

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来  
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期  
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

|                                             |                                              |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 .....                  | 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)                |
| 河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 .....                | 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)  |
| 海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 .....               | 袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)                          |
| 环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测 .....            | 李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)                          |
| 环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 .....                    | 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)                     |
| 海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展 ..... | 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858) |

|                                        |                                          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 .....                 | 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)                     |
| 水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制 .....             | 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876) |
| 中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 .....              | 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)           |
| 中国油气系统甲烷逸散排放估算 .....                   | 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)                     |
| 2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 .....   | 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)                 |
| 九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 .....            | 程宏, 陈荣 (4924)                            |
| 厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 .....                  | 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)       |
| 九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 .....   | 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)       |
| 福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 .....           | 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)            |
| 厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 .....         | 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)                  |
| 改性生物炭固定床对模拟湖水体中 $Mn^{2+}$ 的吸附 .....    | 赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)                 |
| 基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 ..... | 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)                  |
| 紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 .....             | 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)            |

研究报告

|                                                              |                                                 |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 .....                         | 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)                         |
| 伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 .....        | 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)  |
| 城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性 .....                            | 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)                         |
| 南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估 .....                                   | 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)                       |
| 我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 .....                                  | 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)               |
| 东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 .....                                  | 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)              |
| 长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 .....                          | 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)                     |
| 青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 .....                                       | 刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)                    |
| 基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素 .....                       | 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)         |
| 丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 .....                            | 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)             |
| 铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 .....                                    | 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)            |
| 基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 .....                          | 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)           |
| 寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 .....                       | 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)             |
| 中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析 .....                               | 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新 (5131)              |
| 硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析 .....              | 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)      |
| 不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响 .....              | 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)              |
| 不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 $NO$ 和 $N_2O$ 排放的影响 .....        | 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)     |
| 基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 .....                              | 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)           |
| 基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 .....              | 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)           |
| 基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 .....                             | 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)                    |
| 老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 $Cd^{2+}$ 的影响 .....                    | 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)               |
| 磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 .....                   | 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)         |
| 牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 .....                          | 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)                       |
| 磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响 .....                                | 帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)                        |
| 重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 .....                            | 方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)     |
| 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 ..... | 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)             |
| 黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 .....                                     | 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263) |
| 土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 .....                                     | 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)                  |
| 氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 .....                               | 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)                       |
| 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 .....                          | 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)                |
| 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 .....                                     | 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)                   |
| 京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 $CO_2$ 协同减排效益评估 .....               | 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)          |
| 我国塑料污染防治政策分析与建议 .....                                        | 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)                |

# 2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析

符传博<sup>1</sup>, 陈红<sup>2\*</sup>, 丹利<sup>3</sup>, 徐文帅<sup>4</sup>

(1. 海南省气象科学研究所, 海口 570203; 2. 海南省气象台, 海口 570203; 3. 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; 4. 海南省环境科学研究院, 海口 571126)

**摘要:** 基于2019年秋季海南省空气质量和气象监测数据, 结合相关分析、HYSPLIT后向轨迹模型、PSCF(潜在源贡献因子)和CWT(浓度权重轨迹)等分析方法对海南省4次O<sub>3</sub>污染过程特征及潜在源区进行深入分析. 结果表明: ①过程1和过程3分别发生在9月21~30日和11月3~11日, 持续时间达到了10 d和9 d,  $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$  (最大8 h平均) 分别为145.52  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和143.55  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 过程2和过程4出现在10月18~21日和11月20~25日, 持续时间为4 d和6 d,  $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$  分别为130.79  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和115.46  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . ②气压偏高, 降水偏少, 相对湿度偏低, 日照时数偏长和太阳辐射偏强, 是造成海南省出现O<sub>3</sub>污染天气的有利气象条件. 偏北风场控制下有利于O<sub>3</sub>-8h浓度上升, 不同风速大小会影响海南省O<sub>3</sub>-8h浓度高值区分布. ③O<sub>3</sub>污染较为严重的过程1和过程3的影响气流发散度较大, 有来自内陆地区和东南沿海地区两支气流, 而O<sub>3</sub>污染较轻的过程2和过程4的影响气流较为集中, 多为东南沿海气流. ④潜在贡献源区分析表明, 浙江省、江西省、福建省和广东省等地是2019年秋季海南省O<sub>3</sub>污染外源输送的主要源区, 其中珠三角地区和广东省西部WPSCF值和WCWT值分别为大于0.36和大于90  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

**关键词:** 臭氧(O<sub>3</sub>); 后向轨迹; 潜在源贡献因子(PSCF); 浓度权重轨迹(CWT); 海南

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5000-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201225

## Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019

FU Chuan-bo<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>2\*</sup>, DAN Li<sup>3</sup>, XU Wen-shuai<sup>4</sup>

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

**Abstract:** Based on the air quality and meteorological monitoring data of Hainan province in autumn of 2019, this study analyzed the characteristics and potential sources for the four O<sub>3</sub> polluted processes in Hainan province, using the methods of correlation analysis, HYSPLIT backward trajectory modeling, PSCF (potential source contribution function), and CWT (concentration weighted-trajectory). The results showed that ① the average concentrations of the maximum 8h average (O<sub>3</sub>-8h) for process 1 and process 3, which occurred from September 21<sup>st</sup> to 30<sup>th</sup> and November 3<sup>rd</sup> to 11<sup>th</sup> with the durations of 10 d and 9 d, were 145.52  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and 143.55  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. Process 2 and process 4 occurred from October 18<sup>th</sup> to 21<sup>st</sup> and November 20<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup>, with the durations of 4 d and 6 d, and the average concentrations of O<sub>3</sub>-8h were 130.79  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and 115.46  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. ② High air pressure, low precipitation and relative humidity, long sunshine duration, and strong solar radiation favored the occurrence of O<sub>3</sub>-polluted weather in Hainan province. Northerly wind was conducive to the increase in O<sub>3</sub>-8h concentration, and wind speeds affected the regional distribution of high-value areas of O<sub>3</sub>-8h concentration in Hainan province. ③ Furthermore, process 1 and process 3 with more serious pollution had a larger air flow divergence, and there were two airflows originating from the inland area and the southeast coastal area, respectively. Air flow of process 2 and process 4 was relatively more concentrated with less O<sub>3</sub> pollution and was classified as southeast coastal air flow. ④ The analysis of potential contribution sources showed that transport from Zhejiang, Jiangxi, Fujian, and Guangdong provinces were the main sources of O<sub>3</sub> pollution in Hainan province in autumn 2019. Among them, the weight potential source contribution function (WPSCF) and weight concentration weighted-trajectory (WCWT) values were larger than 0.36 and 90  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  in the PRD (Pearl River Delta) and western Guangdong province regions, respectively.

