

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

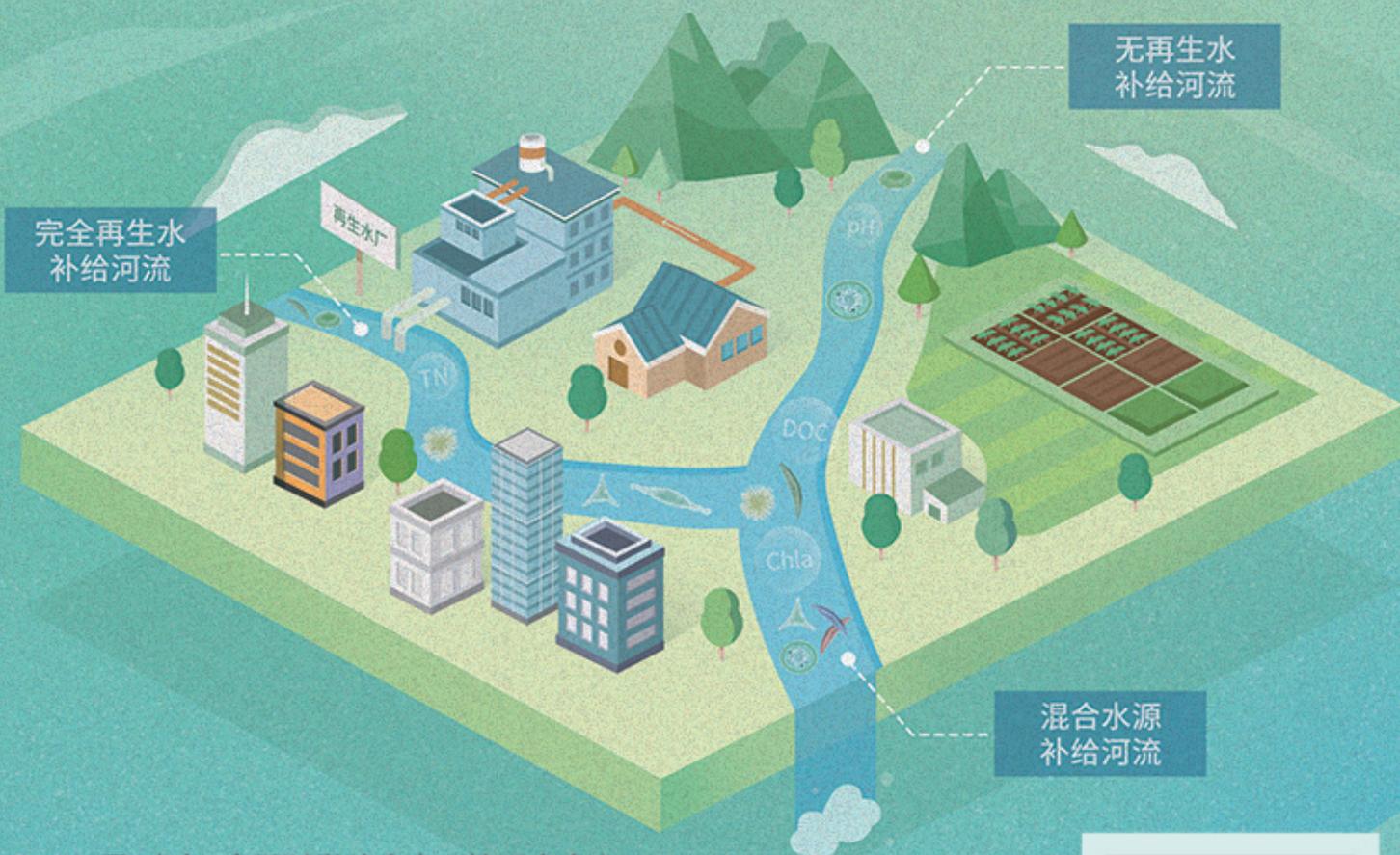
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素 ..... 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 ..... 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度时空分布特征及影响因素分析 ..... 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成及来源解析 ..... 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征与健康风险评估 ..... 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 ..... 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 ..... 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 ..... 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 ..... 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 ..... 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 ..... 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 ..... 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 ..... 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 ..... 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 ..... 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 ..... 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 ..... 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 ..... 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 ..... 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 ..... 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 ..... 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 ..... 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 ..... 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 ..... 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 ..... 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 ..... 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 ..... 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) ..... 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 的去除 ..... 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 ..... 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 ..... 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 ..... 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 ..... 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 ..... 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 ..... 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 ..... 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 ..... 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 ..... 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 ..... 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 ..... 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 ..... 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 ..... 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 ..... 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 ..... 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 ..... 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 ..... 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 ..... 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 ..... 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 ..... (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)

# 海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征

谢文晶<sup>1</sup>, 邢巧<sup>1\*</sup>, 谢东海<sup>2</sup>, 吴晓晨<sup>1</sup>, 胡珊珊<sup>1</sup>, 徐文帅<sup>1\*</sup>

(1. 海南省环境科学研究院, 海口 571126; 2. 海南省生态环境监测中心, 海口 571126)

**摘要:** 基于2019年五指山背景点、海口市和三亚市的环境空气自动监测数据和气象观测资料, 分析了海南省背景区域和重点城市 O<sub>3</sub> 及其前体物 NO<sub>2</sub> 污染特征; 结合挥发性有机物(VOCs)在线监测数据, 分析了五指山背景点 VOCs 的时间变化规律、O<sub>3</sub> 浓度高值月份 O<sub>3</sub> 及其前体物 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 的污染特征以及 VOCs 的臭氧生成潜势(OFP). 结果表明, O<sub>3</sub> 是影响五指山背景点空气质量的关键污染物, 五指山背景点 O<sub>3</sub> 日最大 8 h 浓度平均值与海口市和三亚市显著相关. 背景点 NO<sub>2</sub> 月均浓度水平显著低于城市点, 然而背景点和城市点 O<sub>3</sub> 月均浓度水平和变化趋势高度一致. 背景点 O<sub>3</sub> 变化与风向密切相关, 春夏季偏南风频率较高, O<sub>3</sub> 浓度相对较低; 秋冬季以东北风为主, 易受内陆污染输送影响, O<sub>3</sub> 浓度较高. 五指山背景点春夏季 VOCs 体积分数低于秋冬季, 但对应的 OFP 高于秋冬季; 其中异戊二烯夏季体积分数显著高于秋冬季, 且其夏季体积分数占总挥发性有机物的比例最高, 对应的 OFP 贡献率可达 70% 以上, O<sub>3</sub> 则表现出秋冬季显著高于夏季的特征. 11 月 O<sub>3</sub> 高浓度时段乙炔和芳香烃的体积分数较清洁日出现较大上升, 同时其对应的 OFP 显著上升. VOCs 优势物种和 OFP 主要贡献物种的分析结果表明, O<sub>3</sub> 高浓度时段机动车尾气和油气挥发排放源对五指山背景点 VOCs 的化学组成和 OFP 有重要贡献.

**关键词:** 五指山; 背景点; 臭氧(O<sub>3</sub>); 污染特征; 挥发性有机物(VOCs); 臭氧生成潜势(OFP)

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5407-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201027

## Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province

XIE Wen-jing<sup>1</sup>, XING Qiao<sup>1\*</sup>, XIE Dong-hai<sup>2</sup>, WU Xiao-chen<sup>1</sup>, HU Shan-hu<sup>1</sup>, XU Wen-shuai<sup>1\*</sup>

(1. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 571126, China; 2. Hainan Ecological Environmental Monitoring Centre, Haikou 571126, China)

**Abstract:** Based on ozone and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) automatic monitoring data and meteorological observation data of the Wuzhishan background site, Haikou, and Sanya in 2019, the pollution characteristics of ozone and its precursor NO<sub>2</sub> in the background region and key cities of Hainan Province were analyzed. Combined with volatile organic compounds (VOCs) online monitoring data, the time variation of VOCs, pollution characteristics of ozone and its precursors (VOCs and NO<sub>x</sub>) during the month of high ozone concentrations, and the ozone formation potential (OFP) of VOCs at the Wuzhishan background site were investigated. The results showed that ozone was a key pollutant affecting the air quality of the Wuzhishan background site. The ozone daily maximum 8-hour average concentrations at the Wuzhishan background site were significantly correlated with Haikou and Sanya. The monthly average NO<sub>2</sub> concentrations at the background site were noticeably lower than those at the urban sites; however, the monthly average concentrations and change trends of ozone at the background site were highly consistent with those at the urban sites. Ozone concentration changes at the background site were closely related to the wind direction. The frequency of southerly winds was higher in spring and summer, and the concentration of ozone was relatively low. As the dominant wind direction changed to northeast in autumn and winter, the ozone concentration was relatively high due to the inland pollution transportation. The volume fractions of total volatile organic compounds at the Wuzhishan background site in spring and summer were lower than those in autumn and winter; however, the corresponding OFP saw an opposite tendency. The volume fraction of isoprene in summer was significantly higher than those in autumn and winter, and its volume fraction in summer accounted for the highest proportion of total volatile organic compounds, with the corresponding OFP concentration rate reaching over 70%, whereas ozone concentration showed the opposite trend. The volume fractions of acetylene and aromatic hydrocarbons during the periods of high ozone concentrations in November showed a major increase compared with those during the clean periods, and the corresponding OFP increased markedly. The analysis of the dominant species of VOCs and the main contributing species of OFP indicated that the emission sources of motor vehicle and gasoline or gas volatilization had a significant effect on the chemical composition and OFP of VOCs at the Wuzhishan background site during ozone high concentration periods.

