

文章编号: 1674-7054(2022)04-0404-06



海南岛臭氧污染时空特征及其成因分析

符传博^{1,2}, 佟金鹤^{1,2}, 徐文帅³, 刘丽君^{1,2}

(1. 海南省气象科学研究所, 海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203;
3. 海南省环境科学研究院, 海口 571126)

摘要: 近年来, 海南岛臭氧污染特征及其来源分析和防治工作引起了普遍重视。海南岛城市臭氧(ozone, O₃)浓度较稳定, 但 O₃ 污染超标事件还是时有发生。从最大 8 h 滑动平均 O₃ 浓度(O₃-8h)和超标天数上看, 其分布特征呈现海南岛北部和西部偏高, 中部、东部和南部偏低; 其月变化表现为“双峰型”, 最大值出现在 10 月份。人为排放的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOC_S)是海南岛 O₃ 污染产生的重要前体物; 高温、低湿、低风速和有利风向会造成 O₃ 浓度升高; 气候变化也会在一定程度上影响着海南岛 O₃ 污染的变化。

关键词: 臭氧; 气象条件; 前体物; 气候变化; 海南岛

中图分类号: X 515 **文献标志码:** A

引用格式: 符传博, 佟金鹤, 徐文帅, 等. 海南岛臭氧污染时空特征及其成因分析 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(4): 404-409. DOI: [10.15886/j.cnki.rdsxb.2022.04.012](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdsxb.2022.04.012)

臭氧(ozone, O₃)在大气中是一种痕量气体, 90% 分布在 10~50 km 的平流层中, 仅有 10% 分布在对流层内^[1]。O₃ 作为主要的大气污染物之一, 在大气化学、气候变化和空气质量等方面都起着极为重要的作用^[2-3]。对流层中 O₃ 主要来源于氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOC_S)和一氧化碳(CO)等前体物在太阳紫外光下发生一系列复杂的光化学反应生成^[4-5], 少部分则通过扩散和湍流方式由平流层输送下来^[6]。对流层 O₃ 浓度的上升, 会严重危害人体健康, 包括刺激人体呼吸系统, 破坏免疫系统, 引发炎症和呼吸系统疾病等^[7-8]。此外, 高浓度 O₃ 还会对生态环境和农业生产等产生较大不利影响^[9-10]。近年来对流层 O₃ 浓度的增加已经引起广泛的关注, 同时 O₃ 污染的相关研究也成为大气环境领域的热点和难点之一^[11-12]。

国外早在 20 世纪 60 年代就城市 O₃ 污染的化学机理问题开展了相关研究^[13], 而我国由于产能结构、气候特点和污染类型不同, 早期的大气污染

研究和相关防控工作主要集中在颗粒物污染。随着近年来近地面 O₃ 浓度的增加, O₃ 已经成为我国继细颗粒物(PM_{2.5})之后第二大污染物, 甚至在华东和华南等地, O₃ 已经取代 PM_{2.5}, 成为最主要的大气污染物^[14-15]。O₃ 污染的来源分析和防治工作引起了专家学者的重视, 并开展了一系列 O₃ 污染的研究工作^[16-17]。目前开展的 O₃ 污染研究主要有 O₃ 形成机制^[13, 18]、污染特征^[19]和来源^[20-21]、影响因素^[22]及监测预报^[23]等方面, 而且主要集中在京津冀、长三角、珠三角、四川盆地等高污染地区, 污染相对较轻的区域 O₃ 污染研究较为滞后。海南岛一直以生态自然环境良好著称。根据海南省生态环境厅的统计结果^[24], 2019 年海南岛空气质量优良天数较 2018 年上升 1.5 个百分点, PM_{2.5} 和可吸入颗粒物(PM₁₀)浓度持续下降, 但是海南岛 O₃ 浓度维持较高水平, 与 2018 年相比, O₃ 浓度更是上升了 11 μg·m⁻³。海南岛近年来还发生过多以 O₃ 为主要污染物的大气污染事件^[25]。

收稿日期: 2021-09-16 修回日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(42065010, 42141017); 海南省重大科技计划项目(ZDKJ202007); 海南省自然科学基金(422RC802, 421QN0967)

第一作者: 符传博(1985-), 男, 硕士, 研究员级高级工程师. 研究方向: 大气环境与气候模拟. E-mail: hnfuchuanbo@163.com; fuchuanbo@hainan.gov.cn