**Key words:** ozone (O<sub>3</sub>); back trajectory; potential source contribution factor (PSCF); concentration weight trajectory (CWT); Hainan

近地面臭氧(O<sub>3</sub>)是大气中的重要痕量组分,在许多大气化学过程中起着重要的作用<sup>[1]</sup>. O<sub>3</sub>是城市光化学烟雾污染最重要的指示剂,其主要由自然排放和人为排放的前体物,包括挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和一氧化碳(CO)等,在太阳辐射作用下,经过一系列复杂的链式光化学反应生成<sup>[2]</sup>. 光化学过程是近地面O<sub>3</sub>最主要的来源,

其贡献是平流层臭氧输送通量的7~15倍<sup>[3,4]</sup>. 高浓度的O<sub>3</sub>不仅危害人体健康<sup>[5]</sup>,同时还会影响生

收稿日期: 2022-01-22; 修订日期: 2022-03-08

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)

作者简介: 符传博(1985~),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为大气环境与气候模拟, E-mail: hnfuchuanbo@163.com

\* 通信作者, E-mail: 87433270@qq.com

态环境和农业生产等<sup>[6,7]</sup>. 2013 年以来,我国各级政府高度重视大气污染防治工作,相继出台了多项大气污染治理相关的政策法规,使得  $\text{PM}_{2.5}$  持续下降. 然而,  $\text{O}_3$  浓度却稳步上升,特别是我国华东和华南等地,  $\text{O}_3$  已经代替  $\text{PM}_{2.5}$  成为最主要的大气污染物<sup>[8,9]</sup>. 相对而言,  $\text{O}_3$  污染的成因更为复杂,治理难度更大.

目前,国内外相关专家学者主要从对流层  $\text{O}_3$  的形成机制<sup>[2,10]</sup>、与前体物的相关关系<sup>[11]</sup>、气象因子<sup>[12,13]</sup>和气候变化<sup>[14,15]</sup>对  $\text{O}_3$  浓度的影响等方面展开了大量的研究,普遍认为  $\text{NO}_x$  和 VOCs 在太阳紫外光照射下形成的光化学反应是我国  $\text{O}_3$  污染的重要原因之一<sup>[2]</sup>,不同地区  $\text{O}_3$  浓度对  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的敏感性不同,超大城市的  $\text{O}_3$  几乎都是 VOCs 控制区<sup>[16]</sup>,而大部分城市则受  $\text{NO}_x$  控制<sup>[17]</sup>,我国东部部分城市为混合敏感区<sup>[18]</sup>. 大尺度环流和局地气象因子会显著影响  $\text{O}_3$  浓度的变化,如高空急流、台风等天气系统附近容易发生高空  $\text{O}_3$  的下传和积聚,造成地面  $\text{O}_3$  浓度超标<sup>[19~21]</sup>. 此外高强度的紫外辐射配合高温低湿的气象条件能有效促进光化学反应生成速率,较小的风速和有利风向会对  $\text{O}_3$  的传输及消散产生影响<sup>[22,23]</sup>. 气候变化一方面通过改变地面气温和湿度,从而影响  $\text{O}_3$  及前体物的自然排放;另一方面通过改变天气系统出现频率和大气环流形势,进而影响  $\text{O}_3$  的水平扩散和传输方式<sup>[24,25]</sup>.

海南省地处中国南端,北邻广东省,是我国唯一一个热带海岛旅游省份. 海南省属于热带季风气候<sup>[26]</sup>,夏半年受西南季风影响,天气炎热潮湿,降水充沛;冬半年受欧亚大陆气团影响,偏北气流容易携带北方大量污染物输送至海南省,进而影响海南省空气质量状况<sup>[22]</sup>. 根据海南省生态环境厅的统计结果<sup>[27]</sup>,发现 2019 年海南省空气质量优良天数较 2018 年上升 1.5 个百分点,  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度持续下降. 然而与此同时,海南省  $\text{O}_3$  浓度维持较高水平,与 2018 年相比,  $\rho(\text{O}_3)$  更是上升了  $11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 秋季是海南省  $\text{O}_3$  污染的高发季节<sup>[28]</sup>,一方面由于秋季北方冷空气开始活跃,而海南省位于偏北气流的下游区,大气污染物外源输送对海南省空气质量影响较大;另一方面由于纬度偏低,秋季海南省气温还没有明显下降,太阳辐射较强,因此气象条件对光化学反应比较有利. 2019 年秋季海南省发生了 4 次以  $\text{O}_3$  为主要污染物的大气污染物事件,  $\text{O}_3$  污染问题已经引起政府和社会的广泛关注. 本文基于 2019 年秋季海南省空气质量数据和气象监测数据,结合相关分析、HYSPLIT 后向轨迹模

型、潜在源贡献因子 (potential source contribution factor, PSCF) 和浓度权重轨迹 (concentration weight trajectory, CWT) 等分析方法,对海南省 4 次  $\text{O}_3$  污染发生的主要原因及潜在贡献源区进行分析,以期政府部门制定  $\text{O}_3$  污染防治政策提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据资料

本文选取了海南省 18 个市县 (三沙市除外) 2019 年秋季 (9、10 和 11 月) 逐日的环境监测数据和气象观测数据进行分析,其中  $\text{O}_3$ -8h (最大 8 h 平均) 浓度来自海南省生态环境厅,数据获取网址为: <http://hnsthb.hainan.gov.cn:8009/EQGIS>. 气象数据来自海南省气象局,要素包括日降水量、相对湿度、平均气温、大气压、平均风速、日照时数、最大风速和风向等. HYSPLIT 轨迹模型中使用的气象资料为美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的全球资料同化系统 (GDAS) 数据,空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间分辨率为  $4 \text{次}\cdot\text{d}^{-1}$ ,分别为 00:00、06:00、12:00 和 18:00 (UTC,世界时),变量包括气温、气压、湿度、风场和压力垂直速率等. GDAS 资料从公开网址 (<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>) 下载得到.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 HYSPLIT 后向轨迹模型

为追溯海南省  $\text{O}_3$  污染期间气团路径与走向,本文采用了拉格朗日混合单粒子轨道 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT) 模型进行影响气流后向轨迹模拟. HYSPLIT 模型最初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,目前 HYSPLIT4.9 版本是最新版本,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,因此被广泛应用于大气污染物来源及输送路径等方面的研究<sup>[29,30]</sup>.

#### 1.2.2 潜在源区贡献函数和浓度权重轨迹方法

潜在源贡献因子算法 (PSCF) 和浓度权重轨迹分析法 (CWT) 是通过计算气流轨迹特征判断污染物潜在源区的方法<sup>[31]</sup>. PSCF 法是利用污染轨迹与所有轨迹在途经区域停留时间的比值来表征每个格点区域对受体点的污染贡献<sup>[32]</sup>,PSCF 值越大,表示该网格点对受体点  $\text{O}_3$  浓度的影响越大. 为了降低由于单个网格内气流停留时间较短而引起 PSCF 值的波动,本文引入权重函数来降低 PSCF 值的不确定性<sup>[33]</sup>. 本文中,PSCF 方法设定的  $\text{O}_3$  浓度阈值为 160

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (国家二级标准限值), 权重函数选取可见文献[34]. CWT 法是计算经过每个网格轨迹的污染权重指数, 反映网格对受体点污染物浓度的贡献, 可以区分相同 PSCF 值时网格内污染物浓度高出阈值的程度<sup>[35]</sup>. 在计算 CWT 值时, 本研究也采用了与 PSCF 法相同的权重函数.

