

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

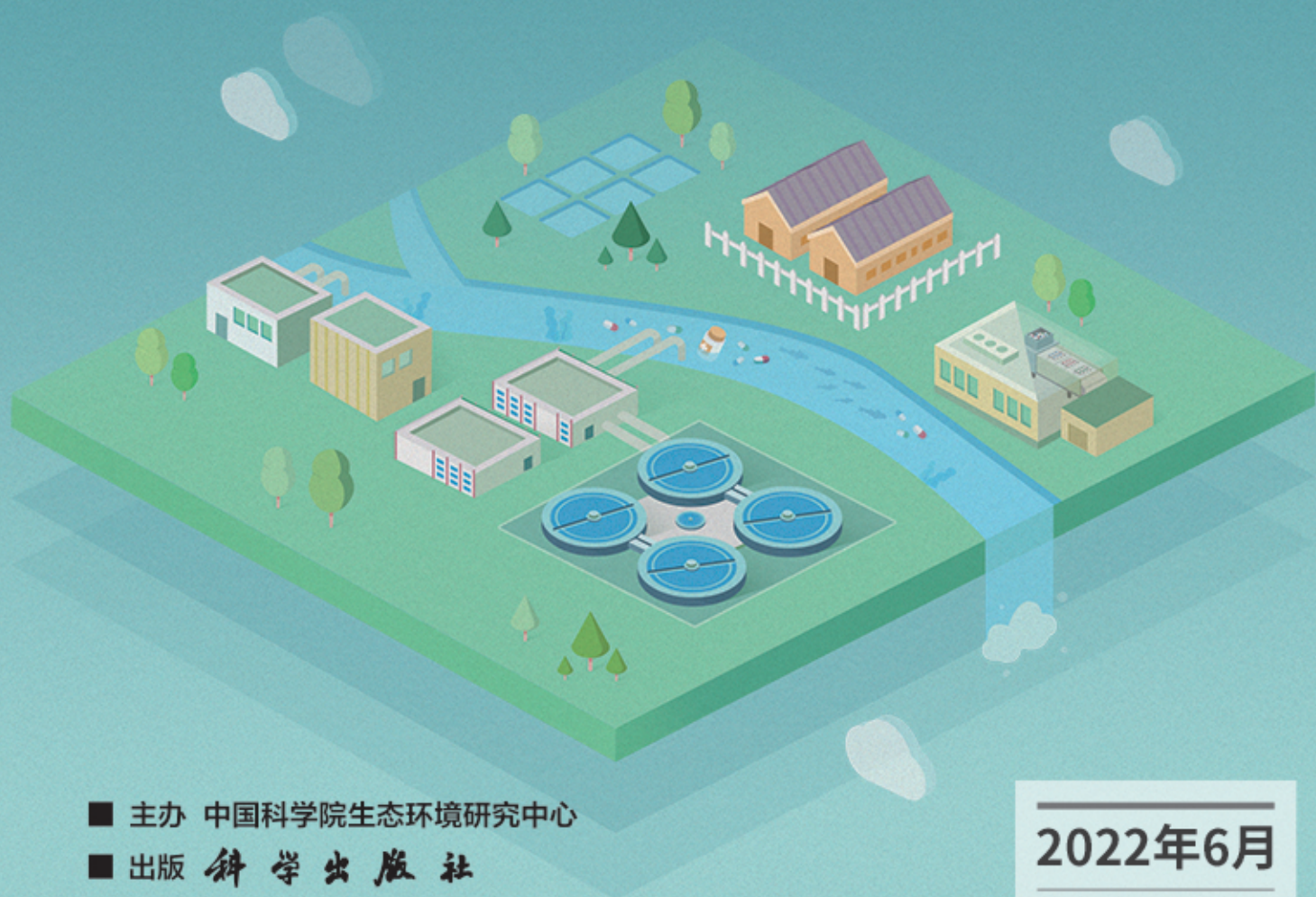
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁敏, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学计量特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡现秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

天津市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及气象影响分析

肖致美¹, 李源¹, 孔君¹, 李鹏¹, 蔡子颖², 高璟贇¹, 徐虹¹, 戢运峰^{1*}, 邓小文^{1*}

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 天津市环境气象中心, 天津 300074)

摘要: 为了解天津市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及气象成因, 基于 2013~2019 年高时间分辨率的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和气象观测数据, 对天津市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征、污染物浓度分布以及关键气象因子进行分析。结果表明, 2013~2019 年, 天津市复合污染日 94 d, 总体呈现下降趋势, 前期(2013~2015 年)下降明显, 由 2013 年的 23 d 降至 2015 年的 11 d, 下降 52.2%; 后期(2016~2019 年)波动式上升, 由 2016 年的 12 d 升至 2019 年的 14 d, 上升 16.7%。复合污染日主要出现在每年的 3~9 月, 年际变化较大, 2013~2016 年在 6~8 月出现较多, 2017~2019 年在 4 月和 9 月出现较多。小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在 $75 \sim 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 小时 $\rho(\text{O}_3)$ 存在峰值区 ($301 \sim 326 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。在所有 O_3 污染中, $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染占比平均值为 34.4%, 并呈逐年减少的趋势。 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染时 O_3 浓度峰值和浓度平均值较单 O_3 污染时高, 复合污染日以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数明显减少, 以 O_3 为首要污染物的天数逐年增加。天津市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染的天气形势主要分为低压、弱高压、高压后部、冷锋前和均压场这 5 种天气类型, 其中低压、冷锋前和弱高压为主要天气类型, 占总天气类型的 92.5%。当风向以西南-南风为主, 风速平均值低于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度区间为 $20 \sim 35^\circ\text{C}$, 相对湿度区间为 40%~60% 时, $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染发生概率高。

关键词: 天津; $\text{PM}_{2.5}$; 臭氧(O_3); 复合污染; 气象因素

中图分类号: X513; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2928-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110126

Characteristics and Meteorological Factors of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 Compound Pollution in Tianjin

