

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示  
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期  
Vol.43 No.2

# 目次

## 综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 ..... 李助之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 ..... 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

## 研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 ..... 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的  $PM_{2.5}$  来源解析对比 ..... 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季  $PM_{2.5}$  中水溶性离子污染特征及来源分析 ..... 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节  $PM_{2.5}$  水溶性离子污染特征 ..... 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物  $PM_{2.5}$  中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 ..... 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省  $PM_{2.5}$  分布的影响 ..... 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域  $PM_{2.5}$  预报比较分析 ..... 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 ..... 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 ..... 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 ..... 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 ..... 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 ..... 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 ..... 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 ..... 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 ..... 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 ..... 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 ..... 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 ..... 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 ..... 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 ..... 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 ..... 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 ..... 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 ..... 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 ..... 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 ..... 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 ..... 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 ..... 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 ..... 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 ..... 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 ..... 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 ..... 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 ..... 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 ..... 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 ..... 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 ..... 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 ..... 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 ..... 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 ..... 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 ..... 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 ..... 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 ..... 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 ..... 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 ..... 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 ..... 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 ..... 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 ..... 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 ..... 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 ..... 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 ..... 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) ..... 信息(685, 935, 956)

# 2015 ~ 2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析

符传博<sup>1,2,3</sup>, 徐文帅<sup>4\*</sup>, 丹利<sup>2</sup>, 佟金鹤<sup>1,3</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 2015 ~ 2020 年海南省 32 个大气环境监测站监测数据, 以及同期的常规气象观测资料, 采用经验正交函数分解方法(EOF)、气候倾向率和趋势系数分析等方法, 探讨了海南省  $O_3$ -8h(最大 8 h 平均)时空分布特征, 及其与前体物和气象因子的关系。结果表明, 海南省  $\rho(O_3-8h)$  呈北部和西部偏高, 中部、东部和南部偏低的分布特征, 最高值出现在东方市 ( $91.5 \mu g \cdot m^{-3}$ )。2015 ~ 2020 年共有 12 个市县  $\rho(O_3-8h)$  呈下降趋势, 其中有 6 个市县达到了 95% 的信度检验。 $\rho(O_3-8h)$  季节变化特征明显, 秋季最高, 春季和冬季次之, 夏季最低。秋季  $\rho(O_3-8h)$  表现为上升趋势, 而其余三季为下降趋势。EOF 分解的前两个特征向量场的累积方差为 72.58%, 能够较好地描述  $\rho(O_3-8h)$  的主要分布特征。第一模态体现了  $\rho(O_3-8h)$  变化的一致性, 第二模态体现了地区性差异。 $\rho(O_3-8h)$  的变化与前体物和气象因子有较好的相关关系, 其中与  $\rho(NO_2)$ 、降水量、日照时数、平均气温、平均风速、大气压和总辐射的相关系数通过了 99% 的信度检验。多元线性回归结果表明, 回归的  $\rho(O_3-8h)$  与观测得到的  $\rho(O_3-8h)$  有较好的一致性, 二者的相关系数为 0.853, 通过了 99.9% 的信度检验。回归值对实测值方差的解释达到了 0.72。

**关键词:** 臭氧( $O_3$ ); 前体物; 气象因子; 经验正交函数分解(EOF); 海南省

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0675-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105103

## Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020

FU Chuan-bo<sup>1,2,3</sup>, XU Wen-shuai<sup>4\*</sup>, DAN Li<sup>2</sup>, TONG Jin-he<sup>1,3</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:** This study investigated temporal and spatial variations in  $O_3$ -8h (defined as the maximum 8 h average result) in Hainan Province from 2015 to 2020 and further analyzed its relationships with precursors and meteorological factors based on a dataset of observations from 32 environmental monitoring stations in Hainan. Basic statistical methods, including the empirical orthogonal function (EOF), climatic tendency rate, and climatic trend coefficient analysis, were used here. The results showed that  $\rho(O_3-8h)$  was higher in northern and western Hainan than that in other regions, with the maximum value occurring in Dongfang City ( $91.5 \mu g \cdot m^{-3}$ ). Twelve cities and counties experienced a downward trend from 2015 to 2020, and six cities and counties reached a 95% confidence level. The variation in  $\rho(O_3-8h)$  in Hainan Province demonstrated remarkable seasonal changes, which were the largest in the autumn, spring, and winter followed by the smallest in the summer, exhibiting a clear declining trend in all seasons except autumn. In addition, the cumulative variance of the first two eigenvector fields decomposed by EOF was 72.58%, which could well describe the distributed characteristics of  $\rho(O_3-8h)$  in Hainan Province. The first mode reflected the consistency of  $\rho(O_3-8h)$  variation, and the second mode reflected regional differences. Meanwhile, the change in  $\rho(O_3-8h)$  had a good correlation with the precursors and meteorological factors. Among them, the correlation coefficients between  $\rho(O_3-8h)$  and  $\rho(NO_2)$ , precipitation, sunshine duration, average temperature, average wind speed, atmospheric pressure, and total radiation passed the 99% confidence test. The results of multiple linear regression showed that the variation in regressed  $\rho(O_3-8h)$  was consistent with the observed  $\rho(O_3-8h)$ , and the correlation coefficient between them was 0.853, which passed the 99.9% confidence test. The regression value explained 0.72 variance of the observed value.

**Key words:** ozone ( $O_3$ ); precursors; meteorological factor; empirical orthogonal function (EOF); Hainan Province

近年来我国工业化、城市化的进程持续加快, 2020 年我国 GDP 突破了  $10.1 \times 10^{13}$  元, 城市化率达到了 63%<sup>[1]</sup>。快速的经济增长和城市化大幅提高了人民的生活水平, 但同时也造成能源资源消耗的持续增加, 以细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 和臭氧 ( $O_3$ ) 为主要大气污染物的大气环境问题日趋严重<sup>[2~4]</sup>, 我国大气污染已经从点源污染和城市污染, 发展成为区域性和复合性大气污染<sup>[5,6]</sup>, 引起了社会的广泛关注<sup>[7,8]</sup>。自 2013 年 9 月 10 日国务院颁布《大气污染防治行动计划》以来, 我国大气污染治理取得了举

世瞩目的成就,  $PM_{2.5}$  持续下降, 然而  $O_3$  浓度却稳步上升, 特别是纬度较低的华东、华南等地,  $O_3$  已经代替  $PM_{2.5}$  成为最主要的大气污染物<sup>[9,10]</sup>。高浓度的  $O_3$  不仅危害人体健康<sup>[11]</sup>, 同时还会影响生态环境和农业生产等<sup>[12,13]</sup>。相对而言,  $O_3$  污染的成因更为

收稿日期: 2021-05-11; 修订日期: 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42065010, 41775011); 海南省重大科技计划项目 (ZDKJ202007); 海南省气象局科研项目 (HNQXT202002)

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和环境气象, E-mail: hnfuchuanbo@163.com

