

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

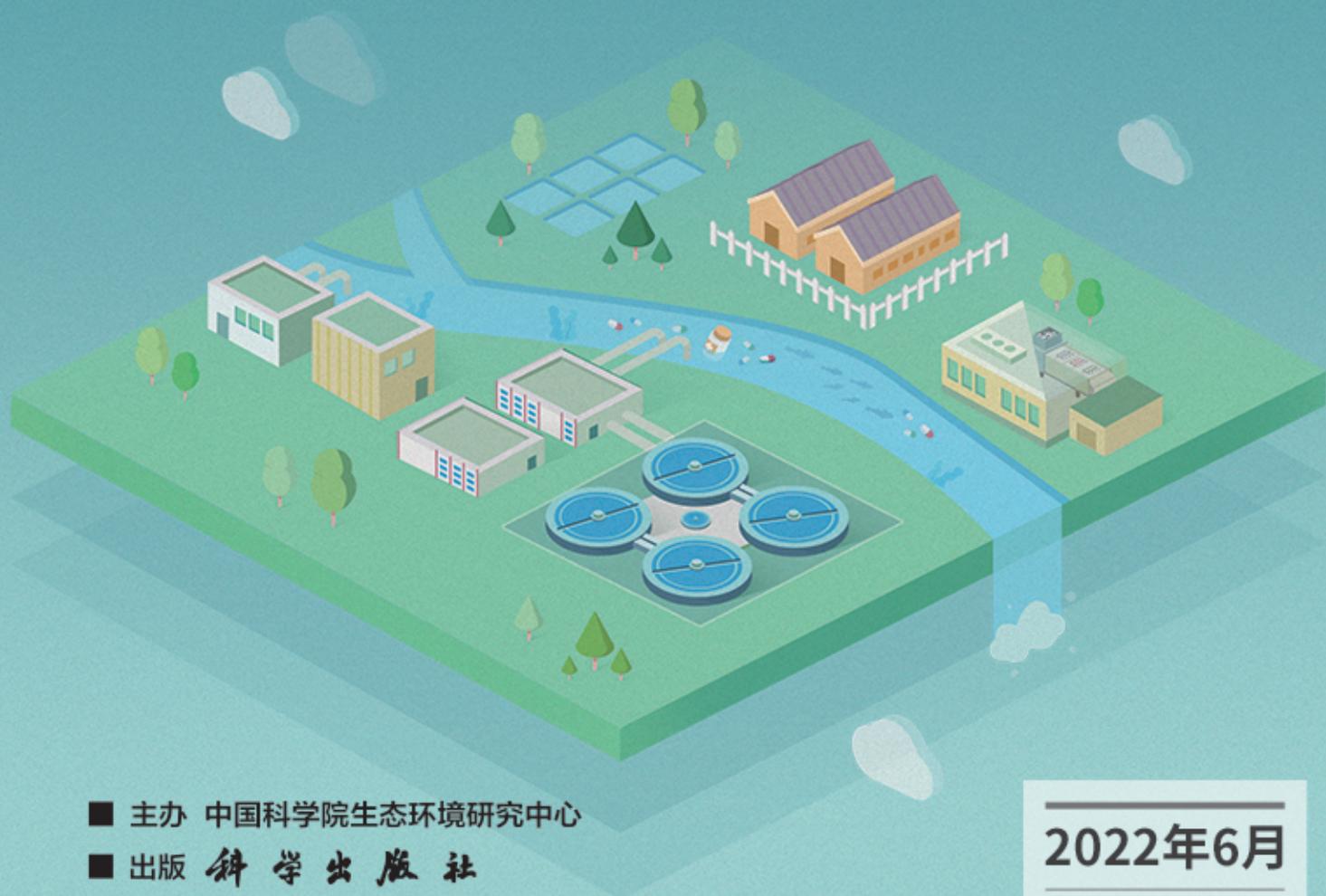
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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, 丁铖, 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}-O₃ 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)

运城市区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, 王思璐, 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, 崔景阳, 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, 蒋钟钟, 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, 徐苏士, 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化学计量学特征 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, 田兴鑫, 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)

石灰海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, 胡砚秋, 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, 杨雪菡, 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)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响

赵伟¹, 吕梦瑶², 卢清^{1*}, 高博¹, 梁小明¹, 刘明¹, 孙家仁¹, 陈来国¹, 范绍佳³

(1. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东省水与大气污染防治重点实验室, 广州 510530; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 中山大学大气科学学院, 广州 510275)

摘要: 基于 2015 ~ 2020 年西北太平洋热带气旋路径资料、珠三角气象观测资料和臭氧监测数据, 分析了西行热带气旋(A 型)、东海转向热带气旋(B 型)、近海影响热带气旋(C 型)和远海热带气旋(D 型)这 4 类热带气旋对珠三角臭氧浓度的影响。结果表明, 在 A 型热带气旋影响下, 区域臭氧浓度超标频率变化不大; 在 B 型热带气旋影响下, 珠三角臭氧超标频率明显升高; 在 C 型热带气旋影响下, 区域臭氧超标频率有较明显的升高, 但是升高幅度弱于 B 型热带气旋; D 型热带气旋远离中国大陆, 对珠三角臭氧浓度影响很小。当 A 型或 C 型热带气旋发生时, 珠三角区域臭氧日最大 8 h 平均浓度(MDA8)平均值的平均增幅在 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 部分城市臭氧 MDA8 可能下降; B 型热带气旋发生时, 区域臭氧 MDA8 平均增幅为 $19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 各城市臭氧浓度均明显增加, 其中珠海、江门两市臭氧 MDA8 平均增幅较大, 增幅超过了 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。相对来说, 珠三角西部城市臭氧浓度受热带气旋的影响更大。当发生 B 型热带气旋时, 珠三角地区太阳辐射增强、日照变长、云量减少、气温升高和相对湿度降低, 同时高空下沉气流增多, 这些因素共同促进地面臭氧浓度升高。当发生 A 型或 C 型热带气旋时, 气象要素变化并不完全有利于臭氧浓度升高, 甚至可能出现降雨等不利条件, 导致区域臭氧超标的频率小于 B 型热带气旋。此外, 受热带气旋影响, 珠三角西部城市的日照时数和气温的增加幅度均比东部城市大, 从而更有利于西部区域臭氧浓度的升高。

关键词: 热带气旋; 臭氧污染; 珠三角 (PRD); 气象因素; 秋季

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2957-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109169

Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn

ZHAO Wei¹, LÜ Meng-yao², LU Qing^{1*}, GAO Bo¹, LIANG Xiao-ming¹, LIU Ming¹, SUN Jia-ren¹, CHEN Lai-guo¹, FAN Shao-jia³