XIAO Zhi-mei¹, LI Yuan¹, KONG Jun¹, LI Peng¹, CAI Zi-ying², GAO Jing-yun¹, XU Hong¹, JI Yun-feng^{1*}, DENG Xiao-wen^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: The characteristics, pollutant concentration distribution, and key meteorological factors of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution in Tianjin were analyzed based on the high-resolution online monitoring data of $\text{PM}_{2.5}$, O_3 , and meteorological data observed in Tianjin from 2013 to 2019. Total $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution was 94 days and showed a decreasing trend by year; a significant decreasing trend of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution days were observed in the early stage, with a decline rate of 52.2% from 2013 to 2015. By contrast, in the later period from 2016 to 2019, a fluctuating increasing trend of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution days of 16.7% was observed. $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution days mainly occurred from March to September each year with substantial variation by year, mainly occurring in June to August from 2013 to 2016 and in April and September from 2017 to 2019. The peak value of $\rho(\text{O}_3)$ ($301 \sim 326 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) appeared when $\rho(\text{PM}_{2.5})$ ranged from $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ to $85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution days accounted for 34.4% of total O_3 pollution events in Tianjin, which showed a decreasing trend by year. The peak O_3 concentration and average O_3 concentration during $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution were higher than those during simplex O_3 pollution, and the number of days with $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 as the primary pollutant decreased and increased in compound pollution days by year, respectively. The weather situation of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution was categorized into five weather types, namely low pressure, weak high pressure, rear of high pressure, front of cold front, and equalized pressure. The low pressure, front of cold front, and weak high pressure were observed most frequently, accounting for 92.5% of the total weather situation. The occurrence of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution was most probable when the dominant wind direction was the southwest and south, the average wind speed was less than $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the temperature was between $20 \sim 35^\circ\text{C}$, and the humidity was between 40%~60%.

Key words: Tianjin; $\text{PM}_{2.5}$; ozone(O_3); compound pollution; meteorological factors

随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》深入实施, 我国环境空气质量逐年改善, 城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值下降明显, 以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的超标天数和重污染的天数也明显减少^[1]。在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善的同时, 我国城市 O_3 浓度逐年上升^[1~8], 近年来还出现了以 O_3 为首要污染物的重度污染天气^[1], O_3 已成为继 $\text{PM}_{2.5}$ 之后影响城市环境空气质量的重要污染物^[1,6~9]。虽然近年来 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降明显, 但对大气污染较重的京津冀及周边地区来说, 2020 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值仍高达 $51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 同时 $\rho(\text{O}_3)$ 达 $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[1], 分别是《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级标准限值的 1.46 倍和 1.13 倍, 呈现以高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 为代表的大气复合污染特点, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的协同控制已

成为“十四五”期间我国大气污染防治的主要方向。

$\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染具有一定的关联性, 二者不仅具有共同的前体物^[10~12], 并且在大气中通过多种途径相互影响^[13~17]。目前国内对 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 复合污染研究主要集中在长三角^[18~21]、珠三角^[22,23] 和京津冀^[24~29] 区域, 主要从污染物的浓度和气象成因^[18,21,25,26,29]、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 相互影响^[19~21,27,28]、复合污染特征和来源解析^[23,24] 以及复合过程的数值模

收稿日期: 2021-10-17; 修订日期: 2021-11-15

基金项目: 天津市科技计划项目 (21YFNSN00200); 国家自然科学基金项目 (42177465); 天津市细颗粒物和臭氧污染协同防控综合解决方案研究项目 (DQGG202102)

作者简介: 肖致美 (1972~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染协同防控, E-mail: xiaozhimei01@163.com

* 通信作者, E-mail: yf_2100@163.com; dxwpp@163.com

拟^[22]等方面开展研究.有研究表明:不同区域复合污染发生的气象因子阈值有所不同,上海发生复合污染时温度为 $27.9 \sim 34^\circ\text{C}$,湿度为 $43\% \sim 58\%$,风速为 $2.1 \sim 3.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并且存在辐合^[18];京津冀区域在温度大于 20°C 、相对湿度小于 55% 时更易发生复合污染^[27];天津2017年夏季和秋季温度阈值分别为 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 和 $20 \sim 30^\circ\text{C}$,相对湿度分别为 $40\% \sim 70\%$ 和 $55\% \sim 100\%$ ^[29];邯郸在温度为 $21 \sim 29^\circ\text{C}$ 、湿度较高和气压偏低的条件下,更容易发生复合污染^[28].王占山等^[25]的研究分析了北京夏季 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况,发现较高的起始浓度、不利的气象条件及区域传输是造成 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到中度污染的主要原因.在徐州^[19]和南京^[21]的研究指出 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 相互作用呈现相反的季节变化,夏季以 O_3 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的促进作用主导大气复合污染变化,冬季以 $\text{PM}_{2.5}$ 对 O_3 的抑制作用主导大气复合污染变化.珠三角复合污染的数值模拟研究显示^[22],复合污染中高 O_3 浓度既有源自气相化学过程,又有源自物理过程,高 $\text{PM}_{2.5}$ 则由较高的起始浓度加上 SO_2 和 NO_2 的高转化率造成;天津夏季复合污染过程中日间 O_3 对 SO_2 的气相氧化和夜间高湿条件下液相化学反应是主导化学机制,而秋季高湿环境促进 SO_2 向硫酸盐转化以及夜间 N_2O_5 水解反应是 $\text{PM}_{2.5}$ 显著增长的关键机制^[29].肖致美等^[24]研究表明,天津复合污染下 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 来源主要为溶剂使用、机动车排放、石化工业、天然源、LPG、燃烧源、油气挥发和其他源.

天津市位于京津冀区域的中北部,工业发达,是京津冀区域大气污染较重的城市之一^[30].2013年以来天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐年下降,但依然远高于国家二级标准限值^[31],2020年 $\rho(\text{O}_3)$ 达 $190 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[31],较2013年上升25.8%,是国家二级标准限值1.19倍,环境空气质量呈现 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特点,目前天津市有关 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染研究主要为复合污染特征和来源分析^[24]以及典型过程污染特征和气象分析^[29],缺少长时间复合污染特征和气象影响分析,同时天津市东临渤海,具有内陆和海洋气候共同影响的特点,选取天津市为研究城市开展 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染分析具有一定代表性.本文在前期研究的基础上^[24],基于长时间和高时空分辨率的监测数据,开展天津市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征和气象影响分析,以期京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 复合污染预测预报和协同防治提供依据.

1 材料与方法

1.1 观测场地

天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度数据来源于空气质量监

测网络国控评价点,天津市共有国控评价点14个,主要分布在中心城区、环城区和滨海新区,监测时间为2013~2019年,所有监测数据均为标准状态下的监测数据,天津市数据为所有国控评价点的平均值.气象观测数据来自中国气象局天津大气边界层观测站(台站编号为54517),其他气象观测点分别位于武清、北辰、静海、津南、塘沽和汉沽.环境空气监测点和气象观测站分布见图1.

