

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 ..... 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 ..... 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 ..... 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O<sub>3</sub> 驱动因素挖掘 ..... 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 ..... 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O<sub>3</sub> 来源解析 ..... 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 ..... 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 ..... 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 ..... 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 ..... 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空变化及驱动机制多维探测 ..... 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM<sub>2.5</sub> 小时浓度估算 ..... 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程输送和增长特性 ..... 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 ..... 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 ..... 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 ..... 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 ..... 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 ..... 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 ..... 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 ..... 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 ..... 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 ..... 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 ..... 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 ..... 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 ..... 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 ..... 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 ..... 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 ..... 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 ..... 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 ..... 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 ..... 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 ..... 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 ..... 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 ..... 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化水中有机微污染物 ..... 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 ..... 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 ..... 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 ..... 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 ..... 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 ..... 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 ..... 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 ..... 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 ..... 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 ..... 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 ..... 梁成冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 ..... 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 ..... 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 ..... 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 ..... 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 ..... 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 ..... 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 ..... 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 ..... 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 ..... 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 ..... 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

# 2022年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析

李婷苑<sup>1</sup>, 陈靖扬<sup>1</sup>, 龚宇<sup>1</sup>, 沈劲<sup>2</sup>

(1. 广东省生态气象中心(珠三角环境气象预报预警中心), 广州 510640; 2. 广东省生态环境监测中心, 国家环境保护区域空气质量监测重点实验室, 广东省环境保护大气二次污染研究重点实验室, 广州 510308)

**摘要:** 气象条件是造成臭氧季节变化的重要原因, 为了解广东省冬季臭氧污染的气象成因, 使用空气质量和气象要素的地面、垂直探测资料和再分析资料, 选取了2022年1月3~6日广东省臭氧中度污染过程与2015~2021年秋季(高污染季)进行对比分析。结果表明: ①污染过程期间超标城市总数为8个, 其中1月4日肇庆达中度污染( $219 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ); 广东省 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 平均值为 $123 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 较历史秋季平均浓度偏高了21%, 但臭氧污染影响范围小于历史秋季污染过程。②风速偏小、日照时数偏长和局地环流影响下的气流回流效应是此次臭氧污染过程最主要的地面气象条件, 气温偏低可能是这次污染过程影响范围偏小的主要原因。③垂直探测表明, 夜间至早晨的贴地逆温, 配合下沉气流偏强、风速偏小, 使得上午时段 $\text{NO}_2$ 浓度维持较高水平, 进一步促使臭氧浓度增量比非污染时段偏高 $34.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 残留层臭氧下传加剧1月4日臭氧污染。④气流轨迹分析显示臭氧存在水平输送和高空地面混合, 近地面不同高度潜在源区主要集中在广东省内, 此次污染过程受广东省本地排放影响较大。

**关键词:** 广东省; 冬季; 臭氧污染; 气象成因; 潜在源区

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3695-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206097

## Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province

LI Ting-yuan<sup>1</sup>, CHEN Jing-yang<sup>1</sup>, GONG Yu<sup>1</sup>, SHEN Jin<sup>2</sup>

(1. Guangdong Ecological Meteorological Center, Pearl River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Guangzhou 510640, China; 2. Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring, Guangdong Environmental Protection Key Laboratory of Secondary Air Pollution Research, Guangdong Ecological Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China)

**Abstract:** Meteorological conditions play an important role in seasonal ozone variations. In order to understand the meteorological formation mechanisms of ozone pollution in Guangdong Province in winter, the moderate ozone pollution process in Guangdong Province from January 3-6, 2022 was selected for comparison with that in autumn (high pollution season) of 2015 to 2021. The research was based on ground and vertical sounding data and reanalysis data of air quality and meteorological elements. Eight cities exceeded the standard during the pollution process, among which Zhaoqing showed moderate pollution ( $219 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) on January 4<sup>th</sup>. The average  $\text{O}_3-8\text{h}$  concentration in Guangdong Province was  $123 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , which was 21% higher than that in historical autumn. However, its scope of pollution was less than the historical pollution processes in autumn. Lower wind speed, longer sunshine hours, and airflow reflux effect under local circulation were the most important ground-level meteorological conditions for the ozone pollution process, whereas lower temperature might be an important reason for its small scope of pollution. Vertical detection analysis showed that the combined effect of low-level temperature inversion layer, stronger downdraft, and lower wind speed kept the  $\text{NO}_2$  concentrations at a high level, and further induced a higher increment of ozone concentration in the morning ( $34.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  higher than that in the non-pollution period). The downward transport of ozone in the residual layer aggravated the ozone pollution on January 4<sup>th</sup>. The accumulation of ozone and its precursors was an important factor of the aggravation of ozone pollution the following day. Airflow trajectory analysis revealed that the ground-level ozone was affected by horizontal transport and vertical mixing of pollutants. Potential sources at 10 m were mainly distributed in the coastal areas from Fujian to Guangdong, and the scope of potential sources was concentrated in Guangdong as the height increased. Airflow backward trajectories at different heights during the ozone process passed over the areas of potential sources in Guangdong, which indicated that the local emissions in Guangdong had a greater impact on the ozone pollution process.

**Key words:** Guangdong Province; winter; ozone pollution; meteorological mechanism; potential sources

广东省作为我国经济发达地区, 经过多年的大气污染治理, 颗粒物浓度显著下降, 但臭氧浓度却维持较高水平<sup>[1]</sup>. 高浓度的臭氧不仅对农作物生长和人体健康造成危害<sup>[2,3]</sup>, 而且对气候变化也有一定的影响<sup>[4,5]</sup>.

近地面臭氧主要是通过复杂的光化学反应生成的二次污染物, 其前体物包括人类活动排放和自然排放的氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、挥发性有机物(VOCs)和

一氧化碳(CO)等污染物<sup>[6~9]</sup>. 臭氧与前体物呈高度

收稿日期: 2022-06-08; 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2020B1111360003); 国家重点研发计划项目(2019YFC0214605, 2018YFC0213902); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515011539, 2019A1515011808); 广东省气象局科技创新团队项目(GRMC202003); 广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2020M12)

作者简介: 李婷苑(1988~), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为污染气象学, E-mail: l-tingyuan@163.com

非线性关系<sup>[10~13]</sup>,近年减排措施使得广东省臭氧生成敏感区发生了一定的变化,VOCs 敏感区范围有所缩小,转变为混合敏感区<sup>[14]</sup>.臭氧浓度的高低除了与前体物排放有关外,还与气象条件密切相关<sup>[15~21]</sup>.大气环流和局地气象因子在臭氧的生成、累积和输送过程中作用显著,同时也影响着天然源的排放,如生物挥发性有机物(BVOCs)和土壤 NO<sub>x</sub> 排放等<sup>[22~24]</sup>.高温、低湿、强辐射等气象条件有利于臭氧的生成<sup>[25~29]</sup>.风影响着污染物的累积和输送<sup>[30,31]</sup>,强天气(如台风和高空急流等)亦可将平流层臭氧输送至对流层,甚至是近地面<sup>[32,33]</sup>.大气边界层的日变化可使得白天形成的臭氧在夜间残留层内储存积累,并于次日下传加剧近地面臭氧污染<sup>[34,35]</sup>.气候变化通过影响大气环流、臭氧前体物的排放和臭氧的光化学反应过程<sup>[36,37]</sup>,进而影响臭氧浓度的变化,已有研究指出由于气候变化的作用强于排放减少的作用,臭氧浓度呈现上升的现象<sup>[38]</sup>.2020年疫情封控期间各地污染排放显著减少,但是对于臭氧浓度变化的影响,华东和华南地区仍有大片区域的气象贡献大于排放贡献<sup>[39,40]</sup>;此外,2020年2月21~22日仍未全面复工复产,广东省却出现了一次臭氧污染过程,由此可见不利气象条件对臭氧污染的影响不容忽视.