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China; 2. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the tropical cyclone track data in the northwest Pacific Ocean from 2015 to 2020, meteorological observation data, and ozone concentration monitoring data in the Pearl River Delta (PRD), the impacts of four tropical cyclones, namely the westbound tropical cyclone (type A), East China Sea tropical cyclone (type B), offshore tropical cyclone (type C), and offshore tropical cyclone (type D), on ozone concentration in the PRD were analyzed. The results showed that: under the influence of the type A tropical cyclone, the risk of regional ozone concentration exceeding the standard exhibited little change. Under the influence of the type B tropical cyclone, the risk of ozone exceeding the standard in the PRD was obviously increased. Under the influence of the type C tropical cyclone, the risk of regional ozone exceeding the standard obviously increased, but the increase was weaker than that of the type B tropical cyclone. The type D tropical cyclone was far away from the Chinese mainland and had little influence on ozone concentration in the PRD. When the type A or type C tropical cyclones occurred, the average daily maximum 8-hour average ozone concentration (MDA8) in the PRD region increased by approximately $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and the ozone MDA8 in some cities may have decreased. When the type B tropical cyclone occurred, the regional ozone MDA8 increased by $19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ on average, and the ozone concentration in all cities increased significantly. Among them, the average increase in ozone MDA8 in Zhuhai and Jiangmen was relatively large, with an increase of greater than $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Generally speaking, the ozone concentration in cities in the western PRD was more affected by tropical cyclones. When the type B tropical cyclone occurred, solar radiation increased, sunshine duration lengthened, cloud cover decreased, air temperature rose, and relative humidity decreased in the PRD, all of which were beneficial to photochemical reactions. Meanwhile, downward flow increased in the boundary layer, and downward flow transported high-concentration ozone to the ground, which promoted the increase in ozone concentration on the ground. When type A or type C tropical cyclones occurred, the change in meteorological conditions was not entirely conducive to the increase in ozone concentration, and in some cases, even adverse meteorological conditions such as rainfall occurred, which led to the risk of regional ozone exceeding the standard being less than that of the type B tropical cyclone. Affected by tropical cyclones, sunshine hours and air temperature in western cities of the PRD increased more than those in eastern cities, which was more conducive to ozone generation.

Key words: tropical cyclone; ozone pollution; Pearl River Delta (PRD); meteorological factors; autumn

近年来,我国城市臭氧污染问题不断凸显^[1~8], 2020 年全国 337 个地级及以上城市以臭氧为首要污染物的超标天数占总超标天数的 37.1%, 在京津冀及周边地区、长三角和汾渭平原等三大重点地区, 臭氧为首要污染物的超标天数占总超标天数的 47%、51% 和 36%, 臭氧已成为“十四五”期间影响我国城市空气质量优良天数比例的主要污染物^[9]。

珠江三角洲(珠三角)作为我国沿海经济发达

地区, 经过多年的结构调整和环境治理, 区域环境空气质量整体改善明显, 连续多年达到国家二级标准, 2019 年和 2020 年区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年平均值分别为 28

收稿日期: 2021-09-18; 修订日期: 2021-11-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213902); 国家自然科学基金项目(41807309, 41773127); 广州市科技计划项目(201904010265)

作者简介: 赵伟(1984~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空气污染气象学, E-mail: zhaowei@scies.org

* 通信作者, E-mail: luqing@scies.org

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $21\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 与此同时,若不考虑受疫情严重影响的 2020 年,近年来珠三角臭氧污染改善成效并不明显. 2019 年珠三角 9 市臭氧日最大 8h 平均浓度 [$\rho(\text{MDA8})$] 第 90 百分位数平均值为 $176\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过二级标准, 同比上升 17%, 较 2016 年升高了 32%, 其中广州、珠海、佛山、东莞、中山、江门和肇庆等 7 市臭氧浓度均超过二级标准, 臭氧占首要污染物比例高达 61%, 已成为制约珠三角地区空气质量的主要污染物^[10,11].

臭氧作为一种二次污染物,其浓度水平不仅受挥发性有机物、氮氧化物等前体物排放和大气光化学过程控制,同时会受到气象因素的显著影响^[12~21]. 臭氧污染往往与晴天、高温和低湿等气象条件有关,在这种有利气象背景下,光化学生成反应剧烈,臭氧浓度容易升高. 受华南地区的典型气象条件影响,珠三角的臭氧污染主要出现在高温、少雨、低湿的秋季,而京津冀和长三角等地区的臭氧污染则往往出现在炎热的夏季^[12,19,21,22]. 从天气系统的角度看,臭氧污染经常与高压天气有关,受高压天气影响,天气晴朗、高温、低湿和辐射强烈,有利于臭氧污染的形成^[23~27]. 此外,在我国东南沿海地区,臭氧污染除了受高压天气影响,还常受到一种特殊天气系统——台风外围天气系统的影响. Wei 等^[28] 采用空气质量模式 CMAQ 研究了 2005 年台风海棠造成的香港臭氧污染事件,认为水平输送和气流辐合造成了臭氧的积累,同时高温和低湿条件促进了活跃的光化学反应,这些因素导致了臭氧污染事件. Shu 等^[29] 结合数值模式研究发现,2013 年 8 月当长三角处于超强台风尤特的正面时,台风外围环流增强下沉气流,造成区域臭氧浓度升高. Zhan 等^[30] 研究了 2018 年夏季在长三角发生的与登陆台风相关的区域性臭氧污染事件,发现强烈的光化学反应、

下沉气流和地面微风是本次臭氧污染的主要原因. Deng 等^[31] 探讨了台风外围天气对珠三角高臭氧和高气溶胶污染事件(“双高”事件)的影响,发现气溶胶增加导致多次散射和光化辐射增加有利于光化学反应,同时,下沉气流和湍流将高浓度臭氧输送到地面,造成了臭氧浓度升高.

总的来说,台风外围天气是珠三角及其它沿海地区臭氧污染预报预警需要特别关注的天气系统. 以往相关的研究主要关注台风外围天气系统造成的臭氧污染个例,针对不同类型台风影响的长期统计研究还比较缺乏,而此项工作对于城市臭氧污染预报工作有很强的实际意义. 考虑到秋季是珠三角臭氧污染最严重的季节,同时也是热带气旋比较活跃的时期,本研究收集利用 2015~2020 年秋季西北太平洋热带气旋资料、珠三角臭氧监测数据、地面气象资料和 ERA5 再分析资料,深入分析了不同台风路径对珠三角地区秋季臭氧浓度的影响,以期为珠三角及其他东南沿海地区臭氧污染预报预警和防治工作提供支持.