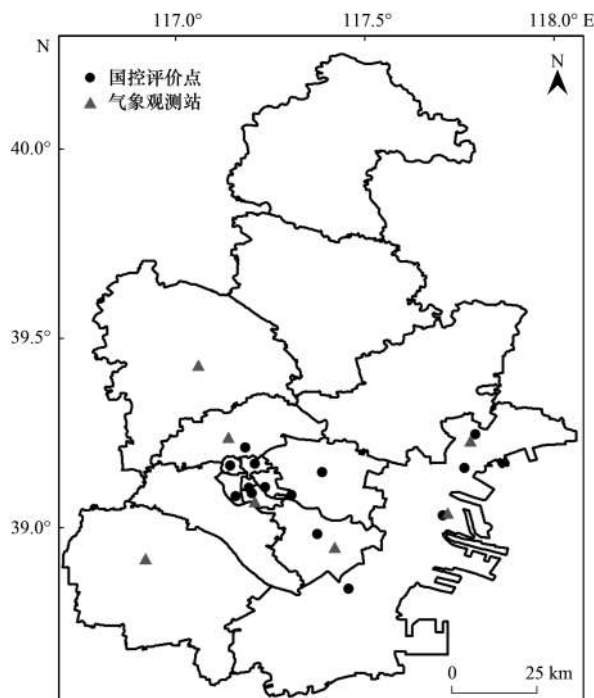


图1 监测点和气象观测站分布示意

Fig. 1 Location of the sampling station and meteorological station

1.2 采样及分析方法

采用美国 Thermo 公司 TEOM 1405F 监测 $\text{PM}_{2.5}$ 、Thermo 49i 监测 O_3 ,时间分辨率为1h. $\text{PM}_{2.5}$ 监测仪器每月更换采样滤膜,对采样流量进行校准,每季度进行压力传感器和温度传感器校验,每半年进行比例系数(K_0)校验,质量控制均严格按照《环境空气颗粒物(PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 817-2018)要求进行. O_3 监测仪器每天进行自动校准,质量控制均严格按照《环境空气气态污染物(SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 CO)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 818-2018)要求进行.

1.3 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染定义

按照《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)规定,本研究将日均 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,同时 O_3 日最大8h滑动平均值 $[\rho(\text{O}_3-8\text{h})] > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定义为 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染日;将 O_3 日最大8h滑动平均值 $[\rho(\text{O}_3-8\text{h})] > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,同时 $\rho(\text{PM}_{2.5}) \leq 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定义为单

O₃ 污染日.

2 结果与讨论

2.1 天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染状况及变化趋势

2013~2019年,天津市共出现PM_{2.5}-O₃复合污染日94d,总体呈现下降趋势,由2013年的23d降至2019年的14d(图2).年际变化呈现两个特点:前期(2013~2015年)下降明显,由2013年的23d降至2015年的11d,下降52.2%;后期(2016~2019年)波动式上升,由2016年的12d升至2019年的14d,上升16.7%.从复合污染日月度分布上看,2013~2019年PM_{2.5}-O₃复合污染日主要出现在每年的3~9月,10月仅出现1d,总体上呈现单峰型态,6月出现复合污染日最多,为25d.从年际变化上看,复合污染日分布呈现明显阶段化变化特点,2013~2016年,复合污染日主要集中在5~9月,其中6~8月出现较多;2017~2019年,复合污染日出现的月份呈现提早至3月,4月和9月出现

较多.主要原因如下:2013~2016年,天津市大气污染物排放量相对较高^[32], $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值范围为69~96 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[33],PM_{2.5}污染较重,高浓度的颗粒物散射和反射作用对O₃光化学反应有抑制作用^[22],5~9月是温度较高的季节,日最高气温大于30℃的天数多,其中6~8月高达15~23d(图3),是大气光化学反应较强的季节,O₃浓度高,加之PM_{2.5}污染较重,易出现复合污染日.2017~2019年,随着《打赢蓝天保卫战三年行动计划》深入实施,天津市全面实施燃煤、工业、机动车和扬尘污染综合治理^[34~36],环境空气质量改善明显, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值范围为48~62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[31],较2013~2016年明显降低,尤其是夏季(6~8月)降水量相对较多(图3),日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超过75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的概率低;4月和9月分别是春初和秋初,与2013~2016年相比,2017~2019年的4月和9月降水相对较少,但日最高气温大于30℃的天数明显增加(图3),因此出现PM_{2.5}-O₃复合污染日增多.

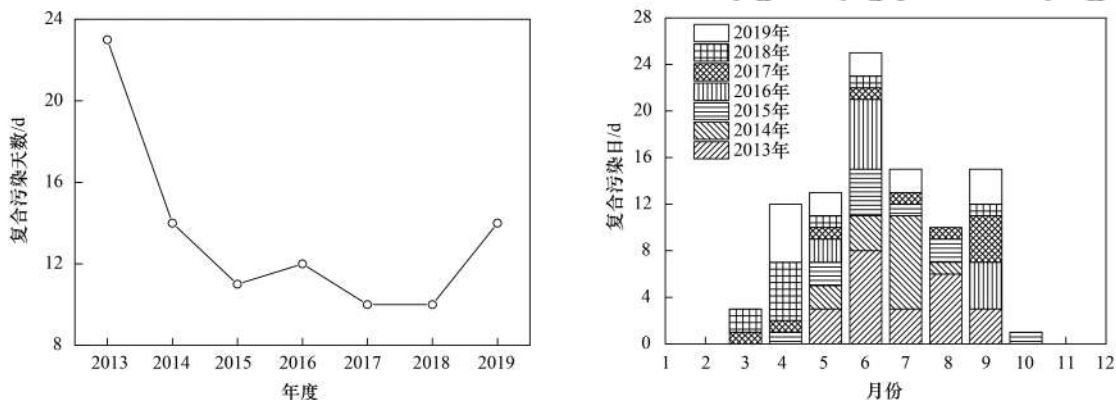


图2 2013~2019年天津市PM_{2.5}-O₃复合污染日变化趋势

Fig. 2 Variations in PM_{2.5}-O₃ compound pollution days in Tianjin from 2013 to 2019

