

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献 ..... 赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)

基于卫星和地面监测的河西走廊 O<sub>3</sub> 浓度时空分布及潜在源区分析 ..... 李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)

海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征 ..... 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)

华东地区对流层 O<sub>3</sub> 和前体物 HCHO 及 NO<sub>2</sub> 的时空特征 ..... 王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)

2006 ~ 2020 年广东省大气甲醛排放演变特征 ..... 明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)

淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力 ..... 黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)

西安市城市降尘和土壤尘 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分特征 ..... 沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)

长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应 ..... 高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)

黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系 ..... 裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)

古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因 ..... 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)

华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价 ..... 陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)

湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险 ..... 张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)

太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析 ..... 王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)

白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献 ..... 李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)

白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估 ..... 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)

雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应 ..... 李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)

鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析 ..... 于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)

不同臭熏程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群 ..... 张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)

反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响 ..... 李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)

密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响 ..... 辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茵, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 宋舒兴, 张俊亚 (4985)

城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制 ..... 赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)

高效异养硝化-好氧反硝化菌 *Glutamicibacter* sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制 ..... 魏渤惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)

大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制 ..... 岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)

不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响 ..... 贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)

淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估 ..... 张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)

黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估 ..... 耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)

固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估 ..... 马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖影云, 海金涛, 王欢 (5055)

鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征 ..... 赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)

聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响 ..... 陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)

聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响 ..... 郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)

聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响 ..... 赵肖琼, 张恒慧, 赵润柱, 张新梅 (5092)

离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算 ..... 张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 徐莉萍, 李永涛 (5102)

土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响 ..... 徐文彬, 饶良懿 (5114)

有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析 ..... 刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)

平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响 ..... 张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)

稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素 ..... 罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)

周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响 ..... 鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)

华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子 ..... 赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)

高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响 ..... 聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)

基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性 ..... 唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)

不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响 ..... 周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)

纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响 ..... 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如茵, 孟庆尧 (5204)

不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性 ..... 刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)

CuFeO<sub>2</sub> 改性生物炭对四环素的吸附特性 ..... 刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)

基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应 ..... 陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)

基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估 ..... 郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)

基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估 ..... 赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)

重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导 ..... 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)

安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析 ..... 贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)

湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估 ..... 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)

不同含量外源镉在土壤中的变化特征 ..... 周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)

CO<sub>2</sub> 泡沫混凝土碳封存潜力分析 ..... 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)

综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例 ..... 陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)

《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)

# 海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征

符传博<sup>1,2,3</sup>, 丹利<sup>2</sup>, 佟金鹤<sup>1,3</sup>, 徐文帅<sup>4</sup>

(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:** 基于环境空气质量数据、气象观测数据和卫星遥感资料, 研究了2015~2020年海南岛臭氧(O<sub>3</sub>)污染的时空分布、变化趋势、O<sub>3</sub>生成敏感性及其与气象因子的关系。结果表明, 海南岛O<sub>3</sub>-8h(日最大8h滑动平均值)表现为西部和北部偏高, 中部、东部和南部偏低的分布特征, 2015年O<sub>3</sub>-8h浓度最高, 2019年O<sub>3</sub>-8h浓度超标占比最大。O<sub>3</sub>-8h浓度与平均气温( $P < 0.1$ )、日照时数( $P < 0.01$ )、太阳总辐射( $P < 0.01$ )、大气压和平均风速呈正相关关系, 与降水量( $P < 0.05$ )和相对湿度呈负相关关系。卫星遥感数据显示, 2015~2020年海南岛对流层NO<sub>2</sub>柱浓度(NO<sub>2</sub>-OMI)和HCHO柱浓度(HCHO-OMI)呈相反的变化趋势, 2020年NO<sub>2</sub>-OMI较2015年上升了7.74%, HCHO-OMI下降了10.2%。海南岛属于NO<sub>x</sub>控制区, 近6年FNR值(O<sub>3</sub>生成敏感性)呈波动式下降趋势, 其趋势系数和气候倾向率分别为-0.514和-0.123 a<sup>-1</sup>。气象因子与海南岛FNR值有较好的相关关系。

**关键词:** 臭氧(O<sub>3</sub>); 臭氧检测仪(OMI); 卫星监测; 臭氧敏感性; 海南岛

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4799-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202209233

## Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island

FU Chuan-bo<sup>1,2,3</sup>, DAN Li<sup>2</sup>, TONG Jin-he<sup>1,3</sup>, XU Wen-shuai<sup>4</sup>

(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:** Based on ambient air quality data, meteorological observation data, and satellite remote sensing data, the temporal and spatial variations in ozone (O<sub>3</sub>) pollution, the sensitivity of O<sub>3</sub>, and its relationship with meteorological factors in Hainan Island were analyzed in this study. The results showed that the maximum daily 8-h moving mean (O<sub>3</sub>-8h) in western and northern cities in Hainan Island was higher than that in the central, eastern, and southern cities. O<sub>3</sub>-8h was the highest in 2015, and O<sub>3</sub>-8h exceeding the standard proportion was the largest in 2019. In addition, O<sub>3</sub>-8h was positively correlated with average temperature ( $P < 0.1$ ), sunshine duration ( $P < 0.01$ ), total solar radiation ( $P < 0.01$ ), atmospheric pressure, and average wind speed and was negatively correlated with precipitation ( $P < 0.05$ ) and relative humidity. The satellite remote sensing data showed that the tropospheric NO<sub>2</sub> column concentration (NO<sub>2</sub>-OMI) and HCHO column concentration (HCHO-OMI) displayed opposite trends in Hainan Island from 2015 to 2020. Compared with those in 2015, NO<sub>2</sub>-OMI increased by 7.74% and HCHO-OMI decreased by 10.2% in 2020. Moreover, Hainan Island belongs to the NO<sub>x</sub> control area, and the FNR value exhibited a fluctuating downward trend in the past 6 years, with a trend coefficient and climatic trend rate of -0.514 and -0.123 a<sup>-1</sup>, respectively. A strong correlation was observed between meteorological factors and the FNR value of Hainan Island.

**Key words:** ozone (O<sub>3</sub>); ozone monitoring instrument (OMI); satellite monitoring; ozone sensitivity; Hainan Island

臭氧(O<sub>3</sub>)是大气中的重要痕量气体, 90%分布在平流层中, 对流层中只约占10%<sup>[1]</sup>。对流层O<sub>3</sub>是光化学烟雾的重要组成部分之一, 其不能由污染源直接排放到大气中, 而是由氮氧化物(NO<sub>x</sub>)与有机化合物(VOCs)经过复杂的化学反应产生<sup>[2,3]</sup>。O<sub>3</sub>具有较强的氧化性和腐蚀性, 其浓度的升高会对眼睛和呼吸道等人体器官造成损伤<sup>[4,5]</sup>, 引起人类健康问题<sup>[6]</sup>。此外, O<sub>3</sub>还会损害植物叶片, 造成农作物减产<sup>[7]</sup>, 对建筑物有腐蚀作用<sup>[8]</sup>。O<sub>3</sub>同时也是一种温室气体, 其在大气中的含量和分布, 会直接影响地气辐射平衡, 进而引起全球和区域的气候变化<sup>[9,10]</sup>。生态环境部门的监测数据显示<sup>[11]</sup>, 2021年全国339个地级及以上城市中, 以O<sub>3</sub>为首要污染物的超标天数占总超标天数的34.7%, 京津冀及周边地区、长