1 材料与方法

1.1 监测数据

本研究采用的监测数据包括:①2015~2020 年秋季珠三角地区 9 个城市(广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门和肇庆等)地面逐时臭氧监测数据,来源于中国环境监测总站(<https://air.cnemc.cn>;18007/). 为保持数据的可比性,所有监测数据统一转化为实况数据. 本研究采用珠三角 9 市污染物浓度的平均值代表珠三角地区整体污染水平;②2015~2020 年秋季中国香港臭氧每周 1 次的垂直探空数据,数据来源于世界臭氧紫外数据中心(<https://woudc.org/>). 图 1 为珠三角国控站点和

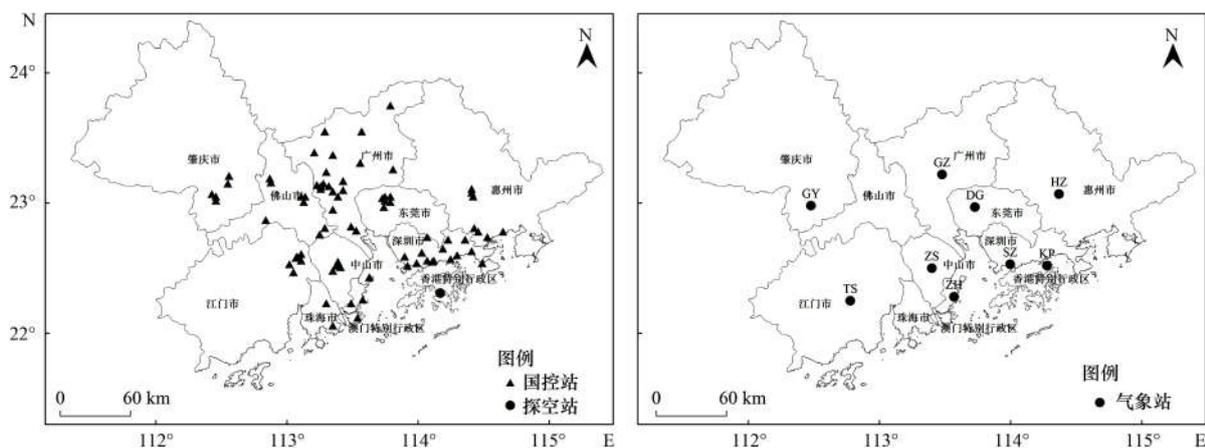


图 1 环境监测站和气象站空间分布

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring stations and weather stations

香港臭氧垂直探空站分布。

1.2 气象观测数据

本研究采用的气象数据包括: ①2015~2020年珠三角8个主要气象站(广州、深圳、珠海、中山、惠阳、东莞、高要和台山)的地面逐日气象数据, 包括气温、风速、相对湿度、降水和日照等参数, 数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的“中国地面气候资料日值数据集”; ②2015~2020年香港天

文台京士柏气象站逐日的云量和太阳总辐射数据, 数据源于中国香港天文台(<https://www.hko.gov.hk>); ③2015~2020年西北太平洋热带气旋数据, 资料取自中国台风网(www.typhoon.gov.cn)“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”。④ERA5再分析资料垂直风速数据, 数据源于哥白尼气候变化服务中心数据库(<https://cds.climate.copernicus.eu>)。气象观测站的基本情况如表1所示, 站点分布见图1。

表1 气象站基本情况

Table 1 Basic condition of weather stations

序号	气象站	纬度/°	经度/°	城市	缩写	气象参数
1	广州站	23.22	113.48	广州	GZ	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
2	深圳站	22.53	114.00	深圳	SZ	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
3	珠海站	22.28	113.57	珠海	ZH	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
4	中山站	22.50	113.40	中山	ZS	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
5	惠阳站	23.07	114.37	惠州	HZ	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
6	东莞站	22.97	113.73	东莞	DG	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
7	高要站	22.25	112.78	肇庆	GY	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
8	台山站	22.98	112.48	江门	TS	气温、风速、日照、相对湿度和降水量
9	京士柏站	22.52	114.28	香港	KP	云量和太阳总辐射

2 结果与讨论

2.1 珠三角臭氧污染特征

2015~2020年珠三角臭氧 $\rho(\text{MDA8})$ 的平均值为 $145 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图2)。其中, 2019年臭氧浓度水平最高, $\rho(\text{MDA8})$ 第90百分位数浓度为 $172 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过国家二级标准($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。从季节变化来看, 珠三角秋季臭氧浓度最高, 其次是夏季和

春季, 冬季最低。

2015~2020年珠三角地区共发生了132个臭氧超标日 [$\rho(\text{MDA8}) > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 其中2019年珠三角超标日数最多, 共出现了54 d。从季节分布来看, 臭氧超标主要集中在秋季, 超标日出现比例高达60.61%; 其次是夏季, 出现比例为24.24%; 再其次是春季, 出现比例为14.39%; 冬季极少出现臭氧超标现象。

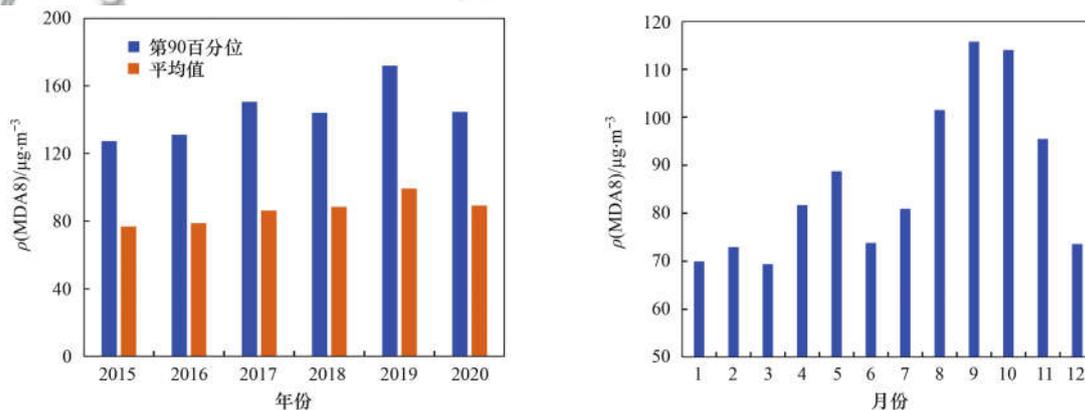


图2 2015~2020年珠三角地区MDA8浓度年际变化和年变化

Fig. 2 Interannual and annual variation in the number of ozone MDA8 concentrations in the PRD from 2015 to 2020