**Key words:** Wuzhishan; background site; ozone(O<sub>3</sub>); pollution characteristics; volatile organic compounds(VOCs); ozone formation potential (OFP)

近年来,臭氧(O<sub>3</sub>)污染成为影响我国空气质量的关键问题,我国城市大气 O<sub>3</sub> 浓度总体上升<sup>[1]</sup>. 对流层 O<sub>3</sub> 是地表大气光化学烟雾和温室气体的组成成分之一,是大气中的强氧化剂,可与其它化合物发生反应,生成有毒空气污染物<sup>[2,3]</sup>. 对流层 O<sub>3</sub> 主要取决于其前体物(氮氧化物和挥发性有机物等)浓度和紫外辐射强度<sup>[4,5]</sup>. 氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)的协同控制,是控制 O<sub>3</sub> 污染的关键<sup>[6,7]</sup>.

海南省位于我国最南端,地处热带地区,常年太

阳辐射强烈,有利于光化学反应发生,大气污染特征及气象条件与内地有明显区别,且近年也受到了 O<sub>3</sub> 污染问题的影响,对海南省背景区域 O<sub>3</sub> 及其前体物污染特征的分析有助于了解我国热带海岛背

收稿日期: 2022-01-04; 修订日期: 2022-04-11

基金项目: 海南省重大科技计划项目(ZDKJ202007); 海南省财政专项项目(ZC2018-196); 海南省环境科学研究院青年创新基金项目(QNCX2021011)

作者简介: 谢文晶(1990~),女,硕士,工程师,主要研究方向为大气污染特征、来源解析与形成机制, E-mail: xiewenjing1990@126.com

\* 通信作者, E-mail: xingqiaoh@126.com; xuwenshuai@hotmail.com

景区域  $O_3$  及其前体物变化规律和传输机制. 大气背景监测点的环境空气质量监测数据代表一个区域尺度的空气质量, 这个区域尺度的大气成分包括天然源排放和从区域外传输的天然源和人为源排放<sup>[8]</sup>, 可了解和评估该区域的本底状况、受污染情况和污染来源情况. 基于中国大气背景点, 众多学者对大气污染物开展了观测和研究, 如青海全球本底站瓦里关<sup>[9-12]</sup>、青海门源<sup>[13,14]</sup>、新疆阿克达拉<sup>[9,15,16]</sup>、福建武夷山<sup>[8,17-19]</sup>、北京上甸子<sup>[9,11,12,20-29]</sup>、浙江临安<sup>[9,11,12,28-32]</sup>、湖北金沙<sup>[11,30,33]</sup>、黑龙江龙凤山<sup>[9,11,30]</sup>、山西庞泉沟<sup>[13,19]</sup>、湖北神农架<sup>[13,19]</sup>、山东长岛<sup>[13,19]</sup>、广东南岭<sup>[13,34,35]</sup>、湖南衡山<sup>[13,36]</sup>和四川海螺沟<sup>[13,37]</sup>等. 目前仍缺乏针对我国热带海岛背景区域  $O_3$  及其前体物污染特征研究的相关报道. 海南五指山大气背景点位于海南岛的中部偏南山区, 通过五指山背景点  $O_3$  及其前体物的特征分析, 有助于分析我国南部区域间  $O_3$  及其前体物传输状况, 计算远距离输送和局地污染源贡献对城市空气质量的影响, 为城市地区  $O_3$  及其前体物污染防控和来源分析等提供对比和参考. 针对五指山背景点, 学者们主要研究其黑碳浓度水平<sup>[13]</sup>、大气气态总汞含量变化特征及其与气象要素的关系<sup>[38-40]</sup>和  $PM_{2.5}$  中多环芳烃的污染特征<sup>[41]</sup>等, 还缺乏对该背景点  $O_3$  及其前体物的研究. 本文对五指山背景点和海南省重点城市(海口市和三亚市)2019年  $O_3$  及其前体物  $NO_2$  监测数据进行分析, 得出不同时间尺度的浓度变化特征, 以及与气象因子的关系, 同时结合 VOCs 在线监测数据, 分析了五指山背景点 VOCs 时间变化规律及其臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP),  $O_3$  高值月份  $O_3$  及其前体物 VOCs 和  $NO_x$  污染特征, 以期深入了解海南省  $O_3$  及其前体物 VOCs 和  $NO_x$  背景变化规律和传输机制提供帮助.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点和监测数据

五指山大气背景监测点位于海南岛中部偏南、五指山市北部的阿陀岭(图1), 点位海拔高度约 1 000 m, 属热带季风气候, 周边人口密度低, 自然生态环境优越, 森林覆盖率达 90% 左右, 主要类型为热带雨林、热带季雨林和常绿阔叶林等, 远离城市和人为污染源. 目前, 五指山大气背景监测点采用美国热电公司 43i、42i、48i 和 49i 系列高精度痕量级环境空气自动监测分析仪, 实时在线监测环境空气中二氧化硫 ( $SO_2$ )、 $NO_2$ 、一氧化碳 (CO) 和  $O_3$  浓度; 采用美国安谱公司 TEOM 1405 振荡天平分析仪, 配合不同粒径的颗粒物切割头, 实时在线监测

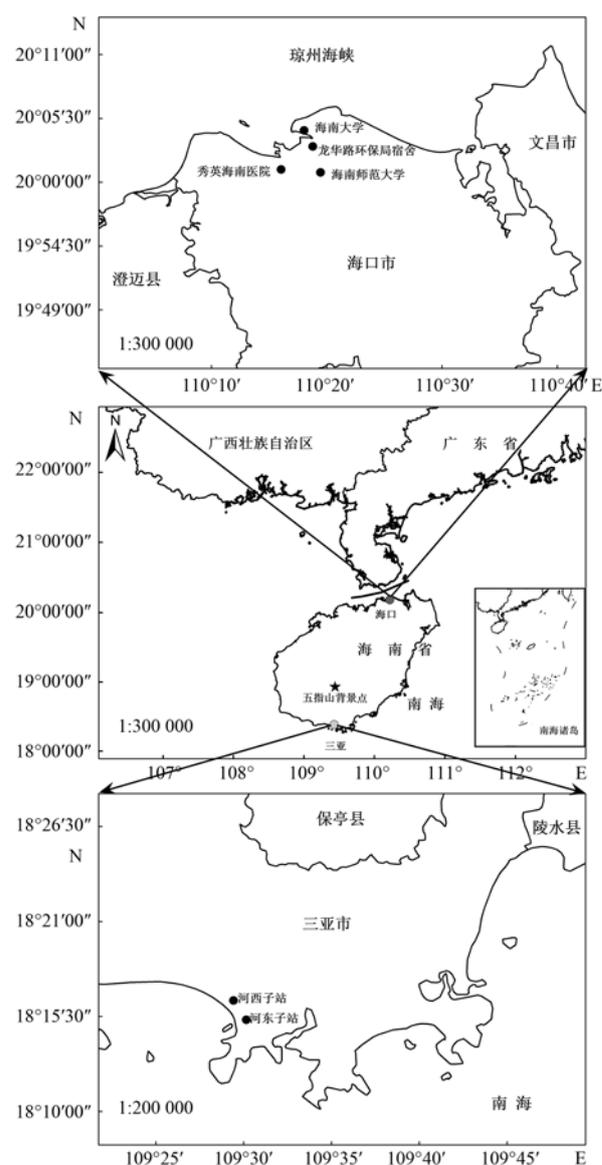


图1 五指山背景点、海口市和三亚市城市环境空气质量监测点地理位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of location of the Wuzhishan background site and the urban air quality monitoring stations in Haikou and Sanya

可吸入颗粒物 ( $PM_{10}$ ) 和细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 浓度. VOCs 在线监测设备临时布设在五指山大气背景监测点站房旁边, 用于开展研究性观测, 监测时间为 2019 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日. 采用荷兰 Syntech Spectras 有限公司生产的 GC-955 系列 611/811 VOCs 在线分析仪监测. VOCs 中的低沸点 (C2 ~ C5) 物种采用 GC955-811 低碳分析仪监测, 高沸点 (C6 ~ C12) 物种采用 GC955-611 高碳分析仪监测. 该研究仪器可检出 57 种 VOCs, 将 57 种 VOCs 的总体积分数定义为总挥发性有机物 (total volatile organic compounds, TVOCs) 体积分数. 气象参数采用德国 LUFFT 公司的 WS500-UMB 气象分析仪测定.

三亚市 2 个国控城市环境空气质量监测点位分别为河东子站和河西子站(图 1), SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、CO、PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>自动监测分别采用美国热电公司 43i、42i、49i、48i、5014i 和 5030i 型仪器, 河东子站和河西子站污染物浓度平均值表示三亚市污染物浓度. 气象资料为三亚市观象台每小时风向、风速、温度和相对湿度等观测数据.

海口市 4 个国控城市环境空气质量监测点位分别为海南大学、海南师范大学、秀英海南医院和龙华路环保局宿舍(图 1), O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>和 NO<sub>2</sub>自动监测采用瑞典 OPSIS 公司的长光程仪器, PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和 CO 分别采用美国热电公司点式 5030、FH62C14 和 48i 型监测仪器. 4 个国控点位的污染物浓度平均值表示海口市污染物浓度. 气象资料为海口市观象台每小时风向、风速、温度和相对湿度等观测数据.