三角地区和汾渭平原以O<sub>3</sub>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<sub>3</sub>已经成为“十四五”期间影响我国重要区域大气环境的首要污染物之一, 其污染防控迫在眉睫<sup>[12,13]</sup>。

O<sub>3</sub>污染的变化主要受前体物排放、化学反应和气象条件等多方面因素影响, 国内外学者对我国O<sub>3</sub>污染加剧及其驱动因素进行了广泛而深入地研究<sup>[14~17]</sup>, 并得到了有意义的结果, 认为在O<sub>3</sub>前体物

收稿日期: 2022-09-24; 修订日期: 2022-11-16

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

大量排放的条件下,光化学反应加剧是我国  $O_3$  污染的重要原因之一<sup>[18]</sup>. 气象因子和气候变化都会显著地影响  $O_3$  浓度的变化,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  $O_3$  的传输及消散产生作用<sup>[19]</sup>,天气系统(如台风等)出现频率和大气环流形势改变等,对  $O_3$  的水平扩散和传输都会有影响<sup>[20]</sup>. 在  $O_3$  敏感性分析方面,我国超大城市几乎都是  $VOC_s$  控制区<sup>[21]</sup>,而中小城市则受  $NO_x$  控制<sup>[22]</sup>,东部部分城市为混合敏感区<sup>[23]</sup>. 目前,针对  $O_3$  生成敏感性方面的研究方法主要有 3 大类,分别是基于观测数据与观测模型方法,基于源排放清单与空气质量模型方法和基于卫星遥感数据方法<sup>[24]</sup>. 3 种研究方法都有各自的优势与缺点,基于观测数据与观测模型方法可以避免排放源清单带来的不确定性,但其对观测数据的准确性和代表性有较高要求;基于源排放清单与空气质量模型方法可以直观地给出  $O_3$  生成敏感性,但受到排放清单与模型的不确定影响较大;虽然卫星遥感数据反演存在一定的误差<sup>[25]</sup>,但卫星数据方法具有覆盖面广、连续观测和成本低等优点,已被广泛引用用于  $O_3$  生成敏感性的研究中,如单源源等<sup>[26]</sup>利用 2005 ~ 2014 年 OMI 卫星资料,研究发现鲁豫晋、京津冀、长三角和珠三角地区中心城市属于  $VOC_s$  控制区. 武卫玲等<sup>[27]</sup>的研究表明,北京、太原和石家庄等城市中心及工业较发达地区受  $VOC_s$  控制;庄立跃等<sup>[28]</sup>的研究认为珠三角中部为  $VOC_s$  控制区,而珠三角边缘地带为  $NO_x$  控制区.

海南岛是我国第二大岛屿,地处热带,气候暖热湿润,常以环境优美和空气质量好著称<sup>[29]</sup>. 然而近些年海南岛  $O_3$  污染事件也屡见报道<sup>[30,31]</sup>. 根据海南省生态环境厅的统计,2019 ~ 2021 年海南岛  $\rho(O_3)$  (第 90 百分位数)分别为 118、105 和 111  $\mu g \cdot m^{-3}$ ,  $O_3$  浓度下降并不明显,浓度一直维持较高水平<sup>[32]</sup>,  $O_3$  已经成为制约海南岛空气质量持续改善的主要大气污染物. 相较于其它污染物,海南岛  $O_3$  污染防控有两方面的难点,一方面是海南岛处于热带地区,年平均气温较高,日照时间较长,太阳辐射较强,气象条件有利于  $O_3$  的生成;另一方面是海南岛毗邻广东珠三角地区,冬半年在偏北气流的影响下有利于  $O_3$  及前体物由源区向海南岛输送,外源输送偏强增加了海南岛  $O_3$  污染的复杂性. 目前关于海南岛  $O_3$  浓度长期变化趋势的研究涉及较少,利用卫星反演资料进行  $O_3$  敏感性分析还未见报道,本文基于 2015 ~ 2020 年海南岛 32 个空气质量国家控制

站(国控站)  $O_3$ 、 $NO_2$  ( $NO_2$ -监测)和  $CO$  ( $CO$ -监测)监测数据,18 个市县气象观测数据,以及臭氧检测仪(ozone monitoring instrument, OMI)卫星遥感的对流层  $NO_2$  ( $NO_2$ -OMI)和甲醛(HCHO-OMI)垂直柱浓度资料,全面分析了海南岛  $O_3$  污染时空变化特征及其生成敏感性,以为政府部门制定和实施有效的  $O_3$  污染防控措施提供科学支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据资料

海南岛空气质量逐时监测数据源自海南省生态环境厅,要素包括  $O_3$ 、 $NO_2$ -监测和  $CO$ -监测,站点共计 32 个,研究时段选取 2015 ~ 2020 年,共计 6 a 的监测资料展开分析. 气象观测站点有 18 个,气象要素包括降水量、平均气温、相对湿度、平均风速、日照时数、大气压和太阳总辐射,其中太阳总辐射只有海口市和三亚市两个站点,气象资料来自海南省气象局. 站点地理位置分布见图 1 所示.

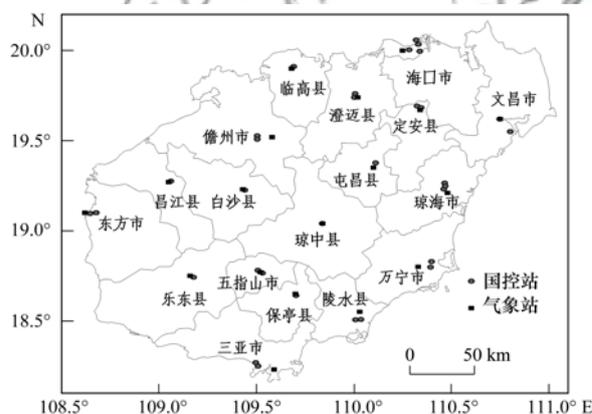


图 1 海南岛环境监测站和气象观测站分布

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring stations and meteorological observation stations in Hainan Island

OMI 卫星产品中的 HCHO-OMI 和  $NO_2$ -OMI 资料空间分辨率较高,观测时间较长,范围较大,常常分别用于作为  $VOC_s$  和  $NO_x$  的指示剂进行分析<sup>[33,34]</sup>. 本研究选取了 2015 ~ 2020 年 OMI 卫星反演的 3 级产品 HCHO-OMI 和  $NO_2$ -OMI 资料进行分析,数据产品下载自 OMI 相关网站(<http://www.qa4ecv.eu>).  $NO_2$ -OMI 和 HCHO-OMI 的空间分辨率分别为  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  和  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ .

### 1.2 分析方法

#### 1.2.1 趋势系数

趋势分析是较为常见的用于分析物理量年际变化的统计方法,能直观定量地反映不同要素的变化程度,同时可用于统计检验<sup>[35,36]</sup>. 本研究采用施能等<sup>[37,38]</sup>的研究方法,计算了趋势系数  $r_{xx}$ ,其定义为  $n$

个时刻(年)的要素序列与自然数列  $1, 2, 3, \dots, n$  的相关系数, 具体公式为:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (1)$$

式中,  $n$  为时间序列,  $x_i$  为第  $i$  个时间要素值,  $\bar{x}$  为其平均值;  $\bar{t} = (n+1)/2$ , 当  $\bar{t}$  为正(负)时, 表示该要素在所计算的  $n$  个时间序列内有线性增加(减少)的趋势, 符合自由度  $(n-2)$  的  $t$  分布, 从而可以检验这种趋势系数是否具有物理意义。

### 1.2.2 气候倾向率

气候倾向率采用公式(2)进行计算:

$$y_i = ax_i + b \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中,  $y$  为样本数为  $n$  的某一要素,  $x$  为  $y$  所对应的时间样本序列号.  $b$  为回归常数,  $a$  为回归系数, 即气候倾向率,  $a$  值可以表示要素  $y$  随时间  $x$  上升或下降的倾向度<sup>[39]</sup>.