2015~2020年秋季臭氧MDA8的逐月变化来看(图3), 2019年9月是 $\rho(\text{MDA8})$ 最高的月份, 平均值达到 $158 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从秋季浓度的年际变化来看, 2019年秋季 $\rho(\text{MDA8})$ 平均值最高, 达到 $152 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

从空间分布来看(图4), 2015~2020年珠三角秋季臭氧浓度总体呈现西南部高, 东北部低的污染

特征。其中 $\rho(\text{MDA8})$ 平均值最高的城市是江门市, 达到 $118 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 浓度最低的是惠州市, $\rho(\text{MDA8})$ 平均值为 $99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.2 2015~2020年热带气旋的基本特征

根据热带气旋的相关研究^[32-34], 本研究将西北太平洋热带气旋划分为4类, 分别是西行热带气旋(A型)、东海转向热带气旋(B型)、近海影响热带

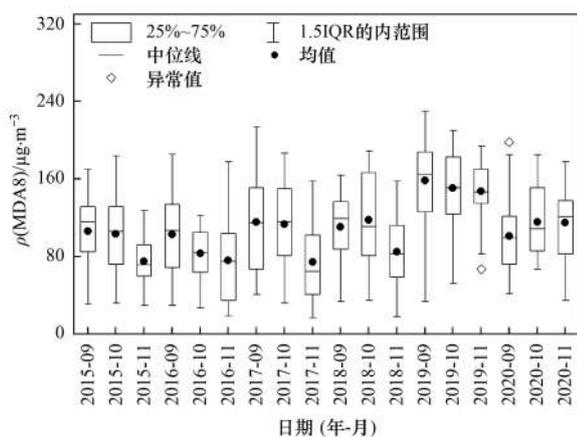


图3 2015~2020年珠三角MDA8浓度秋季逐月变化

Fig. 3 Monthly changes in ozone MDA8 in the PRD from 2015 to 2020

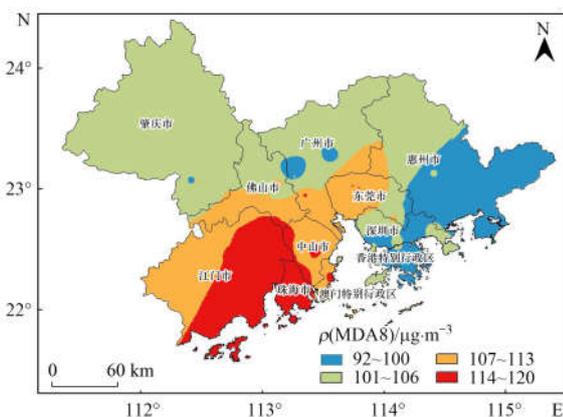


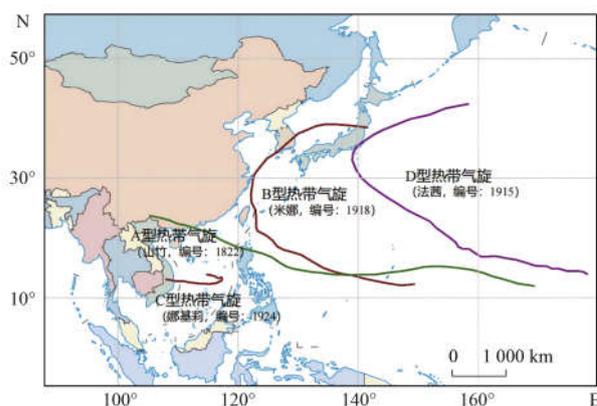
图4 2015~2020年珠三角秋季MDA8浓度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ozone MDA8 in autumn in the PRD from 2015 to 2020

气旋(C型)和远海热带气旋(D型). 其中, A型热带气旋大部分在 15°N 以南、 $130^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 的菲律宾以东海域生成,热带气旋生成后向西北方向运动进入中国南海中北部. B型热带气旋的生成源地范围较大,生成后西北行进至中国东海后转向东北方向. C型热带气旋主要是在 150°E 以西、 10°N 附近生成,之后主要在中国南海或菲律宾以东海域活动. D型热带气旋的生成源地位置大多在 20°N 以南、 150°E 以东海域,之后沿西北方向移至 25°N 附近转向东北方向,或者生成后直接北行,此类热带气旋远离中国大陆,对中国影响很小. 4类气旋的典型路径见图5.

2015~2020年,西北太平洋热带气旋年出现频次在24(2020年)~35次(2018年),其中在夏季和秋季出现的频次最多,分别为78次和75次. 具体到月份来看,8月出现频次最高(39次),其次是9月(31次)、7月(30次)、10月(27次)和11月(17次).

在2015~2020年秋季发生的75次热带气旋过



本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1663号的标准地图制作,底图无修改

图5 不同类型热带气旋典型路径

Fig. 5 Typical paths of different types of tropical cyclones

程中,2019年秋季热带气旋发生次数最多,达到16次;2018年秋季热带气旋发生次数最少,仅为9次. 按照4种热带气旋典型路径分类,2015~2020年秋季A、B、C和D型热带气旋分别出现8、21、26和20次,具体情况见图6.

2.3 热带气旋对珠三角秋季臭氧浓度的影响

由于D型热带气旋路径远离中国影响很小,本研究只关注A、B和C型热带气旋对珠三角臭氧的影响,将D型热带气旋与无热带气旋的情况统一归为“其他”类作为背景情况.

历史数据表明,在2015~2020年秋季,珠三角共出现80个区域 $\rho(\text{MDA8})$ 平均值超标日,其中有47个超标日与A、B或C型热带气旋出现的日期重合,说明热带气旋可能对珠三角臭氧污染有较大的影响. 从珠三角秋季臭氧超标日的 $\rho(\text{MDA8})$ 来看,当A、B和C型热带气旋发生时,臭氧超标日数分别为4、30和13d;在“其他”情况下,超标天数为33d. 从臭氧超标日的 $\rho(\text{MDA8})$ 分布来看(图7),B型热带气旋超标日的 $\rho(\text{MDA8})$ 最大,A型和C型热带气旋超标日的 $\rho(\text{MDA8})$ 较小.