\* 通信作者, E-mail: xuwendshuai@hotmail.com

复杂,治理难度更大。

目前,国内外相关专家学者主要从  $O_3$  污染的形成机制<sup>[14, 15]</sup>、污染特征<sup>[16]</sup>与来源<sup>[17, 18]</sup>和影响因素<sup>[19]</sup>及监测预报<sup>[20]</sup>等方面展开研究。比如 Xu 等<sup>[21]</sup>的研究发现,北京市气温高于  $21^\circ\text{C}$  后,  $O_3$  浓度与气温存在线性上升关系,特别是气温高于  $26^\circ\text{C}$  以后,  $O_3$  浓度容易出现超标。刘小正等<sup>[22]</sup>的研究分析了 2005 ~ 2014 年 OMI 卫星反演数据,发现冬季中国中东部地区对流层  $O_3$  上升速度达 40%,其中京津冀地区的  $O_3$  涨幅超过长三角和珠三角地区,此外长三角地区  $O_3$  混合比例最高,而珠三角地区相对稳定。李全喜等<sup>[23]</sup>的研究利用兰州市 4 个监测点 2014 ~ 2016 年资料分析了  $O_3$  浓度时空分布特征以及影响因素,结果表明  $O_3$  的月季变化为单峰分布,夏季最高。王玫等<sup>[24]</sup>的研究对京津冀地区 13 个城市的  $\rho(O_3)$  数据进行了分析,发现 2014 ~ 2017 年  $\rho(O_3)$  年均增长  $4.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其中北京市和保定市  $O_3$  污染最为严重。王旭东等<sup>[25]</sup>的研究发现郑州市 2014 ~ 2018 年  $O_3$  增长速率为  $15.5 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ,市区站点的主控因子为气温和相对湿度,而城郊站点为气温和风速。

海南省作为我国唯一一个热带海岛旅游省份,一直以生态自然环境好著称。特别是近年来随着政府和民众对生态环境保护工作的重视,国家和省政府连续出台了多项针对海南省生态环境的保护政策,如《国家生态文明试验区(海南)实施方案》和《海南省全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战行动方案》等,区域空气质量明显改善,2020 年海南省空气质量优良天数较 2018 年上升 2.0 个百分点<sup>[26]</sup>,  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  持续下降。与此同时,海南省  $\rho(O_3)$  维持较高水平,而且  $O_3$  在海南省首要污染物中占比最高,  $O_3$  污染问题尤为凸显。本文基于 2015 ~ 2020 年海南省空气质量监测数据和气象观测数据,采用经验正交函数分解(EOF)、趋势系数和回归分析等方法定量诊断  $\rho(O_3)$  的时空变化特征及其与前体物和气象因子的关系,通过更好地了解前体物和气象因子对  $O_3$  污染的内在机制,以期对海南省  $O_3$  污染防治工作提供支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据资料

空气质量监测数据源自海南省生态环境厅,监测站点共计 32 个,其中  $O_3$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  采用瑞典某公司的长光程仪器进行监测,  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和 CO 分别采用美国某公司点式 5030、FH62C14 和 48i 型监测仪器自动监测<sup>[27]</sup>。考虑到海南省近年来主要污染

物为臭氧日最大 8h 滑动平均( $O_3$ -8h)<sup>[28]</sup>,因此本文主要选取  $\rho(O_3$ -8h) 进行分析。另外由于各个市县站点开始监测的时间不同,本文选取了资料较为完整的 2015 ~ 2020 年,共计 6 a 的监测资料展开分析。此外所有气态污染物监测值在分析之前均处理为参比状态值。气象观测站点有 18 个(三沙市除外),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。

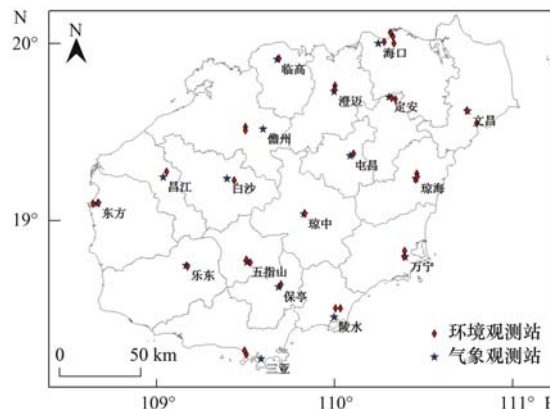


图 1 海南省空气质量监测站(32 站)及气象观测站(18 站)空间分布

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring stations (32 stations) and meteorology monitoring stations (18 stations) in Hainan Province

### 1.2 研究方法:经验正交函数分解

经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF),也称特征向量分析或者主成分分析,是一种将物理量场正交分解为空间场和时间系数乘积,提取主要数据特征量的方法。其优点是提取出来的空间函数部分特征向量不随时间变化,而时间函数部分与空间无关。其具体方法如下:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

某一物理量场可以以矩阵( $m$  表示为空间点,  $n$  表示为时间点)的形式表示,如式(1)所示。将式(1)矩阵分解成空间函数  $V$  和时间函数  $T$  两个部分,如式(2)所示:

$$\mathbf{X} = \mathbf{VT} \quad (2)$$

式中,  $V$  为空间函数矩阵,  $T$  为时间函数矩阵,  $V$  的每一列表示一个模态的空间典型场,只与空间有关,对应的  $T$  序列表示该模态的时间函数,描述了该模态的时间变化规律,也称为主分量<sup>[29]</sup>。此外,本文还用到了气候倾向率和气候趋势系数等统计方法,具体可参考文献[30]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 臭氧质量浓度的时空分布

图 2 给出了 2015 ~ 2020 年平均的海南省  $O_3$ -8h 空间分布,从中可知, $\rho(O_3$ -8h) 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  $\rho(O_3$ -8h) 均超过了  $70 \mu g \cdot m^{-3}$ ,最高值出现在东方市,高达  $91.5 \mu g \cdot m^{-3}$ ,中部、东部和南部的市县基本在  $70 \mu g \cdot m^{-3}$  以下,最低值出现

在琼中县,只为  $59 \mu g \cdot m^{-3}$ 。这可能与海南省不同市县的气候环境和经济发展水平差异有很大关系<sup>[31]</sup>。受东亚季风、台风活动和海南省地形的共同影响,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, $\rho(O_3$ -8h) 自然也高。而东南半部地区是海南省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, $\rho(O_3$ -8h) 相对偏低。此外,像北部和西部的海