### 1.2.3 臭氧生成敏感性分析方法

本研究采用的是基于卫星遥感数据来分析海南岛  $O_3$  生成敏感性指标(FNR), 其计算公式如下:

$$FNR = c(\text{HCHO})/c(\text{NO}_2) \quad (3)$$

式中,  $c(\text{HCHO})$  为 HCHO-OMI 柱浓度,  $c(\text{NO}_2)$  为  $\text{NO}_2$ -OMI 柱浓度, FNR 为二者比值. 最早的 FNR 阈值划分是 Duncan 等<sup>[40]</sup>给出的标准, 即 FNR 值  $< 1$  表示  $O_3$  受 VOCs 控制, FNR 值  $> 2$  表示  $O_3$  受  $\text{NO}_x$  控制, 在 1 和 2 之间时, 表示  $O_3$  受 VOCs- $\text{NO}_x$  协同控制. 由于该阈值划分标准是基于美国环境背景下

通过模型模拟得到的, 因此不一定适合我国的实际情况. Jin 等<sup>[41,42]</sup>在其基础上, 结合我国大气中气溶胶浓度较高的特点, 将  $O_3$  生成敏感性协同控制区 FNR 值的阈值提高至 2.3 ~ 4.2 之间, 即 FNR 值在 2.3 ~ 4.2 之间受 VOCs- $\text{NO}_x$  协同控制, 而 FNR 值  $< 2.3$  则受 VOCs 控制, FNR 值  $> 4.2$  则受  $\text{NO}_x$  控制. 本研究选取 Jin 等<sup>[41,42]</sup>规定的敏感性阈值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 海南岛臭氧浓度空间分布及变化趋势

图 2 为海南岛 2015 ~ 2020 年  $O_3$ -8h 浓度(日最大 8 h 滑动平均值)的空间分布. 整体上看, 近 6 年海南岛  $O_3$ -8h 浓度的空间分布基本一致, 均表现为西部和北部市县  $O_3$ -8h 浓度高于中部、东部和南部市县. 从年际变化上看, 2015 年是近 6 年  $\rho(O_3$ -8h) 最高的一年, 超过  $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的市县有西部的东方市、昌江县、乐东县和临高县, 以及东部的万宁市, 其中东方市最高, 为  $97.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 2016 年  $\rho(O_3$ -8h) 总体有所下降, 西部的昌江县、乐东县和临高县等均下降至  $72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下, 东方市  $\rho(O_3$ -8h) 下降至  $95.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 仍为全省最高. 2017 年北部和西部的市县  $\rho(O_3$ -8h) 有所上升, 海口市和文昌市超过了  $78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 东方市也达到了近 6 年的最高值, 为  $105.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 其余市县  $O_3$ -8h 浓度较 2016 年变化不大. 2018 年  $\rho(O_3$ -8h) 超过  $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的市县有东方市、澄迈县和文昌市, 其中文昌市达到了  $87.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 超过了东方市, 为 2018 年  $\rho(O_3$ -8h) 最高

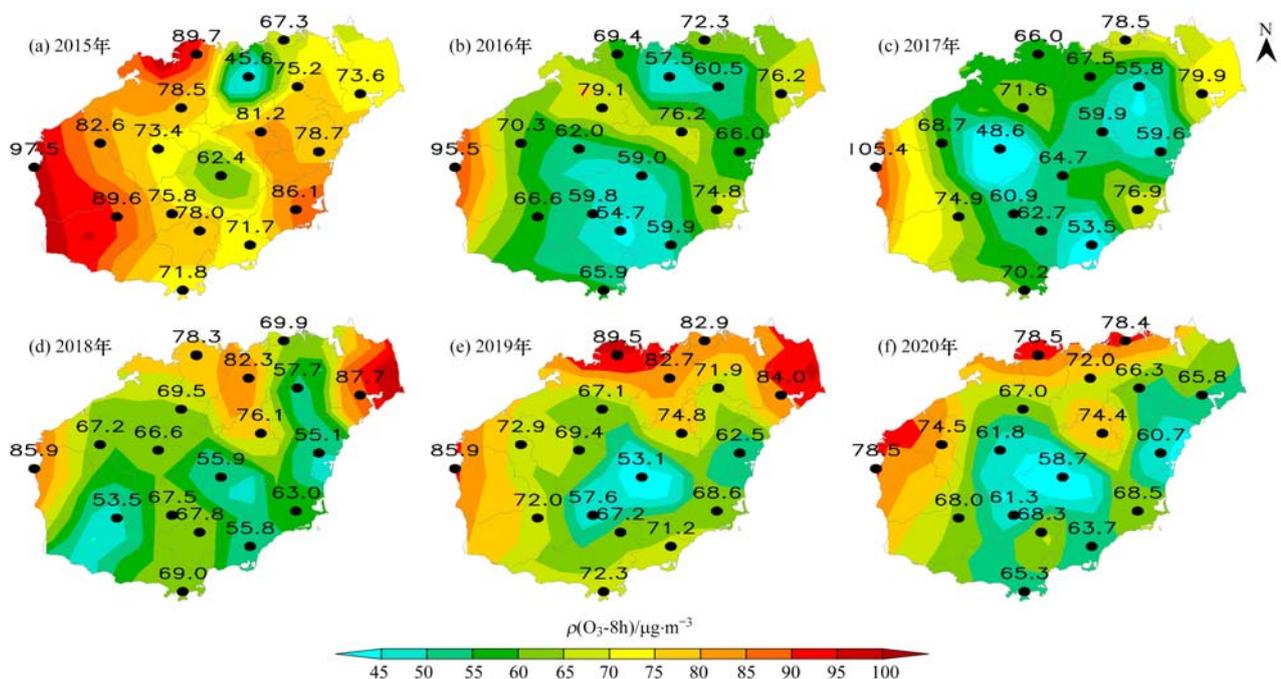


图 2 2015 ~ 2020 年  $O_3$ -8h 浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of  $O_3$ -8h from 2015 to 2020

的市县.西南部的乐东县 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 最低,只为 $53.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .2019年 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 超过 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的市县主要分布在西部和北部沿海,其中临高县为 $89.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,全省最高.中部、东部和南部主要分布在 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下.2020年 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 总体偏低,超过 $78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的市县只有东方市、临高县和海口市,其余均在 $50 \sim 70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间.6 a全岛的 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度平均值从大到小排列为:2015年>2019年>2020年>2018年>2016年>2017年.