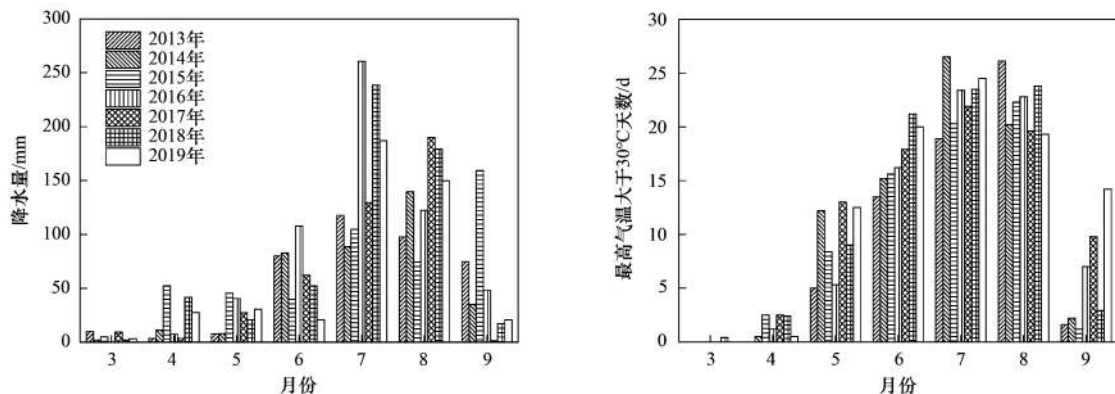


图3 2013~2019年天津市主要月份降水量和高温天数变化趋势

Fig. 3 Variations in precipitation and high temperature days in primary months in Tianjin from 2013 to 2019

从空间分布上看(表1),复合污染日整体呈现出由中心城区向东南方向逐渐减少的特点.中心城区和环城区复合污染日相对较多,滨海新区相

对较少,这与天津市污染源排放和气象因素的分布有关.中心城区虽然没有工业分布,但受周边污染传输影响较大;城区机动车数量和密度高,上下

班高峰期交通堵塞严重,机动车排放量大;此外,中心城区餐饮油烟、干洗、加油站和市政有机溶剂使用等面源排放影响较高,受城市“热岛效应”影响,温度相对较高,大气扩散条件相对较差,出现 PM_{2.5}-O₃ 复合污染日较多. 环城区域钢铁、火电和建材等行业排放量大,不利气象条件作用下也易出现 PM_{2.5}-O₃ 复合污染. 滨海新区石化行业排

放量,但受天津港船舶和柴油车货运影响,NO_x 排放量高,有研究表明 O₃ 可以通过 NO 滴定效应 (NO + O₃ → NO₂ + O₂) 去除^[37],较高的 NO 对 O₃ 生成有明显的抑制作用^[38~40],同时滨海新区受海陆风影响,东南风发生频率高,大气扩散条件相对较好,与中心城区和环城区相比,出现 PM_{2.5}-O₃ 复合污染较少.

表 1 2013 ~ 2019 年天津市复合污染日的空间分布

Table 1 Spatial distribution of PM_{2.5}-O₃ compound pollution days in Tianjin from 2013 to 2019

区域	点位	复合污染日/d							合计
		2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	
中心城区	大理道	19	12	5	9	7	9	13	74
	宾水西道	16	13	9	12	9	8	11	78
	前进道	14	11	9	8	9	9	12	72
	大直沽八号路	22	6	10	11	8	10	11	78
	中山北路	18	11	6	10	9	7	11	72
	勤俭道	20	9	6	7	9	8	13	72
环城区	淮河道	16	10	11	10	8	8	14	77
	跃进路	13	11	6	10	9	9	13	71
	津沽路	10	9	9	10	9	8	11	66
滨海新区	西四道	10	11	6	8	8	9	11	63
	永明路	20	7	5	5	7	8	5	57
	汉北路	3	10	3	4	8	8	10	46
	河西一经路	10	8	8	7	9	9	11	62
	第四大街	10	2	5	7	6	6	6	42

2013 ~ 2019 年,在所有 O₃ 污染中,PM_{2.5}-O₃ 复合污染占比平均值为 34.4%,其中 2013 年占比最高,达 74.2%,2014 ~ 2016 年占比为 36.4% ~ 45.8%,2017 ~ 2019 年占比明显下降,为 11.8% ~ 17.1%,说明 PM_{2.5}-O₃ 复合污染中 PM_{2.5} 影响逐渐降低(图 4). 从复合污染日首要污染物的变化上看,复合污染日中以 PM_{2.5} 为首要污染物的天数明显减少,由 2013 年的 18 d 降至 2016 年的 4 d,并在 2017 ~ 2019 年保持 3 d. 2016 年开始,复合污染日中以 O₃ 为首要污染物的天数超过以 PM_{2.5} 为首要污染物的天数. PM_{2.5}-O₃ 复合污染日在所有 O₃ 污染中占比

的变化和复合污染日首要污染物的变化,反映出影响天津市环境空气质量的首要污染物从 PM_{2.5} 逐渐向 O₃ 过渡的特点.

2.2 复合污染日 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度分布及变化趋势
PM_{2.5}-O₃ 复合污染具有 PM_{2.5} 和 O₃ 双重危害,从 PM_{2.5} 和 O₃-8 h 浓度平均值分布看(图 5),复合污染日 ρ (PM_{2.5}) 平均值呈现下降趋势,由 2013 年的 118 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 2019 年的 88 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降 25.4%; ρ (O₃-8 h) 平均值呈现上升趋势,由 2013 年的 186 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 2019 年的 216 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,上升 16.1%. 复合污染日 ρ (PM_{2.5}) 平均值的下降和

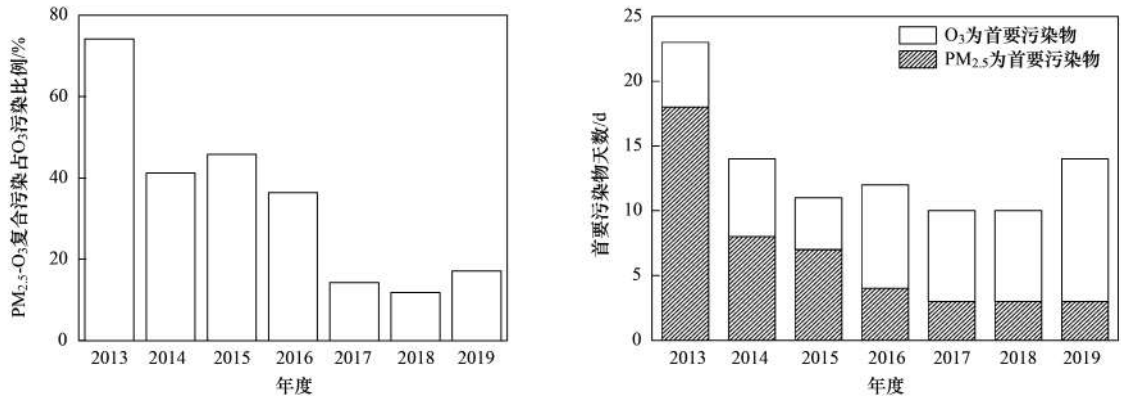


图 4 2013 ~ 2019 年天津市复合污染日占 O₃ 污染日的比例及复合污染日首要污染物变化趋势

Fig. 4 Annual variation in proportion of PM_{2.5}-O₃ compound pollution to O₃ pollution and the primary pollutant of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin from 2013 to 2019