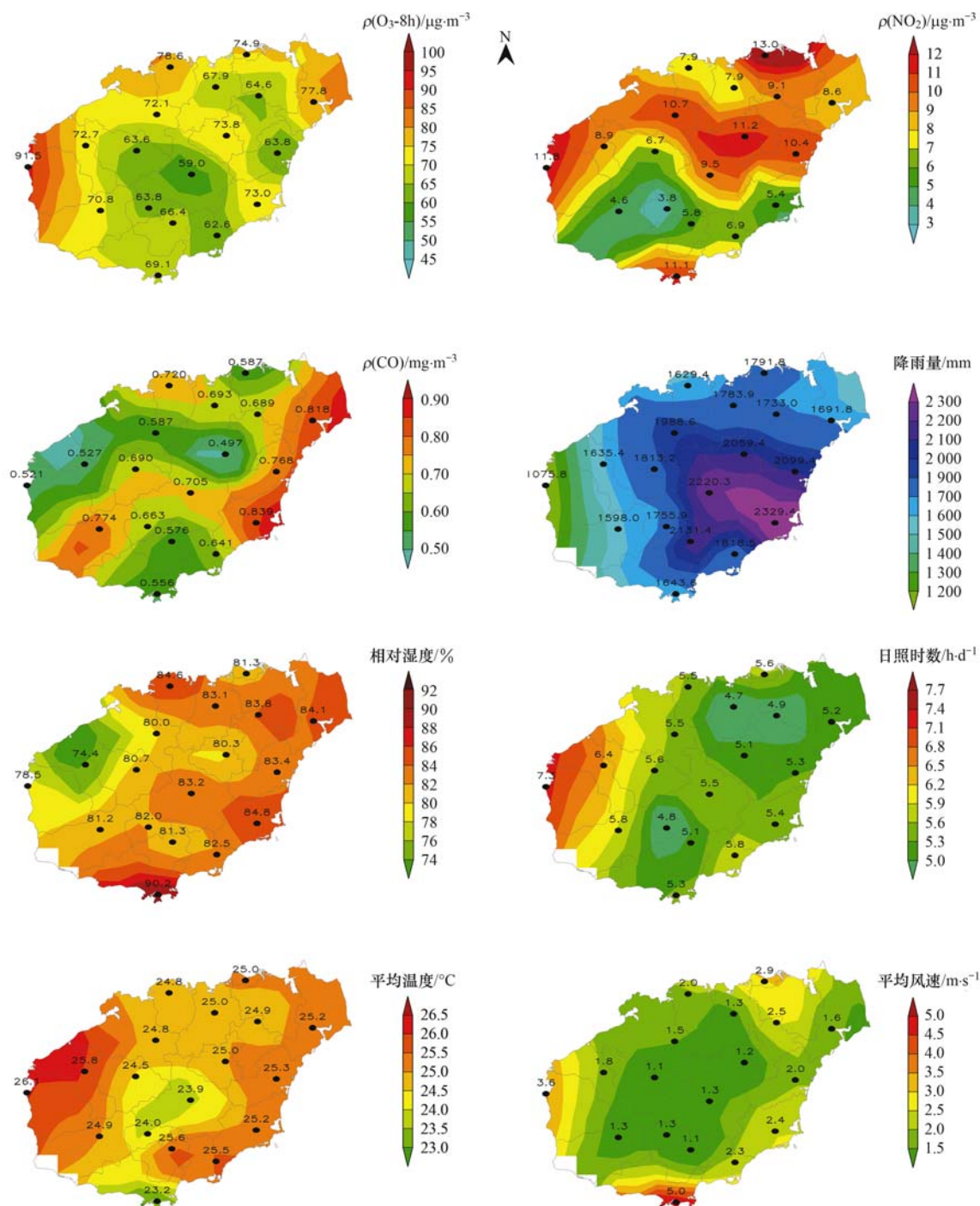


图 2 2015 ~ 2020 年平均的海南省  $O_3$ -8h、 $NO_2$ 、CO、年降水量、相对湿度、日照时数、平均气温和平均风速空间分布

Fig. 2 Distribution of annual mean  $O_3$ -8h, precipitation, relative humidity, sunshine duration, mean temperature and mean wind speed over Hainan Province from 2015 to 2020

口市和儋州市等市县,人口基数、机动车保有量和GDP等整体都较大<sup>[32]</sup>,因而导致人为排放的O<sub>3</sub>前体物也较多,导致ρ(O<sub>3</sub>-8h)相对较高。

图3为海南省O<sub>3</sub>-8h气候趋势系数空间分布。从图3(a)中可以看出,2015~2020年期间海南省ρ(O<sub>3</sub>-8h)变化呈现明显的区域特征,表现为上升趋势的市县共有6个,分别为海口市、澄迈县、临高县、文昌市、屯昌县和陵水县,其中海口市、澄迈县和屯昌县的气候趋势系数通过了95%的信度检验。表现为下降趋势的市县共有12个,其中有6个气候趋势系数通过了95%的信度检验。由于2019年末新冠病毒开始在各省市迅速蔓延,2020年1月24日开始,我国大部分地区实行了交通管制、工厂停工、杜绝聚会、学校停课和公司停班等<sup>[33]</sup>,而且持续时间和影响规模都是以往活动不可比拟的。防疫工作的开展在一定程度上影响着2020年观测的大气污染物浓度数据,因此作者进一步计算了海南省

ρ(O<sub>3</sub>-8h) 2015~2019年的气候趋势系数,如图3(b)所示。相比而言,2015~2019年北部市县的ρ(O<sub>3</sub>-8h)上升更为显著,除了海口市、澄迈县和屯昌县以外,文昌市的ρ(O<sub>3</sub>-8h)气候趋势系数也通过了95%信度检验,其中澄迈县的在0.6以上。一方面,北部市县在冬季风的控制下,容易受偏北气流携带的外来污染物影响;另一方面,近些年随着海南省“候鸟型”养老产业的蓬勃发展<sup>[34]</sup>,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<sub>3</sub>影响因素更为复杂,加大了治理难度。ρ(O<sub>3</sub>-8h)表现为下降趋势的市县共有12个,6个市县通过了95%的信度检验,与2015~2020年一致。总体而言,海南省ρ(O<sub>3</sub>-8h)表现为下降趋势,2015~2020年年平均ρ(O<sub>3</sub>-8h)气候倾向率为-0.65 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>,气候趋势系数为-0.414(表1),其中个别市县的ρ(O<sub>3</sub>-8h)上升值得关注。

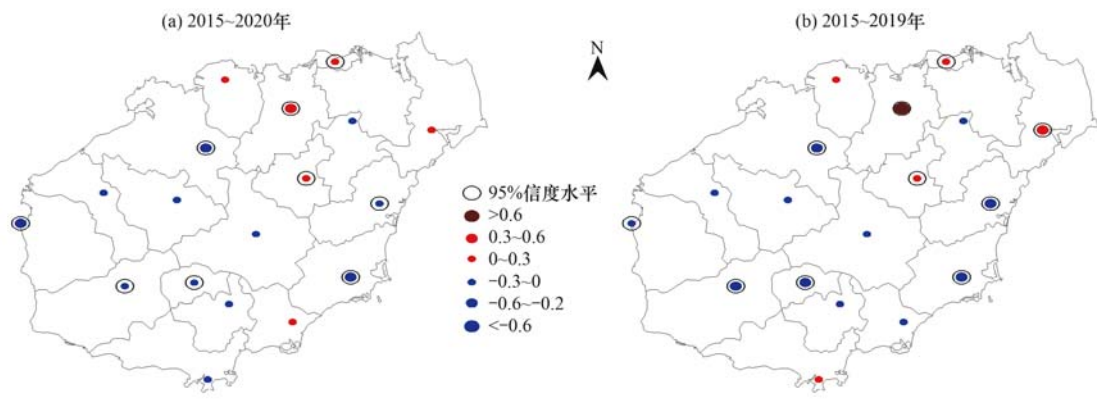


图3 海南省月平均O<sub>3</sub>-8h气候趋势系数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the climatic trend coefficient of O<sub>3</sub>-8h over Hainan Province

表1 2015~2020年海南省O<sub>3</sub>-8h的年平均和四季变化趋势

Table 1 Annual and seasonal variation trends of O<sub>3</sub>-8h over Hainan Province from 2015 to 2020

| 项目  | 平均值<br>/μg·m <sup>-3</sup> | 均方差<br>/μg·m <sup>-3</sup> | 气候倾向率<br>/μg·(m <sup>3</sup> ·a) <sup>-1</sup> | 气候趋势系数 | 信度检验/% |
|-----|----------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|--------|--------|
| 年平均 | 70.33                      | 3.21                       | -0.65                                          | -0.414 | 不显著    |
| 春季  | 71.07                      | 3.59                       | -1.37                                          | -0.779 | 95     |
| 夏季  | 54.60                      | 4.81                       | -1.65                                          | -0.705 | 90     |
| 秋季  | 78.12                      | 8.29                       | 2.05                                           | 0.507  | 80     |
| 冬季  | 77.05                      | 4.30                       | -1.11                                          | -0.528 | 80     |

2.2 O<sub>3</sub>-8h 质量浓度的四季变化趋势

图4给出了海南省2015~2020年各个季节平均的ρ(O<sub>3</sub>-8h)空间分布。从中可知,海南省ρ(O<sub>3</sub>-8h)有明显的季节变化特征。秋季ρ(O<sub>3</sub>-8h)明显偏高,冬季和春季次之,夏季最低。从空间分布上看,北部和西部市县ρ(O<sub>3</sub>-8h)偏高于其余地区,这与年平均ρ(O<sub>3</sub>-8h)空间分布一致,其原因主要与海南省不同地区经济发展水平和自然条件有关<sup>[27]</sup>。从不