2 结果与讨论

2.1 臭氧污染天气过程概况

图 1 给出了 2019 年秋季海南省平均的  $\text{O}_3$ -8h 浓度和超标市县个数逐日变化. 从超标市县个数上看, 海南省市县  $\text{O}_3$ -8h 浓度超标主要发生在 9 月 21~30 日、10 月 18~21 日、11 月 3~11 日和 11 月 20~25 日, 而其余时段各个市县的  $\text{O}_3$ -8h 浓度没有超标, 同时考虑到  $\text{O}_3$  污染发生的持续性, 因此本文定义 9 月 21~30 日为过程 1, 10 月 18~21 日为过程 2, 11 月 3~11 日为过程 3, 11 月 20~25 日为过程 4. 对比而言, 过程 1 和过程 3 的  $\text{O}_3$  污染程度、污

染范围和持续时间都相对要严重(表 1), 过程 1 和过程 3 分别持续了 10 d 和 9 d, 污染时段全省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  平均值分别达到了  $145.52\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $143.55\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 过程 1 中单日超标市县最大个数为 11 个, 分别出现在 9 月 28 日和 9 月 29 日, 过程 3 单日超标市县最大个数为 10 个, 出现在 11 月 5 日. 过程 1 和过程 3 分别平均每天有 6 个和 5.44 个市县  $\text{O}_3$ -8h 浓度超标. 过程 2 和过程 4 的  $\text{O}_3$  污染相对要轻, 持续时间分别为 4 d 和 6 d, 分别出现在 10 月 18~21 日和 11 月 20~25 日, 污染时段  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  分别为  $130.79\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $115.46\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 单日超标市县最大个数分别为 7 个(过程 2)和 9 个(过程 4), 出现日期为 10 月 19 日和 11 月 22 日, 每天  $\text{O}_3$ -8h 浓度平均值超标市县数均少于 3 个. 从污染时段  $\text{O}_3$ -8h 浓度大小来看: 过程 1 > 过程 3 > 过程 2 > 过程 4. 从污染持续时间长短来看: 过程 1 > 过程 3 > 过程 4 > 过程 2. 从污染时段单日平均超标市县个数上看: 过程 1 > 过程 3 > 过程 2 > 过程 4.

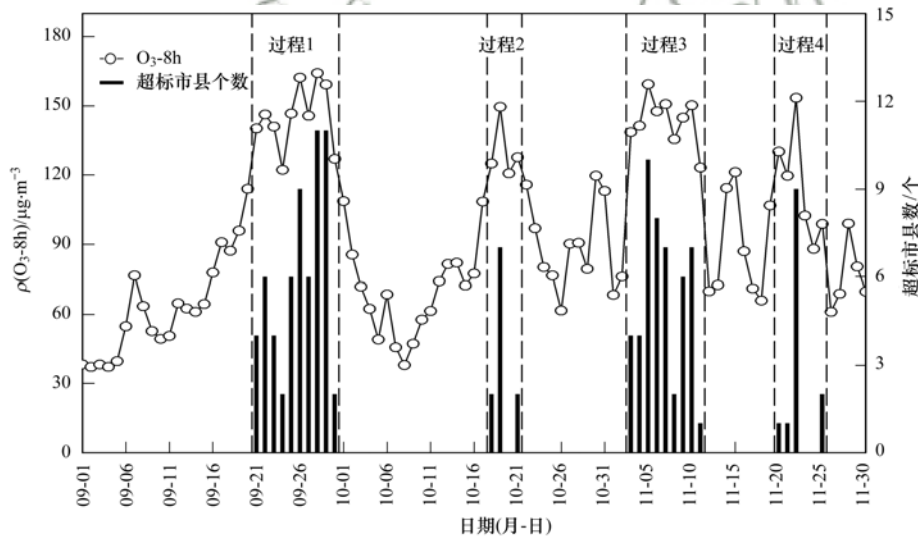


图 1 2019 年秋季海南省  $\text{O}_3$ -8h 浓度和超标市县个数逐日变化

Fig. 1 Daily change in  $\text{O}_3$ -8h concentration and the polluted number of cities and counties over Hainan province in autumn of 2019

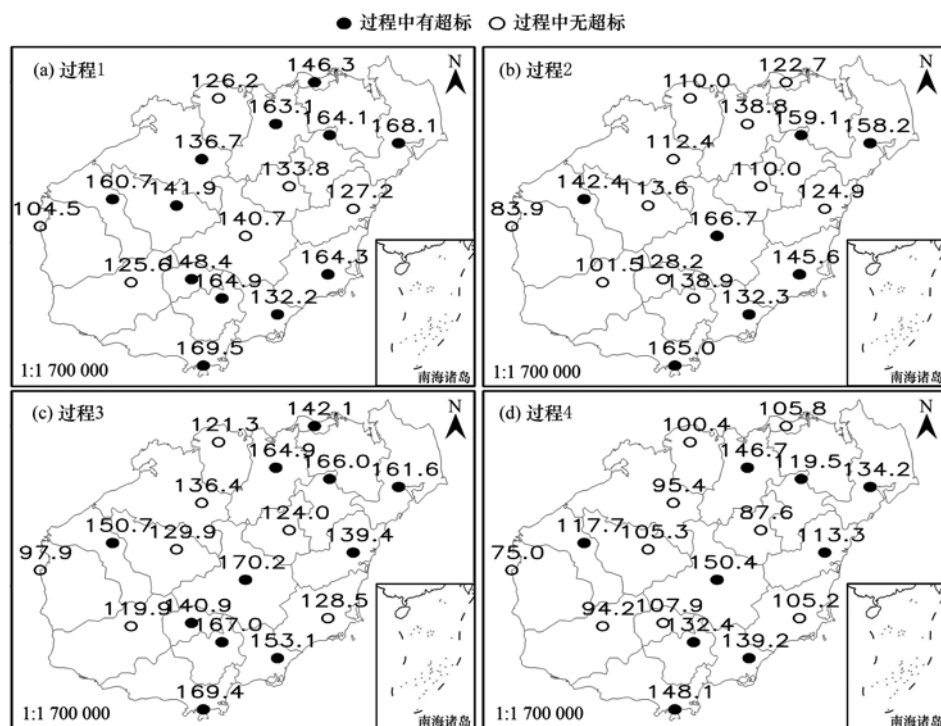
表 1 4 次  $\text{O}_3$ -8h 污染过程对比分析

Table 1 Comparative analysis of the four times  $\text{O}_3$ -8h polluted process

| 项目   | 污染时段         | 持续时间<br>/d | 污染时段<br>$\rho(\text{O}_3\text{-8h})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 污染时段单日平均<br>超标市县数/个 | 污染时段单日超标<br>市县最大数/个 | 污染时段单日最大超标<br>市县对应日期 |
|------|--------------|------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 过程 1 | 9 月 21~30 日  | 10         | 145.52                                                             | 6.00                | 11                  | 9 月 28 日<br>9 月 29 日 |
| 过程 2 | 10 月 18~21 日 | 4          | 130.79                                                             | 2.75                | 7                   | 10 月 19 日            |
| 过程 3 | 11 月 3~11 日  | 9          | 143.55                                                             | 5.44                | 10                  | 11 月 5 日             |
| 过程 4 | 11 月 20~25 日 | 6          | 115.46                                                             | 2.17                | 9                   | 11 月 22 日            |