此外,海南岛各个市县 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标天数占比分布见图3所示.从中可知, $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度年平均值偏高的市县超标率同样较高,但是不同年份超标率分布特征不同.对比而言,沿海地区 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标占比偏大于内陆地区.从不同年份上看,海南岛 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标占比表现为上升趋势,其中2019年是近6年超标占比最大的一年,北部的海口市、澄迈

县、临高县、定安县和屯昌县占比超过了4%,其中海口市高达5.75%,是所有市县中超标占比最大的.而2016年是近6年中 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标占比最小的一年,各个市县超标占比除了东方市以外,其余市县均在1%以下.结合表1给出了海南岛历年气象因子可知,2019年平均气温为 $25.49^\circ\text{C}$ ,是近6年中最高的,降水偏少,湿度偏低,太阳辐射偏强,气象条件有利于光化学反应,致使 $\text{O}_3$ 浓度上升;2016年与2019年气象条件基本相反,降水量高达 $2218.8 \text{ mm}$ ,气温偏低,湿度偏高,太阳辐射偏弱,气象条件不利于 $\text{O}_3$ 浓度的上升. $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标占比与气象条件有很好的对应关系.此外,2015年 $\text{O}_3$ 超标率高值出现在东部和西南部,2017和2018年则出现在北部,2020年出现在北部和西部,不同年份超标率高值区分布可能与局地的气象条件和排放的空间分布有关,其内在机制还有在于进一步分析.

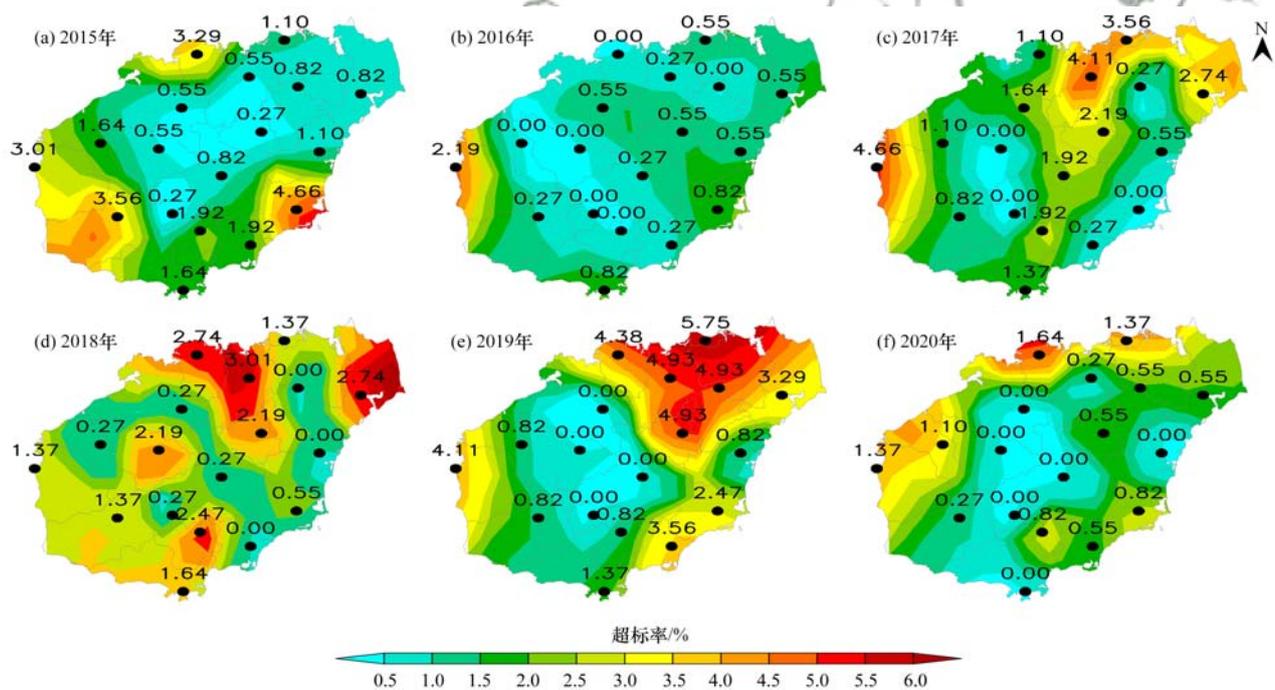


图3 2015~2020年 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度超标率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of exceedance ratio of  $\text{O}_3\text{-8h}$  from 2015 to 2020

## 2.2 海南岛臭氧浓度的影响因素分析

有研究表明, $\text{O}_3$ 浓度的影响因素主要包括前体物排放和气象因子的变化.海南岛2015~2020年平均的前体物监测值( $\text{NO}_2$ -监测和 $\text{CO}$ -监测)和气象要素统计如表1所示,表2进一步给出了 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度年平均值与影响因素的相关系数.从中可以看出, $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度与 $\text{NO}_2$ -监测和 $\text{CO}$ -监测呈正相关关系,即前体物排放偏高的年份, $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度偏高;反之,前体物排放偏低的年份, $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度也偏低. $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度与 $\text{NO}_2$ -监测和 $\text{CO}$ -监测的相关系数分别为0.181和0.177,没有通过信度检验.此外,与

气象因子的关系中, $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度与平均气温、日照时数、太阳总辐射、大气压和平均风速呈正相关关系,其相关系数分别为0.639、0.96、0.916、0.477和0.191;与降雨量和相对湿度呈负相关关系,其相关系数分别为-0.797和-0.495.其中 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度与太阳总辐射和日照时数的相关系数通过了99%的信度检验,与降雨量的相关系数通过了95%的信度检验,与平均气温的相关系数通过了90%的信度检验,其余气象要素没有通过检验.对比来看,2015和2019年 $\text{O}_3\text{-8h}$ 浓度偏高,平均气温、日照时数、太阳总辐射、大气压和平均风

速均维持较高水平,而降雨量和相对湿度则明显偏低;反之,2016年和2017年O<sub>3</sub>-8h浓度偏低,平均气温、日照时数、太阳总辐射、大气压和平均

风速维持较低水平,降雨量和相对湿度明显偏高,这也说明海南岛O<sub>3</sub>-8h浓度显著受气象因子的影响.

表1 2015~2020年O<sub>3</sub>-8h浓度年平均值和影响因素对比

Table 1 Comparison of annual mean O<sub>3</sub>-8h and impact factors from 2015 to 2020

年份	$\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_2\text{-监测})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{CO-监测})$ / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	平均气温 / $^{\circ}\text{C}$	降雨量 / $\text{mm}$	太阳总辐射 / $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	日照时数 / $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$	相对湿度 / $\%$	平均风速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	大气压 / $\text{hPa}$
2015	76.59	9.53	0.731	25.13	1380.1	16.28	6.22	81.66	2.08	998.20
2016	68.10	9.19	0.768	24.70	2218.8	14.70	5.35	83.40	2.02	997.64
2017	68.07	9.25	0.692	24.67	1983.2	14.67	5.16	83.61	1.98	998.05
2018	68.26	8.38	0.616	24.43	2086.7	15.35	5.35	82.49	1.93	997.61
2019	72.53	7.36	0.587	25.49	1654.2	15.99	5.79	80.99	1.92	997.52
2020	68.44	7.37	0.552	25.08	1610.1	14.94	5.06	80.96	2.11	997.68

表2 2015~2020年O<sub>3</sub>-8h浓度年平均值与影响因素的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between annual mean O<sub>3</sub>-8h and impact factors from 2015 to 2020

项目	NO <sub>2</sub> -监测	CO-监测	平均气温	降雨量	太阳总辐射	日照时数	相对湿度	平均风速	大气压
数值	0.181	0.177	0.639 <sup>1)</sup>	-0.797 <sup>2)</sup>	0.916 <sup>3)</sup>	0.960 <sup>3)</sup>	-0.495	0.191	0.477

