

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军 (2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波 (2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红 (2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab (2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤 (2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成 (2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍 (2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)
《环境科学》征订启事(2480)	
《环境科学》征稿简则(2538)	
信息(2766, 2798, 2927)	

台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析

符传博^{1,2,3}, 丹利², 佟金鹤^{1,3}, 徐文帅⁴

(1. 海南省气象科学研究所, 海口 570203; 2. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029; 3. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203; 4. 海南省环境科学研究院, 海口 571126)

摘要: 为了探讨2016号台风“浪卡”对海南岛臭氧(O_3)浓度的影响,选取了2020年10月10~14日海南岛逐时空气质量监测数据、气象要素数据、ERA5再分析资料和“葵花8号”红外亮温TBB产品,采用相关分析和后向轨迹模拟方法进行深入讨论.结果表明,10月11~13日台风过程期间均有市县 O_3 最大8h滑动浓度平均值 $[\rho(O_3-8h)]$ 超标,海南岛平均 $\rho(O_3-8h)$ 峰值出现在10月12日,为 $130.15 \mu g \cdot m^{-3}$,共有4个市县 O_3-8h 浓度超标,其中临高县达到了全岛最高值,为 $198.44 \mu g \cdot m^{-3}$.台风过程期间海南岛小时 O_3 浓度与降水量、相对湿度和风速呈负相关关系,与气压和气温呈正相关关系,其中与降水量、气压和相对湿度相关系数通过了99.9%的信度检验.我国东南部沿海省份是海南岛此次 O_3 污染的主要贡献源区.受西太平洋副热带高压(副高)内部的下沉气流和台风“浪卡”外围下沉气流共同影响,源区大气存在垂直混合作用,气象条件有利于大气光化学反应,并随着台风西北侧的东北气流输送至海南岛,致使海南岛 O_3 污染事件发生.还构建了台风“浪卡”影响下的海南岛 O_3 污染的天气概念模型,可供大气污染预测预警研究和环境管理部门污染联防联控参考.

关键词: 臭氧(O_3); 台风; 气象条件; 概念模型; 海南

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2481-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202206123

Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island

FU Chuan-bo^{1,2,3}, DAN Li², TONG Jin-he^{1,3}, XU Wen-shuai⁴

(1. Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou 570203, China; 2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China; 4. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 571126, China)

Abstract: In order to explore the influence of the 2016 typhoon Nangka on ozone (O_3) concentration in Hainan Island, this study employed correlation analysis and backward trajectory simulated methods, using the hourly air quality monitoring data, meteorological data, ERA5 reanalysis data, and bright temperature (TBB) infrared from the Himawari-8 satellite from October 10 to 14, 2020. The results showed that, during the typhoon process from October 11 to 13, the O_3-8h (maximum of 8 hours sliding average) concentration exceeded the standard. The averaged $\rho(O_3-8h)$ of Hainan Island reached its peak value ($130.5 \mu g \cdot m^{-3}$) in October 12, 2020, with the O_3-8h concentration exceeding the standard in four cities and counties, in which Lingao County reached the highest concentration of $198.44 \mu g \cdot m^{-3}$. During the typhoon process, the hourly O_3 concentration was negatively correlated with precipitation, relative humidity, and wind speed and positively correlated with air pressure and air temperature. Moreover, the correlation coefficients between O_3 with precipitation, air pressure, and relative humidity exceeded the 99.9% confidence level. The southeastern coastal provinces of China were the main contribution source area for this ozone pollution process on Hainan Island. Affected by the downdraft inside the western Pacific subtropical high (WPSH) and the downdraft outside the circumference of typhoon Nangka, vertical transport in the atmosphere appeared over the contribution source area. The meteorological conditions were favorable for atmospheric photochemical reactions. Air pollutants were transported to Hainan Island along the northeast airflow around the typhoon, resulting in the occurrence of an O_3 pollution event. In addition, this study built a weather conceptual model of O_3 pollution in Hainan Island affected by typhoon Nangka, which can be used as a reference for the joint pollution prevention and control by air pollution prediction, early warning, and environmental management departments.

Key words: ozone (O_3); typhoon; meteorological factors; conceptual model; Hainan

随着经济的快速发展和工业化、城市化进程的推进,我国大气环境质量问题日益凸显^[1,2],从点源污染和城市污染,发展成为区域性和复合性大气污染^[3,4],已经引起政府和社会的广泛关注^[5,6].在一系列环保法规严格约束下,以细颗粒物($PM_{2.5}$)为代表的大气污染物浓度逐渐下降,臭氧(O_3)污染浓度却呈现出波动上升的趋势.2021年全国339个地级及以上城市中,以 O_3 为首要污染物的超标天数占总超标天数的34.7%,而三大重点区域的统计结果表明^[7],京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原以 O_3 为首要污染物的超标天数占总超标天数分别为41.8%、55.4%和39.3%,明显高于全国339个

城市的平均结果. O_3 已经成为“十四五”期间影响我国重要城市区域大气环境的首要污染物^[8~10].

台风是一种发生在热带洋面上的强烈的暖性气旋性涡旋^[11],在其中心附近有强烈的上升气流,并伴有暴雨和大风天气,而在其前方和侧缘区域则伴随着明显的、强烈的下沉气流.当台风靠近陆地时,台风外围的下沉气流会在陆地形成具有稳定结构的

收稿日期: 2022-06-11; 修订日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42065010, 42141017); 海南省重大科技计划项目(ZDKJ202007); 海南省自然科学基金项目(422RC802, 421QN0967); 海南省院士创新平台科研项目(YSPTZX202143)

作者简介: 符传博(1985~),男,硕士,正研级高级工程师,主要研究方向为大气环境与大气污染, E-mail: hnfuchuanbo@163.com

高压均压场,这种高温低湿的形势场非常有利于光化学过程和污染物的积累,进而造成空气质量下降及低能见度事件发生^[12~14].已有国内外学者关于台风对 O₃ 浓度的影响进行了相关研究,譬如, Lee 等^[15]研究了 1994~1999 年热带气旋发生期间中国香港夏季出现的 O₃ 污染事件,发现 O₃ 污染多与热带气旋靠近后引起的下沉气流有关; Jiang 等^[16]基于 WRF-Chem 模型研究了 2001 年台风“Nari”影响期间中国香港发生的持续 O₃ 污染事件,结果表明台风外围地表 O₃ 浓度升高主要来源于高层 O₃ 的垂直输送; Shu 等^[17]分析了 2013 年 8 月 7~12 日长三角地区沿海城市出现的 O₃ 污染事件与台风靠近引起的高温、低湿和弱风等天气形势有关,而内陆城市几乎不受其影响;岳海燕等^[18]研究了台风“妮妲”对广州市 O₃ 浓度的影响,发现台风外围下沉气流造成混合层顶低和逆温存在,近地层污染物不易扩散,导致 O₃ 浓度超标;张智等^[19]利用多种观测数据对台风“安比”影响期间河北省出现的 O₃ 污染过程进行分析,发现下沉气流与近地层的弱风辐合场对 O₃ 污染有很好的贡献;赵文龙等^[20]基于 Model-3/CMAQ 模型计算了 2017 年 4 次台风影响期间不同源汇对中山市 O₃ 浓度的贡献,发现台风带来的外来气团经过高污染排放区域时,化学过程贡献显著上升;赵伟等^[21]研究了 2015~2020 年西北太平洋热带气旋与珠三角 O₃ 浓度的关系,结果表明不同路径类型的热带气旋影响下珠三角地区臭氧浓度变化不同,其中东海转向型的热带气旋对珠三角臭氧超标有明显影响。

海南岛位于南海北部,毗邻广东省珠三角地区.近年来国家和省政府高度重视生态环境保护工作,连续出台了多项生态环境的保护政策.在此背景下海南岛颗粒物浓度有明显下降^[22],然而 O₃ 浓度却维持较高水平, O₃ 已经成为制约海南岛空气质量提升的首要大气污染物.近年来关于海南岛 O₃ 污染方面的研究也陆续有报道^[23~25],苏超^[26]的研究发现海口市 O₃ 浓度有上升的趋势;徐文帅等^[27]的研究发现台风外围型和冷高压底部型是有利于海口市 O₃ 浓度超标的两类天气形势;赵蕾等^[28]的研究表明海口市 O₃ 污染可能与外源输送有关;符传博等^[29]对 2017 年秋季海南岛发生的持续性 O₃ 污染过程进行分析,发现我国东南部省份是此次过程污染物的主要贡献源区.海南素有“台风走廊”之称,年平均影响的热带气旋高达 7 个之多^[30].目前针对台风影响下的海南臭氧污染特征及成因还比较缺乏,因此本文收集整理了登陆海南岛的 2016 号台风“浪卡”的路径和强度资料、同期的海南岛 18 个市

县环境监测数据和 ERA5 再分析资料,深入探讨台风“浪卡”过程对海南岛 O₃ 污染的影响,寻求台风过程与海南岛 O₃ 污染之间的联系,建立预报概念模型,以为台风过程气象和环境部门的 O₃ 污染预报提供一定的借鉴.