图 2 进一步给出了 4 次污染过程期间平均  $\text{O}_3$ -8h 浓度空间分布. 从中可以发现, 过程 1 中各个市县  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  整体偏高, 除了西部的东方市 ( $104.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 外, 其余市县主要分布在  $125\sim170$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间. 其中超过  $160\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (国家二级标准限值) 的市县共有 7 个, 分别是位于北部的澄迈县和定安县, 东部的文昌市和万宁市, 西部的昌江县, 以及南部的保亭县和三亚市, 其中最高值出现在三



审图号:GS(2016)569 号,数值单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图2 4次污染过程中 $\text{O}_3$ -8h浓度平均值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of mean  $\text{O}_3$ -8h concentration during the four polluted processes

亚市,为  $169.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 过程 1 期间  $\text{O}_3$ -8h 浓度超标的市县达到了 12 个,超标市县的分布与污染期间  $\text{O}_3$ -8h 浓度的分布基本一致. 过程 2 期间各个市县  $\text{O}_3$ -8h 浓度相对偏低,东方市  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  仅为  $83.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其余市县分布在  $100 \sim 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,其中中部的琼中县和南部的三亚市超过了  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 过程 2 期间  $\text{O}_3$ -8h 浓度超标的市县只有 7 个,分别是北部的定安县,东部的文昌市和万宁市,南部的陵水县和三亚市,以及西部的昌江县. 与过程 1 类似,过程 3 期间各个市县的  $\text{O}_3$ -8h 浓度也较为偏高,大部分市县  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  分布在  $120 \sim 170 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,其中超过  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的市县达到了 6 个,最高值出现在中部的琼中县,为  $170.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,最低值出现在西部的东方市,为  $97.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 过程 3 期间  $\text{O}_3$ -8h 浓度超标的市县达到了 11 个,与过程 1 不同的是西部市县污染并不严重,而中部的琼中县  $\text{O}_3$ -8h 浓度明显偏高. 过程 4 期间各个市县  $\text{O}_3$ -8h 浓度也相对偏低,东方市  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  仅为  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,是 4 次过程中的最低值,其余市县分布在  $87 \sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间. 过程 4 期间  $\text{O}_3$ -8h 浓度超标的市县为 9 个,主要分布在北部、中部和南部地区. 总的来看,4 次污染过程中北部和南部的大部分市县  $\text{O}_3$ -8h 浓度偏高,其中 4 次过程中  $\text{O}_3$ -8h 浓度均超标的市县有北部的定安县,东部的文昌市,以及南部的保亭县和三亚市,其内在原因还有待于进一步分析.

## 2.2 近地面气象条件和 $\text{NO}_2$ 浓度变化

图 3 为 2019 年秋季气象因子和  $\text{NO}_2$  浓度的逐日变化. 从气压和日降水量上看[图 3(a)],  $\text{O}_3$  污染时段海南省气压均有所偏高,同时没有明显降水天气发生. 4 次污染过程气压值分别为  $1000.97$ 、 $1001.48$ 、 $999.91$  和  $1003.11 \text{ hPa}$ (表 2),均高于秋季平均值( $999.01 \text{ hPa}$ ),而污染时段日降水量均低于  $1.21 \text{ mm}$ ,也明显低于秋季平均值( $5.13 \text{ mm}$ ). 一般而言,降水偏大时一方面雨水的冲刷作用会降低大气污染物浓度;另一方面会提高大气中的水汽含量,抑制光化学反应速率<sup>[36]</sup>,进而降低  $\text{O}_3$  浓度. 从平均气温和相对湿度上看[图 3(b)],污染时段平均气温略低于污染前期和后期的平均气温,同时相对湿度有所下降. 4 次污染过程平均气温均在  $22^\circ\text{C}$  以上,相对湿度均低于  $78.99\%$ . 对比而言,污染更为严重的过程 1 和过程 3 相对湿度只分别为  $74.12\%$  和  $74.73\%$ ,远远低于秋季平均值( $80.48\%$ ). 从平均风速和日照时数上看[图 3(c)],  $\text{O}_3$  污染时段海南省平均风速有较大变化,如过程 1 时段平均风速偏小于秋季平均值( $1.94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),但同为污染较为严重的过程 3 平均风速偏大于秋季平均值,同时污染较轻的过程 2 和过程 4 接近于秋季平均值.  $\text{O}_3$  污染时段日照时数总体偏高,除了过程 2 以外,过程 1、过程 3 和过程 4 日照时数均高于秋季平均值( $5.96 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ ),特别是过

程 1,日照时数达到了  $7.89 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ ,远远大于秋季平均值.从太阳总辐射和  $\text{NO}_2$  浓度上看[图 3(d)],过程 1 太阳总辐射高达  $19.79 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,明显偏高于秋季平均值( $15.80 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),而其余污染过程太阳总辐射接近于秋季平均值.4 个过程中  $\text{NO}_2$  浓度均高于秋季平均值( $7.73 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),其中过程 3  $\rho(\text{NO}_2)$  高达  $10.27 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .太阳辐射作为影响光化学反应较为重要的因子之一,其值越大,越能促进光化学反

应的速率<sup>[37,38]</sup>;而  $\text{NO}_2$  是  $\text{O}_3$  的主要前体物之一,其浓度越高, $\text{O}_3$  浓度上升,反之其值越小, $\text{O}_3$  浓度越低<sup>[39,40]</sup>.表 3 进一步给出了  $\text{O}_3$ -8h 浓度与气象要素和  $\text{NO}_2$  浓度的相关系数,其中  $\text{O}_3$ -8h 浓度与气压、日降水量、平均气温、相对湿度和  $\text{NO}_2$  浓度的相关系数均通过了 99% 信度检验,日照时数和太阳总辐射的相关系数分别通过了 95% 和 90% 的信度检验,而平均风速没有通过检验.