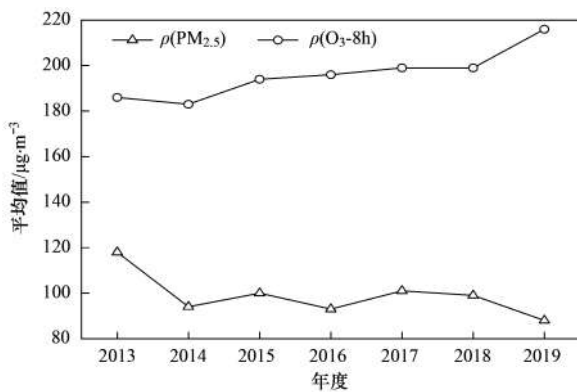


图5 2013~2019年天津市复合污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 -8 h浓度变化趋势

Fig. 5 Average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 -8 h during compound pollution in Tianjin from 2013 to 2019

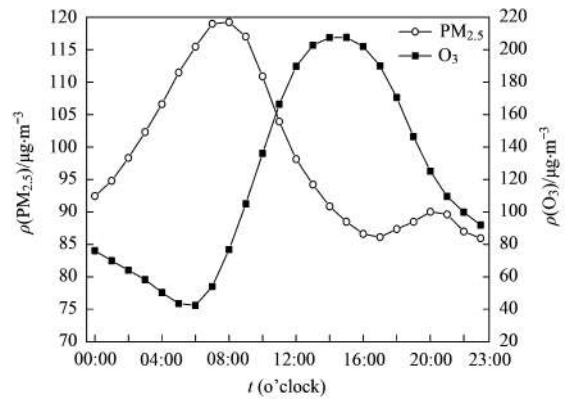
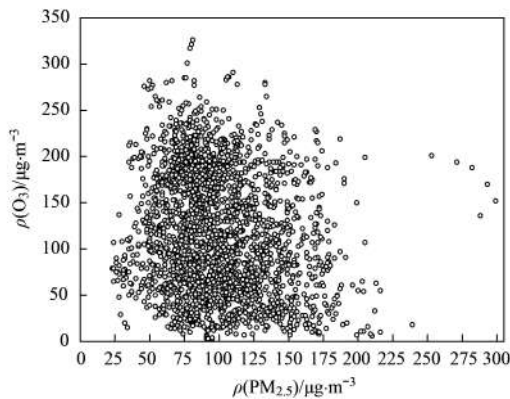


图6 天津市2013~2019年复合污染日小时 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度分布及日变化趋势

Fig. 6 Distribution and diurnal variations of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 concentration during compound pollution in Tianjin from 2013 to 2019

与单 O_3 污染日相比(图7),2013~2019年复合污染下 $\rho(\text{O}_3$ -8 h)平均值为 $196 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较单 O_3 污染的浓度平均值($192 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)高 $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;从年际变化看,2013~2016年复合污染下 O_3 -8 h浓度平均值明显高于单 O_3 污染的浓度平均值,2017~2019年二者基本保持相当,单 O_3 污染的浓度平

均值略高.前期(2013~2016年)大气污染物排放量大^[32],加之 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染下气象条件利于 O_3 生成^[24,25],因此复合污染下 $\rho(\text{O}_3$ -8 h)平均值较高;后期(2017~2019年),环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善明显^[31,41],与前期相比,颗粒物的散射和反射作用降低,尤其是在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低的单 O_3 污

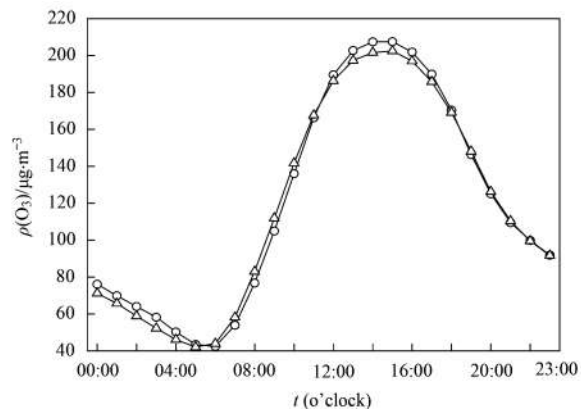
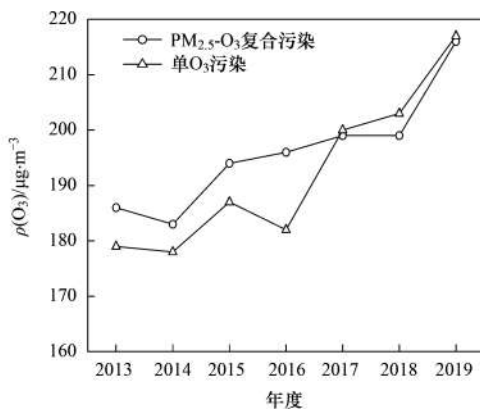


图7 天津市2013~2019年 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染和单 O_3 污染下 O_3 浓度平均值分布及日变化趋势

Fig. 7 Average concentrations and diurnal variation of O_3 during $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution and simplex O_3 pollution in Tianjin from 2013 to 2019

