直平流为 $-2.24 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 、垂直混合为 $-11.70 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和对流作用为 $-0.03 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,湍流混合和垂直平流作用春夏强,秋冬弱;水平输送夏季为汇,其余季节为源;湍流混合在降低近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度中有重要主导作用。

(2) 通过数值模式过程分析技术和标记法源追踪技术,建立重污染成因数值归因方法。定义水平输送、湍流混合、垂直运动和大气自净作用导致地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度每小时变化速率分别为 α 、 β 、 φ 和 θ ,区域输送影响贡献 τ 。天津重污染天气成因解析阈值指标为: $\alpha > -2.0\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\beta > -7.7\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\varphi > 2\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\theta < 12\% \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\tau > 50\%$ 和 PBL(混合层厚度) $< 250 \text{ m}$,通过数值计算和阈值表可较好实现重污染天气成因定量解析。2019年6月~2021年5月16次重污染天气,14次可以用上述方法对成因进行合理解释,无法解析的两次过程一次受到烟花爆竹燃放影响,一次为沙尘天气过程。

(3) 2019年6月~2021年5月重污染过程解析,湍流扩散能力下降和混合层厚度降低是近年形成重污染天气的首要气象影响因素,16次过程中14次清晰表现出大气垂直扩散能力下降的特征。水平风场辐合、垂直平流输送在重污染天气形成中叠加垂直扩散能力的下降的基础上,触发重污染天气,分别出现6次和4次。

(4) 基于数值模式的过程分析技术建立定量化的大气自净能力评估指标,天津排放贡献使得 $\text{PM}_{2.5}$ 均值增加 $16.69 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$, θ 均值为 $30\% \cdot \text{h}^{-1}$, $\theta > 30\% \cdot \text{h}^{-1}$ 时,大气自净能力大于排放贡献, $\theta < 30\% \cdot \text{h}^{-1}$ 时,大气自净能力小于排放贡献。 θ 表征大气自净能力,与传统表征大气自净能力指标的通风系数相关性为 0.65,与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数为 0.65,秋冬季可以达到 0.71,高于通风系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数 0.40。

参考文献:

- [1] 王继康,张恒德,桂海林,等. 能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关系及其分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 2985-2993.
Wang J K, Zhang H D, Gui H L, et al. Relationship between atmospheric visibility and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and distributions [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 2985-2993.
- [2] 丁净,唐颖潇,郝天依,等. 天津市冬季空气湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 和能见度的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5143-5151.
Ding J, Tang Y X, Hao T Y, et al. Impact of air humidity on $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and visibility during winter in Tianjin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5143-5151.
- [3] 胡彬,陈瑞,徐建勋,等. 雾霾超细颗粒物的健康效应[J]. 科学通报, 2015, **60**(30): 2808-2823.
Hu B, Chen R, Xu J X, et al. Health effects of ambient ultrafine (nano) particles in haze [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(30): 2808-2823.
- [4] 李勇,廖琴,赵秀阁,等. $\text{PM}_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1688-1695.
Li Y, Liao Q, Zhao X G, et al. Influence of $\text{PM}_{2.5}$ pollution on health burden and economic loss in China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1688-1695.
- [5] 张强,耿冠楠. 中国清洁空气行动对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 439-440.
Zhang Q, Gen G N. Impact of clean air action on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China [J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1845-1846.
- [6] 国家大气污染防治攻关联合中心. 大气重污染成因与治理攻关项目研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [7] 张小曳,徐祥德,丁一汇,等. 2013~2017年气象条件变化对中国重点地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 483-500.
Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, et al. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $\text{PM}_{2.5}$ mass reduction in key regions in China [J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [8] Mu M, Zhang R H. Addressing the issue of fog and haze: a promising perspective from meteorological science and technology [J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 1-2.
- [9] 潘晨,康志明. 2001~2019年气象条件对江苏省 $\text{PM}_{2.5}$ 分布的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 649-662.
Pan C, Kang Z M. Impact of meteorological conditions on $\text{PM}_{2.5}$ in Jiangsu Province from 2001 to 2019 [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 649-662.
- [10] 廉涵阳,杨欣,张普,等. 北京2019年冬季一次典型霾污染特征与成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2121-2132.
Lian H Y, Yang X, Zhang P, et al. Analysis of characteristics and causes of a typical haze pollution in Beijing in the winter of 2019 [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2121-2132.
- [11] 蔡子颖,韩素芹,张敏,等. 天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2548-2556.
Cai Z Y, Han S Q, Zhang M, et al. Construction and application of vertical diffusion index for analyzing weather during pollution events in Tianjin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2548-2556.
- [12] 贺瑶,朱彬,李锋,等. 长江三角洲地区 $\text{PM}_{2.5}$ 两种污染源对比分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1213-1222.
He Y, Zhu B, Li F, et al. Modeling study on the comparison of the impacts of two kinds of pollution source in a haze episode occurred over the Yangtze River Delta during late January, 2015 [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1213-1222.