1 材料与方法

1.1 数据资料

本文选用 2020 年 10 月 10~14 日台风“浪卡”过程进行分析,台风“浪卡”路径和强度资料来自中国台风网(www.typhoon.gov.cn)“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”.海南岛 18 个市县环境空气质量数据来源于海南省生态环境厅网站(<http://hnsthb.hainan.gov.cn:8009/EQGIS/>),监测要素包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 共 6 种主要污染物,选取 2020 年 10 月 10~14 日逐时资料进行分析. O₃ 浓度标准参照《环境空气质量指数(AQI)技术要求(试行)》(HJ 633-2012), O₃ 最大 8 h 滑动浓度平均值[$\rho(\text{O}_3-8\text{h})$]超过 160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 O₃ 小时浓度[$\rho(\text{O}_3)$]超过 200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 均为 O₃ 浓度超标.气象观测数据来自海南省气象局,气象要素包括逐时的温度、相对湿度、气压、风向、风速和降水等.再分析格点资料本文使用的是 ECMWF 发布的第 5 代资料(ERA5)^[31,32],数据源自哥白尼气候变化服务中心数据库(<https://cds.climate.copernicus.eu>),时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.25°×0.25°.为了进一步分析台风“浪卡”强度特征及外围下沉气流区域分布,本研究还用到了日本“葵花 8 号”(H8)静止气象卫星红外亮温 TBB 产品, H8 卫星产品具体可参见文献[33].

1.2 研究方法

相关分析方法多用于探讨不同要素之间是否存在某种依存关系,相关系数的正负符号和绝对值大小表示了其相关方向与相关程度^[34].本文在探讨海南岛 O₃ 浓度与地面气象因子相关关系时,使用了相关分析方法,具体公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, r_{xy} 为相关系数,其值介于 $[-1, 1]$ 区间,显著性可以通过 t 检验进行判断.当 $r_{xy} > 0$ 时,表示两个要素之间存在正相关关系;当 $r_{xy} < 0$ 时,表示两个要素之间存在负相关关系^[35].

HYSPLIT 后向轨迹模型(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory model)是由美国国家

海洋大气研究中心空气资源实验室(NOAA)和澳大利亚气象局合作研发.模式在处理气象要素输入场、多种物理过程和各类大气污染物排放源等问题上较为成熟,因此主要应用于大气污染物来源及输送路径等方面的研究^[36,37].本文将此次台风过程中 O_3 污染最为严重的临高县($19.9^\circ N$, $109.68^\circ E$)设为起始点,模拟高度设置为100、500和1 000 m,利用 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的全球资料同化系统(GDAS)气象数据,计算了2020年10月11日和12日20:00影响气流的72 h后向轨迹.

2 结果与讨论

2.1 台风概况

2020年10月11日08:00,位于南海东部海面的热带云团加强为热带低压,取名为“浪卡”。“浪卡”生成时中心位置是 $16.5^\circ N$, $120.2^\circ E$,中心附近最大风力为6级($13 m \cdot s^{-1}$),中心附近最低气压为1 004 hPa,为热带低压级。“浪卡”生成后强度不断加强,同时以 $20 km \cdot h^{-1}$ 左右的速度稳定向西偏北方向移动,路径如图1所示,具有近海加强、路径稳定和移速快等特点^[38].10月12日08:00加强为热带风暴级,10月13日11:00继续增强为强热带风暴级,并于10月13日19:20前后在琼海市博鳌镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力10级($25 m \cdot s^{-1}$),中心最低气压988 hPa,登陆后先后穿过琼海市、定安县、屯昌县、澄迈县和儋州市,于10月13日23:00减弱为热带风暴级,10月14日凌晨进入北部湾海面.10月14日18:20,“浪卡”在越南清化沿海再次登陆,登陆时中心附近最大风力为8级($18 m \cdot s^{-1}$),中心最低气压998 hPa,登陆后继续向西偏北方向移动并迅速减弱,对海南岛的影响结束.

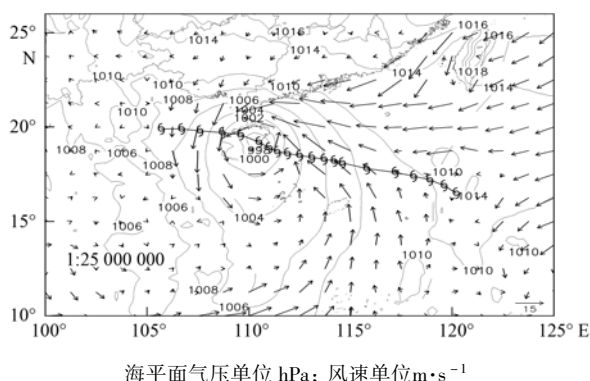


图1 2020年10月11~14日2016号台风“浪卡”路径及登陆时(10月13日19:00)1 000 hPa风速和海平面气压叠加

Fig. 1 Track of 2016 typhoon “Nangka” from October 11 to 14, 2020, overlay with 1 000 hPa wind speed and sea surface pressure at the time of registration (19:00 on the 13th)

2.2 台风期间海南岛 O_3 浓度变化情况

图2给出了2020年10月10日~14日海南岛18个市县 O_3 -8h浓度逐日变化,期间海南岛所有市县首要污染物均为 O_3 -8h.10月10日海南岛空气质量以优良为主[图2(a)],16个市县 O_3 -8h浓度分布在良等级,2个市县在优等级,呈东部和南部 O_3 -8h浓度偏高于其余区域的分布特征.最大值出现在南部的保亭县, $\rho(O_3-8h)$ 为 $151.67 \mu g \cdot m^{-3}$,最小值出现在西部的儋州市,为 $89.06 \mu g \cdot m^{-3}$.10月11日北部和西部市县 O_3 -8h浓度较10日明显增大[图2(b)],其中临高县和屯昌县 $\rho(O_3-8h)$ 超过了二级阈值($160 \mu g \cdot m^{-3}$),为轻度污染等级.全岛平均的 $\rho(O_3-8h)$ 为 $129.28 \mu g \cdot m^{-3}$ (表1),较10月10日明显增大.10月12日海南岛 O_3 -8h浓度分布特征与10月11日一致[图2(c)],表现为北部和西部偏高于东部、中部和南部,其中北部的临高县、海口市、澄迈县和西部的昌江县 $\rho(O_3-8h)$ 超过了 $160 \mu g \cdot m^{-3}$,为轻度污染等级,最大值出现在临高县,为 $198.44 \mu g \cdot m^{-3}$.此时海南岛平均的 $\rho(O_3-8h)$ 也达到了此次污染过程的最高值($130.15 \mu g \cdot m^{-3}$).10月13日海南岛 O_3 -8h浓度呈南部和西部偏高[图2(d)],北部、中部和东部偏低的分布特征,与10月11日和10月12日明显不同.南部的保亭县、陵水县和西部的昌江县 O_3 -8h浓度达到了轻度污染等级,全岛平均的 $\rho(O_3-8h)$ 为 $125.68 \mu g \cdot m^{-3}$.10月14日海南岛 O_3 -8h浓度出现显著下降[图2(e)],全岛 $\rho(O_3-8h)$ 分布在 $50 \sim 90 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间.