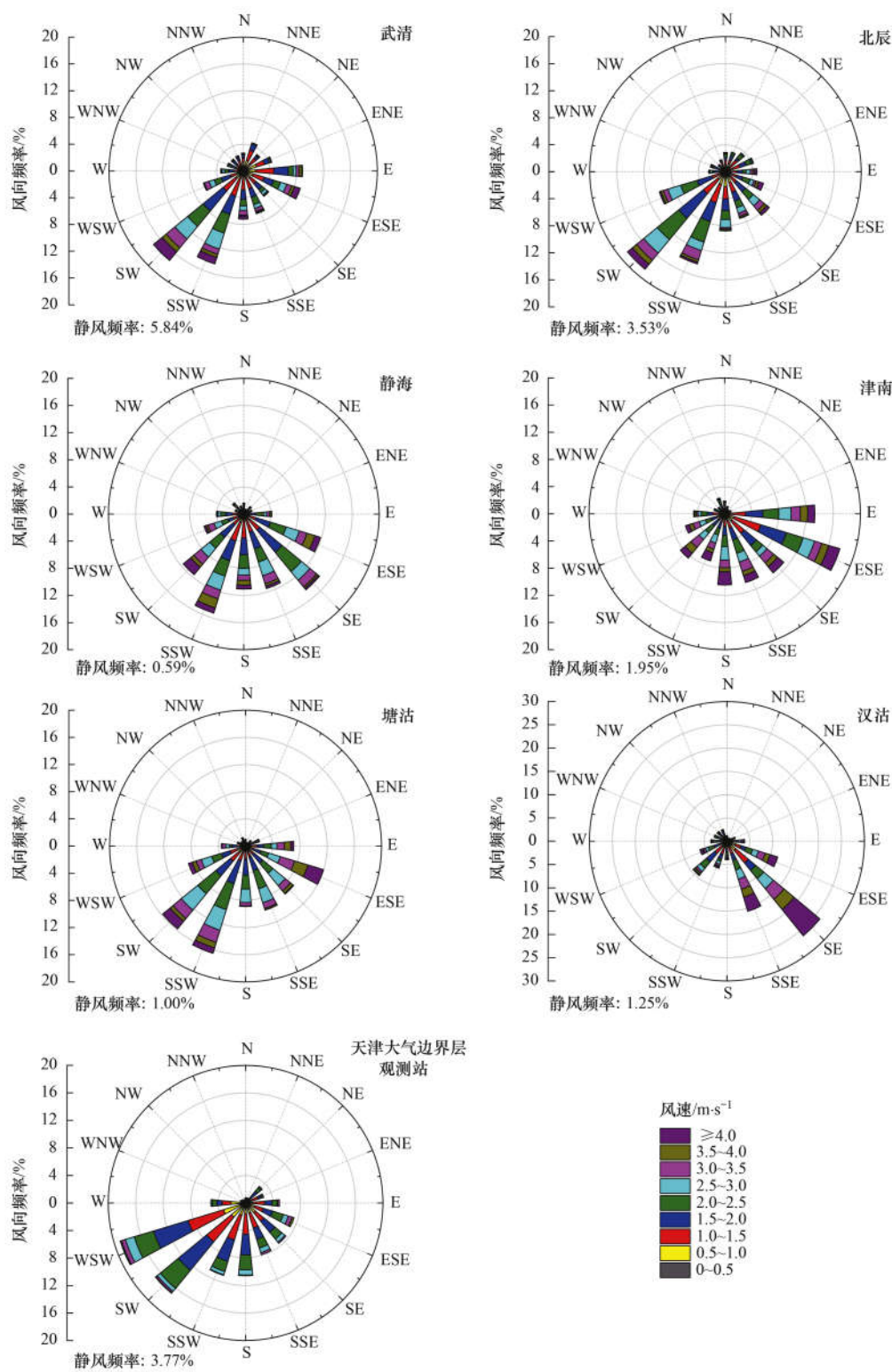


图8 天津市不同区域 2013 ~ 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染下风向和风速分布

Fig. 8 Wind direction and wind speed of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution in different regions in Tianjin from 2013 to 2019

染日太阳辐射作用增强,因此出现单 O_3 污染日 O_3 -8 h 浓度平均值略高的现象. 从小时浓度变化趋势看,复合污染下小时 O_3 浓度在 12:00 ~ 18:00 时均高于单 O_3 污染,峰值出现在 14:00 ~ 15:00 时,这与该时间段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低、太阳辐射较强和温度较高有关. 复合污染小时 O_3 峰值浓度高于

单 O_3 污染,主要与复合污染日气压场较弱,易出现风场辐合,气象条件不利于污染物的扩散,累积的前体物在适合的光化学反应条件下生成更多的 O_3 有关. 总之,复合污染不仅具有 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 双重污染,而且 O_3 的浓度峰值较单 O_3 污染高,对人体健康危害更大.

2.3 PM_{2.5}-O₃ 复合污染关键气象因素影响

基于海平面气压划分 PM_{2.5}-O₃ 复合污染天气类型(表 2),从大类上分,主要分为低压、弱高压、高压后部、冷锋前和均压场这 5 种天气类型,结合京津冀区域特殊的地理地形和天津所处的位置,低压又分为低压中心、低压带、华北小低压和河套倒槽这 4 种类型.在所有天气类型中,低压、冷锋前和弱高压分布较多,分别占有所有天气类型的 51.0%、28.7% 和 12.8%.从不同天气类型下 PM_{2.5} 和 O₃-8 h 浓度平均值分布看,华北小低压时 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{ h})$ 平均

值最高,达 $277\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均压场时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值最高,为 $114\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.冷锋前是指污染过程结束前,由于上游大气污染物的输送,天津会出现 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度的升高,锋面逆温的存在使得高浓度污染会维持一段时间,这种天气形势下天津受上游污染物的传输影响明显.除了冷锋前外,另外 4 种天气类型的共同特征均为气压场较弱,不利于污染物扩散,同时天津东临渤海,6~9 月是天津海陆风多发季节^[42],极易形成海陆风的辐合,导致污染物浓度累积,为复合污染的出现提供了有利的气象条件.

表 2 2013~2019 年天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染日天气类型分布

Table 2 Synoptic classification of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin from 2013 to 2019

PM _{2.5} -O ₃ 复合污染 天气类型	出现天数/d	在复合污染日 中的占比/%	平均值	
			$\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{ h})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
低压	(低压中心)	7	195	109
	(低压带)	37	195	100
	(华北小低压)	2	277	96
	(河套倒槽)	2	205	94
弱高压	12	12.8	192	96
高压后部	3	3.2	186	101
冷锋前	27	28.7	190	101
均压场	4	4.3	198	114

除天气形势外,风向、风速、温度和相对湿度等气象因子对复合污染的形成具有关键作用.天津大气边界层观测站复合污染日气象观测数据表明,复合污染日风向主要以西南-南风为主,占比达 60.5%;整体风速平均值为 $1.49\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,小时风速平均值范围为 $0.0\sim4.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,小时风速平均值低于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率为 79.3%.出现西南风时高空多为暖平流,层结稳定,风速较小,不利于污染物扩散.

从 PM_{2.5}-O₃ 复合污染日风频的空间分布看(图 8),上游观测站(武清观测站、北辰观测站和静海观测站)主要以西南风为主,内陆站中天津大气边界层观测站以西南风为主,津南观测站以南-东南风为主;下游沿海站中塘沽站以西南和东南风为主,汉

沽站以东南风为主,风速大于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率高,大气扩散条件相对较好.围绕中心城区和环城区,大致形成一个西南风和东南风的辐合风场,辐合风场的出现有利于 PM_{2.5} 和 O₃ 的积累,同时也很好地说明了在复合污染 PM_{2.5} 浓度较高的情况下,小时 O₃ 浓度峰值高于单 O₃ 污染.