因此,笔者梳理和总结 2015—2020 年针对海南岛 O_3 污染的研究结果,结合目前 O_3 污染形成机理的研究成果来探讨气候变化对海南岛 O_3 浓度的影响,以期控制 O_3 污染阈值提供理论指导。

1 海南岛臭氧污染时空特征

1.1 臭氧污染的空间分布

图 1 为 2015—2020 年海南岛 18 个市县 O_3 -8h 的平均浓度及超标天数累加值的空间分布。图 1-a 表明, O_3 -8h 浓度呈现北部和西部偏高,中部、东部和南部偏低的分布特征。西部和北部的大部分市县 O_3 -8h 浓度均超过了 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最高值出现在东方市,高达 $91.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,中部、东部和南部的市县基本在 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,最低值($59 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)出现在中部山区的琼中县。从 2015—2020 年的 O_3 -8h 浓度超标天数累加值上看(图 1-b),超标天数累加值空间分布与 O_3 -8h 浓度基本一致,西部和北部的大部分市县超标天数偏高,其中最高的市县为东方市,超标天数高达 61 d。此外,澄迈县、海口市,临高县和文昌市超标天数都超过了 48 d, O_3 -8h 浓度整体超标偏多。中部、东部和南部市县超标天数基本在 30 d 以下,最低

值(2 d)出现在五指山市。

海南岛 O_3 -8h 浓度和超标天数累加值的空间分布与不同市县的气候环境和经济发展水平差异有很大关系^[26]。受东亚季风、台风活动和海南岛地形的共同影响,西北半部年降水量明显偏少于东南半部,加之气温偏高,日照充足,水汽偏低,植被相对稀少,导致光化学反应速率偏快, O_3 浓度维持较高水平,超标天数偏多。而东南半部地区是海南岛台风影响最为频繁的地区,年降水量偏多,植被茂盛,湿度较大,光化学反应受到一定的抑制, O_3 浓度相对偏低,超标日数偏少。此外,像西部和北部的海口市、儋州市等市县,人口基数、机动车保有量、GDP 等整体都较大^[27],因而导致人为排放的 O_3 前体物也较多,导致 O_3 浓度维持较高水平,有利于 O_3 -8 h 浓度超标。

1.2 臭氧污染的时间变化

图 2 为 2015—2020 年海南岛 O_3 -8h 浓度的月际变化、年际变化及其标准差。从图 2 可以发现,一方面,2015—2020 年海南岛 O_3 -8h 浓度表现为略有下降趋势, O_3 -8h 浓度气候倾向率和气候趋势系数分别为 $-0.65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 -0.414 ,表明近年来海南岛政府大力推行大气污染防治工作已经取得一定的成效。另一方面,2015—2020 年 O_3 -8h 浓度不同月份变化幅度有增大的趋势,即 O_3 污染较重的月份与较轻的月份差异越来越显著,从 O_3 -8h 浓度标准差的变化上体现更为明显^[28]。冬半年在冬季风的控制下,海南岛容易受偏北气流携带的外来污染物影响^[29];此外,随着海南岛“候鸟型”养老产业的蓬勃发展^[30],餐饮排放、汽车保有量和电量消耗等增加,必定会加剧本地大气污染物排放, O_3 浓度影响因素更为复杂,加大了治理难度。