1)通过90%信度检验;2)通过95%信度检验;3)通过99%信度检验

### 2.3 海南岛臭氧前体物时空分布

图4展示了基于OMI卫星反演的2015~2020年平均的NO<sub>2</sub>-OMI和HCHO-OMI及对应的气候倾向率.从图4(a)中可以看出,海南岛NO<sub>2</sub>-OMI值呈现北部和西部偏高,中部、东部和南部偏低的分布特征.NO<sub>2</sub>-OMI值超过 $1.5 \times 10^{15} \text{ molecules}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的市县有6个,包括北部的海口市、临高县、澄迈县和定安县,以及西部的昌江县和东方市,最大值出现在海口市,达到了 $2.03 \times 10^{15} \text{ molecules}\cdot\text{cm}^{-2}$ .海口市作为海南省的省会城市,其常住人口、工业排放和机动车保有量等均远远超过其他市县,致使NO<sub>2</sub>-

OMI值也呈现较高水平<sup>[43]</sup>.最低值出现在东部的万宁市,只为 $1.03 \times 10^{15} \text{ molecules}\cdot\text{cm}^{-2}$ .HCHO-OMI值分布特征与NO<sub>2</sub>-OMI有所不同[图4(b)],其大值区主要分布在北部、西部和南部,而中部和东部偏低.HCHO-OMI值超过 $9 \times 10^{15} \text{ molecules}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的市县达到了10个,主要分布在北部、西部和南部,其中最大值出现在西部的东方市,达到了 $10.48 \times 10^{15} \text{ molecules}\cdot\text{cm}^{-2}$ .最小值则出现在东部的琼海市,为 $7.38 \times 10^{15} \text{ molecules}\cdot\text{cm}^{-2}$ .从NO<sub>2</sub>-OMI和HCHO-OMI气候倾向率上看[图4(c)和4(d)],2015~2020年共有12个市县NO<sub>2</sub>-OMI值呈上升的

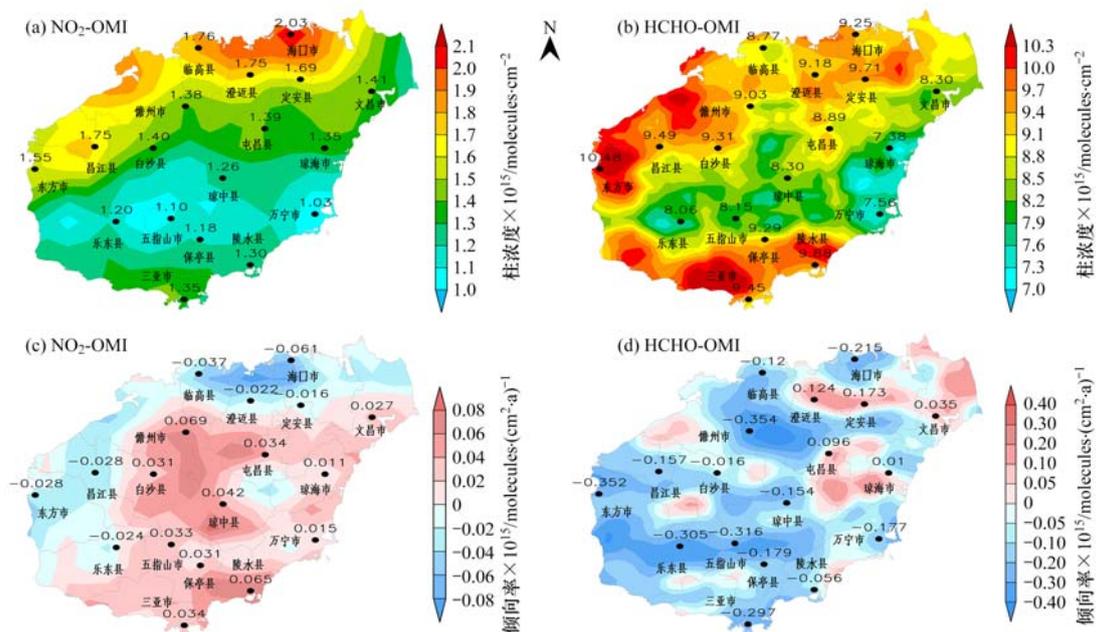


图4 2015~2020年对流层NO<sub>2</sub>和HCHO柱浓度空间分布及对应的气候倾向率

Fig. 4 Satellite-based mean tropospheric NO<sub>2</sub> and HCHO and the corresponding climatic trend rate from 2015 to 2020

变化趋势,其中上升相对较快的市县有儋州市和陵水县,上升幅度超过了  $0.06 \times 10^{15}$  molecules·(cm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>. 北部和西部的6个市县 NO<sub>2</sub>-OMI 值呈下降的变化趋势,其中临高县下降最快,下降幅度为  $-0.037 \times 10^{15}$  molecules·(cm<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>. 与 NO<sub>2</sub>-OMI 值不同,海南岛大部分地区 HCHO-OMI 值呈下降的变化特征,达到了13个市县,只有分布在北部和东部的5个市县表现为上升趋势. NO<sub>2</sub>-OMI 与 HCHO-OMI 值表现出的相反变化趋势值得关注.

图5进一步给出了2015~2020年海南岛 O<sub>3</sub>-8h 浓度及前体物的变化特征,其中前体物包括 NO<sub>2</sub>-监测、CO-监测、NO<sub>2</sub>-OMI 和 HCHO-OMI 等. 纵坐标表示每年污染物浓度与2015年的比值. 相较于2015年,2020年海南岛 O<sub>3</sub>-8h 浓度下降了10.6%. NO<sub>2</sub>-监测和 CO-监测表现为快速下降趋势,2020年较2015年下降幅度分别为22.3%和24.9%. NO<sub>2</sub>-OMI 和 HCHO-OMI 变化趋势相反,其中 NO<sub>2</sub>-OMI 上升了7.74%, HCHO-OMI 下降了10.2%. 这与上一节的分析结果一致.

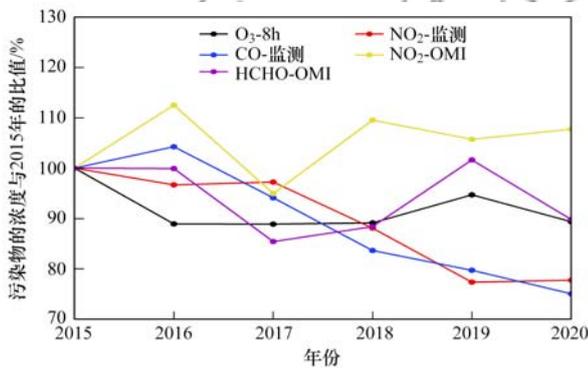


图5 2015~2020年海南岛 O<sub>3</sub>-8h 浓度及其前体物的变化

Fig. 5 Variations in O<sub>3</sub>-8h and precursors in Hainan Island during 2015 to 2020

#### 2.4 海南岛 O<sub>3</sub>-VOCs-NO<sub>x</sub> 敏感性

O<sub>3</sub> 及其前体物之间存在非线性的相关关系,即前体物浓度的下降并不一定会导致 O<sub>3</sub> 浓度相应地下降. 有研究表明,对于 VOCs 控制区, O<sub>3</sub> 浓度会随