为便于分析,本研究将气旋的生命周期划分为前期(气旋生成后第1d)、中期和后期(气旋消失前1d)这3个阶段. 根据热带气旋中期与前期城市臭氧浓度的变化来评估热带气旋的影响,结果如图8所示. 当B型热带气旋发生时,珠三角各市臭氧浓度增加明显,区域 $\rho(\text{MDA8})$ 平均增幅为 $19\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中珠海、江门等城市 $\rho(\text{MDA8})$ 增幅最大,增幅超过 $20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其他城市 $\rho(\text{MDA8})$ 增幅也在 $10\sim 20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 当A型热带气旋发生时,区域 $\rho(\text{MDA8})$ 平均增幅为 $4.9\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,中山、肇庆和佛山等市臭氧浓度增幅较大,增幅在 $10\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,深圳、东莞和惠州等地臭氧浓度反而下降. 当

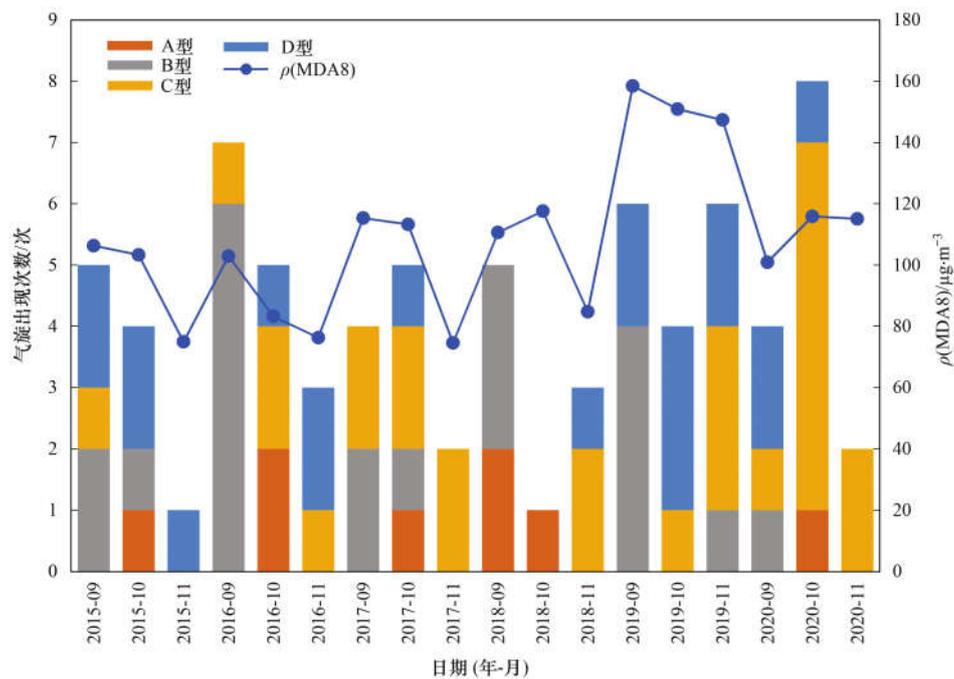


图6 2015~2020年秋季4种热带气旋逐月出现次数

Fig. 6 Frequency of four tropical cyclones in autumn from 2015 to 2020

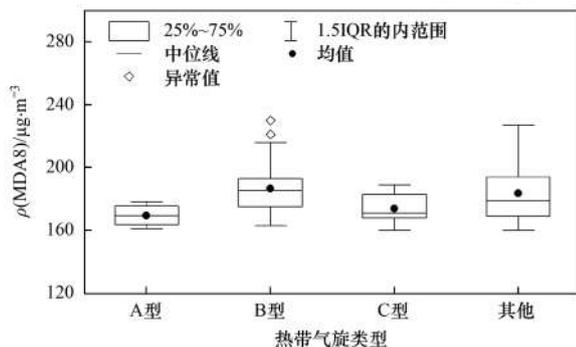


图7 2015~2020年珠三角秋季臭氧超标日的MDA8浓度分布

Fig. 7 Distribution of $\rho(\text{MDA8})$ in the days of ozone exceeding the standard in the PRD in autumn from 2015 to 2020

C型热带气旋发生时,珠三角 $\rho(\text{MDA8})$ 平均增幅为 $4.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中肇庆、佛山和江门 $\rho(\text{MDA8})$ 增幅最大,达到 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,而深圳、珠海和惠州等市浓度反而有所下降.总的来说,珠三角臭氧浓度受B型热带气旋影响的区域和程度最大,且西部城市受影响更大.

在无热带气旋或D型热带气旋的背景情况下,珠三角臭氧平均浓度“优”的频率最高,其次是区域臭氧“良”和最大浓度超标的频率,珠三角臭氧平均浓度超标出现的频率则最低.当热带气旋出现时,这种频率分布结果发生了明显改变(图9).具体来看,对于A型热带气旋而言,在其前期和后期未出现平均臭氧浓度超标的现象;在A型热带气旋的中期,空气质量指数类别达到“良”的频率会有少许升高,出现“优”的频率则有所下降.在B型热带气旋的中后期,珠三角区域臭氧平均浓度出现超标的频率明

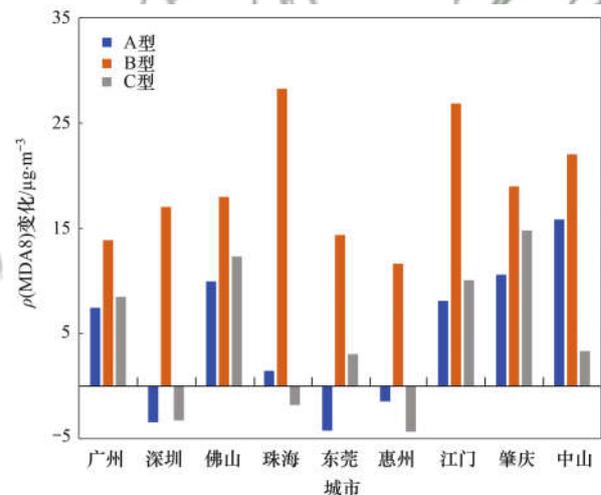


图8 2015~2020年热带气旋对珠三角不同城市的影响

Fig. 8 Influence of tropical cyclones on different cities in the PRD from 2015 to 2020

显升高,同时区域出现臭氧空气质量等级“良”的频率也明显升高,出现“优”的频率则明显下降.对于C型热带气旋而言,在其前期和中期,珠三角区域臭氧出现超标和“良”的频率均有轻微的升高,出现“优”的频率则有轻微的下降.

总的来说,相对于背景情况(无热带气旋或D型热带气旋),在B型热带气旋发生时,珠三角臭氧超标的频率明显升高;在C型热带气旋的前期和中期,区域臭氧超标频率有较明显地升高,但是升高幅度不如B型热带气旋;对于A型热带气旋,在其中期,珠三角臭氧最大浓度超标的频率有一定的抬升,但是区域臭氧平均浓度超标的频率变化不大.