1.2 OFP 的计算方法

为了量化各 VOCs 物种对 O<sub>3</sub> 生成的影响, 采用最大增量反应活性法 (maximum incremental reactivity, MIR) 计算 VOCs 的 OFP, 分析不同 VOCs 的反应活性. OFP 的计算公式见式(1):

$$OFP_i = MIR_i \times [VOC]_i \quad (1)$$

式中, OFP<sub>i</sub> 为第 i 种 VOCs 组分的臭氧生成潜势 (10<sup>-9</sup>); MIR<sub>i</sub> 为第 i 种 VOCs 组分生成 O<sub>3</sub> 的最大增量反应活性系数, 数值见文献[42]; [VOC]<sub>i</sub> 为第 i 种 VOCs 组分的体积分数(10<sup>-9</sup>).

2 结果与讨论

2.1 污染物总体情况

根据《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 633-2012), 2019 年五指山背景点空气质量总体优良, 其中优级天数比例为 77.6%, 良级天数

比例为 14.8%, 轻度污染比例为 6.9%, 中度污染比例为 0.7%, 无重度污染和严重污染. 污染天发生在 9~12 月, 造成空气污染的污染物均为 O<sub>3</sub>, 污染天数为 23 d, 其中轻度污染 21 d, 中度污染 2 d. ρ(SO<sub>2</sub>)、ρ(NO<sub>2</sub>)、ρ(PM<sub>10</sub>) 和 ρ(PM<sub>2.5</sub>) 年均值分别为 0.5、2、14 和 10 μg·m<sup>-3</sup>. O<sub>3</sub> 日最大 8 h 滑动平均值第 90 百分位数为 149 μg·m<sup>-3</sup>, ρ(CO) 第 95 百分位数为 0.5 mg·m<sup>-3</sup>. 五指山背景点 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 CO 浓度远优于海口市和三亚市, 且呈现背景点 < 三亚市 < 海口市的特征, 但五指山背景点的 O<sub>3</sub> 日最大 8 h 平均值第 90 百分位数要高于海口市和三亚市(图 2). 由以上分析可知, O<sub>3</sub> 是影响五指山背景点空气质量的关键污染物. 从表 1 可以看出, 除了五指山背景点和海口市的 NO<sub>2</sub> 日均值相关性不显著, 背景点和两个城市点其余常规污染物间的相关性显著, 其中 O<sub>3</sub>-8 h 的相关系数均达到 0.8 以上, PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 日均值均达到 0.7 以上.

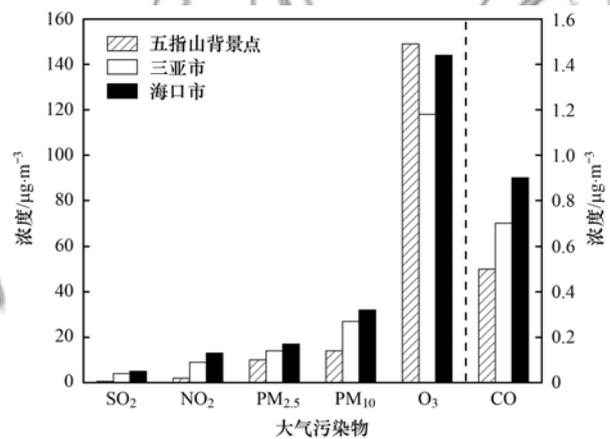


图 2 2019 年五指山背景点、三亚市和海口市常规大气污染物浓度比较

Fig. 2 Conventional air pollutant concentrations at the Wuzhishan background site, Sanya, and Haikou in 2019

表 1 2019 年五指山背景点、海口市和三亚市常规大气污染物浓度的相关系数<sup>1)</sup>

Table 1 Correlation coefficients of conventional air pollution concentrations at the Wuzhishan background site, Sanya, and Haikou in 2019

O <sub>3</sub> -8 h	背景点			海口市			三亚市				
	背景点	海口市	三亚市	背景点	海口市	三亚市	背景点	海口市	三亚市		
背景点	1	0.826 **	0.844 **	背景点	1	0.708 **	0.901 **	背景点	1	0.709 **	0.858 **
海口市		1	0.820 **	海口市		1	0.788 **	海口市		1	0.756 **
三亚市			1	三亚市			1	三亚市			1

NO <sub>2</sub> 24 h 平均	背景点			海口市			三亚市				
	背景点	海口市	三亚市	背景点	海口市	三亚市	背景点	海口市	三亚市		
背景点	1	0.047	0.483 **	背景点	1	0.530 **	0.522 **	背景点	1	0.660 **	0.631 **
海口市		1	0.337 **	海口市		1	0.430 **	海口市		1	0.684 **
三亚市			1	三亚市			1	三亚市			1

1) \*\* 表示在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著

五指山背景点大气 φ (VOCs) 年均值为 3.3 × 10<sup>-9</sup>, VOCs 优势物种年均体积分数如表 2 所示, 将所测的 57 种 VOCs 组分按体积分数从高到低排序,

前 12 位的优势物种分别为乙烷、异戊二烯、乙烯、丙烷、乙炔、甲基环戊烷、正丁烷、2-甲基戊烷、异丁烷、甲苯、苯和异戊烷, 其体积分数之和占

TVOCs 的 91.0%。

表 2 汇总了五指山背景点 VOCs 优势物种与其它有代表意义点位的体积分数,通过比较,可更清晰地了解五指山背景点大气 VOCs 的浓度水平,其中山西庞泉沟和山东长岛代表京津冀周边区域背景值,湖北神农架和福建武夷山分别代表华中和华东地区背景值,深圳杨梅坑代表珠江三角洲沿海区域背景值.异戊二烯为植物排放的特征因子,当叶面温度 $\leq 35^{\circ}\text{C}$ 时,植物释放的异戊二烯与叶面温度正相关<sup>[35]</sup>.五指

山背景点夏季异戊二烯的体积分数要高于庞泉沟、神农架、武夷山和长岛,这可能与五指山背景点森林覆盖率高和夏季气温较高有关.除了异戊二烯体积分数较高外,五指山背景点的乙烷年均体积分数略高于杨梅坑,甲基环戊烷夏季体积分数高于武夷山和长岛,但低于庞泉沟和神农架,其余 VOCs 物种体积分数整体低于其它背景点,表明海南省背景地区相较于京津冀周边、华中、华东和珠江三角洲的背景条件更清洁,但同时也受到了一定程度的污染.

表 2 五指山背景点 VOCs 优势物种体积分数与其它背景点对比<sup>1)</sup>  $\times 10^{-9}$

Table 2 Comparison of major VOCs levels at the Wuzhishan background site with other background sites  $\times 10^{-9}$

物种	五指山(年均)					庞泉沟 <sup>[19]</sup> (夏)	神农架 <sup>[19]</sup> (夏)	武夷山 <sup>[19]</sup> (夏)	长岛 <sup>[19]</sup> (夏)	杨梅坑 <sup>[43]</sup> (年均)
	春	夏	秋	冬	全年					
乙烯	0.37	0.17	0.22	0.72	0.37	0.70	0.28	0.25	0.35	1.93
乙烷	1.05	0.50	1.02	1.65	1.06	1.83	0.80	0.60	1.04	0.99
丙烷	0.16	0.04	0.41	0.67	0.32	1.84	0.36	0.58	1.69	—
乙炔	0.04	0.00	0.29	0.36	0.17	0.48	0.21	0.20	0.41	1.95
正丁烷	0.05	0.03	0.15	0.20	0.11	1.09	0.49	0.30	1.16	0.60
异丁烷	0.04	0.06	0.08	0.12	0.07	1.52	0.58	0.44	0.71	—
异戊烷	0.02	0.02	0.07	0.07	0.05	2.11	0.66	1.57	1.82	0.91
甲苯	0.04	0.02	0.10	0.12	0.07	1.31	0.25	0.39	0.58	0.36
苯	0.05	0.03	0.08	0.11	0.07	0.97	0.14	0.12	0.40	—
异戊二烯	0.66	0.79	0.38	0.13	0.49	0.65	0.09	0.66	0.44	0.11
甲基环戊烷	0.33	0.07	0.01	0.13	0.13	1.11	0.21	0.02	0.04	—
2-甲基戊烷	0.10	0.08	0.10	0.07	0.09	0.87	0.23	0.08	0.12	—

1)五指山背景点研究时间:2019年1~12月,数据来源于本研究(春:3~5月,夏:6~8月,秋:9~11月,冬:1~2月和12月);庞泉沟、神农架、武夷山和长岛背景点研究时间:2019年7~8月;杨梅坑背景点研究时间:2019年8月至2020年7月