广东省地处热带和亚热带季风气候区,强辐射、高气温的气候条件有利于光化学反应生成臭氧<sup>[41]</sup>,同时在东亚冬季风影响下,偏北气流易将内陆污染物输送至华南地区<sup>[42,43]</sup>.广东省臭氧污染主要发生在秋季,冬季臭氧浓度最低<sup>[44]</sup>,但近年广东省地区在冬季也会出现臭氧污染<sup>[45]</sup>,冬季臭氧污染问题已引起政府和社会的广泛关注.气象条件是造成臭氧季节变化的重要原因<sup>[46]</sup>,以往对于广东省臭氧污染气象成因及来源的研究大多集中在夏、秋两季,缺少对冬季臭氧污染气象成因的分析研究.本文使用空气质量数据、气象地面和垂直探测数据以及再分析资料,结合 HYSPLIT 后向轨迹模型和潜在来源贡献函数等分析方法,对比历史秋季臭氧污染气象条件,对2022年1月广东省一次臭氧中度污染过程的气象成因及贡献源区开展研究分析,以期对臭氧污染防治对策的制定提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究采用的数据为2015~2021年秋季(9~11月)和2022年1月广东省空气质量和气象要素的地面、垂直探测资料和再分析资料,其中广东省21个城市地面臭氧和 NO<sub>2</sub> 浓度监测数据来源于广

东省生态环境监测中心,为保证数据的可比性,将监测数据统一转换成实况数据;广东省86个国家气象站地面气象要素监测数据、风廓线雷达监测数据和垂直探空数据来源于广东省气象局;臭氧浓度和气象再分析资料采用欧洲中心 ERA5 和美国 FNL 资料,空间分辨率分别为 0.25° × 0.25° 和 1° × 1°,时间分辨率分别为 1 h 和 3 h,ERA5 数据垂直方向由 1 000 ~ 200 hPa 共 23 层,FNL 数据垂直方向由 1 000 ~ 20 hPa 共 23 层.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 回流指数

回流指数 RF (recirculation factor) 可用来表征地面水平风场对污染物的有效输送能力<sup>[47]</sup>.若 RF 接近 1,代表风场将污染物平直稳定地输送至下风向;若 RF 接近 0,则代表风场使污染物回流堆积效果明显,污染物没有得到有效输送.具体公式如下:

$$RF = \sqrt{\left(\sum_{i=t-\Delta T}^{i=t} u_i\right)^2 + \left(\sum_{i=t-\Delta T}^{i=t} v_i\right)^2} / \sum_{i=t-\Delta T}^{i=t} \sqrt{u_i^2 + v_i^2} \quad (1)$$

式中,  $t$  为国家气象站逐小时观测数据的相应时刻,  $\Delta T$  为时间间隔,为体现 1 d 内局地环流(如海陆风和山谷风等)的影响,  $\Delta T$  取 23 h,以此来反映 1 d 内风场是否有利于污染物向下风向平直输送;  $u_i$  为  $i$  时刻水平风场的东西分量,  $v_i$  为  $i$  时刻水平风场的南北分量.

#### 1.2.2 后向轨迹分析

后向轨迹模式(HYSPLIT)使用 NCEP 的全球资料同化系统 GDAS 的 FNL 全球分析资料,模拟 2015~2021 年冬季和 2022 年 1 月 3~6 日抵达肇庆(112.50°E, 23.25°N) 10、500 和 1 000 m 高度的每日 24 h 对应的 72 h 后向轨迹数据.

#### 1.2.3 污染物潜在贡献源分析法(PSCF)

潜在源区贡献函数 PSCF 通常用来表征轨迹途经网格点对接受点的潜在贡献,该方法使用超过设定阈值的轨迹与所有轨迹在途经区域停留时间的比值计算得到,PSCF 的值越大代表经过此网格的气团对接受点的空气质量影响的概率越大<sup>[48]</sup>.PSCF 的误差会随着网格与接受点距离增加而增加,为了减小不确定性,引入权重函数  $W_{ij}$ <sup>[48]</sup>,计算公式如下:

$$WPSCF_{ij} = W_{ij} \cdot PSCF_{ij} = W_{ij} \cdot \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (2)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 80 < n_{ij} \\ 0.72, & 20 < n_{ij} \leq 80 \\ 0.42, & 10 < n_{ij} \leq 20 \\ 0.05, & n_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $m_{ij}$  为接受点臭氧浓度超过  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时, 轨迹经过网格  $(i, j)$  的轨迹点总数;  $n_{ij}$  为经过网格  $(i, j)$  的所有轨迹点总数。

1.2.4 浓度权重轨迹分析法 (CWT)

权重潜在源贡献分析法 CWT 通过计算网格点的污染权重指数来分析其对接受点的污染贡献<sup>[49]</sup>, CWT 同样适用 PSCF 引入的权重函数  $W_{ij}$ , 即:

$$WCWT_{ij} = W_{ij} \cdot CWT_{ij} = W_{ij} \cdot \left( \sum_{k=1}^M \tau_{ijk} \right)^{-1} \cdot \sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk} \quad (4)$$

式中,  $C_k$  为第  $k$  条轨迹到达观测点时对应的臭氧浓度,  $\tau_{ijk}$  为第  $k$  条轨迹在网格  $(i, j)$  的轨迹点数,  $M$  为气流轨迹总数。

2 结果与讨论

2.1 臭氧污染过程概况

图 1 给出 2022 年 1 月 3 ~ 6 日广东省 21 地市  $\text{O}_3$ -8h 浓度及等级, 图 2 给出 2022 年 1 月 3 ~ 6 日广

东省 21 地市  $\text{O}_3$ -8h 平均浓度分布。可以看到, 2022 年 1 月 3 ~ 6 日广东省共出现 1 个城市臭氧中度污染和 7 个城市臭氧轻度污染, 珠江口及其以西市县臭氧浓度明显高于珠江口以东市县, 臭氧浓度超标出现在珠三角地区 (佛山、东莞、中山、江门、肇庆) 和粤西地区 (云浮、湛江), 其中 1 月 4 日肇庆  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  为  $219 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 达中度污染。与历史 (2015 ~ 2021 年) 秋季  $\text{O}_3$ -8h 浓度进行对比 (表 1), 2022 年 1 月 3 ~ 6 日广东省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  平均值 ( $123 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 显著高于历史秋季浓度水平 ( $102 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 偏高了 21%; 前体物  $\text{NO}_2$  浓度平均值亦显著高于历史秋季水平 (偏高 52%)。另外可以看到, 此次臭氧污染过程日平均污染城市总数为 2 个, 影响范围小于历史秋季污染过程。