PM_{2.5}-O₃ 复合污染下温度平均值为 26°C ,相对湿度平均值为 55%,与单 O₃ 污染相比,复合污染下温度平均值略低,相对湿度平均值略高,说明晴朗、相对干燥的情况下利于 O₃ 反应的生成,而相对较高的湿度促进气溶胶的吸湿增长,为气态前体物向二次颗粒的转化提供适宜的条件^[43],利于 PM_{2.5}-O₃ 复合污染的发生.从复合污染日小时 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度

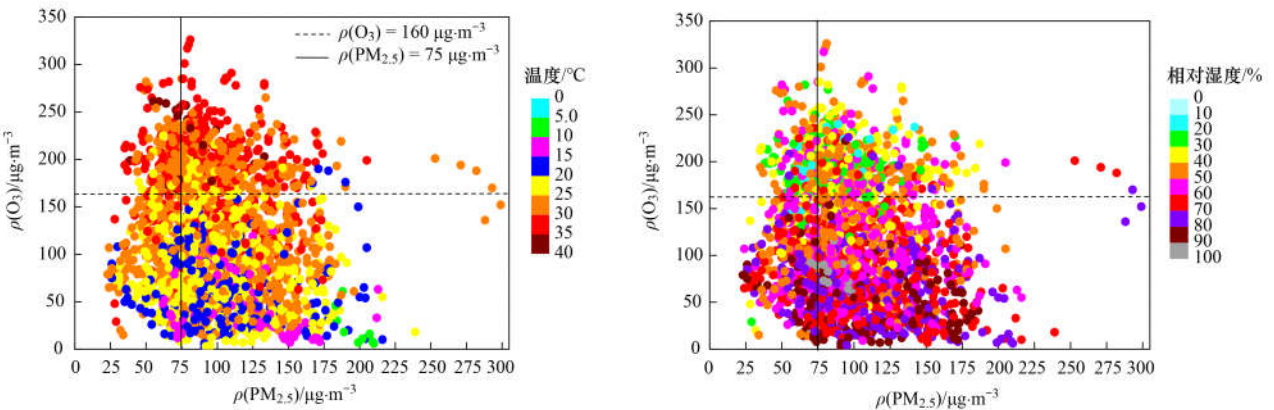


图 9 天津市 2013~2019 年 PM_{2.5}-O₃ 复合污染下温度和相对湿度分布

Fig. 9 Distribution of temperature and relative humidity of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin from 2013 to 2019

与温度和相对湿度分布上看(图 9), 当温度区间为 $20 \sim 35^\circ\text{C}$ 时, 相对湿度区间为 $40\% \sim 60\%$ 时, 小时 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 且小时 $\rho(\text{O}_3) > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 出现的频率高。

3 结论

(1) 2013 ~ 2019 年, 天津市 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染日总体呈下降趋势, 前期下降明显, 后期波动式上升。受污染物排放和气象因素变化影响, 复合污染日 2013 ~ 2016 年在 6 ~ 8 月出现较多, 2017 ~ 2019 年在 4 月和 9 月出现较多, 空间分布整体呈现出由中心城区向东南方向逐渐减少的特点。

(2) 2013 ~ 2019 年复合污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值下降, O_3 -8 h 浓度平均值上升, 日变化趋势呈现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度峰值交替出现的特点; 受气压场较弱和风场辐合等不利气象条件影响, 复合污染小时 O_3 峰值浓度高于单 O_3 污染; 复合污染日在所有 O_3 污染中占比明显下降, 复合污染日中以 O_3 为首要污染物的天数明显增加, 反映影响天津市环境空气质量的首要污染物从 $\text{PM}_{2.5}$ 逐渐向 O_3 过渡的特点。

(3) 天津市复合污染日主要有 5 种天气类型: 分别是低压、弱高压、高压后部、冷锋前和均压场, 其中低压、冷锋前和弱高压为主要天气类型, 占总天气类型的 92.5%; 当风向以西南-南风为主, 风速平均值低于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度区间为 $20 \sim 35^\circ\text{C}$, 相对湿度区间为 $40\% \sim 60\%$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染发生概率高。

参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 2013-2016 中国环境状况公报, 2017-2020 中国生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/>, 2021-10-12.
- [2] Lyu X, Wang N, Guo H, *et al.* Causes of a continuous summertime O_3 pollution event in Jinan, a central city in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(5): 3025-3042.
- [3] Qu Y W, Wang T J, Cai Y F, *et al.* Influence of atmospheric particulate matter on ozone in Nanjing, China: observational study and mechanistic analysis[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, **35**(11): 1381-1395.
- [4] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to O_3 -VOC- NO_x sensitivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [5] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.
Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [6] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [7] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, *et al.* Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- [8] 孟晓艳, 李婧妍, 解淑艳, 等. 2017-2019 年中国 337 个城市及重点区域臭氧污染状况分析[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(3): 9-17.
Meng X Y, Li J Y, Xie S Y, *et al.* Analysis of ozone pollution in 337 cities and key regions of China in 2017-2019[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(3): 9-17.
- [9] Cleaner air for China[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(7), doi: 10.1038/s41561-019-0406-7.
- [10] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] 谢绍东, 田晓雪. 挥发性和半挥发性有机物向二次有机气溶胶转化的机制[J]. *化学进展*, 2010, **22**(4): 727-733.
Xie S D, Tian X X. Formation mechanism of secondary organic aerosols from the reaction of volatile and semi-volatile compounds[J]. *Progress in Chemistry*, 2010, **22**(4): 727-733.
- [12] 冯凝, 唐梦雪, 李孟林, 等. 深圳市城区 VOCs 对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 耦合生成影响研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 11-17.
Feng N, Tang M X, Li M L, *et al.* Research on the influence of VOCs on the coupling generation of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in Shenzhen[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 11-17.
- [13] Li J, Wang Z, Wang X, *et al.* Impacts of aerosols on summertime tropospheric photolysis frequencies and photochemistry over Central Eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(10): 1817-1829.
- [14] Real E, Sartelet K. Modeling of photolysis rates over Europe: impact on chemical gaseous species and aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2010, **10**(7): 16691-16745.
- [15] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenchikov G, *et al.* The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog[J]. *Science*, 1997, **278**(5339): 827-830.
- [16] 朱彤, 尚静, 赵德峰. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用[J]. *中国科学: 化学*, 2010, **40**(12): 1731-1740.
Zhu T, Shang J, Zhao D F. The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze[J]. *Science China Chemistry*, 2011, **54**(1): 145-153.
- [17] Xing J, Wang J D, Mathur R, *et al.* Impacts of aerosol direct effects on tropospheric ozone through changes in atmospheric dynamics and photolysis rates[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9869-9883.
- [18] 毛卓成, 许建明, 杨丹丹, 等. 上海地区 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及气象成因分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2730-2738.
Mao Z C, Xu J M, Yang D D, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological causes of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution in Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2730-2738.
- [19] 张宇静, 赵天良, 殷翀之, 等. 徐州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 作用关系的季节变化[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2267-2272.
Zhang Y J, Zhao T L, Yin C Z, *et al.* Seasonal variation of the relationship between surface $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 concentrations in Xuzhou[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2267-2272.
- [20] 邵平, 辛金元, 安俊琳, 等. 长三角工业区夏季近地层臭氧