同季节上看,春季ρ(O<sub>3</sub>-8h)呈现西北半部偏高,东南半部偏低的分布特征,其中东方市ρ(O<sub>3</sub>-8h)高达94.4 μg·m<sup>-3</sup>。夏季是海南省降水主要发生季节,受降水的冲刷作用和偏南气流影响,海南省ρ(O<sub>3</sub>-8h)普遍偏低,其中中部的五指山市ρ(O<sub>3</sub>-8h)低至41.4 μg·m<sup>-3</sup>。秋季北方冷空气开始活跃,偏北气流携带大量O<sub>3</sub>前体物影响海南省。加之海南省纬度偏低,秋季气温还维持较高水平,光化学反应剧烈,秋季是

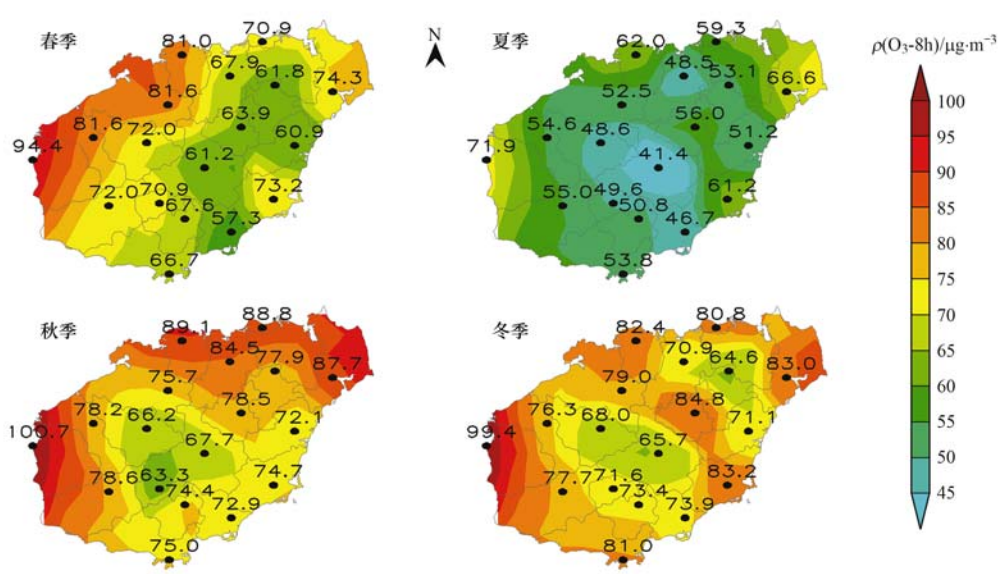


图 4 2015 ~ 2020 年海南省四季  $O_3-8h$  质量浓度平均分布

Fig. 4 Average seasonal distributions of  $O_3-8h$  in Hainan Province from 2015 to 2020

海南省  $\rho(O_3-8h)$  最高的季节, 其中  $O_3$  污染事件也多数发生在秋季<sup>[35]</sup>. 冬季海南省  $\rho(O_3-8h)$  分布较为均匀, 其中中部、东部和南部的市县  $\rho(O_3-8h)$  也较其他季节有所上升, 北部市县  $\rho(O_3-8h)$  偏低。冬季受冬季风影响, 海南省受北方污染气团影响较为明显, 但是由于冬季气温偏低, 光化学反应速率偏慢, 因而冬季  $\rho(O_3-8h)$  偏低。

图 5 为 4 个季节海南省  $\rho(O_3-8h)$  的年际变化趋势。从中可知, 不同季节其年际变化不尽相同。春季、夏季和冬季表现为下降的变化趋势, 其气候倾向率分别为:  $-1.37$  (春季)、 $-1.65$  (夏季) 和  $-1.11 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$  (冬季), 气候趋势系数分别为  $-0.779$ 、 $-0.705$  和  $-0.528$ , 均通过了 80% 的信度检验 (表 1), 其中春季达到了 95% 的信度检验,  $\rho(O_3-8h)$  下降较为显著。值得关注的是秋季  $\rho(O_3-8h)$  表现为显著地上升趋势, 其气候倾向率和气候趋势系数分别为  $2.05 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$  和  $0.705$ , 通过

了 90% 的信度检验。

2.3  $O_3-8h$  质量浓度的 EOF 分析

对海南省 18 个市县 2015 ~ 2020 年月平均  $\rho(O_3-8h)$  进行标准化处理, 再利用 EOF 方法分解。前 3 个模态和对应的主分量 (PCs) 分别占总方差贡献的 63.73%、8.85% 和 5.55% (表 2), 3 个模态均通过了 North's 检验<sup>[36,37]</sup>。从 EOF 第一模态 (EOF1) 和第二模态 (EOF2) 的空间分布以及对应的主分量 (PC1 和 PC2) 可以看出 (图 6), 第一主成分体现了海南省  $\rho(O_3-8h)$  的一致性变化特征。第一模态均被正值覆盖, 其中高荷载区分别位于西部的昌江县、南部的保亭县、陵水县和三亚市, 以及东部的琼海市, 最大值为 0.269, 表征这些站点  $\rho(O_3-8h)$  具有高度的正相关性。低荷载区位于北部的澄迈县, 中心值为 0.174, 表明澄迈县  $\rho(O_3-8h)$  变化与其他市县相关性较弱。结合 PC1 可知, 海南省  $\rho(O_3-8h)$  呈现显著的季节性振荡特征, 其中秋季  $\rho(O_3-8h)$  偏高, 夏季  $\rho(O_3-8h)$  偏低, 而且全省 18 个市县均具有统一的季节性振荡。第二主成分体现的是海南省  $\rho(O_3-8h)$  变化的不均匀性。第二模态表现为海南省北部的海口市、澄迈县和定安县, 东部的文昌市, 中部的屯昌县和琼中县, 以及南部的三亚市 EOF2 为正值, 其他市县均为负值。正值区域中高荷载区位于北部的澄迈县, 为 0.571, 而负值区域高荷载区位于乐东县, 为  $-0.334$ , 表征这两个市县的  $\rho(O_3-8h)$  有明显的负相关性。从 PC2 上看, 2017 年年末到 2019 年年底, EOF2 为正值, 其余时段  $\rho(O_3-8h)$  偏低; 反之, EOF2 为负值的市县  $\rho(O_3-8h)$  在 2017 年年末到 2019 年年底偏低, 其

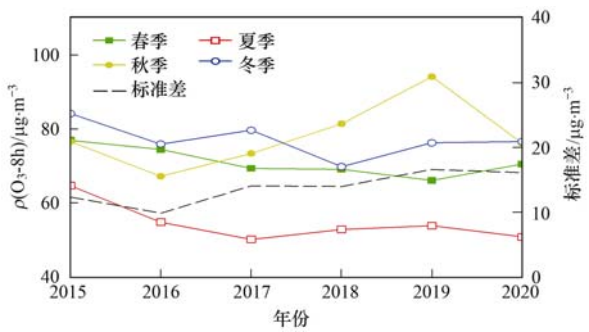


图 5 2015 ~ 2020 年海南省四季  $O_3-8h$  质量浓度与标准差的年际变化

Fig. 5 Annual variations in seasonal  $O_3-8h$  and standard deviation over Hainan Province during 2015-2020