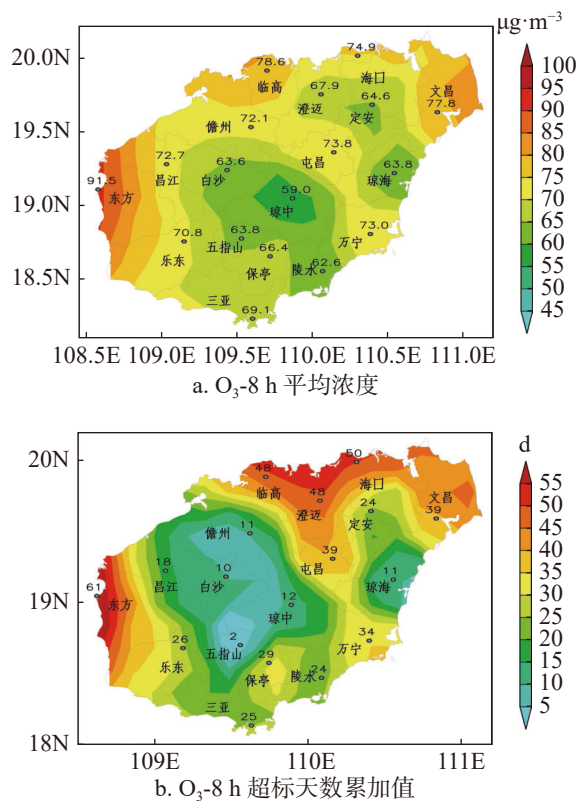


图 1 2015—2020 年海南岛 18 个市县的 O_3 -8h 平均浓度及超标天数累加值的空间分布

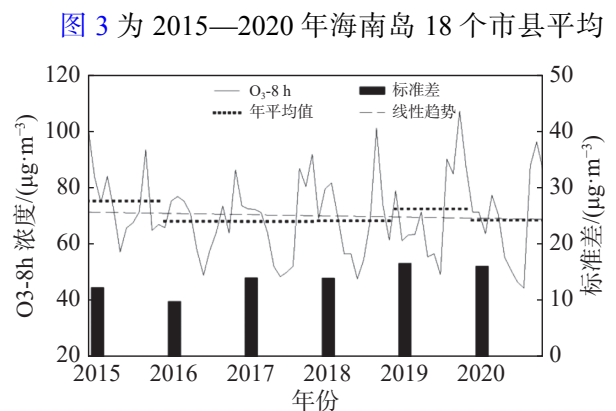


图 2 2015—2020 年海南岛 O_3 -8h 浓度的月际变化、年际变化及其标准差

的 O₃-8 h 浓度月变化。由图 3 可见,海南岛 O₃ 污染秋季较严重,春季和冬季次之,夏季最轻。这种变化特征与我国北方城市基本相反^[4,22],北方城市冬季虽因供暖等原因有更为严重的人为源排放,但太阳辐射较弱,不易发生光化学反应,故而 O₃ 污染较轻^[22]。海南岛由于地处我国最南端,纬度较低,常年太阳辐射偏强,因此 O₃ 浓度更多受前体物排放控制。另外,海南岛 O₃-8h 浓度在全年中基本呈现“双峰型”,最大值出现在 10 月份,次大值出现在 4 月份,这与珠三角地区的城市变化趋势一致^[31]。

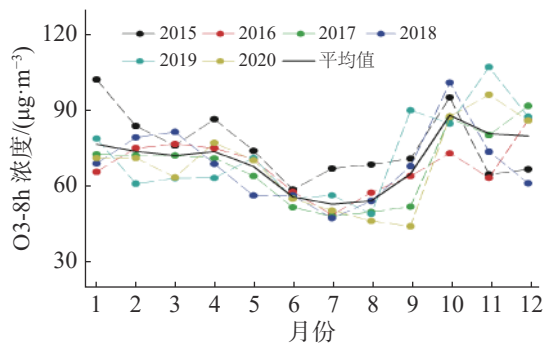
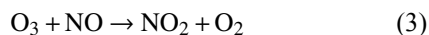
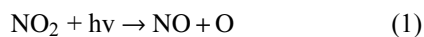


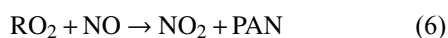
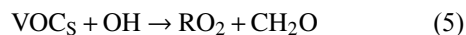
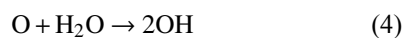
图 3 2015—2020 年海南岛 O₃-8h 浓度月变化

2 臭氧污染及影响因素

2.1 前体物的影响 对流层 O₃ 主要来源于汽车尾气及工业排放的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOC_s) 在紫外光(*hν*)的照射下,经过一系列复杂的光化学反应生成^[5,11]。大气中 NO₂—NO—O₃ 的光解循环反应链如下:



从式(1)~(3)可以发现,只有 NO_x 的光解循环是不会产生多余的 O₃,然而大气中有 VOC_s 的加入后,上述循环则会被终止,VOC_s 产生的 RO₂ 和 HO₂ 代替 O₃ 完成 NO 向 NO₂ 的转化,致使 O₃ 累积,具体见(4)~(6)式:



式中 PAN 为氧乙酰硝酸酯,而且没有天然源,只有人为源。PAN 是重要二次污染物之一,往往被作为大气发生光化学烟雾的依据。

O₃ 前体物的来源包括自然源和人为源两方面,对于自然源,NO_x 来源于土壤和闪电^[32],VOC_s 来源于植物排放^[33]。人为源均包括工业、农业、交通、生活等多个方面,其中工业排放是 NO_x 和 VOC_s 的主要来源^[34]。海南岛各个市县开展 O₃ 及其前体物的实时监测时间各不相同,海口市开始时间是 2013 年^[35],三亚市是 2014 年^[36],2015 年监测工作才在全岛铺开。监测年限相对较短,而且针对前体物和 O₃ 浓度的研究工作也主要停留在较为简单的统计分析,并得出 O₃ 浓度与 NO₂ 存在一定的正相关性结论^[37]。事实上,我国不同地区 O₃ 浓度对前体物的敏感性各不相同,高污染区域 O₃ 浓度都属于 VOC_s 控制区^[11],而大部分城市为 NO_x 控制区^[38],还有部分城市为混合敏感区^[39]。因此,根据不同地区 O₃ 浓度对前体物的敏感性进行协同减排控制,才能有效地控制 O₃ 污染。目前针对海南岛的相关工作还没有见文献报道,尚有待于进一步深入开展。

2.2 气象因子对臭氧污染的影响 气象因子能有效地影响对流层 O₃ 及其前体物的生成、传输和消散^[5]。一般而言,高强度的太阳紫外辐射、高温、低湿、长日照时数、弱风速、有利的风向等气象条件能有效促进光化学反应速率,致使 O₃ 浓度上升^[40-41]。

气温的高低一方面能直接反映出太阳紫外辐射的强弱,另一方面温度偏高,分子碰撞更为频繁,光化学反应速率更快,因而气温与 O₃ 浓度有密切关系^[42-43]。如王玫等^[44]发现北京市 O₃ 浓度受气温影响较大,陆倩等^[45]的研究表明石家庄市气温和 O₃ 浓度存在较好的正相关关系。Xu 等^[46]发现气温高于 21 °C 后,气温与 O₃ 浓度存在线性上升关系。对于海南岛而言,气温最高的夏季 O₃ 浓度最低^[29]。文献 [37] 的分析结果表明,2015—2018 年海南岛气温与 O₃ 浓度呈负相关关系,这与我国其他南方城市一致^[14,47]。这也说明在我国气温偏高的南方地区,O₃ 浓度更多受其他气象因素的影响,如降水、湿度、太阳紫外辐射等。

相对湿度是表征大气中水汽含量的 1 个物理量,而水汽的多少很大程度上影响着 O₃ 浓度的变化。(1)水汽偏大时,太阳紫外辐射会因消光机制而发生衰减,进而降低光化学反应速率^[48];(2)水汽偏大会促进 O₃ 干沉降作用的发生^[49];(3)水汽在一

定条件下会直接跟 O_3 发生化学反应, 直接消耗 O_3 ^[50]。海南岛四面环海, 相对湿度常年偏高, 近些年海南岛 O_3 污染事件的发生, 往往跟北方干气团南下密切相关^[50]。2017年10月海口市一次持续 O_3 污染过程中, 海南岛北部低空相对湿度低至 30%^[51]。

风向风速对 O_3 的作用主要体现在传输和消散方面^[5]。小风条件不利于 O_3 向外扩散, 导致源地 O_3 浓度上升; 大风会加速 O_3 从源地向外扩散, 但同时可能会加大风向下游地区 O_3 浓度的上升, 同时污染物的外源输送会加大区域 O_3 浓度变化^[52]。海南岛位于我国最南端, 北边毗邻珠三角地区, 在冬季风的影响下, 海南岛多次受北方污染物输送影响, 如文献 [53] 利用后向轨迹模型分析了 2013—2018 年海口市 500 m 高度 48 h 影响气流, 发现广东是海口市大气污染物超标的主要潜在贡献源区, 此外福建、江西、湖南和广西东部等地的潜在贡献也较大。污染个例分析也表明, 外源输送与海南岛 O_3 浓度上升有较大关系^[24]。

2.3 气候变化对臭氧污染的影响 工业革命以来, 全球气候正经历着以变暖为主要特征的气候变化^[54]。气候变化可以通过影响温度和湿度, 改变边界层高度和天气系统出现频率, 调整大气环流形势等, 进而影响 O_3 及前体物的生成和传输^[55]。近几十年来, 北半球气旋活动有明显的地区差异^[56], 而我国降水日数、地面风速等都出现了不同程度的减少趋势^[57-58], 这些气候变化特征会影响和改变着对流层 O_3 的生成、分布和传输等。海南岛近几十年气温也表现为上升的变化趋势^[59], 同时伴随着相对湿度的下降^[60]。影响海南岛的台风存在一定的周期变化^[61]等。目前针对海南岛气候变化对 O_3 浓度的影响尚未见相关报道, 其内在机理还有待于进一步研究。