结合台风生成的路径来看,10月10日台风“浪卡”还没有生成,海南岛主要受北方弱冷空气扩散影响,岛上各个市县 O_3 -8h浓度明显偏低,均在优良等级;台风“浪卡”于10月11日08:00时生成并向西北方向移动,海南岛处于台风西偏北方向,受台风西北侧东北气流影响,有利于污染物从我国东南沿海区域输送至海南岛.随着台风的靠近,东北气流风速增大,输送强度增强,加之台风外围下沉气流共同影响,海南岛空气质量逐渐恶化, O_3 浓度升高明显,10月11~13日陆续有市县 O_3 -8h浓度超标.10月13日19:20随着台风“浪卡”在琼海市登陆,带来较强的风雨过程,空气质量转优, O_3 浓度显著下降.

2.3 台风期间 O_3 浓度与气象要素相关性分析

对流层 O_3 浓度的大小除了与氮氧化合物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等前体物的排放状况有关外,还与气象因子决定的光化学反应、干湿沉降、传输和稀释作用等有关^[39~41].图3(a)和图3

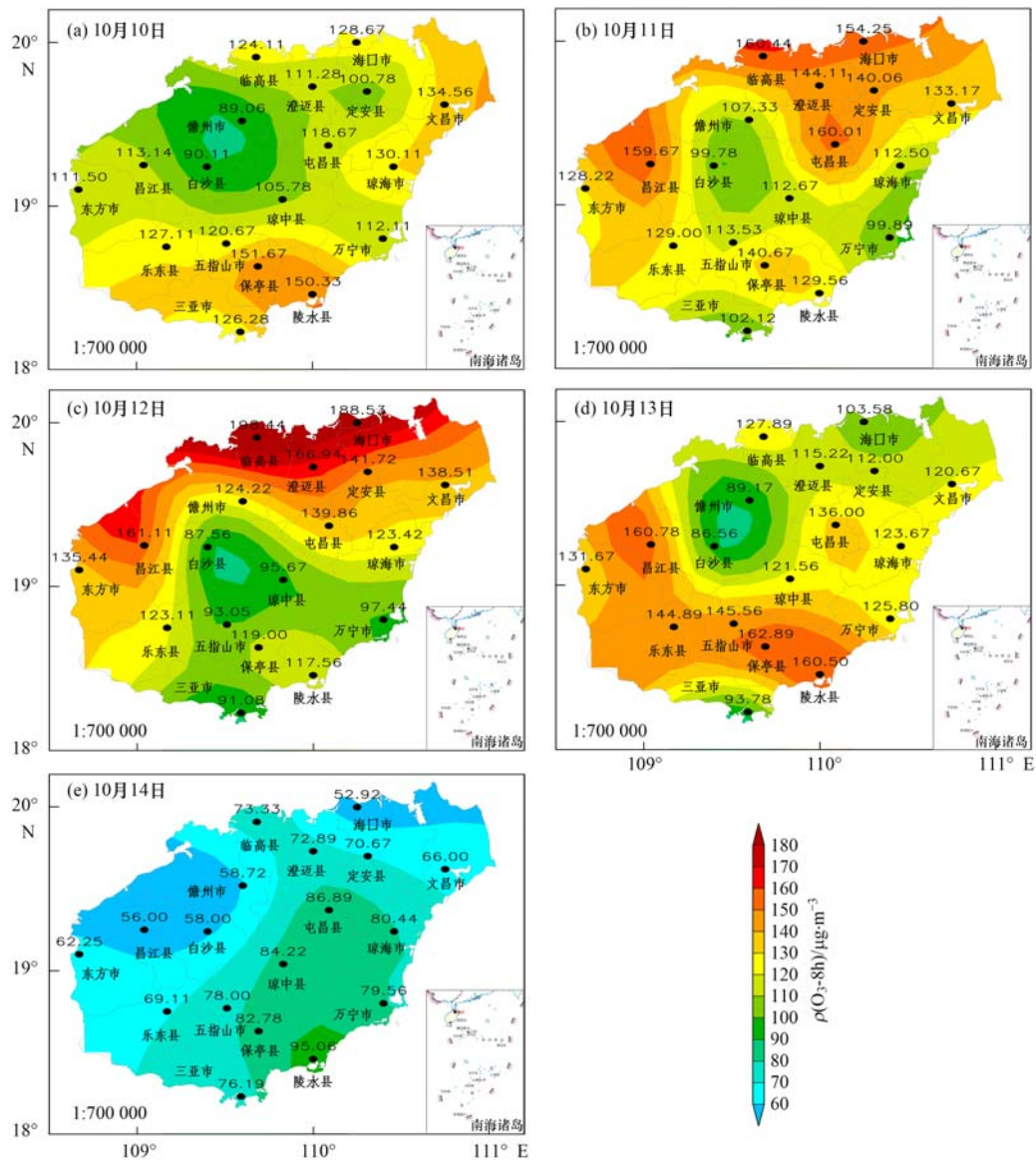


图 2 2020 年 10 月 10 ~14 日海南岛 O₃-8h 浓度逐日变化

Fig. 2 Daily variations in O₃-8h concentration in Hainan island from October 10 to 14, 2020

表 1 2020 年 10 月 10 ~14 日海南岛空气质量逐日统计¹⁾

Table 1 Daily statistics of air quality in Hainan Island from October 10 to 14, 2020

日期(月-日)	O ₃ -8h	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	PM _{2.5}
10-10	119.22	4.96	8.67	38.56	0.67	24.65
10-11	129.28	5.09	9.27	41.24	0.65	26.23
10-12	130.15	5.34	8.65	41.99	0.62	26.54
10-13	125.68	5.43	9.37	33.28	0.63	21.83
10-14	72.39	4.45	5.74	11.85	0.61	7.86

1) CO 单位为mg·m⁻³,其余为 μg·m⁻³

(b)为2020年10月10~14日海南岛平均的O₃浓度和气象要素逐时变化。从中可以清楚地看出,台风生成前(10月10日)海南岛O₃浓度有明显的日变化特征,白天明显高于夜间。台风生成后至降水明显发生前(10月11日08:00~10月13日08:00),海南岛ρ(O₃)前期维持在120 μg·m⁻³左右,并在10月12日夜间ρ(O₃)出现暴发式增长,10月12

23:00达到了157.45 μg·m⁻³。一般而言,20:00之后基本没有太阳紫外辐射,光化学反应速率十分低下,海南岛夜间O₃浓度的升高主要与台风西北侧的东北气流输送持续增强有关。结合气象要素发现,此时段海南岛没有明显降水,逐时气温呈波动上升趋势,最高小时气温出现在10月12日15:00,为27.86℃。相对湿度在10月12日下午至夜间只分布

在 75% 附近,风速也表现为快速下降的变化趋势.海南岛本地的高温、低湿和弱风的气象条件变化进一步促进了 O_3 浓度的增长^[24].随后台风主体靠近,降水发生后污染物的清除作用加强,气温下降,气象条件不利于 O_3 的生成,全岛空气质量转优,此次 O_3 污染过程结束.从 O_3 浓度与气象因子的相关系数上看(表 2),海南岛 O_3 浓度与降水量、相对湿度和风速呈负相关关系,与气压和气温呈正相关关系,其中与降水量、气压和相对湿度的相关系数通过了 99.9% 的信度检验.