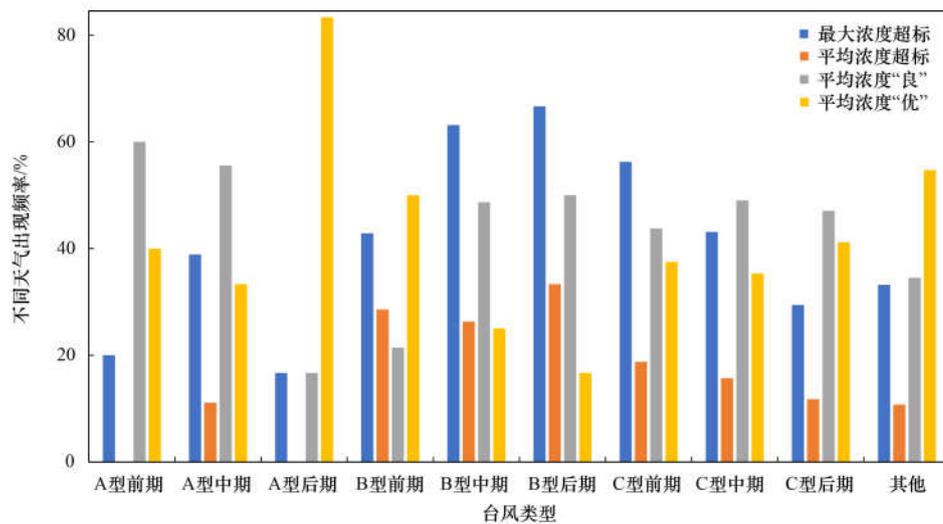


图9 2015~2020年不同热带气旋阶段珠三角不同臭氧浓度水平的出现频率

Fig. 9 Frequency of different ozone concentration levels in the PRD at different tropical cyclone periods from 2015 to 2020

另外,利用 Theil-Sen 斜率估算法^[35]估算了珠三角秋季 $\rho(\text{MDA8})$ 年际变化趋势和变化速率(图10),发现2015~2020年珠三角秋季 $\rho(\text{MDA8})$ 平均值呈上升趋势($P=0.06$),秋季 $\rho(\text{MDA8})$ 平均增长速率为 $3.27 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$;若不考虑热带气旋的影响,秋季 $\rho(\text{MDA8})$ 依然呈上升趋势($P=0.06$),平均增长速率为 $3.96 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$.这个结果说明热带气旋并未影响2015~2020年珠三角秋季臭氧浓度的年际变化趋势,仅对臭氧上升趋势的幅度有一定的影响.

2.4 成因分析

当热带气旋发生时,受其影响,其周边几百公里乃至上千公里范围内的气象场(太阳辐射、云量、气温、风速、相对湿度和垂直风速等)都会发生变化,从而影响到区域臭氧的输送、扩散、清除等物

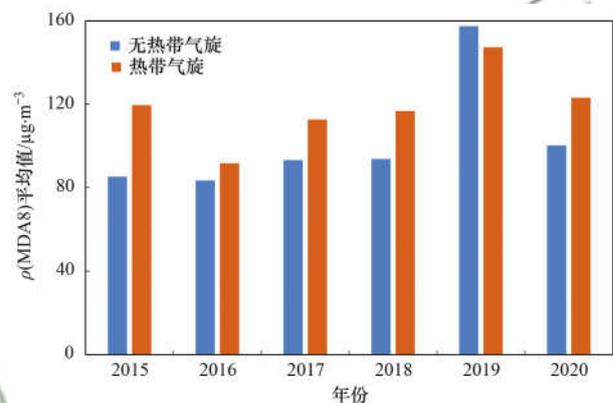


图10 2015~2020年珠三角秋季MDA8平均值

Fig. 10 Average ozone MDA8 in autumn of PRD from 2015 to 2020

理过程以及光化学反应过程,进而对区域臭氧浓度产生影响.2015~2020年,三类热带气旋前期、中期和后期珠三角区域气象要素平均值如表2所示.

表2 2015~2020年热带气旋不同阶段珠三角气象要素平均值

Table 2 Mean of meteorological elements in the PRD at different stages of tropical cyclone periods from 2015 to 2020

热带气旋类型	云量 /%	太阳总辐射 /MJ·m ⁻²	日照时数 /h	平均气温 /°C	最高气温 /°C	相对湿度 /%	降雨量 /mm	地面风速 /m·s ⁻¹
A型前期	77.4	11.9	4.3	25.8	29.2	77.1	1.3	2.3
A型中期	64.8	13.6	5.6	24.8	28.6	72.1	9.9	2.7
A型后期	81.5	8.2	2.0	24.2	27.0	82.6	26.2	3.5
B型前期	64.4	14.7	5.4	27.1	31.1	80.5	11.8	1.8
B型中期	53.8	16.8	7.3	27.2	31.6	75.3	3.1	1.8
B型后期	48.4	17.8	7.5	27.1	31.4	69.1	1.8	2.1
C型前期	63.6	16.1	6.0	23.5	27.4	73.0	0.8	2.3
C型中期	58.8	14.8	6.7	22.8	27.1	67.9	0.9	2.5
C型后期	73.2	11.5	4.3	22.1	25.9	71.9	2.9	2.4
其他(D型或无气旋)	67.1	13.7	4.9	24.5	28.4	78.8	3.2	2.0

太阳辐射影响臭氧的光化学生成反应,二者一般呈正相关关系^[19, 23].从太阳总辐射的前后变化来看,在A型热带气旋的中期,太阳总辐射增加,后期太阳总辐射减少;B型热带气旋的中期和后期,太

阳总辐射增强;C型热带气旋中期和后期,太阳总辐射均有所减弱.云量的变化情况与太阳总辐射类似,在A型热带气旋的中期,云量较前期减少,后期云量增加;在B型热带气旋的中期和后期,云量明

显减少; 在 C 型热带气旋的中期, 云量减少, 后期云量增加。日照也是反映太阳辐射的指标。在日照时数变化方面, 在 A 型热带气旋的中期, 区域日照时数增加, 后期日照时数减少; B 型热带气旋的中期和后期日照时数增加; 在 C 型热带气旋的中期, 日照时数增加, 后期日照时数减少。气温会影响光化学反应速率, 与臭氧浓度一般呈正相关关系^[23], 由表 2 可见, 在 A 型热带气旋的中期和后期, 珠三角气温有所降低; B 型热带气旋的中期和后期区域气温有所升高; C 型热带气旋的中期和后期气温有所降低。

有研究发现, 臭氧浓度与相对湿度成反比^[19]。与热带气旋前期相比, 在 A 型热带气旋的中期, 相对湿度有所降低, 后期相对湿度升高; 在 B 型热带气旋的中后期, 相对湿度降低; 在 C 型热带气旋中期, 相对湿度降低, 后期相对湿度回升。降水的湿清除作用能有效地降低臭氧浓度。在降雨量变化方面, 在 A 型热带气旋的中后期, 降雨量较前期有所增加; B 型热带气旋中后期的降雨量较前期有所减少; C 型热带气旋中后期的降雨量减少, 后期降雨量增加。从地面风速变化来看, A 型热带气旋的中期和后期, 风速增大; B 型热带气旋的中期风速变化不大, 后期风速有所增加; C 型热带气旋的中期风速增加, 后期风速有所降低, 总体变化不大。