3 讨论

NO_x 和 VOC_s 是 O_3 最重要的前体物, 但用定量化解释其来源问题目前尚还不明确, 特别是区分其自然源或人为源的贡献比例问题尤为关键。此外光化学反应过程是非常复杂的过程, 自由基化学等研究正成为大气环境领域的热点。海南岛相对其他岛份来说, 这方面的观测和分析研究起步较晚, 还有待于进一步深入研究。

气象因子会显著影响对流层 O_3 浓度的变化, 一般而言, 高温低湿, 低风速和有利风向会造成海南岛 O_3 浓度升高, 污染事件发生。海南岛这方面的研究目前多局限于气象因子与 O_3 浓度的相关分析, 而定量化的给出不同气象因子的变化对 O_3 浓度的影响还不多见。此外, 对海南岛 O_3 污染时段天气形势的归类分析还未见有报道, 加强这方面的研究, 对气象和环境部门的预报工作有一定的指导意义。

受限于 O_3 和前体物的观测年限, 气候变化对 O_3 浓度的影响分析目前开展的不多, 且多采用数值模式来开展。海南岛的气候有很多具有地方特征的变化, 如海陆风、山谷风和地形的影响等, 今后的研究重点应改进反演算法, 从而获得比较可靠的长时间序列 O_3 浓度资料, 进而探讨气候变化对海南岛 O_3 浓度的影响。

参考文献:

- [1] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 2版 北京: 北京大学出版社, 2013: 11-12.
- [2] IPCC: Climate change 2007 – Synthesis Report, 2007.
- [3] WILLIAM T B, ALSING J, MORTLOCK D J, et al. Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(2): 1379 – 1394.
- [4] 王佳颖, 曾乐薇, 张维昊, 等. 北京市夏季臭氧特征及臭氧污染日成因分析[J]. *地球化学*, 2019, 48(3): 293 – 302.
- [5] 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.
- [6] 王明星. 大气化学[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [7] FUHRER J. Ozone risk for crops and pastures in present and future climates [J]. *Die Naturwissenschaften*, 2009, 96(2): 173 – 194.
- [8] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 603 – 608.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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, 31(6): 8 – 14.
- [12] 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.
- [13] JUNGE C E. Global ozone budget and exchange between stratosphere and troposphere [J]. *Tellus*, 1962, 14: 364 – 377.

- [14] 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.
- [15] 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): 23 – 26.
- [16] 王雪松, 李金龙, 张远航, 等. 北京地区臭氧污染的来源分析[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2009, 39(6): 548 – 559.
- [17] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2041 – 2051.
- [18] PANDIS S N, SEINFELD J H. Sensitivity analysis of a chemical mechanism for aqueous -phase atmospheric chemistry [J]. *Journal Geophysical Research*, 1989, 94(D1): 1105 – 1126.
- [19] 李霄阳, 李思杰, 刘鹏飞, 等. 2016年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1263 – 1274.
- [20] 杨辉, 朱彬, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4519 – 4528.
- [21] WANG M, CHEN W, ZHANG L, et al. Ozone pollution characteristics and sensitivity analysis using an observation-based model in Nanjing, Yangtze River Delta Region of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 93: 13 – 22.
- [22] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 106 – 114.
- [23] 刘烽, 徐怡珊. 臭氧数值预报模型综述[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 1 – 16.
- [24] 海南省生态环境厅. 2019年海南省生态环境状况公报 [OL]. [2020-06-05]. http://hnsthb.hainan.gov.cn/jdhy/zcjd/sptj/202006/t20200605_2799446_mo.html.
- [25] 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.
- [26] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [27] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 基于卫星遥感的海南地区对流层 NO₂ 长期变化及成因分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1402 – 1410.
- [28] 旷雅琼, 邹忠, 张秀英, 等. 长三角地区大气污染物对新冠肺炎封城的时空响应特征[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1165 – 1172.
- [29] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015—2018年海南省城市臭氧时空分布特征[J]. 环境化学, 2020, 39(10): 2823 – 2832.
- [30] 翟羽, 庄雪球, 曹卫洁. 三亚“候鸟型”养老产业发展的现状与对策探索[J]. 产业与科技论坛, 2015, 14(15): 20 – 21.
- [31] 李连和. 珠三角区域地表臭氧浓度变化趋势研究[J]. 能源与环境, 2017(4): 30 – 32.
- [32] FU Y, LIAO H, YANG Y, et al. Interannual and decadal changes in tropospheric ozone in China and the associated chemistry-climate interactions: A review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(9): 975 – 993.
- [33] 程麟钧. 我国臭氧污染特征及分区管理方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [34] LI M, LIU H, GENG G N, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834 – 866.
- [35] 苏超. 海口市环境空气质量、污染特征及其影响因素研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.
- [36] 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): 106 – 111.
- [37] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 前体物与气象因子对海南省臭氧污染的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 45 – 50.
- [38] 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.
- [39] WANG N, LIU X P, DENG X J, et al. Aggravating O₃ pollution due to NO_x emission control in Eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 677: 732 – 744.
- [40] 李顺姬, 李红, 陈妙, 等. 气象因素对西安市西南城区大气中臭氧及其前体物的影响[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(4): 59 – 67.
- [41] 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.
- [42] 王闯, 王帅, 杨碧波, 等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 32 – 37.
- [43] 梁碧玲, 张丽, 赖鑫, 等. 深圳市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 66 – 71.
- [44] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2689 – 2698.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州市区大气臭氧浓度变化及气象要素影响[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 602 – 611.
- [48] 刘晶森, 丁裕国, 黄永德, 等. 太阳紫外辐射强度与气象要素的相关分析[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 45 –