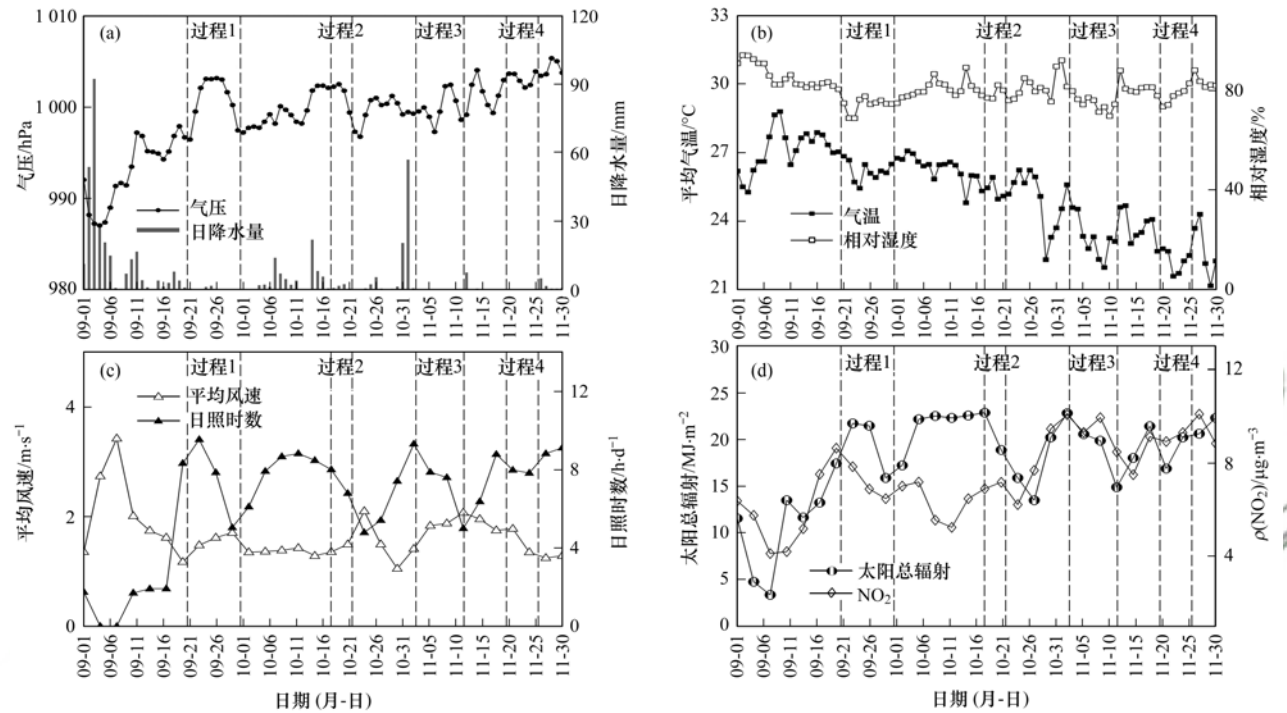


图 3 海南省 2019 年秋季气象要素和  $\text{NO}_2$  浓度的逐日变化

Fig. 3 Daily variations in meteorological elements and  $\text{NO}_2$  concentration over Hainan province during autumn 2019

表 2 4 次  $\text{O}_3$ -8h 污染过程中气象要素对比分析

Table 2 Comparative analysis of meteorological elements during four times  $\text{O}_3$ -8h polluted process

| 时段   | $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$<br>$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 气压<br>$/\text{hPa}$ | 日降水量<br>$/\text{mm}$ | 平均气温<br>$/^\circ\text{C}$ | 相对湿度<br>$/\%$ | 平均风速<br>$/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 日照时数<br>$/\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ | 太阳总辐射<br>$/\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ | $\rho(\text{NO}_2)$<br>$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |
|------|------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 过程 1 | 200.26                                                           | 1 000.97            | 0.33                 | 26.20                     | 74.12         | 1.66                                  | 7.89                                  | 19.79                                   | 9.16                                                    |
| 过程 2 | 130.79                                                           | 1 001.48            | 1.21                 | 25.36                     | 78.99         | 1.98                                  | 5.67                                  | 15.48                                   | 7.86                                                    |
| 过程 3 | 204.36                                                           | 999.91              | 0.01                 | 23.24                     | 74.73         | 2.13                                  | 6.05                                  | 15.51                                   | 10.27                                                   |
| 过程 4 | 115.46                                                           | 1 003.11            | 0.03                 | 22.25                     | 77.84         | 1.93                                  | 6.95                                  | 15.88                                   | 9.75                                                    |
| 秋季   | 94.15                                                            | 999.01              | 5.13                 | 25.26                     | 80.48         | 1.94                                  | 5.96                                  | 15.80                                   | 7.73                                                    |

表 3 2019 年秋季  $\text{O}_3$ -8h 浓度与气象要素和  $\text{NO}_2$  浓度的相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficients of  $\text{O}_3$ -8h with meteorological elements and  $\text{NO}_2$  in autumn 2019

|                  | 气压        | 日降水量       | 平均气温       | 相对湿度       | 平均风速  | 日照时数     | 太阳总辐射   | $\text{NO}_2$ |
|------------------|-----------|------------|------------|------------|-------|----------|---------|---------------|
| $\text{O}_3$ -8h | 0.497 *** | -0.407 *** | -0.365 *** | -0.752 *** | 0.019 | 0.247 ** | 0.177 * | 0.764 ***     |

1) \*\*\* 表示通过 99% 的信度检验, \*\* 表示通过 95% 的信度检验, \* 表示通过 90% 的信度检验

为了分析不同风向风速对海南省  $\text{O}_3$ -8h 浓度的影响,图 4 给出了海南省北南两个城市(海口市和三亚市)不同风向风速变化及其  $\text{O}_3$ -8h 浓度的风玫瑰图.可以看出,两个城市  $\text{O}_3$ -8h 浓度高值出现时风向基本一致,主要为东北风和西北风,而风速略有不

同.东北风影响时,海口市  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  超过  $140 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的风速主要集中在  $2\sim6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而三亚市集中在  $6\sim10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,这可能与海南省地形和三亚市的地理位置有关<sup>[41]</sup>.海口市位于海南岛北端,东北风场控制下,较低的风速就能携带北方大气污染物

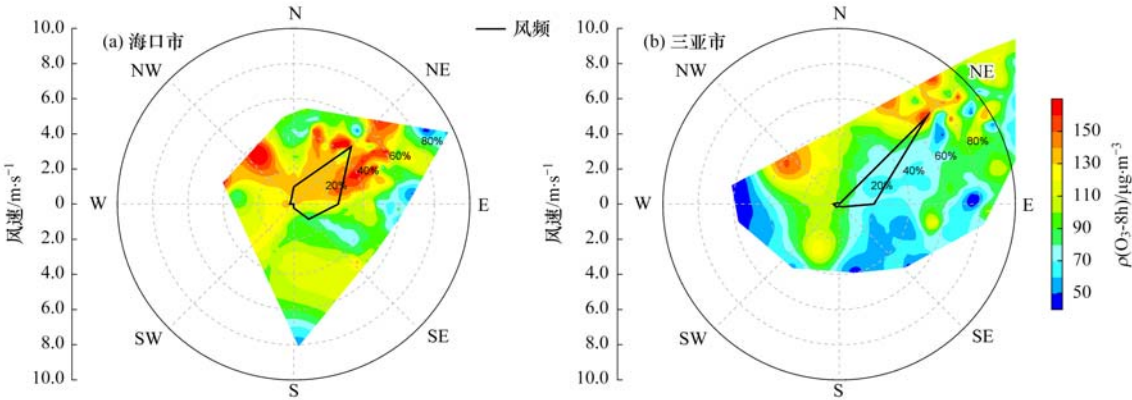


图 4 海口市和三亚市 2019 年秋季风向风速与  $\text{O}_3$ -8h 浓度的关系

Fig. 4 Relationship between  $\text{O}_3$ -8h concentration and wind speed, direction over Haikou City and Sanya City during autumn 2019