2.2 天气形势

图 3 给出此次臭氧中度污染过程的天气形势, 副热带高压 (以下简称副高) 控制下的晴热天气对华南地区的臭氧污染具有重要影响<sup>[50]</sup>, 副高的位置

日期(月-日)	广州	深圳	珠海	佛山	东莞	中山	江门	肇庆	惠州	汕头	潮州	揭阳	汕尾	梅州	河源	韶关	清远	云浮	阳江	茂名	湛江
01-03	105	103	123	144	128	119	182	168	115	131	122	138	128	84	94	105	105	150	157	123	115
01-04	160	121	130	197	164	108	159	219	130	122	120	141	127	98	96	106	149	163	137	99	119
01-05	129	122	114	146	150	162	128	120	103	111	92	111	116	85	109	131	115	88	130	106	104
01-06	94	110	126	104	99	150	112	124	97	112	82	84	106	72	92	80	95	114	147	152	183

优 良 轻度 中度

$\text{O}_3$ -8h 浓度单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 1 2022 年 1 月 3 ~ 6 日广东省 21 地市  $\text{O}_3$ -8h 浓度和等级

Fig. 1  $\text{O}_3$ -8h concentration and levels in 21 cities of Guangdong Province from January 3-6, 2022

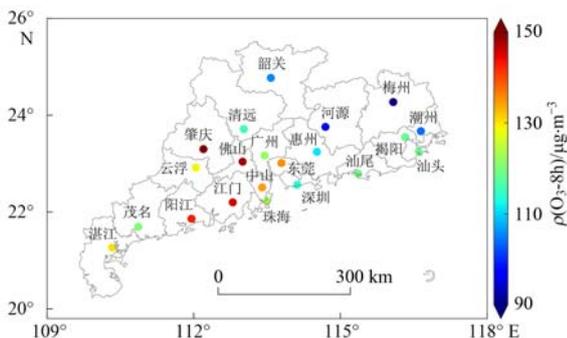


图 2 2022 年 1 月 3 ~ 6 日广东省 21 地市  $\text{O}_3$ -8h 平均浓度分布

Fig. 2 Distribution of  $\text{O}_3$ -8h average concentration in 21 cities of Guangdong Province from January 3-6, 2022

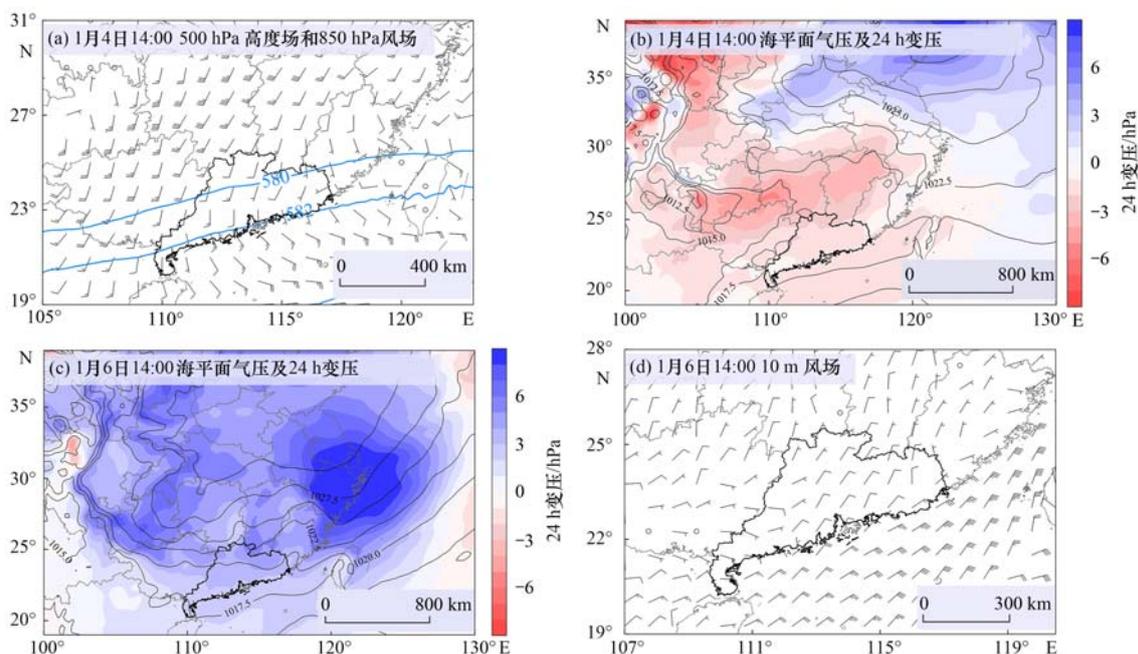
表 1 2022 年 1 月 3 ~ 6 日臭氧统计特征与 2015 ~ 2021 年秋季对比  
Table 1 Comparison of ozone statistical characteristics between 3 to 6 January, 2022 and winter of 2015 to 2021

项目	$\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_2)$ $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	污染过程平均每日 污染城市总数/个
2022 年 1 月 3 ~ 6 日	123	38	2
2015-2021 年秋季	102	25	5

随季节作南北移动, 每年秋季副高逐渐南撤东退, 此次污染过程副高位于广东省以东以南的太平洋海域, 广东省受 850 hPa 反气旋环流影响, 这种低层反气旋的天气形势同样也是对应稳定或下沉气流, 天气晴好<sup>[51,52]</sup>, 在低空形成“锅盖”使得污染物在近地面堆积<sup>[53]</sup>。地面冷空气偏弱偏北, 主要影响长江以北地区, 广东省处于负变压区, 在负变压区配合晴好天气, 气温迅速回升; 地面等压线稀疏, 以均压场控制为主, 气压梯度力小, 地面风力弱, 不利于污染物的稀释和扩散。1 月 6 日冷空气影响广东省地区, 地面为较一致的东北风, 在冷空气影响下 1 月 7 日臭氧污染过程结束。因此, 在 850 hPa 反气旋环流配合地面均压场的天气形势影响下的气象条件有利于臭氧在污染源附近生成并堆积, 从而造成臭氧污染过程。

2.3 地面气象条件

表 2 给出 2022 年 1 月 3 ~ 6 日臭氧污染过程及历史秋季的气象要素对比, 可以看到, 此次臭氧中度



(a) 500 hPa 高度场(等值线)和 850 hPa 风场(空心圆表示风速小于  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,下同); (b)和(c) 海平面气压(等值线)及 24 h 变压(填色); (d) 10 m 风场; (a)和(b) 1月4日 14:00,(c)和(d) 1月6日 14:00

图3 2022年1月4日和1月6日14:00天气形势

Fig. 3 Synoptic circulation at 14:00 on January 4 and January 6, 2022

污染过程风速偏小、日照时数偏长、气压偏高。风速偏小有利于污染物在排放源附近堆积,过程平均风速为  $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,明显低于 2015~2021 年秋季平均风速( $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),1月6日由于广东省受冷空气影响,整体风速增大,过程平均日照时数为 6.9 h,显著高于秋季平均值,日照时数越长,大气光化学反应的持续时间也越长,越有利于臭氧的生成。过程平均气压为  $1009.3 \text{ hPa}$ ,高于历史秋季平均值。气温、相对湿度和紫外辐射是影响臭氧生成的重要气象条件,但此次污染过程气温偏低、相对湿度偏高、紫外辐射偏低,为进一步分析气象因素对臭氧生成的影响,表3给出 2015~2021 年秋季广东省发生臭氧