着 VOCs 降低而降低,随着 NO<sub>x</sub> 降低而增加;对于 NO<sub>x</sub> 控制区, O<sub>3</sub> 浓度随着 NO<sub>x</sub> 降低而降低,随着 VOCs 降低而增加;对于 VOCs-NO<sub>x</sub> 协同控制区, NO<sub>x</sub> 或 VOCs 浓度的降低均可引起 O<sub>3</sub> 浓度降低<sup>[44]</sup>. 因此,明确海南岛 O<sub>3</sub> 生成敏感性的时空变化特征是实施有效 O<sub>3</sub> 防控措施的基础. 图6(a)给出了2015~2020年海南岛 FNR 值空间分布,其中表明,海南岛 FNR 值空间分布呈自北向南递增的变化特征,且各个市县 FNR 值均大于4.2,属于 NO<sub>x</sub> 控制区. 海南岛 FNR 值基本分布在5~8之间,其中北部的海口市 FNR 值最小,为4.64;南部的保亭县 FNR 值最大,达到了8.05. 图6(b)进一步给出了海南岛 FNR 气候倾向率,从中可知,各个市县 FNR 值近6年主要表现出下降的变化趋势,其中 FNR 气候倾向率最大值出现在西部的儋州市,达到了  $-0.6 \text{ a}^{-1}$ ,其次是中部的五指山市,为  $-0.56 \text{ a}^{-1}$ . 北部和西部市县 FNR 气候倾向率变化不大,基本在  $0 \sim -0.1 \text{ a}^{-1}$  附近. 2015~2020年海南岛平均的 HCHO-OMI、NO<sub>2</sub>-OMI 和 FNR 值年际变化如图7所示. 从中可以发现,近6年海南岛 HCHO-OMI 和 FNR 值呈波动式的下降趋势,而 NO<sub>2</sub>-OMI 呈缓慢上升趋势. 其中 FNR 趋势系数和气候倾向率分别为  $-0.514$  和  $-0.123 \text{ a}^{-1}$ ,表明海南岛 O<sub>3</sub> 生成敏感性有逐渐趋向于受 VOCs-NO<sub>x</sub> 协同控制区的转变,近年来海南岛经济呈快速发展趋势,汽车保有量增长明显<sup>[43]</sup>,导致 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 排放比率发生变化;此外在全球变化的背景下,海南岛气象要素也在逐渐发生变化;同时海南岛污染物在冬季风的影响下,外源输送影响严重<sup>[31]</sup>,海南岛 O<sub>3</sub> 生成敏感性影响因素复杂,其内在原因还有待进一步分析.

#### 2.5 气象条件对臭氧生成敏感性的影响

O<sub>3</sub> 前体物的本地源排放主要包括人为源和自然源,NO<sub>x</sub> 人为源包括化石燃料燃烧和生物质燃烧,自然源燃烧包括闪电过程、土壤排放和平流层输送等; VOCs 的人为源包括化石燃料燃烧、油品挥发

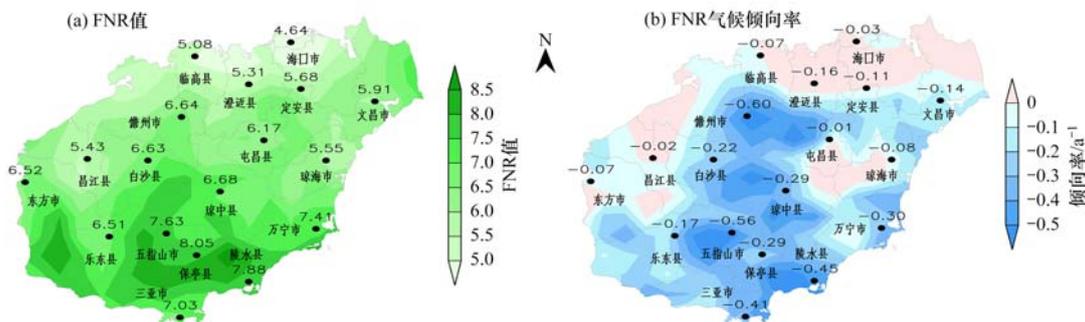


图6 2015~2020年海南岛 FNR 值空间分布及其气候倾向率

Fig. 6 Spatial distribution of FNR and its climatic tendency rate in Hainan Island from 2015 to 2020

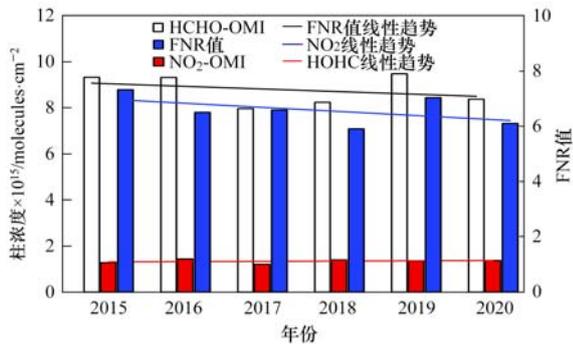


图7 2015~2020年海南岛平均的HCHO-OMI、NO<sub>2</sub>-OMI和FNR值年际变化

Fig. 7 Annual variation of tropospheric HCHO-OMI, NO<sub>2</sub>-OMI, and FNR in Hainan Island from 2015 to 2020

和溶剂挥发等,自然源包括植被和动物排放的VOCs等<sup>[45]</sup>.气象条件的变化会影响O<sub>3</sub>前体物自然源排放,同时改变光化学反应速率,进而影响O<sub>3</sub>生成敏感性.图8给出了2015~2020年海南岛月平均FNR值与气象因子的相关性.从中可以看出,海南岛月平

均FNR值基本在4.2以上,属于NO<sub>x</sub>控制区.FNR值与降水量、日照时数、平均气温和太阳总辐射呈正相关关系,表明降水量偏多,日照时数偏长、平均气温偏高和太阳总辐射偏强,有利于海南岛O<sub>3</sub>生成敏感性趋向于受NO<sub>x</sub>控制,其相关系数(表3)分别为0.171(降雨量)、0.508(日照时数)、0.541(平均气温)和0.564(太阳总辐射),其中与降水量、日照时数和平均气温的相关系数均通过99%的信度检验.海南岛FNR值与相对湿度、平均风速和大气压呈负相关关系,表明相对湿度偏高、平均风速偏大和大气压偏高,有利于海南岛O<sub>3</sub>生成敏感性趋向于受VOCs-NO<sub>x</sub>协同控制.其相关系数分别为-0.337(相对湿度)、-0.226(平均风速)和-0.487(大气压),其中与相对湿度和大气压的相关系数通过了99%的信度检验,与平均风速的相关系数通过了95%的信度检验.FNR值的变化,除了与气象因子有关外,还与本地污染物排放和区域传输有关,相关研究还有待于进一步开展.