- [13] 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000~2019 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4832-4843.
Xia X S, Wang J H, Song W D, *et al.* Spatio-temporal evolution of PM_{2.5} concentration during 2000-2019 in China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4832-4843.
- [14] 蔡子颖, 姚青, 韩素芹, 等. 气溶胶直接气候效应对天津气象和空气质量的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 908-914.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, *et al.* The influence of the air quality and meteorological field about Aerosol direct climate effect on Tianjin[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 908-914.
- [15] 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 等. 2019 年 10~12 月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4402-4412.
Zhu Y Y, Gao Y X, Wang W, *et al.* Assessment of emergency emission reduction effect during the heavy air pollution episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and its surrounding area (“2+26” Cities) from October to December 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4402-4412.
- [16] 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, *et al.* Concentration characteristics of PM_{2.5} and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- [17] 郝巨飞, 张功文, 王晓娟, 等. 一次环境大气重污染过程的监测分析[J]. 高原气象, 2017, **36**(5): 1404-1411.
Hao J F, Zhang G W, Wang X J, *et al.* Analysis of meteorology detection data during a heavy pollution event [J]. Plateau Meteorology, 2017, **36**(5): 1404-1411.
- [18] Han S Q, Hao T Y, Zhang M, *et al.* Observation analysis on microphysics characteristics of long-lasting severe fog and haze episode at urban canopy top [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(9): 2475-2486.
- [19] Li Q H, Wu B G, Liu J L, *et al.* Characteristics of the atmospheric boundary layer and its relation with PM_{2.5} during haze episodes in winter in the North China Plain [J]. Atmospheric Environment, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117265.
- [20] Li L, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Modeling approach for investigating emission source contribution to atmospheric SO₂ pollution in Tangshan, northern China [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, **2013**, doi: 10.1155/2013/136453.
- [21] 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 等. 乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4180-4190.
Zhang R X, Chen Q, Xia J Q, *et al.* Exploring characteristics and causes of summer ozone pollution based on process analysis in Wuhai[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4180-4190.
- [22] 程兴宏, 徐祥德, 丁国安, 等. MM5/WRF 气象场模拟差异对 CMAQ 空气质量预报效果的影响[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(12): 1411-1419.
Cheng X H, Xu X D, Ding G A, *et al.* Differences in MM5 and WRF meteorological field simulations and impact on air quality forecasting by CMAQ model [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(12): 1411-1419.
- [23] Liu X H, Zhang Y, Xing J, *et al.* Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II. Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(30): 3719-3727.
- [24] 王超, 安兴琴, 翟世贤, 等. 伴随模式在追踪污染事件重点源区中的应用[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1283-1290.
Wang C, An X Q, Zhai S X, *et al.* The application of an adjoint model in tracking influential haze source areas of pollution episodes [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1283-1290.
- [25] 王媛林, 李杰, 李昂, 等. 2013-2014 年河南省 PM_{2.5} 浓度及其来源模拟研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3543-3553.
Wang Y L, Li J, Li A, *et al.* Modeling study of surface PM_{2.5} and its source apportionment over Henan in 2013-2014 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3543-3553.
- [26] 许云凡, 王大玮, 向伟玲, 等. 基于 PM_{2.5} 来源解析的减排方案制定[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(5): 2048-2055.
Xu Y F, Wang D W, Xiang W L, *et al.* Emission reduction scheme based on source apportionment analysis [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(5): 2048-2055.
- [27] 蔡子颖, 韩素芹, 邱晓滨, 等. 基于 WRF/Chem 模式天津地区重污染天气成因分析[J]. 高原气象, 2019, **38**(5): 1108-1119.
Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, *et al.* Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on WRF/Chem [J]. Plateau Meteorology, 2019, **38**(5): 1108-1119.
- [28] 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 9-18.
Yang X, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Heavy pollution episode in Tianjin based on UAV meteorological sounding and numerical model [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 9-18.
- [29] 杨鹏, 朱彬, 高晋徽, 等. 一次以南京为中心的夏季 PM_{2.5} 污染岛污染事件的数值模拟[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 321-330.
Yang P, Zhu B, Gao J H, *et al.* A numerical simulate study of the pollution incident of the PM_{2.5} pollutant island in the summer of Nanjing [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(2): 321-330.
- [30] Chen L, Zhu J, Liao H, *et al.* Assessing the formation and evolution mechanisms of severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region using process analysis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(16): 10845-10864.
- [31] 杨文涛, 譙鹏, 刘贤赵, 等. 2011~2017 年中国 PM_{2.5} 多尺度时空分异特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5236-5244.
Yang W T, Qiao P, Liu X Z, *et al.* Analysis of multi-scale spatio-temporal differentiation characteristics of PM_{2.5} in China from 2011 to 2017 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5236-5244.
- [32] 孟凡, 李时蓓. 大气环境容量理论的再思考和总量控制[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(7): 1583-1591.
Meng F, Li S B. Revisiting atmospheric environmental capacity theory and emission cap [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(7): 1583-1591.
- [33] 郝吉明, 许嘉钰, 吴剑, 等. 我国京津冀和西北五省(自治区)大气环境容量研究[J]. 中国工程科学, 2017, **19**(4): 13-19.
Hao J M, Xu J Y, Wu J, *et al.* A study of the atmospheric environmental capacity of Jingjinji and of the five northwestern provinces and autonomous regions in China [J]. Engineering Science, 2017, **19**(4): 13-19.
- [34] 李陵. 北京市近年大气颗粒物和近地面臭氧的相互影响研究