污染的气象因子阈值。当广东省秋季发生臭氧污染过程时,地面风速范围为  $1.4 \sim 3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,气温的范围为  $18.5 \sim 30.7^\circ\text{C}$ ,气压介于  $992.7 \sim 1013.1 \text{ hPa}$ ,相对湿度的范围为  $49.5\% \sim 87.4\%$ ,日照时数的范围为  $1.5 \sim 10.9 \text{ h}$ ,总紫外辐射介于  $309.6 \sim 738.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。对比表2可知,2022年1月3~6日相对湿度和紫外辐射处于历史秋季臭氧污染过程的相对湿度和总紫外辐射阈值范围内,较为有利于臭氧生成。气温是臭氧生成的重要环境条件,污染过程期间平均气温为  $17.5^\circ\text{C}$ ,低于 2015~2021 年秋季臭氧污染过程气温阈值,因此气温偏低可能是这次污染过程影响范围偏小的重要原因。

表2 2022年1月3~6日气象要素特征及2015~2021年秋季对比

Table 2 Comparative analysis of meteorological characteristics between January 3-6, 2022 and winter of 2015 to 2021

日期 (年-月-日)	风速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	气温 $/^\circ\text{C}$	气压 $/\text{hPa}$	相对湿度 $/\%$	日照时数 $/\text{h}$	总紫外辐射 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
2022-01-03	1.6	16.5	1011.1	75.3	8.6	426.5
2022-01-04	1.6	17.1	1009.5	78.2	7.1	426.7
2022-01-05	1.7	18.7	1007.4	78.2	6.0	347.2
2022-01-06	2.4	17.7	1009.2	76.8	5.8	364.2
2015~2021年秋季	2.1	24.1	1004.9	76.7	5.6	459.1

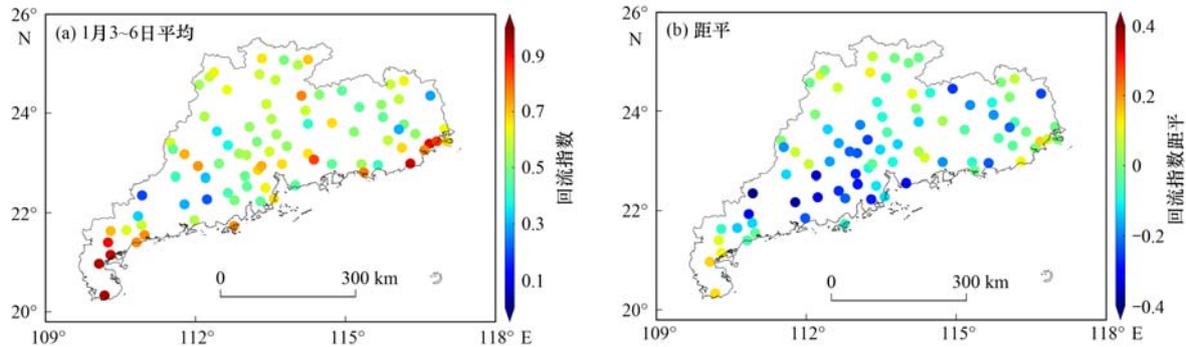
表3 2015~2021年秋季臭氧污染过程的气象因子阈值

Table 3 Meteorological factor thresholds for ozone pollution processes in autumn from 2015 to 2021

项目	$\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	风速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	气温 $/^\circ\text{C}$	气压 $/\text{hPa}$	相对湿度 $/\%$	日照时数 $/\text{h}$	总紫外辐射 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
平均值	133.7	1.9	25.2	1004.4	72.9	7.7	550.1
最大值	201.7	3.5	30.7	1013.1	87.4	10.9	738.5
最小值	81.6	1.4	18.5	992.7	49.5	1.5	309.6

广东省北靠南岭,南临南海,受海陆风、山谷风、城市热岛环流等局地环流影响显著<sup>[54~56]</sup>,在这些局地环流影响下,易使得污染物在一段时间内兜回本地,从而加重臭氧污染.图4给出2022年1月3~6日广东省平均回流指数及距平分布,可以看到,污染过

程期间珠江口西侧回流指数较小,大部分站点平均回流指数小于0.5,全省大部分站点回流指数较历史秋季偏低,特别是珠江口西侧偏低更为显著(偏低0.2~0.5),说明回流效应明显增强,这可能是此次污染过程主要发生在珠三角西部和粤西的重要原因.



距平为2022年1月3~6日平均值减去  
2015~2021年秋季平均值

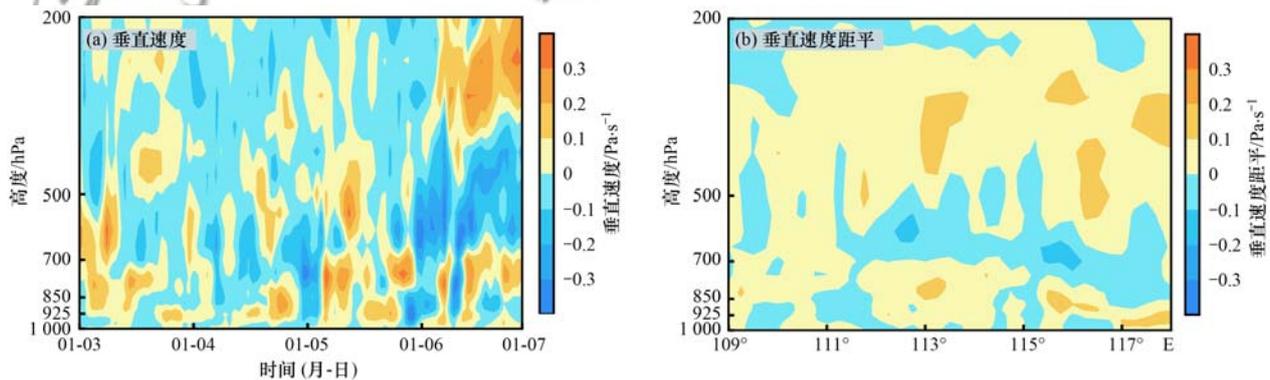
图4 2022年1月3~6日广东省平均回流指数和距平分布

Fig. 4 Distribution of averaged reflux index and anomalies in Guangdong from January 3-6, 2022

#### 2.4 垂直气象条件

大气垂直速度对污染物的变化具有重要影响,当受强下沉气流或持续时间长的下沉气流控制时,污染物无法向上扩散,易造成贴地层的空气污染指数猛增<sup>[57]</sup>.图5给出2022年1月3~6日肇庆市垂直速度垂直分布变化以及沿23.25°N垂直速度距平垂直剖面,污染过程期间,在反气旋环流的作用下,对流层低层(700 hPa以下)不同高度

均存在下沉气流[图5(a)],与历史秋季进行对比,此次臭氧污染过程下沉气流偏强[图5(b)],使得污染物在近地面堆积;另外,1月3日午后近地面(850 hPa以下)以上升运动为主,1月3日夜至1月4日在近地面出现持续的下沉气流,有利于夜间残留层内(975 hPa左右)储存丰富的臭氧(图6)并于次日下传至近地面<sup>[34,35]</sup>,从而进一步加剧臭氧污染.