从 2.2 节的分析中可知,10 月 13 日海南岛 O_3 -8h 浓度超标的市县出现在西部和南部,因此本小节选取了北半部的临高县和南半部的保亭县进行对比分析,如图 3(c)~3(f)所示.图中表明,海南岛北半部市县和南半部市县 O_3 浓度变化有明显不同.10

月 13 日 00:00 之前,临高县逐时 $\rho(\text{O}_3)$ 呈波动式上升趋势,于 10 月 12 日 20:00 达到最大值,为 $210 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.而保亭县 10 月 12 日 12:00 之前表现为波动式下降趋势,随后在 10 月 12 日夜间出现暴发式增长,最大值出现在 10 月 13 日 03:00,为 $196 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.结合两个市县 O_3 浓度与气象因子的相关关系可以发现,临高县和保亭县 O_3 浓度与降水和相对湿度均呈负相关关系,与气压和气温呈正相关关系.而与风速的相关关系,两个市县却表现为相反的相关关系,其中临高县 O_3 浓度与风速的相关系数为 -0.288 ,通过了 99% 的信度检验,表明风速越大时, O_3 浓度越小.保亭县 O_3 浓度与风速的相关系数为 0.554 ,通过了 99.9% 的信度检验,表明风速越大时, O_3 浓度越大(表 2).结合海南岛地形可以推测,当台风离海南岛较远时,低层风速较小,外源输送的

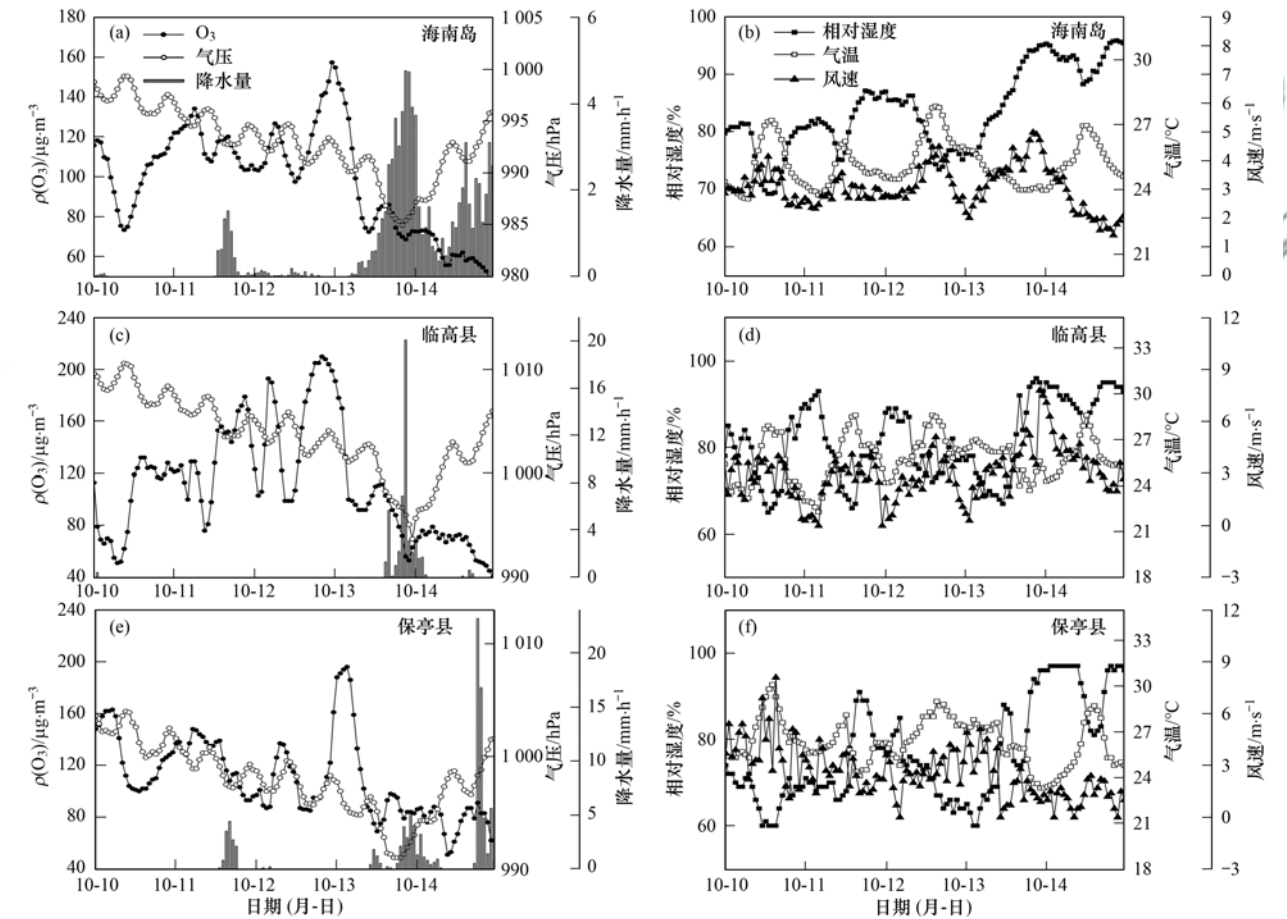


图 3 2020 年 10 月 10 ~ 14 日 O_3 浓度和气象要素逐时变化

Fig. 3 Hourly variations in O_3 concentration and meteorological elements in Hainan Province from October 10 to 14, 2020

表 2 2020 年 10 月 10 ~ 14 日逐时 O_3 浓度与气象因子相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient between hourly O_3 concentration and meteorological factors from October 10 to 14, 2020

区域	降水量	气压	相对湿度	气温	风速
海南岛	-0.603 ***	0.292 **	-0.653 ***	0.036	-0.007
临高县	-0.202 *	0.113	-0.420 ***	0.330 ***	-0.288 **
保亭县	-0.209 *	0.339 ***	-0.637 ***	0.144	0.554 ***

1) * 表示通过 95% 信度检验, ** 表示通过 99% 信度检验, *** 表示通过 99.9% 信度检验

污染物受到五指山山脉的阻挡,北半部的市县影响较大,南半部市县影响较小;反之,当台风靠近海南岛时,低层风速增大,外源输送的污染物会随着爬山气流和绕山气流输送至海南岛南半部,进而造成南半部的市县 O_3 浓度也明显升高. 为了验证笔者的推测,图4进一步给出了临高县和保亭县2020年10月10~14日逐时 O_3 浓度分布和风频图. 结果发现临高县 $\rho(\text{O}_3)$ 高值($\geq 140 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要发生在风速为 $0 \sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北偏东风,而保亭县风速小于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时没有出现 O_3 浓度高值,只有风速为 $4 \sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北风影响下, O_3 浓度才明显升高. 符传博等^[32]对三亚市一次臭氧污染过程的成因进行分析,发现三亚市 O_3 浓度升高与低层的绕山气流辐合效应密切相关. 此外,10月12日夜间保亭县 O_3 浓度的极大值出现时段滞后于临高县,也进一步证明了在台风“浪卡”影响下,海南岛的 O_3 污染与外源输送密切相关,而输送是以直接输送 O_3 为主还是以输送前体物为主,目前还不清楚,其内在机制还有待于进一步研究.