## 2.2 时间变化特征

### 2.2.1 臭氧及其前体物月变化特征

五指山背景点的  $\text{O}_3$  月均浓度与海口市和三亚市的变化趋势及浓度水平高度一致,  $\text{O}_3$  高值均出现在 9~12 月[图 3(a)]; 背景点 6~8 月  $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$  维持在  $60\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右.海口市和三亚市的  $\rho(\text{NO}_2)$  各月份变化不大,分别在  $12\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右波动[图 3(b)],五指山背景点  $\text{NO}_2$  各月浓度显著低于重点城市,处于极低浓度水平,这反映了  $\text{NO}_2$  主要受局地污染源影响;另一方面,重点城市和背景点  $\text{NO}_2$  浓度有显著差异,而  $\text{O}_3$  浓度差异不明显,说明海口市与三亚市  $\text{O}_3$  浓度一方面与本地机动车等污染源排放相关,此外还存在与五指山背景点来源相同的污染源.从五指山背景点 VOCs 总体积分数来看(图 4),其秋冬季的 VOCs 体积分数高于春夏季,但秋冬季对应的 OFP 却低于春夏季,其中烯烃的 OFP 占比最高(图 5).芳香烃和乙炔在秋冬季 OFP 较春夏季有所上升,而烯烃 OFP 在秋冬季显著下降,主要与异戊二烯秋冬季体积分数的显著下降有关.从 VOCs 物种来看,异戊二烯春夏季体积分

数要显著高于秋冬季,这与五指山背景点植被茂密,在春夏季气温较高时,排放较多的异戊二烯有关;其中异戊二烯在 6~8 月  $\text{O}_3$  浓度低值时段,其体积分数占 TVOCs 的 32.0%~40.1%,是占比最高的物种,同时其对应的 OFP 占总臭氧生成潜势(total ozone formation potential, TOFP)的 70%左右,而在  $\text{O}_3$  月均浓度最高的 11 月,其体积分数占比仅为 3.1%,对应的 OFP 占比下降至 21.7%.在植物源排放强度较大和 TOFP 较高的夏季,  $\text{O}_3$  却处在全年最低值,此时盛行偏南风,气流主要来自海上,海上清洁气流的稀释可能是  $\text{O}_3$  浓度在夏季保持较低水平的一个重要因素.乙炔、丙烷、乙烷、正丁烷、甲苯和苯的体积分数秋冬季要显著高于春夏季,则可能与来自东北方向的外来污染传输相关.

### 2.2.2 臭氧及其前体物日变化特征

从非污染天的日变化看(图 6),五指山背景点  $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  日变化波动极小,  $\rho(\text{NO}_2)$  为  $1\sim 2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\rho(\text{O}_3)$  在  $58\sim 68\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  小幅波动,  $\text{O}_3$  谷值出现在 11:00, 15:00 至次日 07:00 处于  $\text{O}_3$  相对高

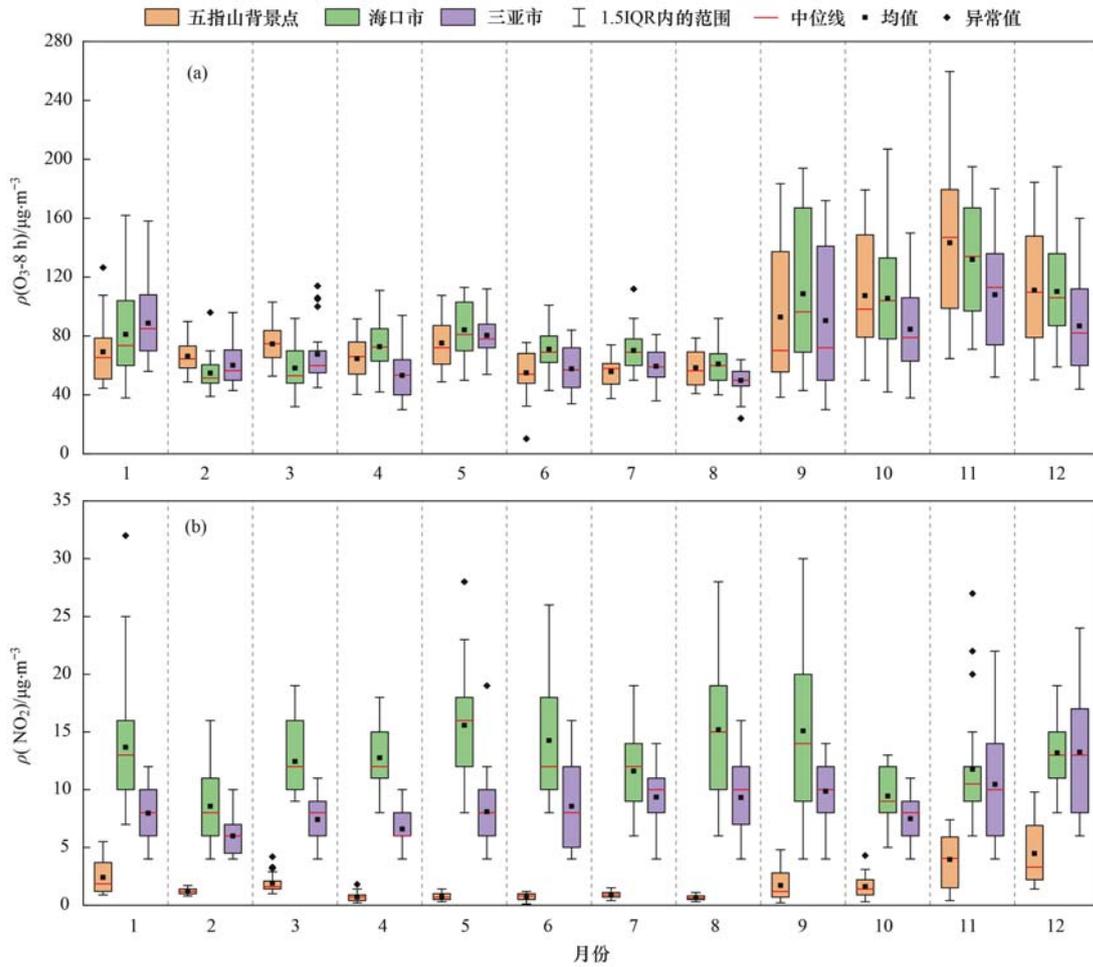


图3 2019年五指山背景点、三亚市和海口市 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 月浓度比较

Fig. 3 Monthly concentrations of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> at the Wuzhishan background site, Sanya, and Haikou in 2019

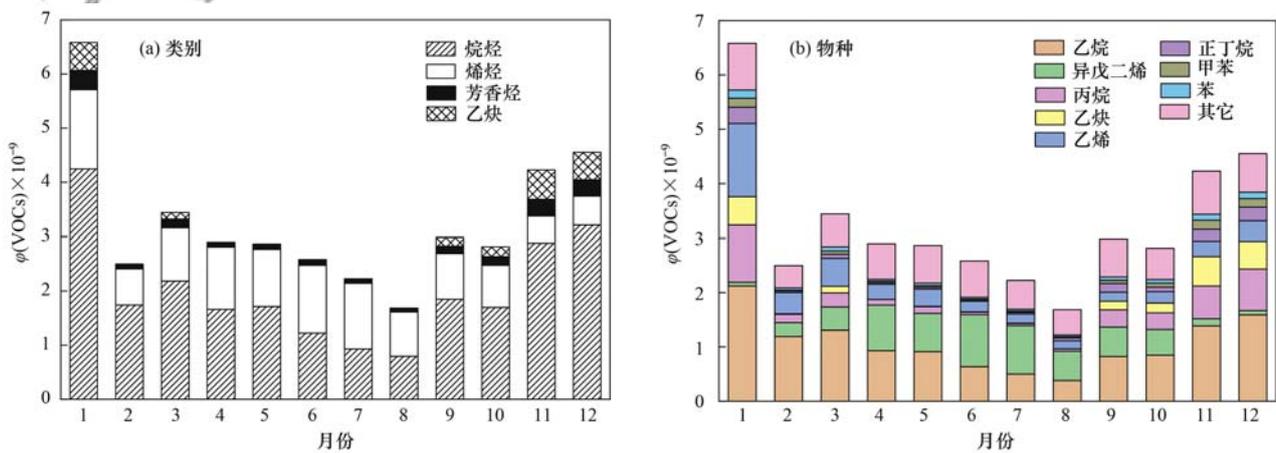


图4 2019年五指山背景点 VOCs 月均体积分数比较

Fig. 4 Average monthly concentrations of VOCs at the Wuzhishan background site in 2019

值, O<sub>3</sub> 峰谷比仅为 1.2, 这主要与五指山背景点周边人为活动稀少, 受局地污染源影响较小有关. 五指山背景点 O<sub>3</sub> 日变化特征可能受到两方面因素的影响, 一方面由于夜间气温较低, 大气层结相对稳定, 扩散条件不利, O<sub>3</sub> 逐渐累积, 此外夜间以下沉气流为主, 由高空传输的 O<sub>3</sub> 致使 O<sub>3</sub> 浓度较高; 白天随着气温上升, 湍流混合作用逐渐增强, 有利于大气污染物扩

散, 同时白天以上升气流为主, 夜间通过地面沉降在谷底的低 O<sub>3</sub> 含量大气随着气流上升, 使山上背景点的 O<sub>3</sub> 浓度降低, 在 11:00 出现谷值, 随后由于对流作用和太阳辐射逐渐增强, 周边区域大气污染物往背景点传输和光化学反应增强, O<sub>3</sub> 浓度逐渐升高, 且在夜间维持在相对高值. 另一方面由于五指山背景点 NO 浓度极低, 对 O<sub>3</sub> 的滴定作用很小, 因此夜