距平为2022年1月3~6日平均值减去2015~2021年秋季平均值

图5 2022年1月3~6日肇庆市垂直速度垂直分布逐时变化和沿23.25°N垂直速度距平垂直剖面

Fig. 5 Hourly variation in vertical profile of vertical velocity in Zhaoqing from January 3-6, 2022 and vertical profile of vertical velocity anomalies along 23.25°N

图7给出了2022年1月4日云浮和江门风廓线图,可以看到,两个站点在400 m高度以下均以静小风为主,且均小于历史秋季平均风速,近地面大气稀释扩散能力差,有利于污染物积聚在区域内.午后至傍晚时段,静小风区域扩展至1500 m左右高空,风速显著低于历史秋季平均风速,水平扩散条件较差,不利于污染物的水平扩散.同时可以看到,对于

江门站点,中午前后500 m左右以东北风为主,傍晚至夜间段转为东南风,配合地面午后偏南风,夜间偏北风(图略),海陆风效应明显,同时南北风转换易导致污染物回流,并在区域内积聚和相互作用,从而有利于区域臭氧污染的形成.

气温的垂直分布表征大气层结的稳定度,影响湍流活动的强弱,逆温层是分析空气污染潜势的重

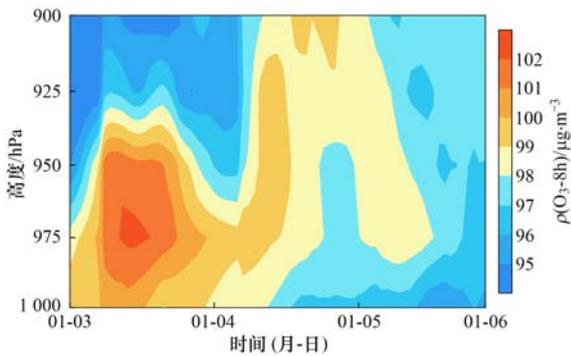
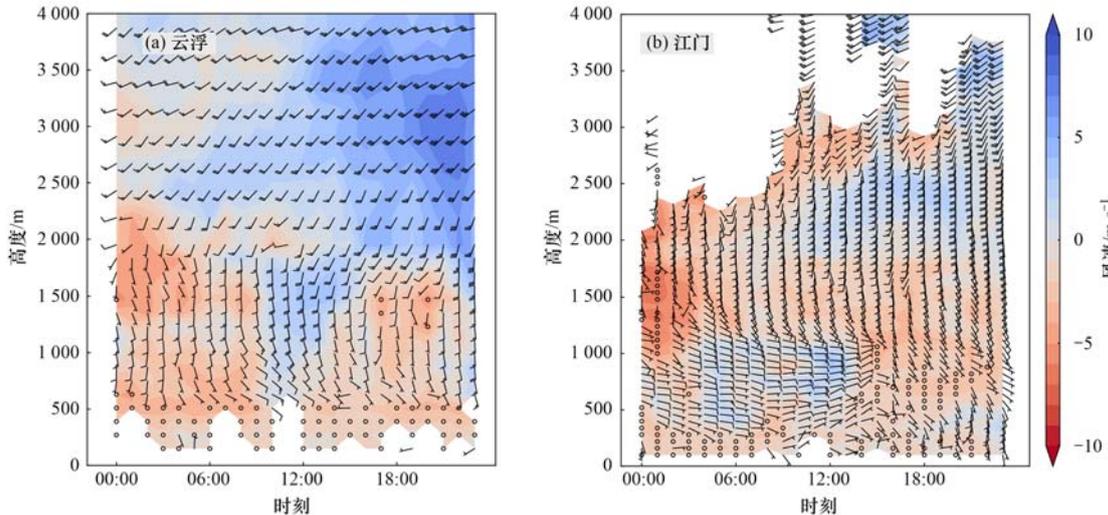


图 6 2022 年 1 月 3 ~ 5 日肇庆臭氧浓度垂直分布逐时变化  
Fig. 6 Hourly variation in vertical profile of ozone concentration in Zhaoqing from January 3-5, 2022

要条件,直接关系着地面污染程度<sup>[58]</sup>.图 8 给出 2022 年 1 月 3 ~ 6 日 08:00 清远和阳江探空站温度

垂直廓线,可以看到,此次污染过程大气层结非常稳定,700 hPa 以下存在多层逆温现象.晴朗少云且小风的夜晚,地面长波辐射使得地面大量失去热量而不断冷却,近地面的空气也随之冷却,从而形成明显的贴地逆温<sup>[59]</sup>.在这次过程中,上午 08:00 仍存在明显的贴地逆温,贴地逆温会限制近地面湍流运动,阻碍下方垂直运动的发展,在贴地逆温的作用下,前体物 NO<sub>2</sub> 在近地面累积,配合下沉气流和近地面小风条件,NO<sub>2</sub> 较高浓度时段明显长于污染过程前后,在上午时段 NO<sub>2</sub> 浓度仍然维持较高水平,使得臭氧浓度增量明显高于非污染时段,1 月 3 ~ 5 日 09:00 ~ 12:00 臭氧浓度总增量平均为 87.7 μg·m<sup>-3</sup>,比污染前后(1 月 1 ~ 2 日和 1 月 7 ~ 8 日)增量偏高了 34.2 μg·m<sup>-3</sup>(图 9).



色柱为该时刻风速减去 2015 ~ 2021 年秋季对应时刻的平均风速

图 7 2022 年 1 月 4 日云浮和江门风廓线

Fig. 7 Wind profiles over Yunfu and Jiangmen on January 4, 2022

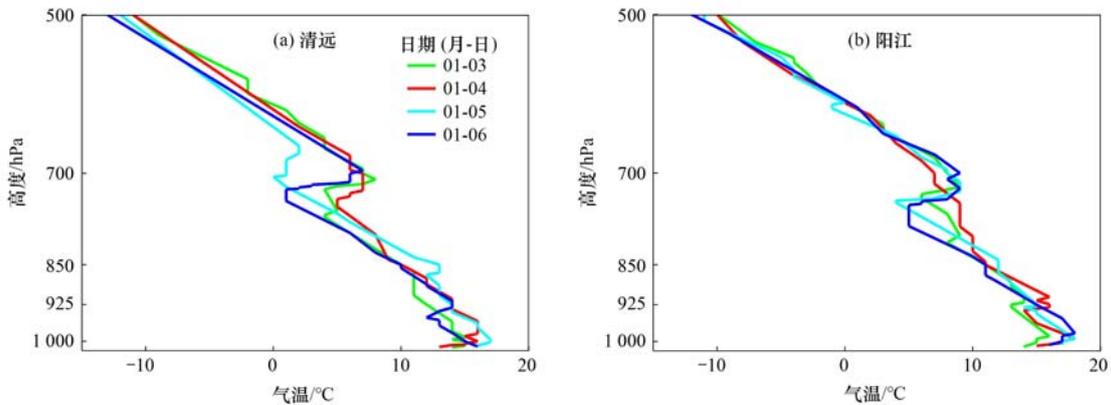


图 8 2022 年 1 月 3 ~ 6 日 08:00 探空站温度垂直廓线

Fig. 8 Temperature vertical profile of sounding station at 08:00 from January 3-6, 2022