影响海口市；而三亚市位于海南岛南端，加上五指山脉的阻挡，外来污染物要输送至三亚市则需要更大的风速。总体而言，东北风和西北风控制下有利于海南省  $\text{O}_3$ -8h 浓度上升，而不同风速可能会造成海南省  $\text{O}_3$ -8h 浓度高值区不同，偏低的风速有利于北半部市县  $\text{O}_3$ -8h 浓度升高，偏高的风速则有利于南半部市县  $\text{O}_3$ -8h 浓度升高。

2.3 后向轨迹分析

结合前面的分析可知， $\text{O}_3$  及其前体物的区域传输对海南省 2019 年秋季 4 次  $\text{O}_3$  污染过程有明显影响。因此，本文采用 HYSPLIT 后向轨迹模式，深入

探究上游区域输送对海南省 4 次  $\text{O}_3$  污染的影响。有数据模拟研究表明<sup>[42,43]</sup>，大气污染物的跨区域输送主要集中在 500 ~ 1 500 m 高度范围内，500 m 风场既可以反映近地层的气团输送特征，又可以减少地面摩擦对气团的影响，因此选用 500 m 高度处气流作为研究高度，以海口市（20.00°N，110.15°E）为受体点，模拟了 4 次  $\text{O}_3$  污染时段中每日 20:00 海口市的 72 h 后向轨迹，如图 5 所示。对于过程 1 而言[图 5(a)]，有 5 条气流轨迹从江苏省北部，途经安徽省、浙江省、江西省、福建省和广东省，到达海南省，属于长距离气流，移动速度较快。剩余 5 条气流

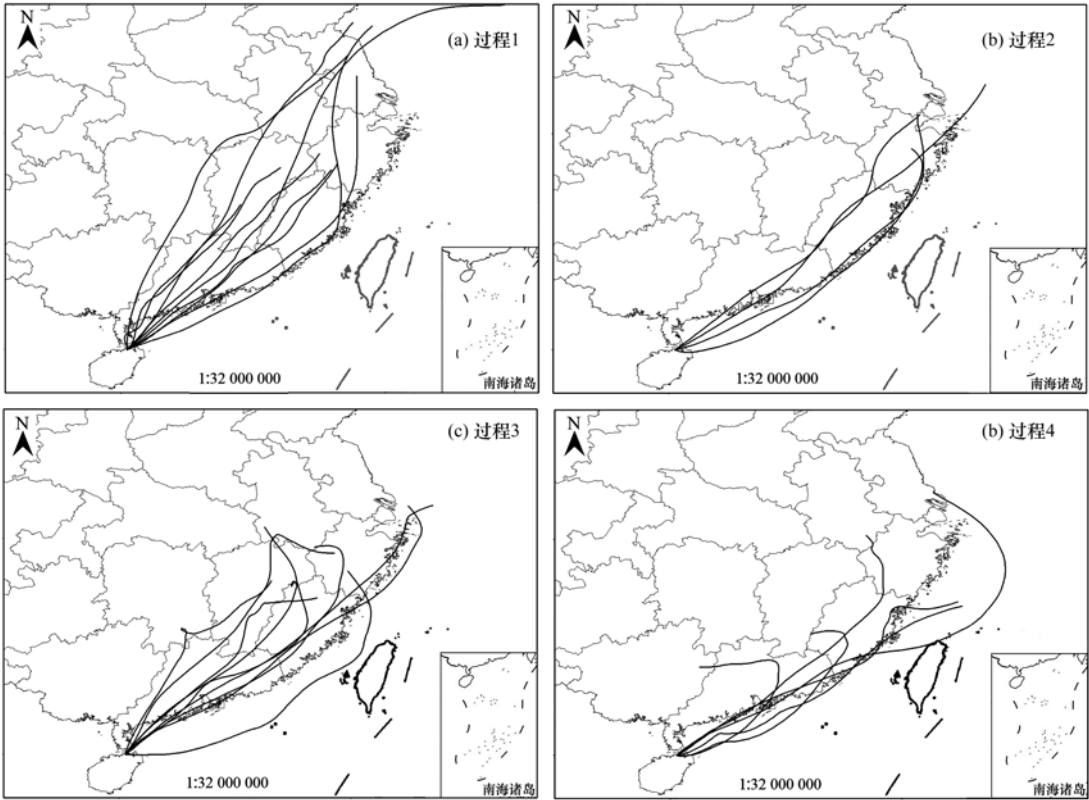


图 5 海口市 500 m 高度影响气团 72 h 后向轨迹

Fig. 5 HYSPLIT 72 h backward trajectories at 500 m over Haikou City during the four polluted periods

轨迹起始于江西省和福建省交界,经过广东省到达海南省,属于短距离气流,移动速度较慢.过程2的影响气流主要从长江三角洲地区[图5(b)],途经我国东南沿海地区到达海南省,属于中长距离气流.过程3的影响气流输送距离相对较短,也属于中长距离气流,主要起始于江西省北部和浙江省东部等地,经过福建省和广东省到达海南省.过程4的影响气流起始位置较为分散,主要位于广西自治区东部、福建省西部、安徽省南部和江苏省南部等地,途经我国东南沿海到达海南省.对比而言,过程1和过程3的影响气流发散度较大,有分布于内陆地区的气流和分布于东南沿海地区的气流两支,其中来自内陆地区的气流所经过区域大气污染物浓度更高,这也是过程1和过程3期间海南省 $O_3$ 污染程度更为严重的原因之一.而过程2和过程4的影响气流较为集中,多为东南沿海气流,气流经过区域大气污染物浓度相对较小,过程2和过程4的 $O_3$ 污染程度较轻.

#### 2.4 潜在贡献源区分析

PSCF方法表明污染轨迹通过某一区域的概率,其值是指超过阈值浓度轨迹与所有轨迹数的比值,CWT方法能给出该区域对受体点的浓度贡献大小,两者重合区域为受体点 $O_3$ 污染最主要的潜在贡献源区<sup>[44,45]</sup>.图6给出了2019年秋季海口市后向轨迹的WPSCF(weight potential source contribution function)和WCWT(weight concentration weighted-trajectory)结果.从WPSCF上看,潜在贡献源区主要集中在浙江省、江西省、福建省和广东省等地,这与后向轨迹分析基本一致.WPSCF高值区( $>0.2$ )主要集中在江西省南部、福建省和广东省,其中珠

三角地区和广东省西部WPSCF值大于0.36,表明这些区域对海南省秋季 $O_3$ 污染贡献较大.从WCWT上看,WCWT高值区( $>70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )主要分布在浙江省南部、江西省南部、福建省、广东省以及台湾海峡至海南岛东部海域,其中珠三角地区和广东省西部WCWT值高达 $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,对海南省 $O_3$ 污染输送更为明显.总的来说,WPSCF和WCWT分析得到的结果较为一致,高值区均分布在浙江省、江西省、福建省和广东省等地,这些区域也是2019年秋季海南省 $O_3$ 污染外源输送的主要贡献源区<sup>[34]</sup>.