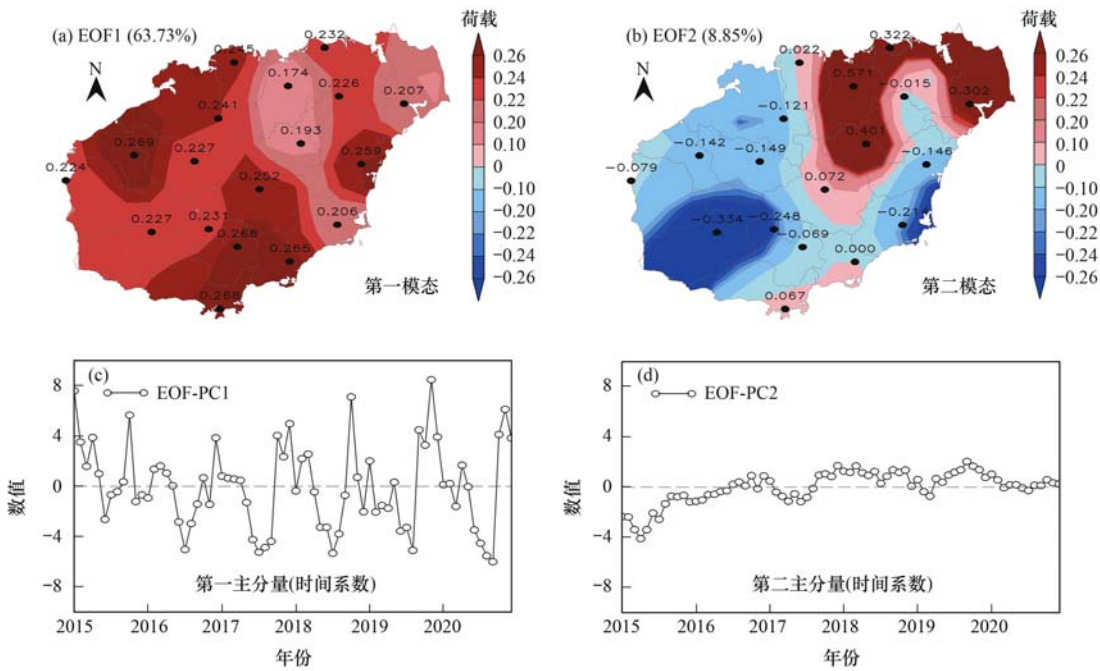


图6 2015~2020年海南省月平均O<sub>3</sub>-8h质量浓度EOF分解的前两个模态及其主分量  
Fig. 6 First two leading EOF models of monthly O<sub>3</sub>-8h from 2015 to 2020 and their time coefficients

余时段偏高。第二主成分具有明显的地区差异。

表2 海南省月平均O<sub>3</sub>-8h质量浓度前3个EOF特征向量方差贡献/%

| Table 2 Percentage contributions of the first three EOF eigenvectors to the variance of the monthly average O <sub>3</sub> -8h over Hainan Province/% |                |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------|
| 项目                                                                                                                                                    | 前3个EOF特征向量方差贡献 |       |       |
|                                                                                                                                                       | 1              | 2     | 3     |
| 个别方差                                                                                                                                                  | 63.73          | 8.85  | 5.55  |
| 累积方差                                                                                                                                                  | 63.73          | 72.58 | 78.13 |

2.4 O<sub>3</sub>-8h质量浓度与前体物的相关性

城市O<sub>3</sub>主要来源于氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs)在太阳紫外辐射下,经过一系列复杂的链式光化学反应生成<sup>[38]</sup>,O<sub>3</sub>作为一种二次污染物,其浓度变化很大程度上受前体物排放的影响。NO<sub>2</sub>作为O<sub>3</sub>最重要的前体物之一,其人为排放源主要包括汽车尾气、化石燃料、工业生产、火力发电和

金属铸造等<sup>[39]</sup>,海南省作为国内著名的旅游省份,工业排放和化石燃烧都较其他省份偏少,但是近年来随着国际旅游岛和海南自贸港建设步伐的加快,民用汽车保有量增长迅速,汽车尾气排放对NO<sub>2</sub>浓度上升贡献较大<sup>[32]</sup>。CO也是常见的一种大气污染物,其人为源包括汽车尾气、工业生产、冬季采暖和炉灶燃烧等。CO是·OH主要的汇,其浓度变化能影响大气中·OH,进而间接控制着其他大气污染物的反应<sup>[40]</sup>。此外CO也是光化学反应的中间产物,其浓度的上升预示着光化学反应速率的加快<sup>[38]</sup>,故而CO与O<sub>3</sub>存在密切关系。图7给出了ρ(O<sub>3</sub>-8h)与ρ(NO<sub>2</sub>)和ρ(CO)的散点图,从中可知,ρ(O<sub>3</sub>-8h)与ρ(NO<sub>2</sub>)和ρ(CO)存在明显的正相关关系,即ρ(NO<sub>2</sub>)和ρ(CO)偏高时,ρ(O<sub>3</sub>-8h)偏高;而ρ(NO<sub>2</sub>)和ρ(CO)偏低时,ρ(O<sub>3</sub>-8h)也偏低。ρ(O<sub>3</sub>-

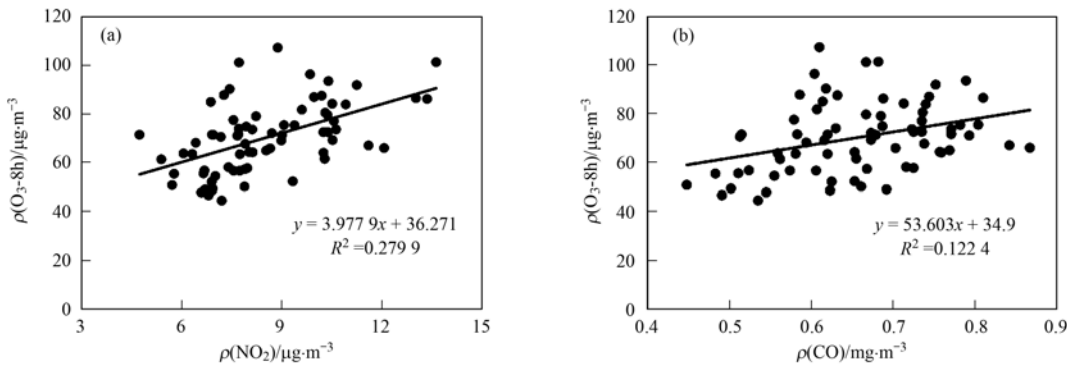


图7 2015~2020年月平均O<sub>3</sub>-8h质量浓度与主要前体物质量浓度的相关性

Fig. 7 Monthly correlation analysis of O<sub>3</sub>-8h with main precursor from 2015 to 2020

8h) 与  $\rho(\text{NO}_2)$  和  $\rho(\text{CO})$  的相关系数分别为 0.529 和 0.35 (表 3), 其中  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与  $\rho(\text{NO}_2)$  的相关系数通过了 99% 的信度检验, 而与  $\rho(\text{CO})$  的相关系数通过了 95% 的信度检验.