2.5 后向轨迹及潜在源区分析

对 2022 年 1 月 4 日 14:00 到达中度污染城市肇庆市的 120 h 后向轨迹进行分析(图 10),10、500 和 1 000 m 高度气流前期均为往南路径,到达珠三角

东部沿海后顺时针兜转回流至肇庆市.10 m 高度的后向轨迹来自江西 1 000 m 以上高度,随着时间推移逐渐下沉,可能会将残留层内或高层的臭氧输送至地面.500 m 和 1 000 m 高度的后向轨迹均来自长三

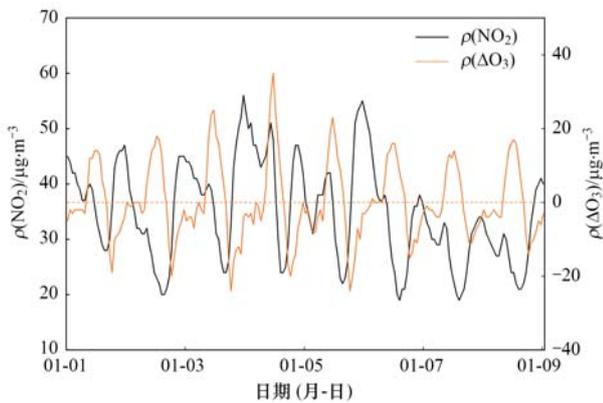


图 9 2022 年 1 月 1 ~ 8 日广东省臭氧浓度增量和 NO<sub>2</sub> 浓度逐时变化

Fig. 9 Hourly variation in ozone concentration increment and NO<sub>2</sub> concentration in Guangdong from January 1-8, 2022

角区域,经东部沿海到达肇庆. 500 m 高度的 120 h 后向轨迹基本都在 500 m 以下,以近地面影响为主. 1 000 m 高度的后向轨迹由 2 000 m 左右高空下沉至地面,而后又逐渐抬升,使得高空和地面的污染物在近地面混合累积.

图 11 给出了 2015 ~ 2021 年冬季肇庆市 10、500 和 1 000 m 后向轨迹的 WPSCF 结果,可见,10 m 高度的潜在源主要集中在福建至广东沿海,WPSCF 值高于 0.25,随着高度的升高,浙江和福建沿海的 WPSCF 高值区逐渐消失. 另外,对于 10 m 高度后向

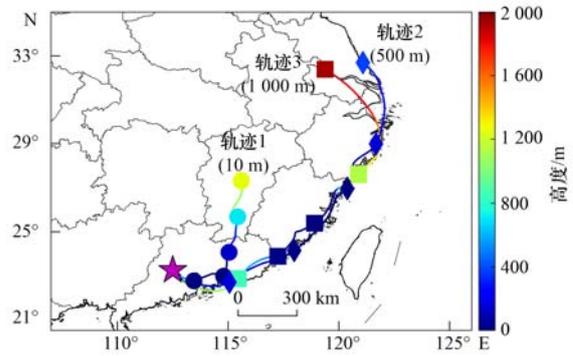


图 10 2022 年 1 月 4 日 14:00 到达肇庆气流 120 h 后向轨迹

Fig. 10 The 120 h backward trajectory arriving in Zhaoqing at 14:00 on January 4, 2022

轨迹的 WPSCF 值,在湖南省部分地区存在 WPSCF 高值区,而 500 m 和 1 000 m 高度的后向轨迹 WPSCF 值则在江西省部分地区存在 WPSCF 高值区. 对比不同高度的 WCWT 值(图 12),WCWT 分析结果与 WPSCF 具有较好的一致性,对于 10 m 高度后向轨迹的 WCWT 值,福建至广东沿海和湖南东部对肇庆市臭氧贡献 > 70  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 对于 500 m 高度后向轨迹的 WCWT 值,广东东部至珠三角沿海和江西与湖南交界处至粤北对肇庆市臭氧贡献 > 70  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 1 000 m 高度后向轨迹的 WCWT 高值区 (> 70  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 则主要集中在珠三角沿海和粤北地区. 结

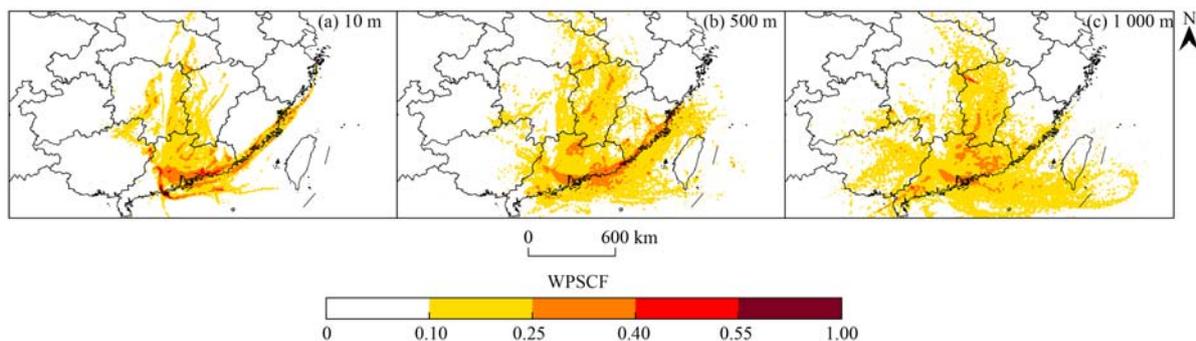


图 11 2015 ~ 2021 年冬季肇庆市臭氧潜在源 WPSCF 值

Fig. 11 WPSCF of potential sources of ozone in Zhaoqing in winter from 2015 to 2021

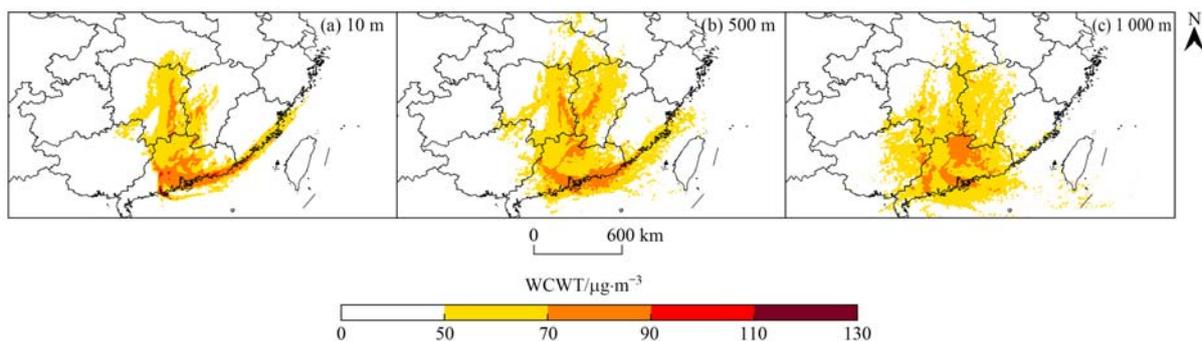


图 12 2015 ~ 2021 年冬季肇庆市臭氧潜在源 WCWT 值

Fig. 12 WCWT of potential sources of ozone in Zhaoqing in winter from 2015 to 2021