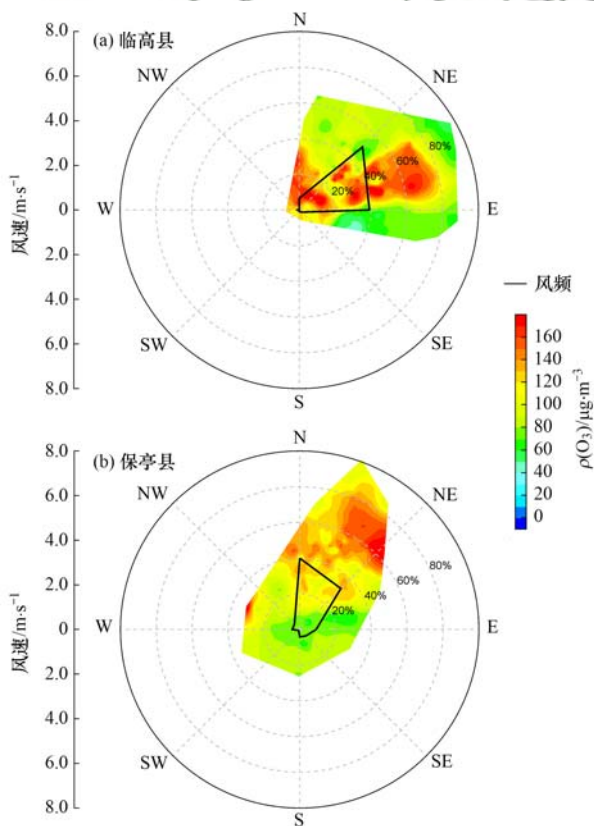


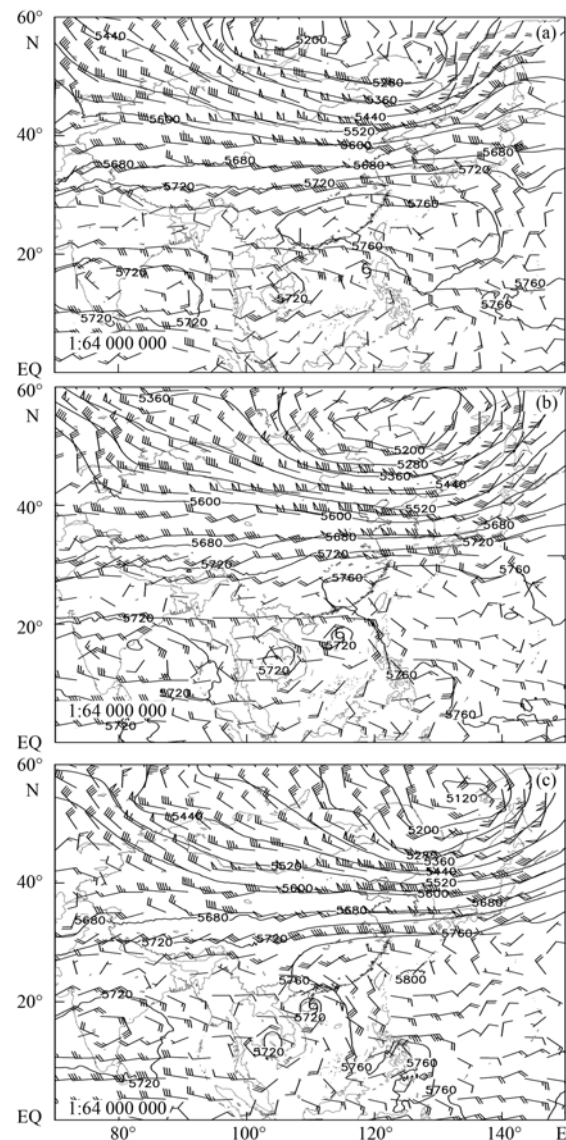
图4 2020年10月10~14日逐时 O_3 浓度分布及风频图

Fig. 4 Distribution of hourly O_3 concentrations and wind frequency chart from October 10 to 14, 2020

2.4 台风过程对海南岛 O_3 浓度的影响

2.4.1 天气形势分析

图5为2020年10月11~13日20:00 500 hPa



(a)2020年10月11日20:00,(b)2020年10月12日20:00,
(c)2020年10月13日20:00;黑色实线表示位势高度场,

单位:gpm;风羽表示风场

图5 台风“浪卡”期间500 hPa位势高度场与风场叠加

Fig. 5 Distribution of mean 500 hPa geopotential height and wind fields during typhoon “Nangka”

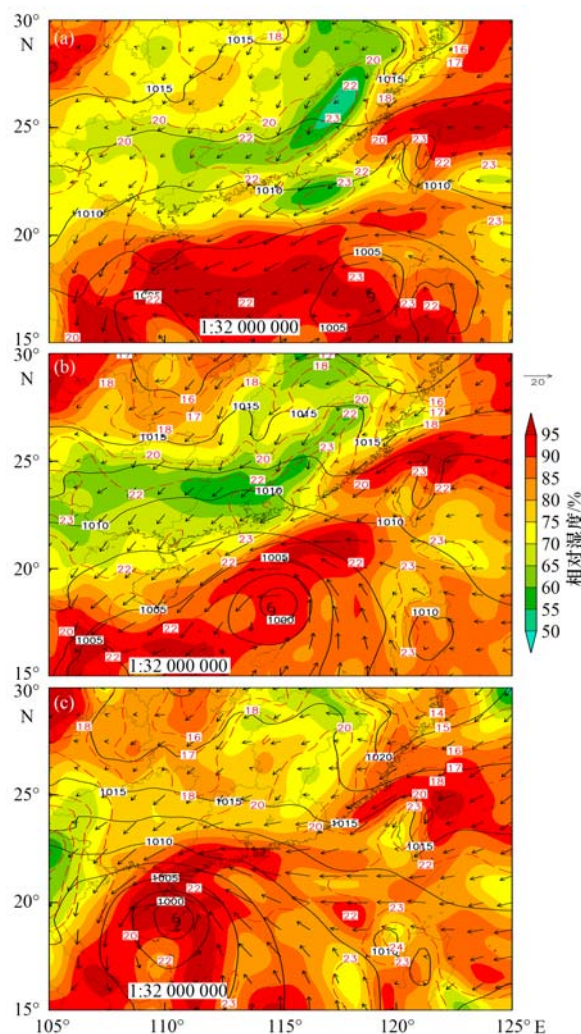
位势高度场与风场叠加,图6为925 hPa风场、相对湿度、气温和海平面气压场叠加. 从10月11日20:00高空场上可以看出[图5(a)],中高纬地区为一槽一脊的形势,东亚大槽槽底偏北,西风带较为平直,西太平洋副热带高压(以下简称副高)呈带状分布,我国的东南部沿海省份在副高控制下. 台风“浪卡”此时位于副高南侧的南海东北部海面,受副高南侧偏东风引导气流影响,“浪卡”以 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右的速度稳定向西偏北方向移动. 从10月11日20:00地面场上看[图6(a)],海南岛受弱冷空气扩散影响,海平面气压1007.5 hPa等值线分布在海南岛南部. 华南地区925 hPa受东北风风场控制,福建省和广东省附近925 hPa出现了明显的高温低湿中

心,最高气温为 23°C ,相对湿度最低值在 50% 以下,而且风速较小,非常有利于该区域光化学过程的发展, O_3 浓度上升,并随着低层东北风影响海南岛. 10 月 11 日海南岛各个市县 O_3 浓度有不同程度地上升,其中临高县和屯昌县 O_3 -8h 浓度达到了轻度污染等级. 10 月 12 日 20:00 副高有所东退[图 5(b)],西脊点在 112°E 附近,浙江省南半部、福建省和广东省均在副高内部. 台风“浪卡”东移至南海北部. 海南岛海平面气压分布在 $1005 \sim 1007.5 \text{ hPa}$ 之间[图 6(b)],受台风“浪卡”靠近影响,华南地区 925 hPa 东北风持续增大,我国东南部高温低湿的范围较 10 月 11 日 20:00 明显加大,高温中心位于广东珠三角地区,中心值达 24°C ,相对湿度在 60% 以下,气象条件非常有利于该地区 O_3 浓度的升高,增大的低层东北风导致外源输送增强,10 月 12 日海南岛 O_3 -8h 浓度超标市县达到了 4 个,为此次过程 O_3 污染最为严重的 1 d. 10 月 13 日 20:00 副高范围增大[图 5(c)],台风“浪卡”于 10 月 13 日 19:20 登陆海南岛,地面风速加大并伴有强降水,气温下降,相对湿度升高[图 6(c)],海南岛此次 O_3 污染过程结束.

综上可知,我国的东南部沿海省份是海南岛此次过程的主要贡献源区. 受副高内部的下沉气流和台风“浪卡”外围下沉气流共同影响下,该地区出现晴好天气,气温偏高,紫外线强,低层风速较小,大气光化学反应加快,有利于贡献源区 O_3 浓度上升^[42]. 台风“浪卡”西北侧的低层东北气流将东南部沿海省份的大气污染物输送至海南岛. 随着台风“浪卡”强度增强和移动路径靠近,我国东南部省份气象条件有利于光化学反应速率上升,可能导致 O_3 浓度升高,配合上东北气流的加强,外源输送强度增大,致使 10 月 11 日和 10 月 12 日夜間海南岛 O_3 浓度持续增加,出现多个市县 O_3 -8h 浓度超标事件.