2.5  $\text{O}_3\text{-8h}$  质量浓度与气象因子的相关性

城市中  $\text{O}_3$  的大小, 除了与前体物的排放状况有关外, 还与气象条件决定的光化学反应、干湿沉降、传输和稀释等有关<sup>[41]</sup>. 当不利于污染物扩散的气

象条件出现时, 污染物在近地面逐渐积累, 浓度上升; 反之气象条件有利于污染物向外扩散, 则污染物浓度在近地面维持甚至下降. 为了更为直观地分析气象因子对  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的影响, 图 8 进一步给出了  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与 7 种气象因子的散点图. 降水的冲刷作用一直是大气污染物最为有效的清除机制之一, 从图 8(a) 可以看出,  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与降水量呈显著的负相关关系, 即降水量偏多时,  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  偏低; 降水

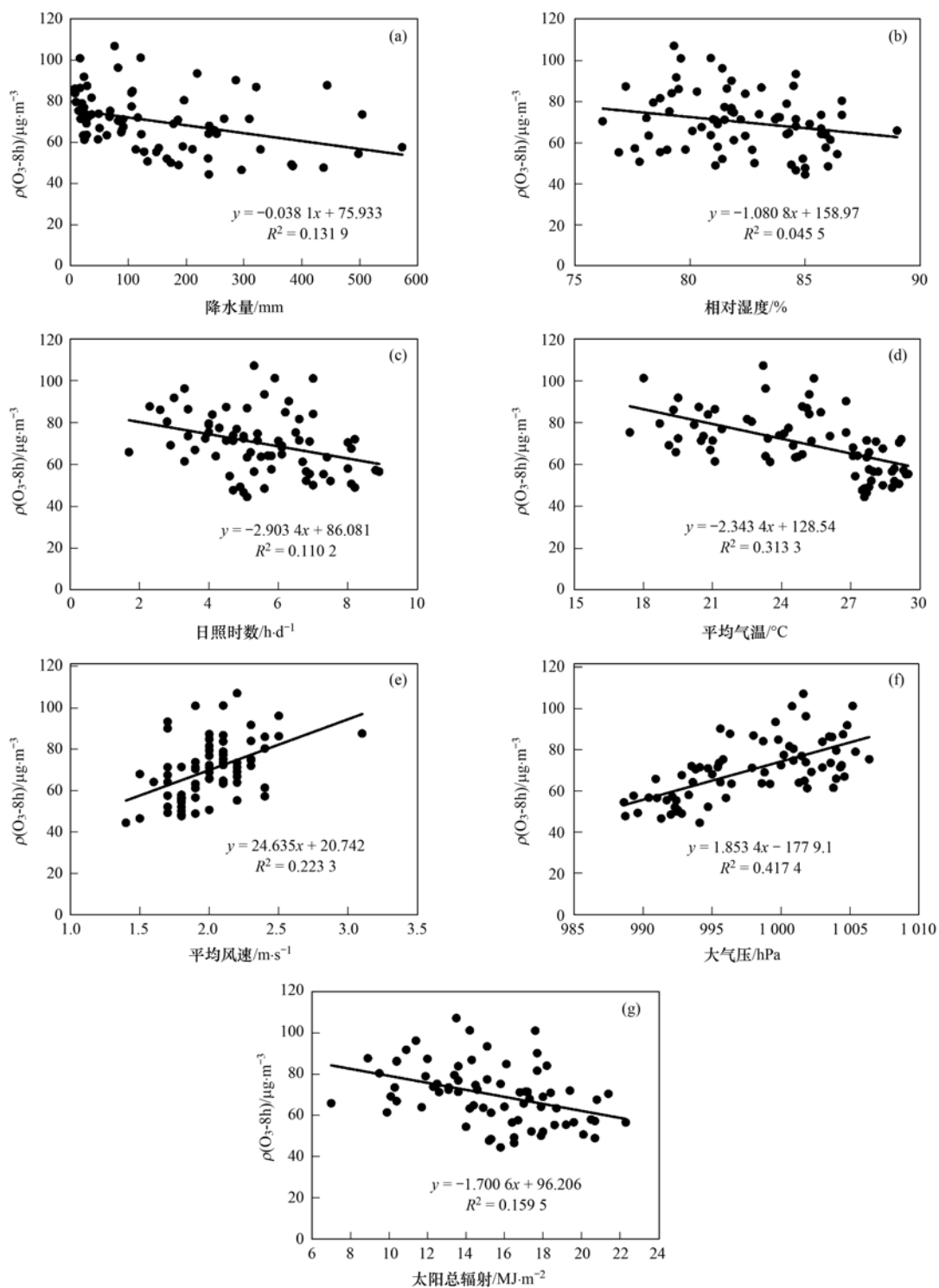


图 8 2015 ~ 2020 年月平均  $\text{O}_3\text{-8h}$  质量浓度与气象因子的相关性

Fig. 8 Monthly correlation analysis of  $\text{O}_3\text{-8h}$  with meteorological factors from 2015 to 2020

量偏少时,  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  偏高. 二者的相关系数为  $-0.363$ , 通过了 99% 的信度检验. 相对湿度的大小会对  $\text{O}_3$  的生成和消除产生影响. 相对湿度降低时, 一方面会减弱大气对太阳辐射的消光机制, 增加地面太阳辐射量, 促进光化学反应速率<sup>[42]</sup>; 另一方面不利于  $\text{O}_3$  干沉降作用的发生, 延长  $\text{O}_3$  停留在空气中的时间, 提升  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ <sup>[43]</sup>. 图 8(b) 表明海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与相对湿度呈负相关关系, 二者的相关系数为  $-0.213$ . 一般而言, 日照时数越长, 气温越高, 光化学反应越剧烈, 因而  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与日照时数和平均气温存在正相关关系<sup>[19,24,25]</sup>. 从图 8(c) 和 8(d) 可知, 海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与日照时数和平均气温的相关系数分别为  $-0.332$  和  $-0.56$ , 这种相反的变化特征表明海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  更多依赖于其他因素, 这与我国其他南方城市一致<sup>[10,38]</sup>. 平均风速对  $\text{O}_3$  的作用主要体现在传输和消散方面, 风速

偏大时, 有利于高污染排放区域污染物向外扩散, 同时影响着下游地带的污染物外源输送. 海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与平均风速呈较好的正相关关系, 相关系数为  $0.473$ , 通过了 99% 的信度检验, 表明外源输送在一定程度上影响着  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的变化<sup>[35]</sup>. 高压内部盛行下沉气流, 故而高压系统控制下的区域多为晴好天气, 不利于污染物的垂直输送扩散, 同时也对光化学反应提供必要条件. 海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与大气压相关系数高达  $0.646$  [图 8(f)], 通过了 99% 的信度检验. 太阳紫外辐射是影响光化学反应速率的主要因子之一, 图 8(g) 表明, 海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与太阳总辐射呈负相关关系, 相关系数为  $-0.399$ , 这可能与夏季  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  偏低有关<sup>[27]</sup>, 夏季尽管太阳辐射偏强, 气温偏高, 但是降水等其他气象要素导致  $\text{O}_3$  清除作用增大, 故而  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  并没有明显上升.