合图 10 可知,此次臭氧中度污染过程不同高度的气流后向轨迹均经过影响肇庆市臭氧的主要源区,广东省本地排放影响较大(WPSCF 和 WCWT 值均较高),江西和福建沿海排放对此次臭氧污染过程也有一定影响。

### 3 结论

(1)在反气旋环流和地面均压场的天气形势下,2022 年 1 月 3~6 日广东省出现一次臭氧中度污染过程,臭氧污染区域为珠三角西部和粤西地区,其中 1 月 4 日肇庆市为臭氧中度污染( $219 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。广东省  $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$  平均值为  $123 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,较历史秋季  $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$  平均值( $102 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )偏高 21%;日平均污染城市总数为 2 个,影响范围小于历史秋季污染过程(5 个)。

(2)风速偏小、日照时数偏长和气流回流效应偏强是造成此次臭氧污染过程最主要的地面气象条件,而气温偏低则可能是造成污染城市偏少的重要原因。过程中珠江口西侧回流效应明显增强,回流指数较历史秋季偏低 0.2~0.5,有利于污染物在珠三角西部和粤西地区混合、传输和累积。

(3)污染过程期间对流层低层存在多层逆温、下沉气流偏强和风速偏小,有利于臭氧及其前体物在近地面累积和维持,上午时段  $\text{NO}_2$  浓度维持较高水平,促使臭氧浓度增量明显高于非污染时段(偏高  $34.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。1 月 3 日午后近地面(850 hPa 以下)的上升运动、1 月 3 日夜间至 1 月 4 日白天时段持续的下沉气流,有利于夜间残留层内储存丰富的臭氧并于次日下传,从而进一步加剧臭氧污染。

(4)气流轨迹显示污染物存在水平输送和高空地面混合,气流到达珠三角东部沿海后顺时针兜转回流至肇庆市。10 m 高度的臭氧潜在源区主要集中在福建至广东沿海,随着高度升高,臭氧潜在源区范围缩小至广东省内。此次臭氧污染过程受广东省本地排放影响较大,不同高度气流后向轨迹均经过广东省臭氧潜在源区。

#### 参考文献:

[1] 广东省生态环境厅. 2021 广东省生态环境状况公报[EB/OL]. <http://gdee.gd.gov.cn/attachment/0/488/488577/3927093.pdf>, 2022-04-26.

[2] 王倩,刘苗苗,杨建勋,等. 2013~2019 年臭氧污染导致的江苏稻麦产量损失评估[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 5094-5103.

Wang Q, Liu M M, Yang J X, et al. Yield losses of rice and winter wheat due to ground-level ozone in Jiangsu Province from 2013 to 2019 [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(11): 5094-5103.

[3] 赵楠,卢毅敏. 中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1235-1245.

Zhao N, Lu Y M. Estimation of surface ozone concentration and health impact assessment in China[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1235-1245.

[4] Wang W C, Liang X Z, Dudek M P, et al. Atmospheric ozone as a climate gas[J]. Atmospheric Research, 1995, **37**(1-3): 247-256.

[5] IPCC. Climate change 2013-the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[6] QX/T 240-2014, 光化学烟雾判识[S].

[7] Zou Y, Deng X J, Zhu D, et al. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs,  $\text{NO}_x$  and  $\text{O}_3$  at a suburban site in Guangzhou, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(12): 6625-6636.

[8] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 132-139.

Jin D. Role of atmospheric VOCs in ozone formation in summer in Shanghai suburb[J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 132-139.

[9] 王帅,聂赛赛,冯亚平,等. 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2679-2690.

Wang S, Nie S S, Feng Y P, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and source apportionment of  $\text{O}_3$  and  $\text{NO}_2$  in Shijiazhuang [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2679-2690.

[10] 沈劲,陈多宏,汪宇,等. 基于情景分析的珠三角臭氧与前体物排放关系研究[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(10): 1925-1932.

Shen J, Chen D H, Wang Y, et al. Study on the relationship between ozone and precursors emission in the Pearl River Delta based on scenario analysis [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(10): 1925-1932.

[11] 伍永康,陈伟华,颜丰华,等. 不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 160-169.

Wu Y K, Chen W H, Yan F H, et al. Nonlinear response relationship between ozone and precursor emissions in the Pearl River Delta region under different transmission channels [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 160-169.

[12] 李光耀,陈强,郭文凯,等. 基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 616-623.

Li G Y, Chen Q, Guo W K, et al. Nonlinear response characteristics and control scheme for ozone and its precursors based on orthogonal experimental methods [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 616-623.

[13] Luo H H, Zhao K H, Yuan Z B, et al. Emission source-based ozone isopleth and isosurface diagrams and their significance in ozone pollution control strategies [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, **105**: 138-149.

[14] Wang N, Lyu X P, Deng X J, et al. Aggravating  $\text{O}_3$  pollution due to  $\text{NO}_x$  emission control in eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**(24): 732-744.

[15] Li Y, Zhao X J, Deng X J, et al. The impact of peripheral circulation characteristics of typhoon on sustained ozone episodes over the Pearl River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, **22**(6): 3861-3873.

[16] He Y P, Li L, Wang H L, et al. A cold front induced co-occurrence of  $\text{O}_3$  and  $\text{PM}_{2.5}$  pollution in a Pearl River Delta city: temporal variation, vertical structure, and mechanism [J]. Environmental Pollution, 2022, **306**, doi: 10.1016/j.envpol.