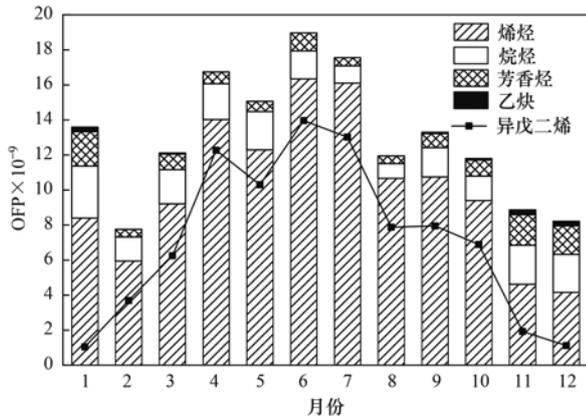


图5 2019年五指山背景点 OFP 月变化

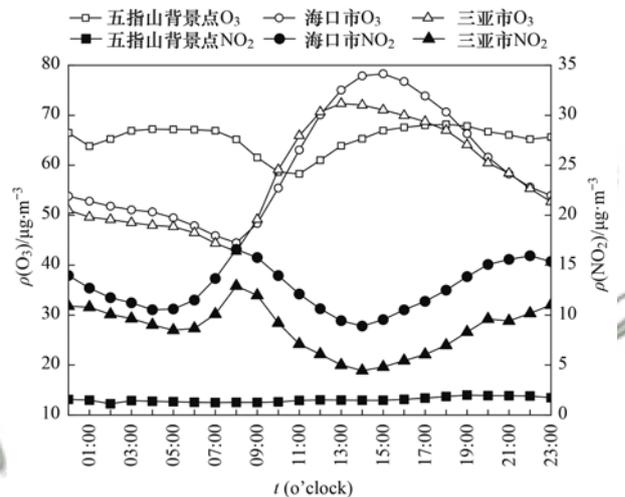
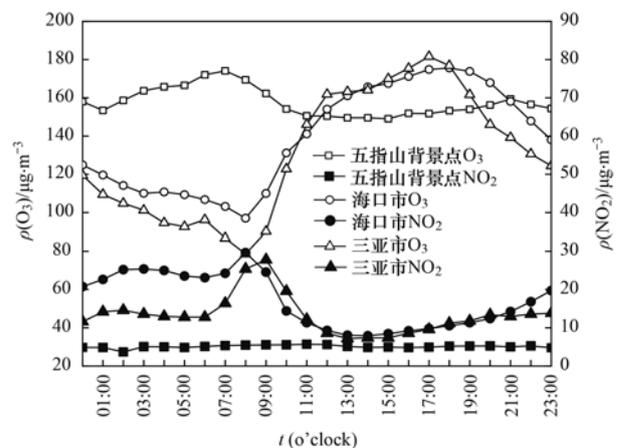
Fig. 5 Monthly OFP at the Wuzhishan background site in 2019

间  $O_3$  消耗极少,从而浓度较高<sup>[44]</sup>. 海口市和三亚市的  $NO_2$  和  $O_3$  日变化则较为明显,08:00 为上班高峰期,  $NO_2$  出现峰值,由于机动车大量排放 NO 对  $O_3$  的消耗,  $O_3$  出现最低值;午后太阳辐射增强,  $O_3$  浓度快速上升,海口市和三亚市分别在 15:00 和 13:00 达峰,随后逐渐降低. 海口市和三亚市  $O_3$  日变化的峰谷比分别为 1.8 和 1.7,显著高于五指山背景点,但亦显著低于同期国内重点城市北京(3.8)、天津(3.5)、石家庄(5.0)、济南(3.0)、南京(3.5)、杭州(4.7)、上海(2.4)、广州(5.8)、深圳(2.5)和成都(4.9)等,说明海口市和三亚市  $O_3$  的  $NO_2$  影响效应要低于国内重点城市.

从污染天的日变化看(图7),五指山背景点  $O_3$  污染天  $O_3$  和  $NO_2$  日变化同样波动幅度较小,其中  $\rho(NO_2)$  为  $4 \sim 6 \mu g \cdot m^{-3}$ ;  $\rho(O_3)$  各时刻维持在  $160 \mu g \cdot m^{-3}$  左右的高值,此外,在 01:00 ~ 07:00 出现了  $O_3$  浓度的上升,此后浓度有所下降,谷值出现在 13:00,随后又缓慢上升. 海口市和三亚市  $O_3$  污染天的日变化与非污染天类似,呈现单峰特征,但峰值出现的时间偏晚,分别在 18:00 和 17:00 达峰,同时  $NO_2$  浓度也有不同程度的升高,这可能与海口市和三亚市受本地和传输共同影响有关.

植物源排放的特征因子异戊二烯与人为源 VOCs 的排放特征有较大差异,因此以下将 VOCs 分为人为源和植物源进行日变化讨论. VOCs 人为源和植物源在各季节的日变化如图8所示,不同季节异戊二烯日变化均呈单峰型,且呈现冬季 < 秋季 < 春季 < 夏季的特征. 异戊二烯浓度受太阳辐射和气温影响较大<sup>[43]</sup>,白天随着太阳辐射的增强和气温的升高,异戊二烯的体积分数显著上升,异戊二烯从 08:00 后体积分数逐渐升高,峰值出现在 14:00 ~ 16:00,随后太阳辐射减弱,气温下降后体积分数随之快速下降. 人为源 VOCs 受污染源排放强

度、光化学反应和扩散条件等因素的综合影响<sup>[43]</sup>,其季节日变化与异戊二烯相反,呈现夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季的特征. 此外,人为源 VOCs 在春夏季变化不明显,而秋冬季其变化幅度要强于春夏季,其中秋季峰值出现在 11:00 和 20:00,凌晨和午后体积分数较低;冬季日变化呈 W 型变化,在凌晨体积分数较低,峰值出现在 11:00,之后体积分数又出现下降,16:00 出现谷值,随后缓慢上升直至夜间. 这主要由于春夏季边界层高度一般较秋冬季高,且五指山背景点春夏季多以偏南风为主,来自海洋的气团较为洁净,具有稀释作用;而秋冬季以偏北风为主,来自内陆的气团携带的污染物浓度水平一般较高.

图6 2019年非污染天  $O_3$  和  $NO_2$  日变化比较Fig. 6 Diurnal variation of  $O_3$  and  $NO_2$  on non-pollution days in 2019图7 2019年污染天  $O_3$  和  $NO_2$  日变化比较Fig. 7 Diurnal variation of  $O_3$  and  $NO_2$  on pollution days in 2019

### 2.3 气象条件特征

海口市、三亚市和五指山背景点均呈现出高温高湿的特性,温差小,湿度变化范围小;五指山背景点由于海拔高,因此气温低于海口市和三亚市. 五指

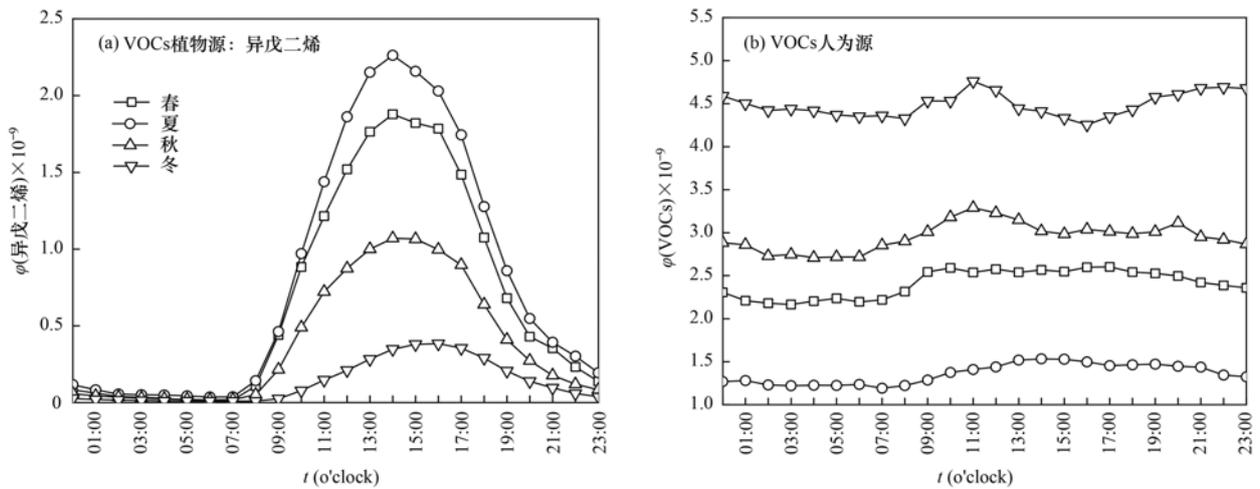


图8 2019年五指山背景点VOCs人为源和植物源体积分数日变化

Fig. 8 Diurnal variation of anthropogenic hydrocarbons and isoprene at the Wuzhishan background site in 2019

山背景点、海口市和三亚市的月均气温分别在 15.6 ~ 24.0、19.4 ~ 29.8 和 19.4 ~ 26.9℃ 之间, 月均相对湿度分别在 85.9% ~ 95.6%、77.1% ~ 87.0% 和 84.7% ~ 93.2% 之间, 月均气温变化范围相对较小, 月均最低气温维持在 15℃ 以上, 全年光化学反应条件充足; 相对湿度月均值变化范围均在 10% 以内 (图 9). 海口市、三亚市和五指山背景点秋冬季主

导风向为东北-偏东风或东北风, 春夏季主导风向为偏南风 (图 10). 背景点和城市点的  $O_3$  浓度以及背景点 VOCs 体积分数变化与风向密切相关, 春夏季偏南风主要来自海上, 海上清洁气流有利于污染物稀释, 因此浓度较低; 秋冬季主导风转为东北风, 受我国北方地区及珠三角区域的大气污染物输送影响, 浓度显著升高.