总的来说, 当 B 型热带气旋出现时, 地面气象条件变化有利于光化学反应和臭氧浓度积累, 使得臭氧超标可能性增大。当 A 型或 C 型热带气旋出现时, 可能带来气温降低、降雨等不利臭氧污染的气象条件, 从而使得臭氧污染出现频率小于 B 型热带气旋。

除了地面气象要素以外, 高空垂直风速也会影响地面臭氧浓度^[36]。中国香港的历史臭氧探空数据表明, 在高空存在臭氧浓度峰值(图 11), 因此下沉气流可将高空高浓度臭氧输送至近地面, 有助于地面臭氧浓度升高。

如图 12 所示, 在 A 型热带气旋前期, 高空垂直风速微弱; 中期下沉气流变多, 此时有助于地面臭氧浓度升高; 后期上升气流明显增多, 容易形成降雨, 有利于地面臭氧浓度下降。B 型台风前期, 高空

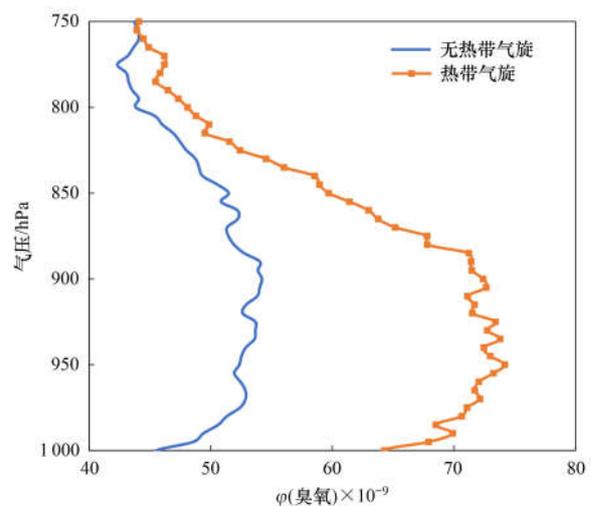


图 11 2015 ~ 2020 年中国香港地区臭氧垂直廓线

Fig. 11 Vertical ozone profile in Hong Kong from 2015 to 2020

盛行微弱的上升气流; 中期和后期下沉气流不断增多, 促进地面臭氧浓度升高。C 型热带气旋前期盛行弱下沉气流; 中期下沉气流进一步增多, 有利于地面臭氧浓度升高; 后期下沉气流减少, 上升气流增多, 有利于地面臭氧浓度降低。

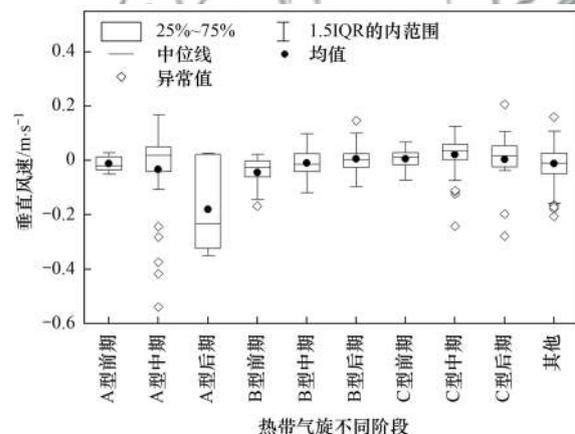


图 12 2015 ~ 2020 年不同热带气旋阶段珠三角 900 hPa 高空垂直风速

Fig. 12 Vertical wind speed at 900 hPa in the PRD at different tropical cyclone periods from 2015 to 2020

此外, 从珠三角东部和西部两个区域的情况来看(表 3), 当 A、B 或 C 型热带气旋出现时, 珠三角西部地区的日照时数、平均气温和日最高气温等要素的增加幅度均比东部大, 有利于臭氧生成, 这可能是在台风外围天气系统影响下, 珠三角西部臭氧增

表 3 2015 ~ 2020 年不同热带气旋发生时珠三角不同区域气象变化

Table 3 Meteorological changes in different regions of the PRD of different tropical cyclones from 2015 to 2020

热带气旋类型	日照时数/h		平均气温/°C		最高气温/°C		相对湿度/%		降水量/mm		地面风速/m·s ⁻¹	
	西部	东部	西部	东部	西部	东部	西部	东部	西部	东部	西部	东部
A 型	1.7	0.9	-0.9	-1.0	0.0	-0.8	-4.6	-4.8	4.7	10.5	0.1	0.3
B 型	2.4	1.6	0.2	0.1	0.7	0.2	-5.2	-4.7	-3.9	-8.4	0.0	-0.1
C 型	1.7	-0.2	-0.5	-0.7	0.2	-0.6	-6.0	-4.4	-0.4	0.2	0.2	0.1

1) 数值为热带气旋中期相较于早期的气象参数变化值, 其中西部采用高要和台山站的气象平均值, 东部采用惠阳、东莞和深圳站的气象平均值

加幅度更大的原因。

3 结论

(1) 2015~2020 年秋季西北太平洋一共发生了 74 次热带气旋过程。其中 A、B、C 和 D 型热带气旋分别为 8 次、20 次、27 次和 19 次。

(2) 珠三角臭氧浓度受 B 型热带气旋影响最大, 在 B 型热带气旋影响下, 珠三角臭氧超标频率明显升高; 受 C 型热带气旋影响时, 区域臭氧超标频率有较明显地升高, 但是升高幅度弱于 B 型热带气旋; 当出现 A 型热带气旋时, 区域臭氧浓度超标频率变化不大。

(3) 当 B 型热带气旋发生时, 珠三角各市臭氧浓度增加明显, 区域 $\rho(\text{MDA8})$ 平均增幅为 $19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中珠海、江门等城市臭氧浓度增幅最大, $\rho(\text{MDA8})$ 增幅超过 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在 A 型或 C 型热带气旋出现时, 珠三角 $\rho(\text{MDA8})$ 的平均增幅在 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 部分城市臭氧浓度可能下降。此外, 珠三角不同城市受热带气旋的影响有明显差异, 西部城市受影响更大。

(4) 2015~2020 年, 珠三角秋季臭氧平均浓度呈上升趋势。若不考虑热带气旋的影响, 秋季臭氧浓度依然呈上升趋势, 说明热带气旋并未影响珠三角秋季臭氧浓度的年际变化趋势, 仅影响了上升速率。