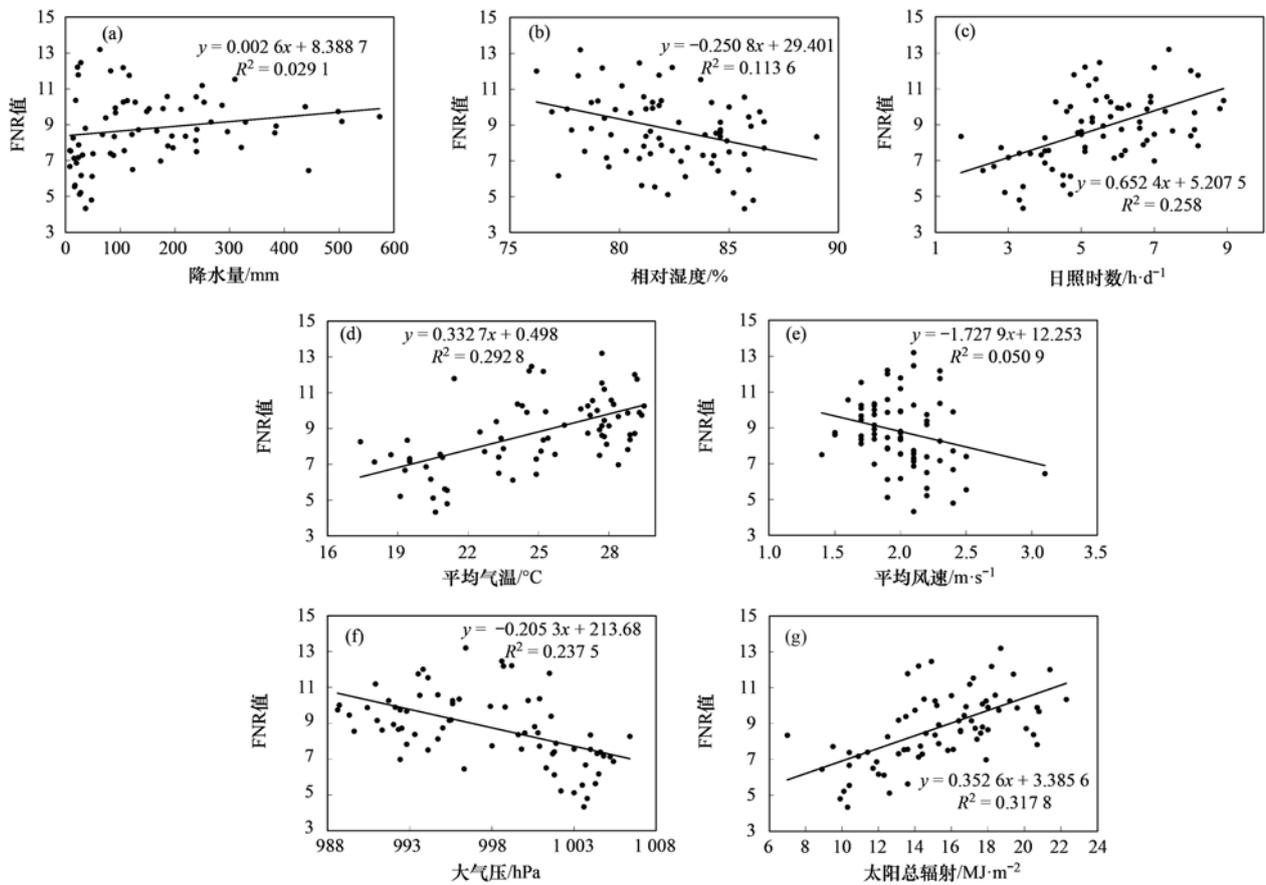


图8 2015~2020年海南岛月平均FNR值与气象因子的相关性

Fig. 8 Correlation analysis between monthly FNR and atmospheric factors in Hainan Island from 2015 to 2020

表3 2015~2020年月平均FNR值与气象因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between monthly mean FNR and meteorological factors from 2015 to 2020

项目	平均气温	降雨量	太阳总辐射	日照时数	相对湿度	平均风速	大气压
数值	0.541 <sup>1)</sup>	0.171	0.564 <sup>1)</sup>	0.508 <sup>1)</sup>	-0.337 <sup>1)</sup>	-0.226 <sup>2)</sup>	-0.487 <sup>1)</sup>

1)通过99%信度检验; 2)通过95%信度检验

### 3 结论

(1) 2015~2020年海南岛  $O_3$ -8h 浓度表现为西部和北部市县偏高,中部、东部和南部偏低的分布特征,2015年是近6年中  $O_3$ -8h 浓度最高的一年,随后呈波动式地下降趋势.海南岛沿海市县  $O_3$ -8h 浓度超标占比偏大于内陆市县,2019年是近6年超标占比最大的一年,占比超过4%的市县主要出现在北部地区.

(2) 海南岛  $O_3$ -8h 浓度与前体物呈正相关关系,但相关系数偏小,没有通过显著性检验.与气象因子的关系中, $O_3$ -8h 浓度与平均气温、日照时数、太阳总辐射、大气压和平均风速呈正相关关系,与降雨量和相对湿度呈负相关关系,其中与太阳总辐射和日照时数的相关系数通过了99%的信度检验,与降雨量的相关系数通过了95%的信度检验,与平均气温的相关系数通过了90%的信度检验.

(3) 海南岛  $NO_2$ -OMI 值呈现北部和西部偏高,中部、东部和南部偏低的分布特征;而 HCHO-OMI 大值区主要分布在北部、西部和南部,而中部和东部偏低.2015~2020年海南岛  $NO_2$ -OMI 和 HCHO-OMI 值呈相反的变化趋势,相较于2015年,2020年  $NO_2$ -OMI 值上升了7.74%,HCHO-OMI 值下降了10.2%.

(4) 海南岛属于  $NO_x$  控制区,FNR 值呈自北向南递增的分布特征.2015~2020年海南岛 FNR 值呈波动式的下降趋势,其趋势系数和气候倾向率分别为-0.514和-0.123  $a^{-1}$ ,海南岛  $O_3$  生成敏感性有逐渐趋向于受 VOCs- $NO_x$  协同控制的转变.海南岛 FNR 值与气象因子关系密切,其中与降雨量、日照时数、平均气温和太阳总辐射呈正相关关系,与相对湿度、平均风速和大气压呈负相关关系.其中与相对湿度和大气压的相关系数通过了99%的信度检验,与平均风速的相关系数通过了95%的信度检验.

#### 参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学[M].(第二版).北京:高等教育出版社,2006.
- [2] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [3] 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.
- [4] Lu X, Zhang L, Wang X L, *et al.* Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013 [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(4): 240-247.
- [5] 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.
- [6] Chen K, Zhou L, Chen X D, *et al.* Acute effect of ozone exposure on daily mortality in seven cities of Jiangsu Province, China: no clear evidence for threshold [J]. *Environmental Research*, 2017, **155**: 235-241.
- [7] 冯兆忠,彭金龙.中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系[J].*环境科学*, 2021, **42**(6): 3084-3090.  
Feng Z Z, Peng J L. Relationship between relative crop yield/woody plant biomass and ground-level ozone pollution in China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 3084-3090.
- [8] 王倩,刘苗苗,杨建勋,等.2013~2019年臭氧污染导致的江苏稻麦产量损失评估[J].*中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5094-5103.  
Wang Q, Liu M M, Yang J X, *et al.* Yield losses of rice and winter wheat due to ground-level ozone in Jiangsu Province from 2013 to 2019 [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5094-5103.
- [9] Garcia-Menendez F, Monier E, Selin N E. The role of natural variability in projections of climate change impacts on U.S. ozone pollution [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(6): 2911-2921.
- [10] Wang Z S. Satellite-observed effects from ozone pollution and climate change on growing-season vegetation activity over China during 1982-2020 [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(11), doi: 10.3390/atmos12111390.
- [11] 中华人民共和国生态环境部.2021年中国生态环境状况公报[EB/OL].<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202205/P020220527581962738409.pdf>, 2022-09-24.
- [12] Yu R L, Lin Y L, Zou J H, *et al.* Review on Atmospheric ozone pollution in China: formation, spatiotemporal distribution, precursors and affecting factors [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(12), doi: 10.3390/atmos12121675.
- [13] Li Y S, Yin S S, Yu S J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and the sensitivity to precursors during early summer in central plain, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **99**: 354-368.
- [14] 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.
- [15] Yang L F, Luo H H, Yuan Z B, *et al.* Quantitative impacts of meteorology and precursor emission changes on the long-term trend of ambient ozone over the Pearl River Delta, China, and implications for ozone control strategy [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(20): 12901-12916.
- [16] Shu L, Xie M, Wang T J, *et al.* Integrated studies of a regional ozone pollution synthetically affected by subtropical high and typhoon system in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(24): 15801-15819.
- [17] Sun L, Xue L K, Wang Y H, *et al.* Impacts of meteorology and emissions on summertime surface ozone increases over Central Eastern China between 2003 and 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(3): 1455-1469.
- [18] 郭云飞,包云轩,刘端阳.基于卫星和地面观测的中国典型