2.4.2 垂直速度与云图分析

图 7 给出了 2020 年 10 月 11~13 日 20:00 950 hPa 风场、垂直速度和 2 m 温度露点差叠加,图 8 给出了同期 14:00 H8 卫星红外亮温(TBB). 从中可以清楚看出,台风“浪卡”中心附近存在剧烈的上升气流,TBB 值在 -70°C 左右(图 8),西侧和北侧的外围区域以下沉引动为主,形成了较为典型的热带气旋垂直循环结构. 10 月 11 日 20:00,我国东南部省份的大部分地区处在下沉气流控制下,下沉速度分布在 $0.1 \sim 0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间[图 7(a)],TBB 值在 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间[图 8(a)],水平风速较小,同时配合有明显的干区,2 m 温度露点差在 4°C 以上,最大值出现在广东省东部至福建省中部,为 8°C ,气象条件非常



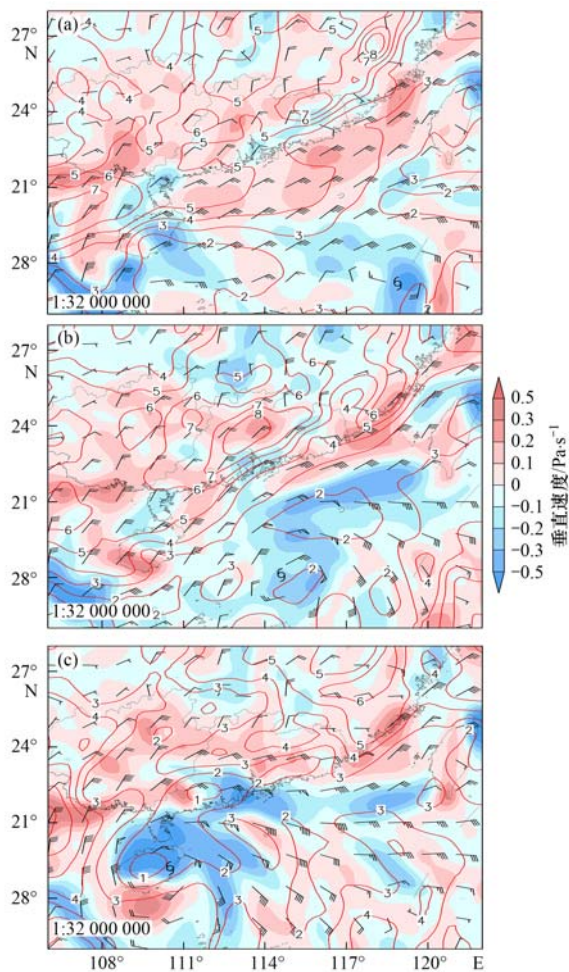
(a)2020 年 10 月 11 日 20:00, (b)2020 年 10 月 12 日 20:00, (c)2020 年 10 月 13 日 20:00; 黑色实线表示海平面气压,单位 hPa; 红色虚线表示气温,单位 $^{\circ}\text{C}$; 矢量表示风速,单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

图 6 台风“浪卡”期间 925 hPa 风场、相对湿度、气温与海平面气压叠加

Fig. 6 Distribution of 925 hPa wind fields, relative humidity, temperature and mean surface sea level pressure during typhoon “Nangka”

有利这些区域的光化学反应, O_3 浓度上升. 海南岛主要为上升气流影响,这可能与地形对低空气流的抬升作用有关^[43]. 台湾海峡至海南岛东侧的南海北部海面有明显的东北气流控制,风速总体偏大,外源输送特征非常显著. 10 月 12 日 20:00 台风“浪卡”中心 TBB 值进一步降低至 -80°C 左右[图 8(b)],强度增强. 随着台风“浪卡”强度的增强和中心逐渐靠近,福建省、广东省和海南岛北半部均在台风外围的下沉气流区域,2 m 温度露点差中心(8°C)位于广东省珠三角地区,增强的下沉气流运动使得气流存在垂直方向的传输,光化学反应剧烈,近地面 O_3 聚集,造成 O_3 污染并随着增强的台风西北侧东北气流输送至海南岛. 由于 O_3 形成机制较为复杂,低层

水平输送过程是直接输送 O_3 到海南岛,还是输送前体物到海南岛,而后在海南岛光化学反应生成,还有待于进一步研究. 10 月 13 日 20:00 台风“浪卡”已登陆海南岛[图 7(c)],有强降水发生,950 hPa 海南岛上为台风旋转风控制,广东省珠三角地区被台风螺旋云带控制[图 8(c)],也有明显的上升气流覆盖,传输机制被打破,海南岛 O_3 浓度下降,此次 O_3 污染过程结束.



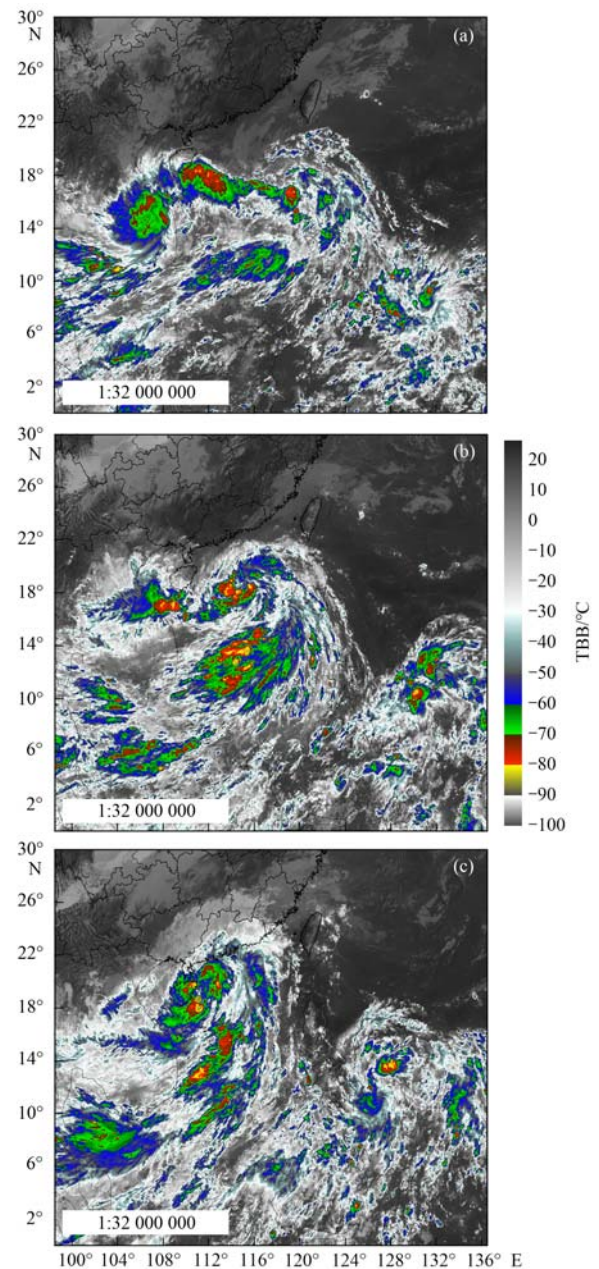
(a)2020 年 10 月 11 日 20:00, (b)2020 年 10 月 12 日 20:00, (c)2020 年 10 月 13 日 20:00; 色柱表示垂直速度,正数表示垂直向下运动,负数表示垂直向上运动,单位 $Pa \cdot s^{-1}$; 红色实线表示 2 m 温度露点差,单位 $^{\circ}C$; 风羽表示风场

图 7 台风“浪卡”期间 950 hPa 风场、垂直速度与 2 m 温度露点差叠加

Fig. 7 Distribution of 950 hPa wind fields, vertical speed, and difference in 2 m temperature and dew point during typhoon “Nangka”

2.4.3 后向轨迹与天气概念模型

利用 HYSPLIT 模型对台风“浪卡”期间(10 月 11 日 20:00 和 10 月 12 日 20:00)临高县 72 h 后向轨迹进行模拟,结果如图 9 所示. 从中可知,10 月 11 日和 10 月 12 日的 20:00 临高县 100、500 和 1 000 m 高度的影响气流主要来自长三角地区及其



(a)2020 年 10 月 11 日 14:00, (b)2020 年 10 月 12 日 14:00, (c)2020 年 10 月 13 日 14:00

图 8 台风“浪卡”期间葵花 8 号卫星红外亮温 (TBB)

Fig. 8 Infrared bright temperature from Himawari-8 satellite during typhoon “Nangka”