- 50.
- [49] SARAH C K, JENNIFER G M. Understanding ozone-meteorology correlations: A role for dry deposition [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(6): 1 – 10.
- [50] 姚青, 孙玫玲, 刘爱霞. 等. 天津臭氧浓度与气象因素的相关性及其预测方法 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2206 – 2210.
- [51] 符传博, 丹利, 佟金鹤. 等. 2017年秋季海口市一次持续空气污染过程特征及成因分析 [J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1048 – 1058.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [55] 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.
- [56] 王新敏, 邹旭凯, 翟盘茂. 北半球温带气旋的变化 [J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 154 – 157.
- [57] 张丽亚, 吴润. 近几十年中国小雨减少趋势及其机制的研究进展 [J]. *暴雨灾害*, 2014, 33(3): 202-207.
- [58] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 全球气候模式对未来中国风速变化预估 [J]. *大气科学*, 2010, 34(2): 323 – 336.
- [59] 吴胜安, 吴慧. 海南岛气温年际变化与海温的关系 [J]. *气象研究与应用*, 2009, 30(4): 38 – 41.
- [60] 唐少霞, 赵从举, 袁建平, 等. 1961—2007年海口市气候环境变化及其对城市发展的响应 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2721 – 2726.
- [61] 李剑兵. 百多年登陆粤西海南台风的频数分析 [J]. *广东气象*, 2001, 3(3): 14 – 14.

Research Advances in the spatio-temporal distribution and causes of ozone pollution in Hainan Province

FU Chuanbo^{1,2}, TONG Jinhe^{1,2}, XU Wenshuai³, Liu Lijun^{1,2}

(1. Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou, Hainan 570203; 2. Hainan Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Haikou, Hainan 570203; 3. Hainan Academy of Environmental Sciences, Haikou, Hainan 571126, China)

Abstract: In recent years the concentration of urban ozone (O_3) in Hainan Province has been stable relatively, but O_3 pollution events have occurred frequently, and its source and characteristics have attracted the attention of government and local people. In this context the researches on O_3 pollution in Hainan over the years from 2015 to 2020 were reviewed. The review showed that the running 8 h average O_3 concentration (O_3 -8h) and the number of days exceeding the standard are higher in northern and western Hainan than in middle, eastern and southern Hainan, and their monthly variation is bimodal, with the maximum value appearing in October. Man-made emissions of nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOC_s) are very important for formation of O_3 that generates O_3 pollution in Hainan Province. In addition, high temperature, low humidity, low wind speed and favorable wind direction will lead to elevation of O_3 concentration, and climate change will also affect O_3 pollution in Hainan Province.

Keywords: ozone; meteorological condition; precursors; climate change; Hainan Province

(责任编辑: 刘少军 责任编辑: 叶 静)