- 和颗粒物污染相互关系研究[J]. 大气科学, 2017, **41**(3): 618-628.
- Shao P, Xin J Y, An J L, *et al.* An analysis on the relationship between ground-level ozone and particulate matter in an industrial area in the Yangtze River delta during summer time[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, **41**(3): 618-628.
- [21] Jia M W, Zhao T L, Cheng X H, *et al.* Inverse relations of $PM_{2.5}$ and O_3 in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China[J]. Atmosphere, 2017, **8**(3), doi: 10.3390/atmos8030059.
- [22] 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.
- [23] 赖安琪, 陈晓阳, 刘一鸣, 等. 珠江三角洲高质量浓度 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, **57**(4): 30-36.
- Lai A Q, Cheng X Y, Liu Y M, *et al.* Characteristics of complex pollution with high concentrations of $PM_{2.5}$ and O_3 over the Pearl River Delta, China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, **57**(4): 30-36.
- [24] 肖致美, 徐虹, 高璟璐, 等. 天津市 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- Xiao Z M, Xu H, Gao J Y, *et al.* Characteristics and sources of $PM_{2.5}$ - O_3 compound pollution in Tianjin[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- [25] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 北京市夏季不同 O_3 和 $PM_{2.5}$ 污染状况研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 807-815.
- Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Different air pollution situations of O_3 and $PM_{2.5}$ during summer in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 807-815.
- [26] 李婷婷, 尉鹏, 程水源, 等. 北京一次近地面 O_3 与 $PM_{2.5}$ 复合污染过程分析[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(5): 1979-1985.
- Li T T, Wei P, Cheng S Y, *et al.* Analysis of a near earth surface O_3 and $PM_{2.5}$ pollution in combination with its contaminating process in Beijing[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, **17**(5): 1979-1985.
- [27] 唐斌雁. 京津冀地区近地层臭氧和颗粒物污染相互影响研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018. 10-19.
- [28] 赵淑婷, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸市 $PM_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及相互影响研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2250-2261.
- Zhao S T, Wang L T, Qi M Y, *et al.* Study on the characteristics and mutual influence of $PM_{2.5}$ - O_3 complex pollution in Handan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(6): 2250-2261.
- [29] 刘可欣, 卢苗苗, 张裕芬, 等. 天津市夏秋季 O_3 - $PM_{2.5}$ 复合污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(9): 3650-3662.
- Liu K X, Lu M M, Zhang Y F, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological causes of O_3 - $PM_{2.5}$ compound pollution in summer and autumn over Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(9): 3650-3662.
- [30] 中国环境监测总站. 2018-2019 年全国城市空气质量报告[EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlkbg>, 2021-09-30.
- [31] 天津市生态环境局. 2020 年天津市生态环境状况公报 http://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202109/t20210902_5577540.html, 2021-09-30.
- [32] 刘茂辉, 徐媛, 岳亚云, 等. 天津《大气污染防治行动计划》实施减排效益[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(5): 124-131.
- Liu M H, Xu Y, Yue Y Y, *et al.* Emission reduction benefits for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Tianjin[J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(5): 124-131.
- [33] 天津市生态环境局. 2016 年天津市环境状况公报[EB/OL]. http://sthj.tj.gov.cn/ZWXX808/TZGG6419/202010/t20201021_3972881.html, 2021-09-30.
- [34] 天津市人民政府. 天津市 2017 年大气污染防治工作方案[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2017/1211/143681013.shtm>, 2021-10-12.
- [35] 天津市人民政府. 天津市 2018 年大气污染防治工作方案[EB/OL]. http://www.tj.gov.cn/zwgk/szfwj/tjsrmzfbgt/202005/t20200519_2370503.html, 2021-10-12.
- [36] 天津市人民政府. 天津市 2019 年度打好污染防治攻坚战工作计划[EB/OL]. <http://tjtv.enorth.com.cn/system/2019/05/29/037281506.shtml>, 2021-10-12.
- [37] Seguel R J, Morales R G E, Leiva M A. Ozone weekend effect in Santiago, Chile[J]. Environmental Pollution, 2012, **162**: 72-79.
- [38] 王占山, 李云婷, 董欣, 等. 北京城区大气污染物“周末效应”分析[J]. 中国科学院大学学报, 2015, **32**(6): 843-850.
- Wang Z S, Li Y T, Dong X, *et al.* Analysis on weekend effect of air pollutants in urban atmosphere of Beijing[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, **32**(6): 843-850.
- [39] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO 、 NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 706-711.
- An J L, Wang Y S, Li X, *et al.* Analysis of the relationship between NO , NO_2 and O_3 concentrations in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, **28**(4): 706-711.
- [40] 毛敏娟, 刘厚通, 杜荣光. 不同时间尺度下杭州市 O_3 污染特征及控制因素[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(11): 1844-1851.
- Mao M J, Liu H T, Du R G. Characteristics and control factors of ozone pollution at different time scales in Hangzhou city[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(11): 1844-1851.
- [41] 肖致美, 徐虹, 李立伟, 等. 基于在线观测的天津市 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- Xiao Z M, Xu H, Li L W, *et al.* Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ based on the online observation in Tianjin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- [42] 孟丽红, 李英华, 韩素芹, 等. 海陆风对天津市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 质量浓度的影响[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(3): 390-398.
- Meng L H, Li Y H, Han S Q, *et al.* Influence of Sea-Land Breeze on the concentrations of $PM_{2.5}$ and O_3 in Tianjin City[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(3): 390-398.
- [43] Liu P F, Zhao C S, Göbel T, *et al.* Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(7): 3479-3494.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, GONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)