- [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2020.
- Li L. Study on the interaction between atmosphere particulate matter and near-surface ozone in Beijing in recent years [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2020.
- [35] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J]. 科学通报, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, *et al.* “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- [36] 曾佩生, 朱蓉, 范广洲, 等. 京津冀地区低层局地大气环流的气候特征研究[J]. 气象, 2019, **45**(3): 381-394.
- Zeng P S, Zhu R, Fan G Z, *et al.* Study on climatic characteristics of local circulation in the lower atmosphere in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Meteorological Monthly, 2019, **45**(3): 381-394.
- [37] 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 等. 2016 年 1 月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 534-545.
- Yao S, Zhang H Y, Wang X Q, *et al.* Air pollution characteristics and quantitative evaluation of multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei region in January, 2016 [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 534-545.
- [38] Wang D F, Huo J T, Duan Y S, *et al.* Vertical distribution and transport of air pollutants during a regional haze event in eastern China: a tethered mega-balloon observation study [J]. Atmospheric Environment, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118039.
- [39] 韩素芹. 大气边界层对天津重污染天气影响研究及应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- [40] 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 等. 基于天气背景天津大气污染输送特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4855-4863.
- Cai Z Y, Yang X, Han S Q, *et al.* Transport characteristics of air pollution in Tianjin based on weather background [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4855-4863.
- [41] Gao J H, Zhu B, Xiao H, *et al.* A case study of surface ozone source apportionment during a high concentration episode, under frequent shifting wind conditions over the Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **544**: 853-863.
- [42] Gao J H, Zhu B, Xiao H, *et al.* Effects of black carbon and boundary layer interaction on surface ozone in Nanjing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(10): 7081-7094.
- [43] Tong D, Cheng J, Liu Y, *et al.* Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015-2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, **20**(9): 5729-5757.
- [44] Zheng B, Zhang Q, Geng G N, *et al.* Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020 [J]. Earth System Science Data, 2021, **13**(6): 2895-2907.
- [45] 蔡子颖, 韩素芹, 邱晓滨, 等. 基于 255 m 气象塔天津地区污染天气高空风特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(9): 3406-3413.
- Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, *et al.* The characteristics of high-altitude wind about the analysis of pollution weather by 255 meters meteorological tower in Tianjin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(9): 3406-3413.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)