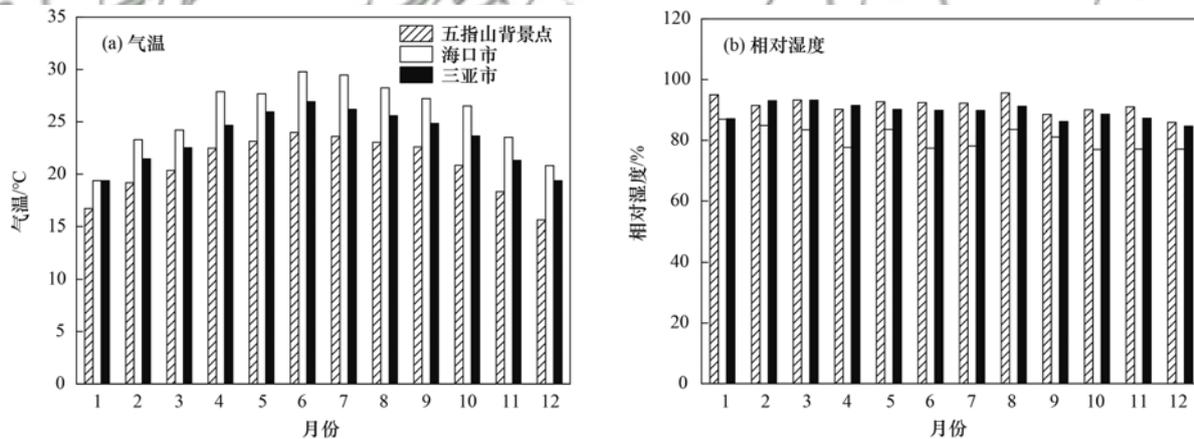


图9 2019年五指山背景点、海口市和三亚市月均气温和相对湿度

Fig. 9 Average monthly temperature and relative humidity at the Wuzhishan background site, Haikou, and Sanya in 2019

## 2.4 典型污染过程分析

### 2.4.1 臭氧及其前体物总体情况

2019年11月,五指山背景点  $O_3$  浓度达到最高值,且11月  $O_3$  污染天数为12 d,污染天数占比超过全年污染天数的50%,因此以下以2019年11月为例,重点分析  $O_3$  污染过程  $O_3$  及其前体物污染特征. 2019年11月观测期间,五指山背景点  $O_3$ -8 h 污染天出现在11月的3~11、15和22~23日,有2 d 为中度污染(11月4~5日),其它污染天均为轻度污染. 海南省中部的五指山背景点在11月  $O_3$ -8 h 大多数时段均高于海南省北部的海口市和南部的三亚市,且五指山背景点、海口市和三亚市出现  $O_3$  污染

的前几日,上风向珠三角地区均出现  $O_3$  高值 (图 11). 对连续  $O_3$  污染时段11月3~11日和该时段前后各一天的小时浓度作进一步深入分析发现,在  $O_3$  发生连续污染前后,  $\rho(O_3)$  均在  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以内,且日变化相对不大. 五指山背景点在11月3~11日期间连续多日出现凌晨无光照的情况下  $O_3$  浓度的快速上升,且浓度大多高于海口市和三亚市,说明  $O_3$  可能具有高空传输特征;与此同时海口市和三亚市均存在午夜或凌晨  $O_3$  不降反升的现象 (图 12),结合前述污染日  $\text{NO}_2$  日变化和气象要素分析可知,  $\text{NO}_2$  在污染日也出现了浓度上升,秋冬季海南岛盛行东北风,同时11月海南岛上风向的珠三角地区出

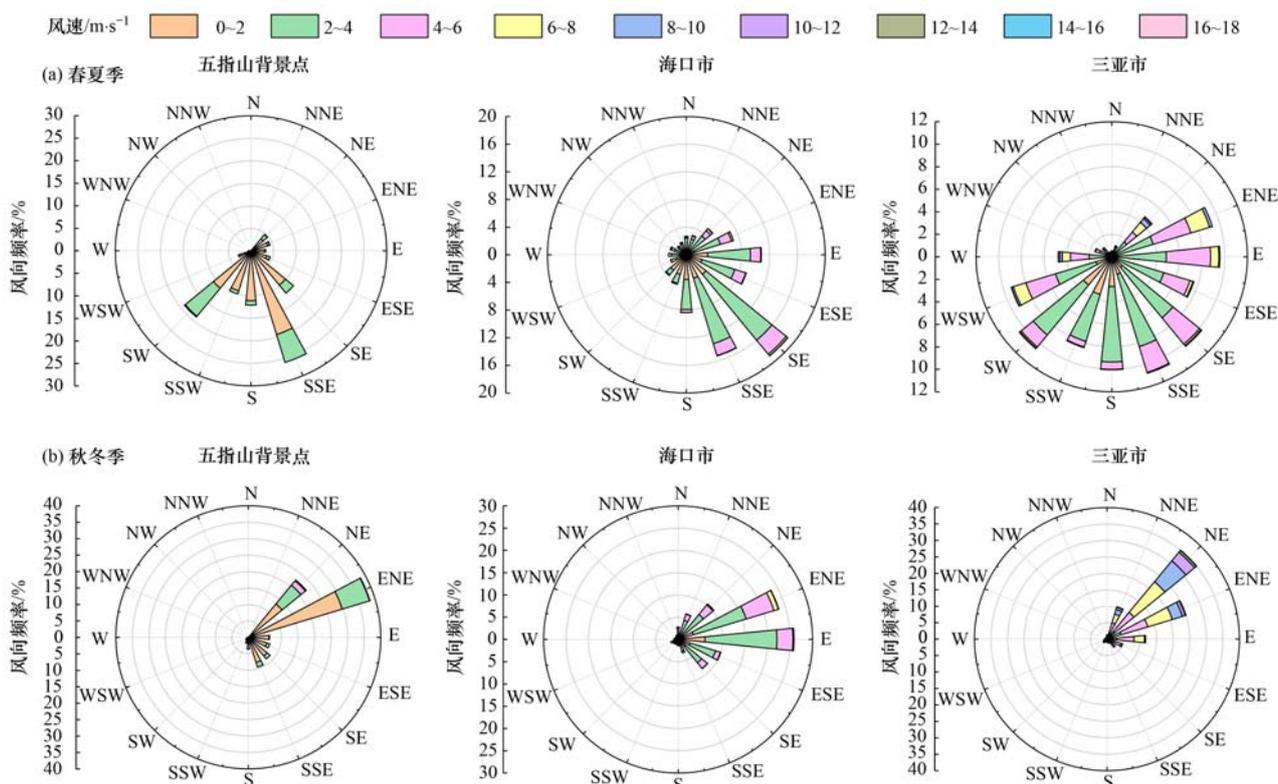
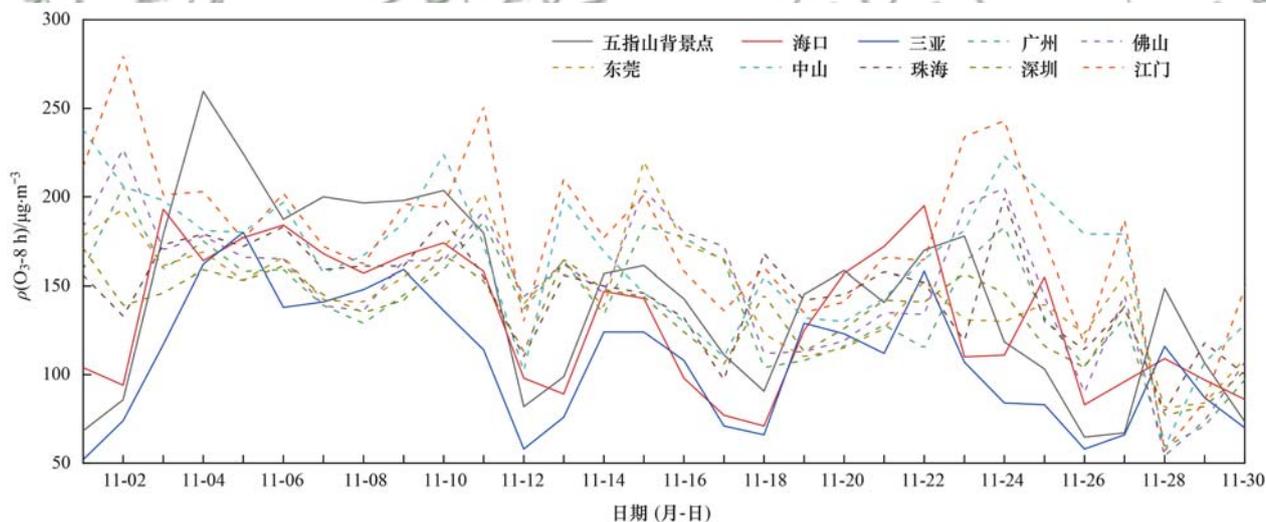