### 3 结论

(1)2019年秋季海南省发生了4次连续 $O_3$ 污染天气过程,其中过程1和过程3污染较重,持续时间分别达到了10 d和9 d, $\rho(O_3-8h)$ 分别为 $145.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $143.55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .过程2和过程4污染较轻,持续时间分别为4 d和6 d, $\rho(O_3-8h)$ 分别为 $130.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $115.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .总体而言中北部和南部的大部分市县 $O_3-8h$ 浓度偏高,其中4次过程中 $O_3-8h$ 浓度均超标的市县有北部的定安县,东部的文昌市,以及南部的保亭县和三亚市.

(2)气压偏高,降水偏少,相对湿度偏低,日照时数偏长和太阳辐射偏强,是造成海南省出现 $O_3$ 污染天气的有利气象条件,污染时段平均气温和平均风速与秋季平均值没有明显差异.近地面东北风和西北风控制下有利于海南省 $O_3-8h$ 浓度上升,而不同风速可能会造成海南省 $O_3-8h$ 浓度高值区不同,偏低的风速有利于北半部市县 $O_3-8h$ 浓度升高,偏高的风速则有利于南半部市县 $O_3-8h$ 浓度升高.

(3)污染较重的过程1和过程3的影响气流发散度较大,有分布于内陆地区的气流和分布于东南沿海地区的气流,其中来自内陆地区的气流携带的大气污染物浓度更高.而污染较轻的过程2和过程4的影响气流较为集中,多为东南沿海气流,气流经过区域污染物浓度相对较小.

(4)海南省 $O_3$ 污染的潜在贡献源区主要集中在浙江省、江西省、福建省和广东省等地.其中珠三角地区和广东省西部WPSCF值大于0.36,WCWT值高达 $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,这些区域对2019年秋季海南省 $O_3$ 污染外源输送贡献较大.

#### 参考文献:

- [1] Chen Z Y, Li R Y, Chen D L, *et al.* Understanding the causal influence of major meteorological factors on ground ozone concentrations across China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118498.
- [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

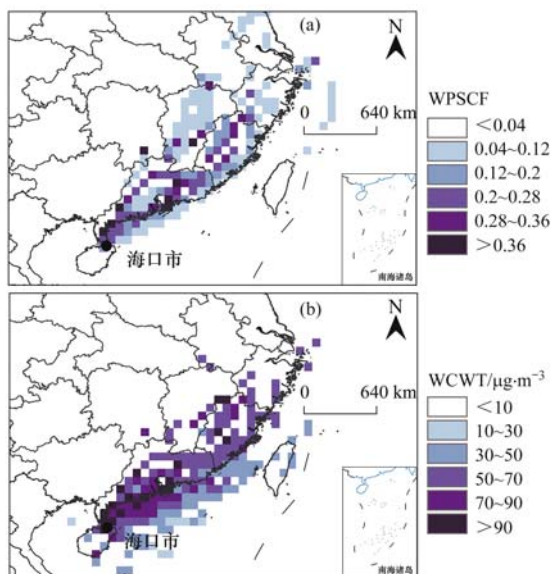


图6 2019年秋季海口市 $O_3-8h$ 浓度的WPSCF和WCWT分析

Fig. 6 WPSCF and WCWT analysis results of  $O_3-8h$  in Haikou City during autumn 2019