2022. 119464.
- [17] 黎煜满, 李磊, 王浩霖, 等. 粤北山地城市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析—以韶关为例[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(2): 258-270.  
Li Y M, Li L, Wang H L, *et al.* Analysis of characteristics of surface ozone pollution and meteorological factors in a mountain city of northern Guangdong: a case study in Shaoguan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(2): 258-270.
- [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] 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.
- [20] He C, Lu X, Wang H L, *et al.* Unexpected high frequency of nocturnal surface ozone enhancement events over China: characteristics and mechanisms[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, doi: 10.5194/acp-2022-310.
- [21] 陈多宏, 沈劲, 陈瑶瑶, 等. 2020 年珠三角区域臭氧污染特征及主要成因分析[J]. 中国环境科学, 2022, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220616.007.  
Chen D H, Shen J, Chen Y Y, *et al.* Characteristics and main causes of ozone pollution in the Pearl River Delta in 2020[J]. *China Environmental Science*, 2022, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220616.007.
- [22] Wang N, Huang X, Xu J W, *et al.* Typhoon-boosted biogenic emission aggravates cross-regional ozone pollution in China[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(2), doi: 10.1126/sciadv.abl6166.
- [23] Wang X D, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Assessment of summertime O<sub>3</sub> formation and the O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivity in Zhengzhou, China using an observation-based model [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **813**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152449.
- [24] Yienger J J, Levy II H. Empirical model of global soil-biogenic NO<sub>x</sub> emissions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D6): 11447-11464.
- [25] 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**(6693): 617-630.
- [26] 黄俊, 廖碧婷, 吴兑, 等. 广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(1): 23-31.  
Huang J, Liao B T, Wu D, *et al.* Guangzhou ground level ozone concentration characteristics and associated meteorological factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 23-31.
- [27] 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.
- [28] 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 等. 热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2957-2965.  
Zhao W, Lyu M Y, Lu Q, *et al.* Effects of tropical cyclones on ozone pollution in the Pearl River Delta in autumn [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2957-2965.
- [29] 邓雪娇, 周秀骥, 吴兑, 等. 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(1): 93-102.  
Deng X J, Zhou X J, Wu D, *et al.* Effect of atmospheric aerosol on surface ozone variation over the Pearl River Delta region[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(5): 744-752.
- [30] 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.
- [31] Lin C Q, Lau A K H, Fung J C H, *et al.* Removing the effects of meteorological factors on changes in nitrogen dioxide and ozone concentrations in China from 2013 to 2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148575.
- [32] 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.
- [33] Zhao K H, Hu C, Yuan Z B, *et al.* A modeling study of the impact of stratospheric intrusion on ozone enhancement in the lower troposphere over the Hong Kong regions, China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **247**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105158.
- [34] He G W, Deng T, Wu D, *et al.* Characteristics of boundary layer ozone and its effect on surface ozone concentration in Shenzhen, China: a case study [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **791**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148044.
- [35] Ouyang S S, Deng T, Liu R, *et al.* Impact of a subtropical high and a typhoon on a severe ozone pollution episode in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(16): 10751-10767.
- [36] Yang X Y, Zeng G, Iyakaremye V, *et al.* Effects of different types of heat wave days on ozone pollution over Beijing-Tianjin-Hebei and its future projection [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **837**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155762.
- [37] 孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 气候变化对环境空气质量影响的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2011, **16**(6): 805-814.  
Sun J R, Xu Z C, Liu Y, *et al.* Advances in the effect of climate change on air quality[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, **16**(6): 805-814.
- [38] Gao Z Q, Ivey C E, Blanchard C L, *et al.* Separating emissions and meteorological impacts on peak ozone concentrations in Southern California using generalized additive modeling [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **307**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119503.
- [39] Wang N, Xu J W, Pei C L, *et al.* Air quality during COVID-19 lockdown in the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta: two different responsive mechanisms to emission reductions in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(9): 5721-5730.
- [40] Fu S, Guo M X, Fan L P, *et al.* Ozone pollution mitigation in Guangxi (South China) driven by meteorology and anthropogenic emissions during the COVID-19 lockdown [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115927.
- [41] Moghani M, Archer C L. The impact of emissions and climate change on future ozone concentrations in the USA [J]. *Air*

- Quality, Atmosphere & Health, 2020, **13**(12): 1465-1476.
- [42] Li T Y, Deng X J, Li Y, *et al.* Transport paths and vertical exchange characteristics of haze pollution in Southern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **625**(8): 1074-1087.
- [43] Ding A J, Wang T, Fu C B. Transport characteristics and origins of carbon monoxide and ozone in Hong Kong, South China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, **118**(16): 9475-9488.
- [44] 沈劲, 黄晓波, 汪宇, 等. 广东省臭氧污染特征及其来源解析研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(12): 4449-4457.  
Shen J, Huang X B, Wang Y, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and source apportionment in Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(12): 4449-4457.
- [45] 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 等. 广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4305-4315.  
Pei C L, Xie Y T, Chen X, *et al.* Analysis of a typical ozone pollution process in Guangzhou in winter [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4305-4315.
- [46] 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.
- [47] Allwine K J, Whiteman C D. Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation [J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(4): 713-721.
- [48] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al.* The aerosol at Barrow, Alaska: long-term trends and source locations [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(16): 2441-2458.
- [49] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB Sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 545-562.
- [50] 李婷苑, 陈靖扬, 翁佳烽, 等. 广东省臭氧污染天气型及其变化特征[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(5): 2015-2024.  
Li T Y, Chen J Y, Weng J F, *et al.* Ozone pollution synoptic patterns and their variation characteristics in Guangdong Province [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(5): 2015-2024.
- [51] 黄乾, 王海波. 南京北郊污染物来源及跨区域输送过程研究[J]. 大气科学学报, 2019, **42**(4): 531-541.  
Huang Q, Wang H B. Sources and transregional transport process of air pollutant in northern suburbs of Nanjing[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, **42**(4): 531-541.
- [52] 梁幼林, 王鹏飞, 徐予红. 气旋与反气旋的特征和分类[EB/OL]. <http://www.kepu.net.cn/gb/earth/weather/vary/var401.html>, 2022-07-15.
- [53] Pope R J, Butt E W, Chipperfield M P, *et al.* The impact of synoptic weather on UK surface ozone and implications for premature mortality[J]. Environmental Research Letters, 2016, **11**(12), doi: 10.1088/1748-9326/11/12/124004.
- [54] 李明华, 范绍佳, 王宝民, 等. 珠江三角洲秋季大气边界层温度和风廓线观测研究[J]. 应用气象学报, 2008, **19**(1): 53-60.  
Li M H, Fan S J, Wang B M, *et al.* Observation study on the temperature and wind profiles over the Pearl River Delta in autumn[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, **19**(1): 53-60.
- [55] 吴蒙, 罗云, 吴兑, 等. 珠三角干季海陆风特征及其对空气质量影响的观测[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3263-3272.  
Wu M, Luo Y, Wu D, *et al.* Observation on the characteristics of sea-land breezes and its influence to air quality over Pearl River Delta region during dry season [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3263-3272.
- [56] 邓玉娇, 杜尧东, 王捷纯, 等. 粤港澳大湾区城市热岛时空特征及驱动因素[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(8): 2671-2677.  
Deng Y J, Du Y D, Wang J C, *et al.* Spatiotemporal characteristics and driving factors of urban heat islands in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(8): 2671-2677.
- [57] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(S1): 4-6.  
Fan S J, Wang A Y, Fan Q, *et al.* Atmospheric boundary layer features of Pearl River Delta and its conception model [J]. China Environmental Science, 2006, **26**(S1): 4-6.
- [58] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 空气污染气象学教程[M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 2004.  
Jiang W M, Sun J N, Cao W J, *et al.* Air pollution meteorology course (2nd ed.) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- [59] 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报[M]. 北京: 气象出版社, 2001.  
Wu D, Deng X J. Environmental meteorology and special weather forecasting [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.

## CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region .....	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China .....	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance .....	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O <sub>3</sub> Based on Explainable Machine Learning .....	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology .....	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O <sub>3</sub> Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model .....	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM .....	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province .....	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China .....	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020 .....	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021 .....	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM <sub>2.5</sub> Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model .....	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM <sub>2.5</sub> Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei .....	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers .....	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles .....	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer .....	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area .....	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an .....	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei .....	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area .....	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City .....	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang .....	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin .....	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River .....	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River .....	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction .....	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas .....	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region .....	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches .....	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region .....	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River .....	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River .....	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons .....	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite .....	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> and Oxidize Organic Micropollutants in Water .....	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrotriazole (Methylene Phosphonic Acid) .....	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics .....	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China .....	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing .....	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province .....	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi .....	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review .....	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review .....	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis .....	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation .....	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta .....	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA .....	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area .....	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province .....	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i> .....	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk .....	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period .....	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong .....	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning .....	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)