图 10 2019 年五指山背景点、海口市和三亚市风玫瑰图

Fig. 10 Wind roses of the Wuzhishan background site, Haikou, and Sanya in 2019

图 11 2019 年 11 月五指山背景点、海口市、三亚市和珠三角地区 O<sub>3</sub>-8 h 浓度Fig. 11 O<sub>3</sub>-8 h concentrations of Wuzhishan background site, Haikou, Sanya, and cities of Pearl River Delta in November 2019

现连续 O<sub>3</sub> 高值, 综上所述说明海南 O<sub>3</sub> 污染与本地生成和累积以及东北方向的污染传输有关。

图 13 为 2019 年 11 月五指山背景点 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、NO 和 VOCs 等污染物和气象要素(风速、风向、气温和相对湿度等)的小时时间序列。从中可知, 2019 年 11 月五指山背景点的风向以东北风为主, 且风速不大, 基本低于 4 m·s<sup>-1</sup>, 平均风速为 1.5 m·s<sup>-1</sup>。将 O<sub>3</sub> 及其前体物高浓度时段即 11 月的 3~11、14~16、19~23 和 28~29 日分别命名为 I、II、III 和

IV, 其余时间定义为清洁日。从表 3 可以看出, I、II、III 和 IV 期间 O<sub>3</sub>-8 h 均值分别为清洁日的 2.3、1.8、1.8 和 1.5 倍, 前体物 NO<sub>x</sub> 分别为清洁日的 4.3、2.8、3.9 和 4.5 倍, VOCs 体积分数分别为清洁日的 2.6、2.2、3.1 和 3.8 倍。虽然 IV 期间 O<sub>3</sub> 前体物的浓度最高, 但 O<sub>3</sub> 浓度却是 4 个高浓度时段中最低的, 从气象要素分析可知, 过程 IV 相对于其它高浓度时段, 温度较低且日变化不大, 相对湿度较高, 低温高湿的条件不利于 O<sub>3</sub> 的生成。4 个 O<sub>3</sub> 高浓度

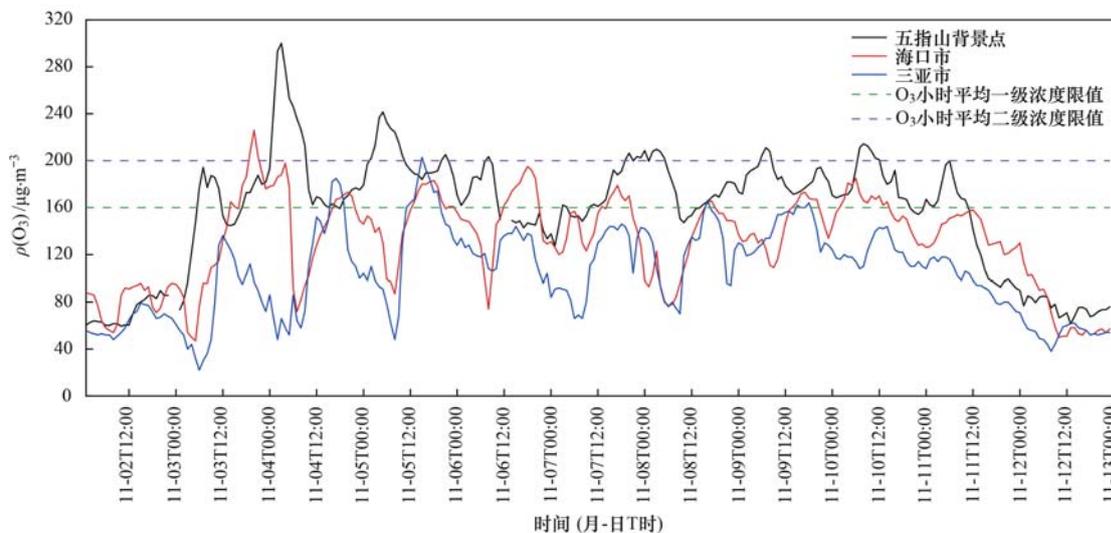


图 12 2019 年 11 月 2 ~ 12 日五指山背景点、海口市和三亚市 O<sub>3</sub> 小时浓度

Fig. 12 O<sub>3</sub> 1-hour average concentrations of the Wuzhishan background site, Haikou, and Sanya from November 2 to November 12, 2019

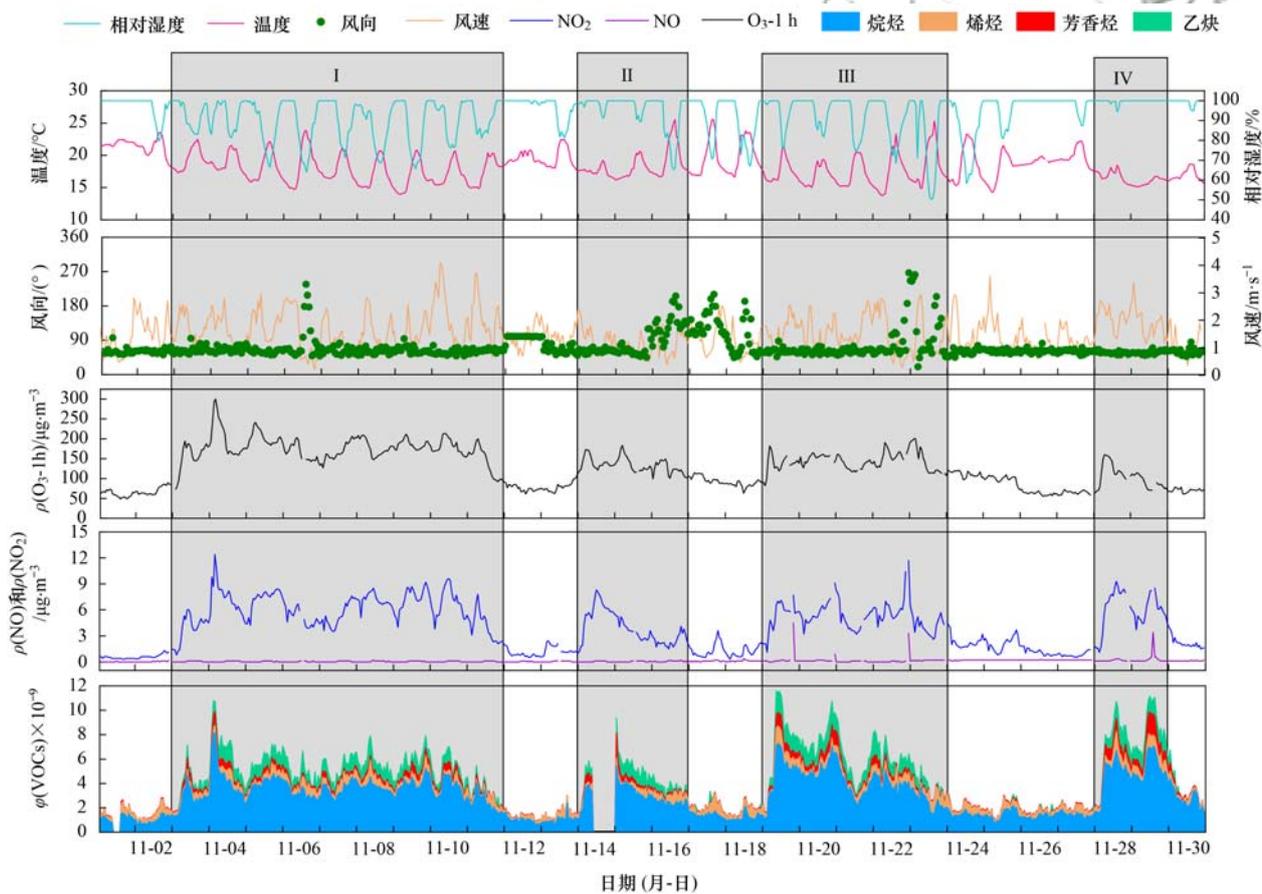


图 13 2019 年 11 月五指山背景点 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、NO、VOCs 等污染物和气象要素时间序列

Fig. 13 Time series diagram of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, VOCs, and meteorological elements at the Wuzhishan background site in November 2019

时段乙炔、芳香烃和烷烃体积分数相对于清洁日均有不同程度的上升, 烯烃体积分数较清洁日变化不大; 其中乙炔体积分数上升幅度最大, I、II、III 和 IV 时段的体积分数分别为清洁日的 28.0、25.1、37.0 和 40.2 倍; 芳香烃体积分数上升幅度次之, 分别是清洁日的 3.7、3.6、4.8 和 9.0 倍; 烷烃体积

分数分别是清洁日的 2.5、2.1、2.9 和 3.6 倍。

从图 13 中风速风向逐小时变化情况和图 14 中 O<sub>3</sub> 高浓度时段和清洁日气流的 48 h 后向轨迹结果可以看出, 4 个 O<sub>3</sub> 高浓度时段影响五指山背景点的气团主要来自东北方向的珠三角、雷州半岛和江西等地. 当风向转为来自海洋的偏东风, 气团较为清