(5) 当发生 B 型热带气旋时, 珠三角太阳辐射增强, 日照变长, 云量减少, 气温升高, 相对湿度降低, 这些变化均有利于光化学反应, 同时下沉气流增多, 下沉气流将高空高浓度臭氧输送至地面, 从而进一步促进地面臭氧浓度升高。当发生 A 型或 C 型热带气旋时, 气象条件变化并不完全有利于臭氧浓度升高, 某些情况下甚至出现降雨等不利气象条件, 从而导致区域臭氧超标频率小于 B 型热带气旋。此外, 在热带气旋影响下, 珠三角西部地区的日照时数、气温等气象要素的增加幅度大于东部, 更有利于臭氧生成。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. http://www.luoshan.gov.cn/departments_news.php?cid=87&id=18556, 2021-09-17.
- [2] Shen L, Jacob D J, Liu X, *et al.* An evaluation of the ability of the Ozone Monitoring Instrument (OMI) to observe boundary layer ozone pollution across China: application to 2005-2017 ozone trends[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(9): 6551-6560.
- [3] Yin C Q, Deng X J, Zou Y, *et al.* Trend analysis of surface ozone at suburban Guangzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133880.
- [4] 张倩倩, 张兴赢. 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国

臭氧时空分布及变化特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1132-1142.

Zhang Q Q, Zhang X Y. Ozone spatial-temporal distribution and trend over China since 2013: insight from satellite and surface observation[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1132-1142.

- [5] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 中国城市 O_3 浓度时空变化特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1120-1131.

Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Spatial-temporal variation of ozone concentration and its driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1120-1131.

- [6] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4168-4179.

He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4168-4179.

- [7] 严茹莎, 王红丽, 黄成, 等. 上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3577-3584.

Yan R S, Wang H L, Huang C, *et al.* Characteristics and control strategies on summertime peak ozone concentration in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3577-3584.

- [8] 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.

- [9] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/>, 2021-09-17.

广东省生态环境厅. 2020 年广东省生态环境状况公报[EB/OL]. http://gdee.gd.gov.cn/xwfb4199/content/post_3266057.html, 2021-09-17.

- [11] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.

Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.

- [12] NRC (National Research Council). Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution [M]. Washington: National Academy Press, 1991.

- [13] Otero N, Sillmann J, Schnell J L, *et al.* Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, **11**(2), doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024005.

- [14] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 气象因素和前体物对中国东部 O_3 浓度分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2273-2282.

Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Impact of meteorological factors and precursors on spatial distribution of ozone concentration in Eastern China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2273-2282.

- [15] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2190-2201.

Qin Y, Xu B, Xia L J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and relationships with meteorological factors in Jiangxi Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2190-2201.

- [16] 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 等. 郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 604-615.
Wang X D, Yin S S, Yang J, *et al.* Characteristics, meteorological influences, and transport source of ozone pollution in Zhengzhou city[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 604-615.
- [17] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1582-1596.
- [18] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 813-820.
Liu J, Wu D, Fan S J, *et al.* Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 813-820.
- [19] 赵伟, 高博, 刘明, 等. 气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 55-66.
Zhao W, Gao B, Liu M, *et al.* Impact of meteorological factors on the ozone pollution in Hong Kong [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 55-66.
- [20] 高平, 庄立跃, 王龙, 等. 广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3527-3538.
Gao P, Zhuang L Y, Wang L, *et al.* Characteristics of surface ozone and impact factors at different station types during the autumn in Guangzhou [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3527-3538.
- [21] Zhao W, Fan S J, Guo H, *et al.* Assessing the impact of local meteorological variables on surface ozone in Hong Kong during 2000-2015 using quantile and multiple line regression models [J]. Atmospheric Environment, 2016, **144**: 182-193.
- [22] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2041-2051.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing city in 2014 [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2041-2051.
- [23] 唐孝炎, 张远航, 邵敏, 等. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] Zhao C, Wang Y H, Zeng T. East China plains: a "basin" of ozone pollution [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(6): 1911-1915.
- [25] Dong Y M, Li J, Guo J P, *et al.* The impact of synoptic patterns on summertime ozone pollution in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2020, **735**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139559.
- [26] Gao D, Xie M, Chen X, *et al.* Systematic classification of circulation patterns and integrated analysis of their effects on different ozone pollution levels in the Yangtze River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117760.
- [27] Huang J P, Fung J C H, Lau A K H, *et al.* Numerical simulation and process analysis of typhoon-related ozone episodes in Hong Kong [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, **110**(D5), doi: 10.1029/2004JD004914.
- [28] Wei X L, Lam K S, Cao C Y, *et al.* Dynamics of the typhoon haitang related high ozone episode over Hong Kong [J]. Advances in Meteorology, 2016, **2016**, doi: 10.1155/2016/6089154.
- [29] Shu L, Xie M, Wang T J, *et al.* Integrated studies of a regional ozone pollution synthetically affected by subtropical high and typhoon system in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(24): 15801-15819.
- [30] Zhan C C, Xie M, Huang C W, *et al.* Ozone affected by a succession of four landfall typhoons in the Yangtze River Delta, China: major processes and health impacts [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, **20**(22): 13781-13799.
- [31] Deng T, Wang T J, Wang S Q, *et al.* Impact of typhoon periphery on high ozone and high aerosol pollution in the Pearl River Delta region [J]. Science of the Total Environment, 2019, **668**: 617-630.
- [32] 叶家成, 杜新观, 余锦华. 影响中国大陆热带气旋路径分类及其特征研究[J]. 气象科学, 2019, **39**(3): 304-311.
Ye J C, Du X G, Yu J H. Study on the classification and characteristics of tropical cyclone tracks in mainland China [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, **39**(3): 304-311.
- [33] 杨柳, 王体健, 吴蔚, 等. 热带气旋对香港地区臭氧污染影响的初步研究[J]. 热带气象学报, 2011, **27**(1): 109-117.
Yang L, Wang T J, Wu W, *et al.* The preliminary study on the effect of tropical cyclones on ozone pollution in Hong Kong [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, **27**(1): 109-117.
- [34] 中国气象局国家气候中心. 气候系统监测·诊断·预测·评估 [EB/OL]. https://cmdp.ncc-cma.net/extreme/typhoon.php?product=typhoon_moni&catId=21#typhoon, 2021-09-17.
- [35] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, **63**(324): 1379-1389.
- [36] Jiang Y C, Zhao T L, Liu J, *et al.* Why does surface ozone peak before a typhoon landing in southeast China? [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(23): 13331-13338.

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 Transport 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-ji, <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 Autochthonic 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, SONG 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)