表 3 2015 ~ 2019 年月平均  $\text{O}_3\text{-8h}$  质量浓度与前体物和气象因子的相关系数<sup>1)</sup>

| 项目                     | 前体物           |             | 气象因子      |        |           |           |          |          |           |
|------------------------|---------------|-------------|-----------|--------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
|                        | $\text{NO}_2$ | $\text{CO}$ | 降水量       | 相对湿度   | 日照时数      | 平均气温      | 平均风速     | 大气压      | 总辐射       |
| $\text{O}_3\text{-8h}$ | 0.529 **      | 0.350 *     | -0.363 ** | -0.213 | -0.332 ** | -0.560 ** | 0.473 ** | 0.646 ** | -0.399 ** |

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

2.6 前体物和气象因子对  $\text{O}_3\text{-8h}$  质量浓度变化的影响

以上的分析表明, 前体物的排放和气象因子的作用都会对  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  变化产生重要影响. 一般而言, 大量的前体物排放, 以及高强度的太阳紫外辐射、高温、低湿、长日照时数、弱风速和有利的风向等气象条件能有效促进光化学反应速率, 致使  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  上升. 本小节利用海南省 18 个市县平均的前体物:  $\rho(\text{NO}_2)$  和  $\rho(\text{CO})$ , 以及气象因子: 降水量 ( $P$ )、气压 ( $p_r$ )、相对湿度 (RH)、10 m 平均风速 ( $W_{10}$ )、日照时数 (SD)、平均气温 ( $T$ ) 和太阳总辐射 ( $T_r$ ), 运用多元线性回归方法建立了关于  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的线性回归方程:

$$\rho(\text{O}_3\text{-8h}) = 1.90\rho(\text{NO}_2) + 16.67\rho(\text{CO}) +$$
$$0.09P + 4.56p_r - 3.76\text{RH} - 4.38W_{10} -$$
$$1.94\text{SD} + 2.78T - 0.21T_r - 4\,258.13 \quad (3)$$

图 9 给出了由公式(3)计算得到的前体物和气象因子对  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的多元线性回归逐月变化曲线. 作为对比, 图 9 同时给出了观测得到的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  实测值逐月变化曲线. 从中可以看出, 前体物和气象因子回归的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与观测得到的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  具有较好的一致性, 基本能反映出实测值  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的逐月变化. 进一步计算二者的相关系数为  $0.853$ , 通过

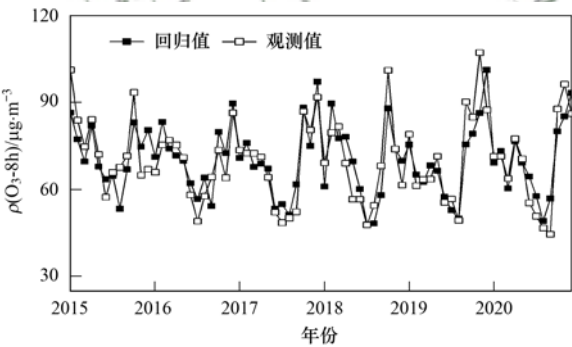


图 9 2015 ~ 2020 年  $\text{O}_3\text{-8h}$  质量浓度观测值的逐月变化与利用前体物和气象因子对  $\text{O}_3\text{-8h}$  质量浓度的多元线性回归曲线

Fig. 9 Monthly variations in observation curve and multiple linear regression curve of  $\text{O}_3\text{-8h}$  using precursors and meteorological factors from 2015 to 2020

了 99.9% 的信度检验. 回归值对实测值方差的解释达到了  $0.73$ , 即多元回归的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  逐月变化可以解释 73% 的观测得到的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的逐月变化.

为了对比分析前体物和气象因子对  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的相对重要性, 本研究分别利用前体物 ( $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ ) 和气象因子 ( $P$ 、 $p_r$ 、 $\text{RH}$ 、 $W_{10}$ 、 $\text{SD}$ 、 $T$  和  $T_r$ ), 建立了对应的线性回归方程. 结果表明, 只考虑前体物的回归  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与观测得到的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  相关系数为  $0.529$ , 解释的方差为  $0.28$ ; 而只考虑气象因子的回

归  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与观测得到的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  相关系数为 0.815, 解释的方差为 0.66, 并且它们都通过了 99% 的信度检验。由此可知, 气象因子的作用对海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的变化相比于前体物更为重要, 其原因可能是前体物中没有考虑可挥发性有机物 (VOCs) 所致。

### 3 结论

(1) 海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  呈北部和西部偏高, 中部、东部和南部偏低的分布特征。最高值出现在东方市, 为  $91.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2015~2020 年海南省共有 12 个市县  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  表现为下降的变化趋势, 主要分布在西部、中部和东部。共有 6 个市县表现为上升的变化趋势, 其中海口市、澄迈县和屯昌县的气候趋势系数通过了 95% 的信度检验。

(2) 季节变化特征分析表明, 海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  表现为秋季最高, 冬季和春季次之, 夏季最低。其中 2015~2020 年秋季  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  出现上升的变化趋势, 其气候倾向率和气候趋势系数分别为  $2.05 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$  和 0.507, 通过了 80% 的信度检验, 秋季  $\text{O}_3$  污染加重的现象值得关注。春季、夏季和冬季  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  2015~2020 年则表现为不同程度地下降趋势, 其中春季下降最快, 其气候趋势系数通过了 95% 的信度检验。

(3) 对海南省月平均  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的距平场进行 EOF 分析得到前两个特征向量场的累积方差为 72.58%, 能够较好地描述  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的主要分布特征。第一模态在空间上为正值, 第一主分量呈显著的季节性振荡, 体现了海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  变化的一致性。第二模态在不同区域表现不同, 表明了  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  变化的地区性差异。

(4) 海南省  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的变化与前体物和气象因子有较好的相关关系。  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与前体物呈正相关关系, 相关系数分别为 0.529 [ $\rho(\text{NO}_2)$ ] 和 0.35 [ $\rho(\text{CO})$ ], 均通过了 95% 的信度检验。  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与降水量、相对湿度、日照时数、平均气温和总辐射呈负相关关系, 与平均风速和大气压呈正相关关系。其中与降水量、日照时数、平均气温、平均风速、大气压和总辐射的相关系数通过了 99% 的信度检验。

(5) 对 2015~2020 年  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  逐月演变的多元线性回归结果表明, 同时考虑前体物和气象因子回归的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  与观测得到的  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  有较好的一致性, 基本能反映出实测值  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的逐月变化。二者的相关系数为 0.853, 通过了 99.9% 的信度检验。回归值对实测值方差的解释达到了 0.72。  $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$  的逐月变化有 0.66 的方差可以由气象因

子解释, 而前体物的解释方差只为 0.28, 其原因可能与前体物中没有考虑可挥发性有机物 (VOCs) 有关。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227\\_1814154.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html), 2021-02-28.
- [2] 王玮, 汤大纲, 刘红杰, 等. 中国  $\text{PM}_{2.5}$  污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 1-5.  
Wang W, Tang D G, Liu H J, et al. Research on current pollution status and pollution characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(1): 1-5.
- [3] Wang Y Q, Zhang X Y, Sun J Y, et al. Spatial and temporal variations of the concentrations of  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_1$  in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(23): 13585-13598.
- [4] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 中国臭氧浓度的时空变化特征及分区 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4003-4012.  
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, et al. Spatial and seasonal variation and regionalization of ozone concentrations in China [J]. China Environmental Science, 2017, 37(11): 4003-4012.
- [5] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异 [J]. 科学通报, 2015, 60(12): 1132-1143.  
Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al. “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze China [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(12): 1132-1143.
- [6] 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  $\text{O}_3$  in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5): 1530-1541.
- [7] Liu H, Liu S, Xue B R, et al. Ground-level ozone pollution and its health impacts in China [J]. Atmospheric Environment, 2018, 173: 223-230.
- [8] Croze M L, Zimmer L. Ozone atmospheric pollution and Alzheimer's disease: from epidemiological facts to molecular mechanisms [J]. Journal of Alzheimer's Disease, 2018, 62(2): 503-522.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Fuhrer J. Ozone risk for crops and pastures in present and future