- 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] Li J, Huang J, Cao R, *et al.* The association between ozone and years of life lost from stroke, 2013-2017: a retrospective regression analysis in 48 major Chinese cities [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **405**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124220.
- [4] Zhao S P, Yin D Y, Yu Y, *et al.* PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> pollution during 2015-2019 over 367 Chinese cities: Spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts [J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114694.
- [5] Anenberg S C, Horowitz L W, Tong D Q, *et al.* An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, **118**(9): 1189-1195.
- [6] 耿春梅, 王宗爽, 任丽红, 等. 大气臭氧浓度升高对农作物产量的影响[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(3): 239-245.
- Geng C M, Wang Z S, Ren L H, *et al.* Study on the impact of elevated atmospheric ozone on crop yield [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(3): 239-245.
- [7] 冯兆忠, 李品, 袁相洋, 等. 我国地表臭氧生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2018, **38**(5): 1530-1541.
- Feng Z Z, Li P, Yuan X Y, *et al.* Progress in ecological and environmental effects of ground-level O<sub>3</sub> in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(5): 1530-1541.
- [8] 邓爱萍, 陆维青, 杨雪. 2013 年-2017 年江苏省环境空气中首要污染物变化分析研究[J]. 环境科学与管理, 2017, **42**(12): 19-22.
- Deng A P, Lu W Q, Yang X. Analysis on change of primary pollutant in ambient air of Jiangsu Province during 2013 and 2017 [J]. Environmental Science and Management, 2017, **42**(12): 19-22.
- [9] 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.
- [10] Sahu S K, Liu S C, Liu S, *et al.* Ozone pollution in China: background and transboundary contributions to ozone concentration & related health effects across the country [J]. Science of the Total Environment, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144131.
- [11] Zhang Q, Yuan B, Shao M, *et al.* Variations of ground-level O<sub>3</sub> and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(12): 6089-6101.
- [12] 陆倩, 付娇, 王朋朋, 等. 河北石家庄市近地层臭氧浓度特征及气象条件分析[J]. 干旱气象, 2019, **37**(5): 836-843.
- Lu Q, Fu J, Wang P P, *et al.* Temporal distribution of ozone mass concentration near surface and their relations with weather conditions in Shijiazhuang of Hebei Province [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, **37**(5): 836-843.
- [13] Xu W Y, Zhao C S, Ran L, *et al.* Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(9): 4353-4369.
- [14] 张天奇, 高阳. 气候变化和污染源对中国华北地区臭氧的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2021, **51**(3): 100-109.
- Zhang T Q, Gao Y. The impact of climate change and emissions on ozone in North China [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, **51**(3): 100-109.
- [15] Wang Y X, Shen L L, Wu S L, *et al.* Sensitivity of surface ozone over China to 2000-2050 global changes of climate and emissions [J]. Atmospheric Environment, 2013, **75**: 374-382.
- [16] 耿福海, 刘琼, 陈勇航. 近地面臭氧研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, **6**(6): 8-14.
- Geng F H, Liu Q, Chen Y H. Discussion on the research of surface ozone [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2012, **6**(6): 8-14.
- [17] Guo H, Chen K Y, Wang P F, *et al.* Simulation of summer ozone and its sensitivity to emission changes in China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(5): 1543-1552.
- [18] Wang N, Lv X P, Deng X J, *et al.* Aggravating O<sub>3</sub> pollution due to NO<sub>x</sub> emission control in Eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**: 732-744.
- [19] 严仁嫦, 叶辉, 林旭, 等. 杭州市臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1128-1136.
- Yan R C, Ye H, Lin X, *et al.* Characteristics and influence factors of ozone pollution in Hangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1128-1136.
- [20] Ni Z Z, Luo K, Gao X, *et al.* Exploring the stratospheric source of ozone pollution over China during the 2016 Group of Twenty summit [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(4): 1267-1275.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- Qian 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.
- [24] 孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 气候变化对环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.
- [25] 姜华, 常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(7): 1576-1582.
- Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of causes and prevention and control recommendations [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(7): 1576-1582.
- [26] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [27] 海南省生态环境厅. 2019 年海南省生态环境状况公报(图解)[EB/OL]. [http://hnshtb.hainan.gov.cn/jdhy/zcjd/sptj/202006/t20200605\\_2799446\\_mo.html](http://hnshtb.hainan.gov.cn/jdhy/zcjd/sptj/202006/t20200605_2799446_mo.html), 2020-06-05.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Wang L L, Li W J, Sun Y, *et al.* PM<sub>2.5</sub> Characteristics and regional transport contribution in five cities in Southern North China Plain, during 2013-2015[J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(4), doi: 10.3390/atmos9040157.
- [32] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017 年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 88-96.  
Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 88-96.
- [33] 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.
- [34] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 基于轨迹模式分析海口市大气污染的输送及潜在源区[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 36-42.  
Fu C B, Dan L, Tang J X, *et al.* Analysis of air polluted transportation and potential source in Haikou City based on trajectory model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 36-42.
- [35] 李莉, 蔡黎琳, 周敏. 2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2327-2336.  
Li L, Cao J L, Zhou M. Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in eastern and middle China in December, 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [36] 徐锟, 刘志红, 何沐全, 等. 成都市夏季近地面臭氧污染气象特征[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(5): 36-45.  
Xu K, Liu Z H, He M Q, *et al.* Meteorological characteristics of O<sub>3</sub> pollution near the ground in summer of Chengdu [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(5): 36-45.
- [37] 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 等. 乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4180-4190.  
Zhang R X, Chen Q, Xia J Q, *et al.* Exploring characteristics and causes of summer ozone pollution based on process analysis in Wuhai[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4180-4190.
- [38] 汪宏宇, 龚强, 付丹丹. 沈阳空气质量对到达地面太阳辐射的影响分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 2839-2849.  
Wang H Y, Gong Q, Fu D D. Analysis for the influence of air quality on solar radiation arriving on the ground in Shenyang[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 2839-2849.
- [39] 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 等. 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 686-695.  
Sun X Y, Zhao M, Shen H Q, *et al.* Ozone formation and key VOCs of a continuous summertime O<sub>3</sub> pollution event in Ji'nan [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 686-695.
- [40] 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市春季 O<sub>3</sub> 污染特征及关键前体物识别[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4611-4620.  
Han L, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics of O<sub>3</sub> pollution and key precursors in Chengdu during spring[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4611-4620.
- [41] 符传博, 丹利, 徐文帅, 等. 2014—2019 年三亚市臭氧浓度变化特征[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(10): 2028-2033.  
Fu C B, Dan L, Xu W S, *et al.* Variation of O<sub>3</sub> concentration in Sanya City from 2014 to 2019 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(10): 2028-2033.
- [42] 李莉莉, 朱莉娜, 闫耀宗, 等. 绥化市一次空气污染过程及潜在源区分析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(10): 3785-3793.  
Li L L, Zhu L N, Yan Y Z, *et al.* An air pollution process and potential sources of Suihua[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(10): 3785-3793.
- [43] 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 等. 石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5131-5142.  
Nie S S, Wang S, Cui J S, *et al.* Spatio-temporal characteristics and potential source areas of seasonal atmospheric pollution in Shijiazhuang[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5131-5142.
- [44] 赵德龙, 田平, 周崑, 等. COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5109-5121.  
Zhao D L, Tian P, Zhou W, *et al.* Evolution and potential source apportionment of atmospheric pollutants of two heavy haze episodes during the COVID-19 lockdown in Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5109-5121.
- [45] 王坛涛, 张强, 温肖宇, 等. 运城市 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征和潜在源区季节分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 74-84.  
Wang Y T, Zhang Q, Wen X Y, *et al.* Spatiotemporal distribution and seasonal characteristics of regional transport of PM<sub>2.5</sub> in Yuncheng city [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 74-84.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                       |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management .....                                                                                      | WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)               |
| Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment .....                                                                                            | WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)         |
| Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters .....                                                                | YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)                       |
| Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring .....                                                                             | LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)                              |
| Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water .....                                                                                                             | BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)      |
| Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....                       | ..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858) |
| Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....                                                                                                                                           | ..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)                     |
| Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils .....                                                                  | WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)               |
| Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China .....                                                                                                                        | SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)        |
| Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China .....                                                                                                                 | CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)                          |
| Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020 .....                                                              | LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)             |
| Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....                                                                                                  | CHENG Hong, CHEN Rong (4924)                                            |
| Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....                                                                                                                     | YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)                  |
| Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....                                                                     | QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)            |
| Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....                                             | ..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)         |
| Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....                                                                           | PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)                   |
| Adsorption of Mn <sup>2+</sup> by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....                                                                                            | ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)                |
| Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....                                                                                                               | XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)                |
| Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....                                                                                                           | XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)         |
| Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....                                                                                    | FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)                    |
| Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....                 | ..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)                  |
| Difference in PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....                                                                                        | QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)               |
| Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....                                                                                                           | FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)          |
| Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....                                                                                | SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)               |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....                                                                                                         | CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)         |
| Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....                                    | ..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)               |
| Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....                                                                                                    | LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)                   |
| Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....                                                       | ..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)           |
| Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....                                                        | HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)                |
| Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....                                                                             | WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)                         |
| Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....                                         | ..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)            |
| Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....                                          | ..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)        |
| Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....                                                                                          | ..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)  |
| Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....                               | ..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)               |
| Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....                                                    | ..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)     |
| Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N <sub>2</sub> O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....                                                  | TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)             |
| Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....                                                                     | LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)                |
| Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....                        | ..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)        |
| Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....                                                                                           | ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)             |
| Effect of Aging on Stabilization of Cd <sup>2+</sup> Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....                                                                              | WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)                 |
| Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....                                       | ..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)           |
| Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....                                                                        | ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)          |
| Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....                                                                                   | SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)                |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....                                                                                | FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)              |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios ..... | ..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)   |
| Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....                                                                                               | XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)           |
| Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....                                                                                                                              | CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)              |
| Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....                                                                                            | SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)               |
| Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....                                          | ..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)                 |
| Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....                                                                                                     | HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)               |
| Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....                                            | ..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)   |
| Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....                                                                                                                    | LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)                      |