以东洋面,经过我国东南沿海省份到达海南岛. 10 月 11 日 20:00 100 m 气流主要分布在陆地[图 9(a)],500 m 气流主要流经东南沿海,而 1 000 m 气流主要来自海上. 10 月 12 日 20:00 的气流轨迹表明[图 9(c)],不同高度的影响气流均经过广东省后影响海南岛. 从垂直高度上看,10 月 11 日 20:00 100 m 高度气流随着时间的推移先上升后下沉[图 9(b)],而 500 和 1 000 m 气流均表现为下沉趋势,说明高空和地面的污染物在前期发生了混合累积,随后在台风外围下沉气流的影响下,聚集在低层并输送至海南岛. 10 月 12 日 20:00 100、500 和 1 000 m

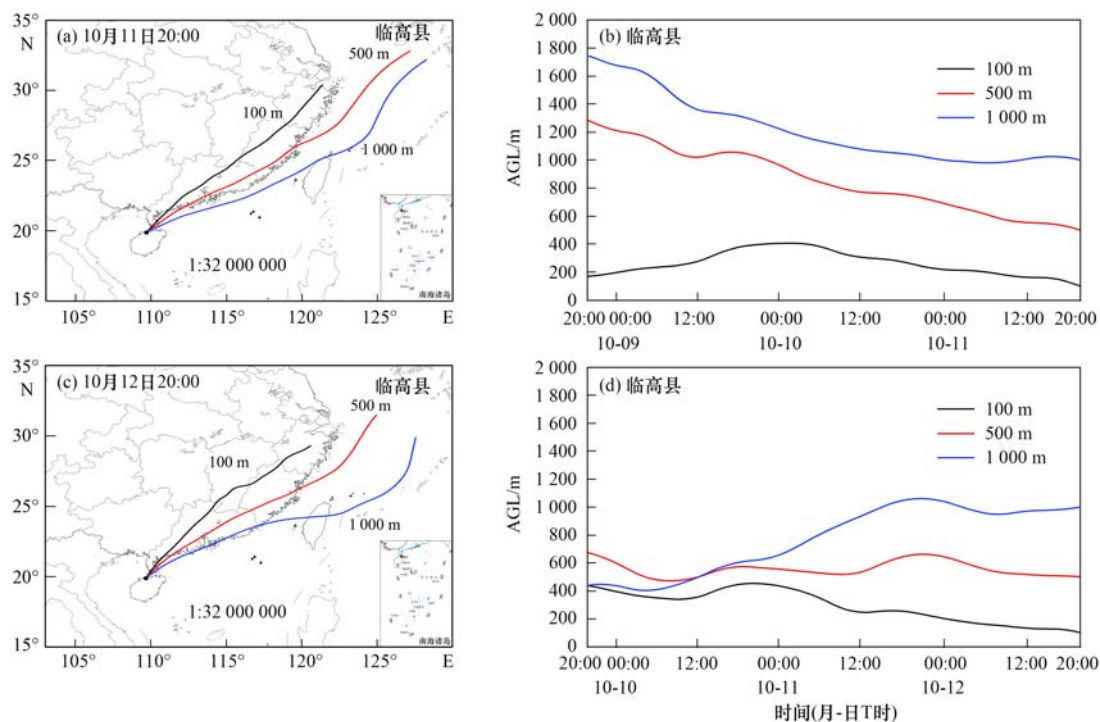


图 9 台风“浪卡”期间临高县 72 h 后向轨迹
Fig. 9 The 72 h back trajectory of Lingao during typhoon “Nangka”

气流主要来自 400 ~ 600 m 高度上[图 9(d)],其中 1 000 m 气流随着时间推移表现为先上升后趋于平稳变化,这可能与流经区域有关,而 100 和 500 m 气流主要表现为波动式的下降趋势,污染物在流向海南岛的过程当中,受下沉气流影响聚集在低空,造成了海南岛此次 O₃ 污染过程。

结合前面的分析,本文凝练了台风“浪卡”影响下的海南岛 O₃ 污染的大尺度天气概念模型,天气形势配置示意如图 10 所示. 500 hPa 东亚中高纬大陆呈一槽一脊型,槽脊位置总体偏北,西风带较为平直. 受北方槽脊活动挤压影响,副高加强西伸,西脊点位于华南附近. 地面冷高压主体位于长江以北地区,华南地区受其南侧东北气流影响,风速偏弱. 台风位于副高西南侧,受副高引导气流影响稳定向西

偏北方向移动,强度有所加强. 在副高下沉气流与台风外围下沉气流共同影响下,我国东南部省份出现高温、低湿和弱风等有利于光化学反应的气象条件,随着台风强度的加强与中心位置的靠近,该区域光化学反应速率加快,O₃ 浓度上升,高浓度的 O₃ 和前体物随着低层东北气流输送至海南岛,导致了海南岛 O₃ 污染事件的发生。

3 结论

(1)2020 年 10 月 10 日海南岛没有市县空气质量超标,而台风“浪卡”过程期间,10 月 11 ~ 13 日均有市县空气质量超标,且首要污染物均为 O₃-8h. 10 月 11 日和 10 月 12 日 O₃-8h 浓度分布表现为北部和西部偏高于东部、中部和南部,而 10 月 13 日呈南部和西部偏高,北部、中部和东部偏低的分布特征. 10 月 12 日海南岛平均的 ρ(O₃-8h) 最高,为 130.15 μg·m⁻³,共有 4 个市县 ρ(O₃-8h) 超标,其中临高县达到了全岛最高的 198.44 μg·m⁻³。

(2)台风过程期间,海南岛小时 O₃ 浓度前期较为平稳,在 10 月 12 日夜间 ρ(O₃) 出现暴发式增长,23:00 达到了 157.45 μg·m⁻³,与降水量、相对湿度和风速呈负相关关系,与气压和气温呈正相关关系,其中与降水量、气压和相对湿度的相关系数通过了 99.9% 的信度检验. 海南岛北半部市县和南半部市县 O₃ 浓度变化不同,这与五指山山脉的地形作用有关。

(3)台风登陆海南岛前,我国东南部沿海省份受

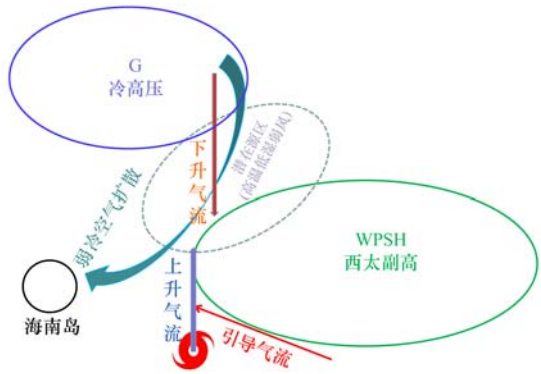


图 10 台风“浪卡”影响下的海南岛 O₃ 污染天气概念模型
Fig. 10 Conceptual model of O₃ pollution under the influence of typhoon “Nangka” in Hainan Island

副高内部的下沉气流和台风“浪卡”外围下沉气流共同影响下,天气晴好,气温偏高,紫外线强,低层风速较小,有利于大气光化学反应生成 O_3 。台风西北侧的低层东北气流将该区域的污染物输送至海南岛,输送作用随着台风“浪卡”强度增强和移动路径靠近而得到加强,致使了此次海南岛 O_3 污染事件的发生。

(4)后向轨迹模拟结果表明,10月11日和10月12日影响海南岛的气流主要来自我国东南沿海省份,高空和地面污染物在前期有混合积累,后期在台风外围下沉气流作用下于低层聚集并输送至海南岛,造成了海南岛此次 O_3 污染过程。本文凝练了台风“浪卡”影响下,海南岛 O_3 污染的天气概念模型,其结论可供大气污染预测预警研究和环境管理部门 O_3 污染联防联控参考。

参考文献:

- [1] Fan H, Zhao C F, Yang Y K. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014-2018 [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117066.
- [2] 符传博,周航.中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J].*中国环境监测*, 2021, **37**(2): 33-43.
Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 33-43.
- [3] 丁一汇,柳艳菊.近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J].*中国科学:地球科学*, 2014, **44**(1): 37-48.
Ding Y H, Liu Y J. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 36-46.
- [4] 徐祥德,王寅钧,赵天良,等.中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J].*科学通报*, 2015, **60**(12): 1132-1143.
Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al. “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- [5] Guan Y, Xiao Y, Wang Y M, et al. Assessing the health impacts attributable to $PM_{2.5}$ and ozone pollution in 338 Chinese cities from 2015 to 2020 [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117623.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 2021 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220527581962738409.pdf>, 2022-05-28.
- [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] 常炉予,许建明,瞿元昊,等.上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究[J].*环境科学学报*, 2019, **39**(1): 169-179.
Chang L Y, Xu J M, Qu Y H, et al. Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 169-179.
- [10] 解淑艳,霍晓芹,曾凡刚,等.2015-2019年汾渭平原臭氧污染状况分析[J].*中国环境监测*, 2021, **37**(1): 49-57.
Xie S Y, Huo X Q, Zeng F G, et al. Analysis of ozone pollution in Fenwei Plain from 2015 to 2019 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(1): 49-57.
- [11] 高拴柱,董林,许映龙,等.2016年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J].*气象*, 2018, **44**(2): 284-293.
Gao S Z, Dong L, Xu Y L, et al. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoons in Western North Pacific in 2016 [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, **44**(2): 284-293.
- [12] Feng Y R, Wang A Y, Wu D, et al. The influence of tropical cyclone Melor on PM_{10} concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta region of China: numerical modeling versus observational analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(21): 4349-4365.
- [13] 余伟,罗栩羽,范绍佳,等.珠三角一次重空气污染过程特征分析及数值模拟[J].*环境科学研究*, 2011, **24**(6): 645-653.
Yu W, Luo X Y, Fan S J, et al. Characteristics analysis and numerical simulation study of a severe air pollution episode over the Pearl River Delta [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(6): 645-653.
- [14] Hu X M, Xue M, Kong F Y, et al. Meteorological conditions during an ozone episode in Dallas-Fort Worth, Texas, and impact of their modeling uncertainties on air quality prediction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, **124**(4): 1941-1961.
- [15] Lee Y C, Calori G, Hills P, et al. Ozone episodes in urban Hong Kong 1994-1999 [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(12): 1957-1968.
- [16] Jiang F, Wang T J, Wang T T, et al. Numerical modeling of a continuous photochemical pollution episode in Hong Kong using WRF-chem [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(38): 8717-8727.
- [17] 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**(38): 15801-15819.
- [18] 岳海燕,顾桃峰,王春林,等.台风“妮妲”过程对广州臭氧浓度的影响分析[J].*环境科学学报*, 2018, **38**(12): 4565-4572.
Yue H Y, Gu T F, Wang C L, et al. Influence of typhoon Nida process on ozone concentration in Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(12): 4565-4572.
- [19] 张智,马翠平,赵娜.台风“安比”对河北东南部地区一次 O_3 污染影响的特征分析[J].*环境科学学报*, 2019, **39**(12): 4162-4173.
Zhang Z, Ma C P, Zhao N. The character analysis on typhoon ampil effecting on ozone air pollution in the southeast of Hebei Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(12): 4162-4173.
- [20] 赵文龙,张春林,李云鹏,等.台风持续影响下中山市大气 O_3 污染过程分析[J].*中国环境科学*, 2021, **41**(12): 5531-5538.
Zhao W L, Zhang C L, Li Y P, et al. Analysis of the ozone pollution process in Zhongshan under the continuous influence of

- typhoons[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(12): 5531-5538.
- [21] 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, Lü 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.
- [22] 海南省生态环境厅. 2020 年海南省生态环境状况公报[EB/OL]. http://hnstb.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202106/t20210607_2990105.html, 2021-06-07.
- [23] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 前体物与气象因子对海南省臭氧污染的影响[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(7): 45-50.
Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Hainan Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(7): 45-50.
- [24] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 海南省城市臭氧污染特征及气象学成因[M]. 北京: 气象出版社, 2021.
- [25] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 675-685.
Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Temporal and spatial variations in ozone and its causes over Hainan Province from 2015 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 675-685.
- [26] 苏超. 海口市环境空气质量、污染特征及其影响因素研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.
Su C. The research on Haikou air quality, pollution characteristics and its influence factors [D]. Haikou: Hainan University, 2016.
- [27] 徐文帅, 邢巧, 孟鑫鑫, 等. 海口市臭氧污染特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(4): 186-193.
Xu W S, Xing Q, Meng X X, *et al.* Characteristics of ozone pollution in Haikou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 186-193.
- [28] 赵蕾, 吴坤梯, 陈明. 2013—2016 年海口市空气质量特征及典型个例污染物来源分析[J]. *气象与环境学报*, 2019, **35**(5): 63-69.
Zhao L, Wu K T, Chen M. Characteristics of air quality in Haikou from 2013 to 2016 and pollutant source analysis during typical pollution events [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, **35**(5): 63-69.
- [29] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 2017 年 10 月海南省一次臭氧污染特征及输送路径与潜在源区分析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(4): 863-871.
Fu C B, Dan L, Tang J X, *et al.* Potential source contributions and transported routes in Hainan Province during ozone polluted episode in October 2017 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(4): 863-871.
- [30] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [31] 朱景, 袁慧珍. ERA 再分析陆面温度资料在浙江省的适用性[J]. *气象科技*, 2019, **47**(2): 289-298.
Zhu J, Yuan H Z. Applicability of ERA reanalysis data of land surface temperature in Zhejiang Province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, **47**(2): 289-298.
- [32] 符传博, 丹利, 刘丽君, 等. 2019 年秋季三亚市一次典型臭氧污染个例气象成因解析[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(1): 89-99.
Fu C B, Dan L, Liu L J, *et al.* Characteristics of a typical ozone pollution event and its meteorological reason in Sanya City in autumn 2019 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(1): 89-99.
- [33] 张夕迪, 孙军. 葵花 8 号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析[J]. *气象*, 2018, **44**(10): 1245-1254.
Zhang X D, Sun J. Application analysis of Himawari-8 in monitoring heavy rain convective clouds [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, **44**(10): 1245-1254.
- [34] 肖建能, 杜国明, 施益强, 等. 厦门市环境空气污染时空特征及其与气象因素相关分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3363-3371.
Xiao J N, Du G M, Shi Y Q, *et al.* Spatiotemporal distribution pattern of ambient air pollution and its correlation with meteorological factors in Xiamen City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3363-3371.
- [35] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 1960~2013 年我国霾污染的时空变化[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3237-3248.
Fu C B, Tang J X, Dan L, *et al.* Temporal and spatial variation of haze pollution over China from 1960 to 2013 [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3237-3248.
- [36] 周沙, 刘宁, 刘朝顺. 2013-2015 年上海市霾污染事件潜在源区贡献分析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(5): 1835-1842.
Zhou S, Liu N, Liu C S. Identification for potential sources for haze events in Shanghai from 2013 to 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(5): 1835-1842.
- [37] 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 等. 山东半岛近地面 O_3 浓度时空变化及潜在源区解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1256-1267.
Li L, Liu M X, Xiao S R, *et al.* Temporal and spatial variation in O_3 concentration near the surface of Shandong Peninsula and analysis of potential source areas [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1256-1267.
- [38] 赵飞, 包文雯, 张雪波, 等. 台风“浪卡”(2016)暴雨成因及数值预报模式偏差分析[J]. *气象研究与应用*, 2021, **42**(3): 83-87.
Zhao F, Bao W W, Zhang X B, *et al.* Typhoon Nangka (2016) rainstorm causes and deviation analysis of numerical forecast model [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2021, **42**(3): 83-87.
- [39] 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 等. 天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1573-1581.
Yao Q, Han S Q, Zhang Y F, *et al.* Effects of VOCs on ozone formation in the Tianjin suburbs in summer [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1573-1581.
- [40] 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 75-87.
Luo R X, Liu B S, Liang D N, *et al.* Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin Suburbs in summer [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 75-87.
- [41] 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 等. 淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 170-179.
Wang Y Y, Yang W, Wang X Y, *et al.* Characteristics of ozone pollution and influencing factors in urban and suburban areas in Zibo [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 170-179.
- [42] 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.
- [43] 杨仁勇, 闵锦忠, 郑艳. 强台风“纳沙”引发的特大暴雨过程数值试验[J]. *高原气象*, 2014, **33**(3): 753-761.
Yang R Y, Min J Z, Zheng Y. Numerical simulations of the extraordinary rainstorm by typhoon Nesat [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, **33**(3): 753-761.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)