- climates[J]. *Naturwissenschaften*, 2009, **96**(2): 173-194.
- [13] 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.
- [14] Junge C E. Global ozone budget and exchange between stratosphere and troposphere[J]. *Tellus*, 1962, **14**(4): 363-377.
- [15] Pandis S N, Seinfeld J H. Sensitivity analysis of a chemical mechanism for aqueous-phase atmospheric chemistry[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1989, **94**(D1): 1105-1126.
- [16] 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.  
Li X Y, Li S J, Liu P F, *et al.* Spatial and temporal variations of ozone concentrations in China in 2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1263-1274.
- [17] 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.  
Yang H, Zhu B, Gao J H, *et al.* Source apportionment of VOCs in the northern suburb of Nanjing in summer[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- [18] 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.
- [19] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.  
Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [20] 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.  
Liu F, Xu Y S. Review of surface ozone modeling system[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 1-16.
- [21] 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.
- [22] 刘小正, 楼晟荣, 陈勇航, 等. 基于 OMI 数据的中国中东部城市近地面臭氧时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2811-2818.  
Liu X Z, Lou S R, Chen Y H, *et al.* Spatiotemporal distribution of ground-level ozone in mid-east China based on OMI observations[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2811-2818.
- [23] 李全喜, 王金艳, 刘筱冉, 等. 兰州市区臭氧时空分布特征及气象和环境因子对臭氧的影响[J]. *环境保护科学*, 2018, **44**(2): 78-84, 97.  
Li Q X, Wang J Y, Liu X R, *et al.* Temporal and spatial distribution of ozone and effects of meteorological and environmental factors on ozone in the urban areas of Lanzhou City [J]. *Environmental Protection Science*, 2018, **44**(2): 78-84, 97.
- [24] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2689-2698.  
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, *et al.* Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- [25] 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.
- [26] 海南省生态环境厅. 2020 年海南省生态环境状况公报[EB/OL]. [http://hnsthb.hainan.gov.cn/xgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202106/t20210607\\_2990105.html](http://hnsthb.hainan.gov.cn/xgk/0200/0202/hjzl/hjzkgb/202106/t20210607_2990105.html), 2021-06-07.
- [27] 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.  
Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Spatiotemporal distribution of ozone in cities of Hainan from 2015 to 2018[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(10): 2823-2832.
- [28] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 2014-2016 年海口市空气质量概况及预报效果检验[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 270-278.  
Fu C B, Tang J X, Dan L, *et al.* Verification of air quality forecasted by CUACE model in Haikou City during 2014 to 2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 270-278.
- [29] 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.
- [30] 符传博, 丹利, 冯锦明, 等. 1960~2012 年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系[J]. *大气科学*, 2019, **43**(1): 87-98.  
Fu C B, Dan L, Feng J M, *et al.* Temporal and spatial variations of total cloud amount and their possible relationships with temperature and water vapor over China during 1960 to 2012[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, **43**(1): 87-98.
- [31] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [32] 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 Trop NO<sub>2</sub> over Hainan Island and its possible reason[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1402-1410.
- [33] 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.  
Kuang Y Q, Zou Z, Zhang X Y, *et al.* Spatial-temporal responses of atmospheric pollutants to the COVID-19 lockdown across the Yangtze River Delta region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1165-1172.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] North G R, Bell T L, Cahalan R F, *et al.* Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, **110**(7): 699-706.
- [37] 周国华, 罗小莉, 王盘兴, 等. 中国冬季气温异常 EOF 分析的改进[J]. *大气科学学报*, 2012, **35**(3): 295-303.  
Zhou G H, Luo X L, Wang P X, *et al.* Improvements of

- empirical orthogonal function analysis for winter temperature anomaly over China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2012, **35**(3): 295-303.
- [38] 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.
- [39] 王明星. 大气化学[M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 1999.
- [40] 杨继东, 刘佳泓, 杨光辉, 等. 天津市环境空气中一氧化碳污染特征及变化趋势研究[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(6): 89-90, 104.
- Yang J D, Liu J H, Yang G H, *et al.* Analysis on pollution characteristics and variation trend of CO in Tianjin [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, **37**(6): 89-90, 104.
- [41] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 前体物与气象因子对海南省臭氧污染的影响[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(7): 45-50.
- Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Hainan Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(7): 45-50.
- [42] 刘晶淼, 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.
- Liu J M, Ding Y G, Huang Y D, *et al.* Correlation analyses between intensity of solar ultraviolet radiation and meteorological elements[J]. *Plateau Meteorology*, 2003, **22**(1): 45-50.
- [43] Kavassalis S C, Murphy J G. Understanding ozone-meteorology correlations: a role for dry deposition[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(6): 2922-2931.

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2021 年 12 月 27 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议发布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 20 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China .....                                                             | LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> ( 577 )            |
| Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability .....                                                                                                                        | ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo ( 586 )                          |
| Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou .....                                                           | HUANG Wen, WANG Sheng-li ( 597 )                                       |
| PM <sub>2.5</sub> Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models .....                                                                                                              | WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> ( 608 )             |
| Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM <sub>2.5</sub> During Summer in Central China .....                                                                  | SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> ( 619 )                |
| Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City .....                                                                         | CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> ( 629 )                    |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province .....                                                                    | LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> ( 639 )     |
| Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019 .....                                                                                                | PAN Chen, KANG Zhi-ming ( 649 )                                        |
| Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model .....                                                                      | GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> ( 663 )           |
| Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020 .....                                                                                                | FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> ( 675 )               |
| Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O <sub>3</sub> Pollution Event in Ji'nan .....                                                                                              | SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> ( 686 )          |
| Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong .....                                                                    | YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> ( 696 )                 |
| Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass .....                                                     | ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> ( 707 )                |
| Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer .....                                                                             | YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> ( 714 )           |
| Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China .....                                                                                                      | ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> ( 723 )              |
| Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts .....                                                                                                                  | ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> ( 735 )             |
| Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 .....                                                                                   | TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao ( 743 )                        |
| Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China .....                                            | XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun ( 752 )                                 |
| Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake .....                                                                       | XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> ( 762 )        |
| Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events .....                                                                | ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 770 )             |
| Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen .....                                                    | BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> ( 782 )             |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City .....                                                                               | PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 795 )              |
| Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River .....                                                                           | GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> ( 803 )           |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example ..... | CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> ( 813 )     |
| Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai .....                                                                                         | YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> ( 826 )         |
| Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang .....                                                        | GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> ( 837 )         |
| Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake .....                                                                                                            | LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> ( 847 )          |
| Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake .....                                                                                       | LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> ( 859 )  |
| Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation .....                                                     | WANG Zi-qiao, LI Xu-yong ( 867 )                                       |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic .....                                                                  | ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> ( 878 )           |
| Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration .....                                             | QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> ( 887 )                   |
| Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar .....                                                                                           | CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> ( 896 )                      |
| Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water .....                                                                                       | ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> ( 907 )           |
| Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge .....                                                         | HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> ( 920 )            |
| Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance .....                                                                                       | FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> ( 928 )            |
| Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan .....                                                                                                   | LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> ( 936 )              |
| Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain .....                                                   | ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song ( 946 )                           |
| Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example .....                                        | JU Tie-nan, LEI Mei ( 957 )                                            |
| Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China .....                                                             | MU De-miao, SUN Yue-bing ( 965 )                                       |
| Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area .....                                                        | HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> ( 975 )    |
| Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas .....                                            | ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> ( 985 )          |
| Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years .....                                                                           | REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> ( 995 )         |
| Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth .....                                                                                                   | CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> ( 1004 )                |
| Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments .....                                                         | WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> ( 1015 )           |
| Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation .....                                                              | CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> ( 1023 )          |
| Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat .....                                                              | LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> ( 1031 )       |
| Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers .....                             | YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> ( 1040 )              |
| Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i> .....                          | LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> ( 1050 )      |
| Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas .....                                                            | JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> ( 1059 )            |
| Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils .....                                                                                                 | DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> ( 1069 ) |
| Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil .....                                                                         | HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> ( 1077 )             |
| Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine .....                                                                                            | HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> ( 1089 )                    |
| Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province .....                                                                                               | WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> ( 1097 )                |
| Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta .....                                           | XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> ( 1108 )          |