- 城市群对流层内臭氧时空变化特征[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(3): 719-730.
- Guo Y F, Bao Y X, Liu D Y. Spatial-temporal variations of tropospheric ozone over typical urban agglomerations in China based on satellite and surface observations [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 719-730.
- [19] 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.
- [20] 孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 气候变化对环境空气质量影响的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2011, **16**(6): 805-814. Sun J R, Xu Z C, Liu Y, *et al.* Advances in the effect of climate change on air quality[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, **16**(6): 805-814.
- [21] 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.
- [22] Li K, Jacob D J, Shen L, *et al.* Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**: 11423-11433.
- [23] Wang N, Liu 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.
- [24] 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 等. 河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2947-2956. Yan Y Y, Yin S S, He Q, *et al.* Trend changes in ozone pollution and sensitivity analysis of ozone in Henan Province[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2947-2956.
- [25] 陈瑜萍. 粤港澳大湾区臭氧生成敏感性时空变化特征及其影响因素研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. Chen Y P. Study on the spatial-temporal variation characteristics of ozone formation sensitivity and its influencing factors in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater bay area [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [26] 单源源, 李莉, 刘琼, 等. 基于 OMI 数据的中国中东部臭氧及前体物的时空分布[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(8): 1128-1136. Shan Y Y, Li L, Liu Q, *et al.* Spatial-temporal distribution of ozone and its precursors over Central and Eastern China based on OMI data[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(8): 1128-1136.
- [27] 武卫玲, 薛文博, 雷宇, 等. 基于 OMI 数据的京津冀及周边地区 O<sub>3</sub> 生成敏感性[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1201-1208. Wu W L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Sensitivity analysis of ozone in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area using OMI satellite remote sensing data [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1201-1208.
- [28] 庄立跃, 陈瑜萍, 范丽雅, 等. 基于 OMI 卫星数据和 MODIS 土地覆盖类型数据研究珠江三角洲臭氧敏感性[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(11): 3581-3592. Zhuang L Y, Chen Y P, Fan L Y, *et al.* Study on the ozone formation sensitivity in the Pearl River Delta based on OMI satellite data and MODIS land cover type products [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(11): 3581-3592.
- [29] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 海南省生态环境厅. 2021 年海南省生态环境状况公报[EB/OL]. [http://hnsthb.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202206/t0220602\\_3205707.html](http://hnsthb.hainan.gov.cn/xxgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202206/t0220602_3205707.html), 2022-06-02.
- [33] Xu W Y, Xu X B, Lin M Y, *et al.* Long-term trends of surface ozone and its influencing factors at the Mt Waliguan GAW station, China-Part 2: the roles of anthropogenic emissions and climate variability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(2): 773-798.
- [34] Wang W, Ronald V D A, Ding J, *et al.* Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **21**, doi: 10.5194/acp-21-7253-2021.
- [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] Bai K X, Ma M L, Chang N B, *et al.* Spatiotemporal trend analysis for fine particulate matter concentrations in China using high-resolution satellite-derived and ground-measured PM<sub>2.5</sub> data [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **233**: 530-542.
- [37] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, **53**(4): 431-439. Shi N, Chen J Q, Tu Q P. 4-phase climate change features in the last 100 years over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, **53**(4): 431-439.
- [38] 施能, 黄先香, 杨扬. 1948~2000 年全球陆地年降水量趋势变化的时、空特征[J]. 大气科学, 2003, **27**(6): 971-982. Shi N, Huang X X, Yang Y. Spatiotemporal features of the trend variation of global land annual rainfall fields from 1948~2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(6): 971-982.
- [39] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 2007.
- [40] Duncan B N, Yoshida Y, Olson J R, *et al.* Application of OMI observations to a space-based indicator of NO<sub>x</sub> and VOC controls on surface ozone formation [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(18): 2213-2223.
- [41] Jin X M, Holloway T. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the Ozone Monitoring Instrument [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(14): 7229-7246.
- [42] Jin X M, Fiore A, Boersma K F, *et al.* Inferring changes in summertime surface ozone-NO<sub>x</sub>-VOC chemistry over U. S. Urban areas from two decades of satellite and ground-based observations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(11): 6518-6529.
- [43] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 基于卫星遥感的海南地区对流

层 NO<sub>2</sub> 长期变化及成因分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1402-1410.

Fu C B, Tang J X, Dan L, *et al.* Satellite-based long-term trends analysis in TroNO<sub>2</sub> over Hainan Island and its possible reason[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1402-1410.

[44] 刘楚薇, 连鑫博, 黄建平. 我国臭氧污染时空分布及其成因

研究进展[J]. 干旱气象, 2020, 38(3): 355-361.

Liu C W, Lian X B, Huang J P. Research review on the spatio-temporal distribution of ozone pollution and its causes in China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(3): 355-361.

[45] Beirle S, Boersma K F, Platt U, *et al.* Megacity emissions and lifetimes of nitrogen oxides probed from space [J]. Science, 2011, 333(6050): 1737-1739.

## 欢迎订阅 2023 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA); Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS); Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn

## CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities .....	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O <sub>3</sub> Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring .....	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island .....	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O <sub>3</sub> and Precursors HCHO and NO <sub>2</sub> in East China .....	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020 .....	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo .....	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an .....	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin .....	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin .....	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment .....	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain .....	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province .....	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming .....	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake .....	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake .....	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River .....	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qiu, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang .....	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels .....	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China .....	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir .....	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater .....	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 for Various Nitrogen Sources at Low Temperature .....	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism .....	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost .....	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin .....	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland .....	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan .....	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake .....	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm .....	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) .....	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean .....	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide .....	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone .....	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers; A Meta-analysis .....	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope .....	ZHANG Gao-ning, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals .....	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability .....	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain .....	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil .....	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials .....	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce .....	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress .....	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas .....	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO <sub>2</sub> -modified Biochar .....	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis .....	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model .....	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI .....	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing .....	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province .....	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province .....	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil .....	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO <sub>2</sub> Foamed Concrete .....	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling .....	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)