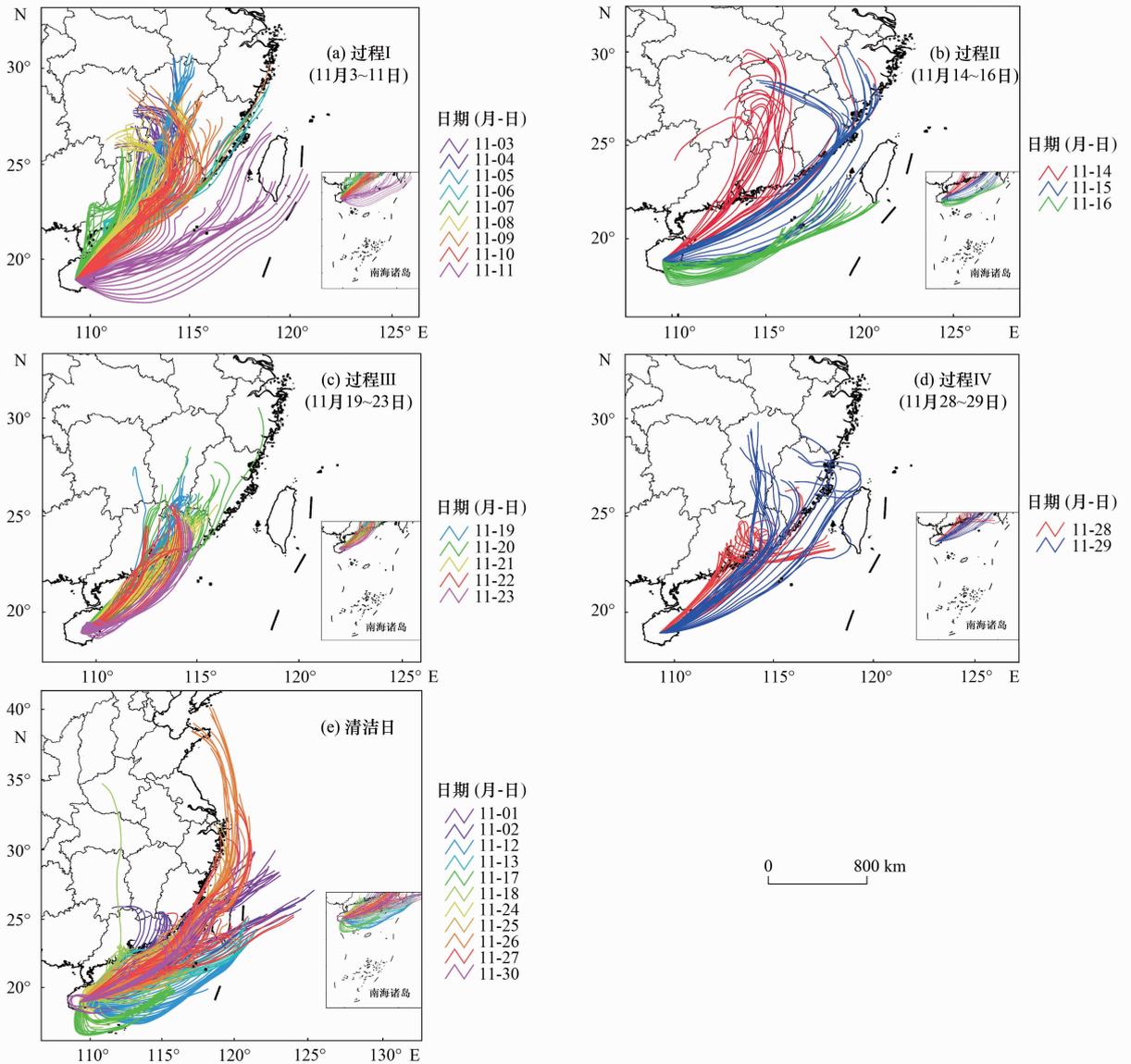


图 14 观测期间不同过程五指山背景点 48 h 气团后向轨迹

Fig. 14 The 48 h backward air trajectories of the Wuzhishan background site at different periods during the measurement

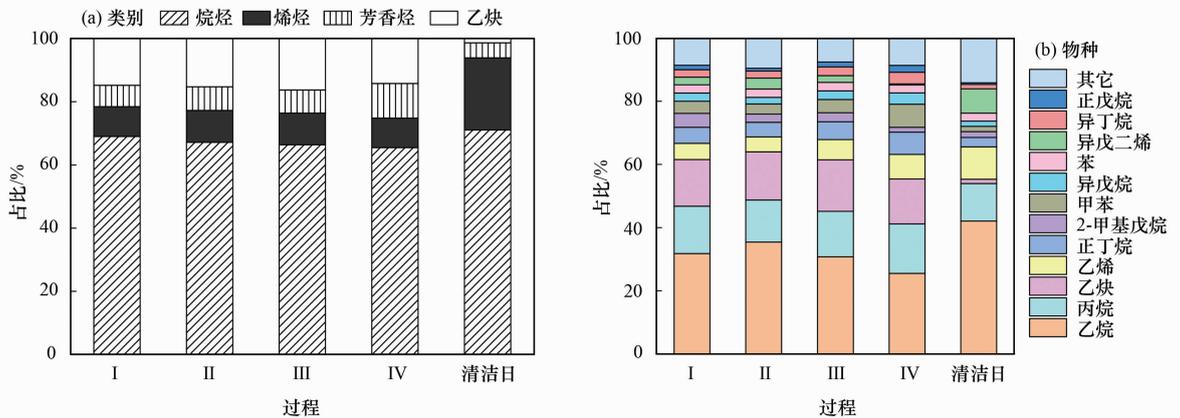


图 15 观测期间不同过程五指山背景点 VOCs 的化学组成

Fig. 15 Chemical composition of VOCs at the Wuzhishan background site at different periods during the measurement

洁,污染逐渐缓解. 11 月期间, 仅在 1 日出现了中雨, 11 ~ 12 日和 25 ~ 26 日出现小雨, 其余时段均无降水. 各  $O_3$  高值过程中, 过程 I 前出现了中雨, 过程

I 和过程 II 间以及过程 III 和过程 IV 间出现了小雨, 但过程 II 和过程 III 间未出现降水, 说明降水对  $O_3$  浓度的降低起到了一定作用, 但风向的转换是  $O_3$  浓度

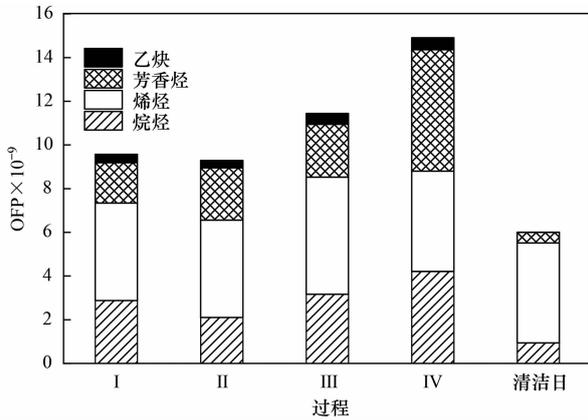


图 16 观测期间不同过程 VOCs 的 OFP 变化特征

Fig. 16 OFP variation of VOCs at different periods during the measurement

降低的主要影响因素,五指山背景点  $O_3$  浓度的升高与东北向的污染传输有关。

#### 2.4.2 VOCs 的污染特征

$O_3$  高浓度时段 (I、II、III 和 IV) 芳香烃和乙炔的占比较清洁日出现不同程度的上升,乙炔上升幅度较大,上升比例超过 10% (图 15)。清洁时段 VOCs 优势物种为乙烷、丙烷、乙烯和异戊二烯,这 4 个物种在 TVOCs 的占比超过 70%;  $O_3$  高浓度时段的优势物种为乙烷、丙烷、乙炔、乙烯和正丁烷,这

5 种 VOCs 占比在各时段 TVOCs 中的占比均超过 70%。乙烷是  $O_3$  高浓度时段和清洁时段体积分数占比最高的物种,乙炔、甲苯、正丁烷、丙烷、异丁烷、异戊烷和正戊烷在  $O_3$  高浓度时段的占比较清洁时段有显著上升,结合上述气团后向轨迹推测可能受到来自东北上风向污染气团的影响。有研究表明:乙烷、丙烷、乙炔、乙烯、正丁烷、异丁烷、甲苯、异戊烷和正戊烷等是机动车尾气排放和油气挥发的示踪物种<sup>[45-47]</sup>,五指山背景点在  $O_3$  高浓度时段上述优势物种和显著上升物种说明该时段外来交通源排放的 VOCs 对其 VOCs 的化学组成有显著影响。

#### 2.4.3 VOCs 臭氧生成潜势

I、II、III 和 IV 期间的 OFP 分别为  $9.6 \times 10^{-9}$ 、 $9.3 \times 10^{-9}$ 、 $11.4 \times 10^{-9}$  和  $14.9 \times 10^{-9}$ ,分别是清洁日 ( $6.0 \times 10^{-9}$ ) 的 1.6、1.6、1.9 和 2.5 倍。虽然烯烃在 TVOCs 中的体积分数占比不高 (清洁日为 22.8%,  $O_3$  高值时段约为 10%),远低于烷烃 (65.5%~71.1%),但其 OFP 贡献率在过程 I、II、III 和清洁日位居第一位,在过程 IV 位居第二位 (芳香烃位居第一位);  $O_3$  高值时段乙炔、芳香烃和烷烃的 OFP 较清洁日均有所增长,烯烃 OFP 变化不大,其中乙炔增幅最显著,其次为芳香烃 (图 16)。

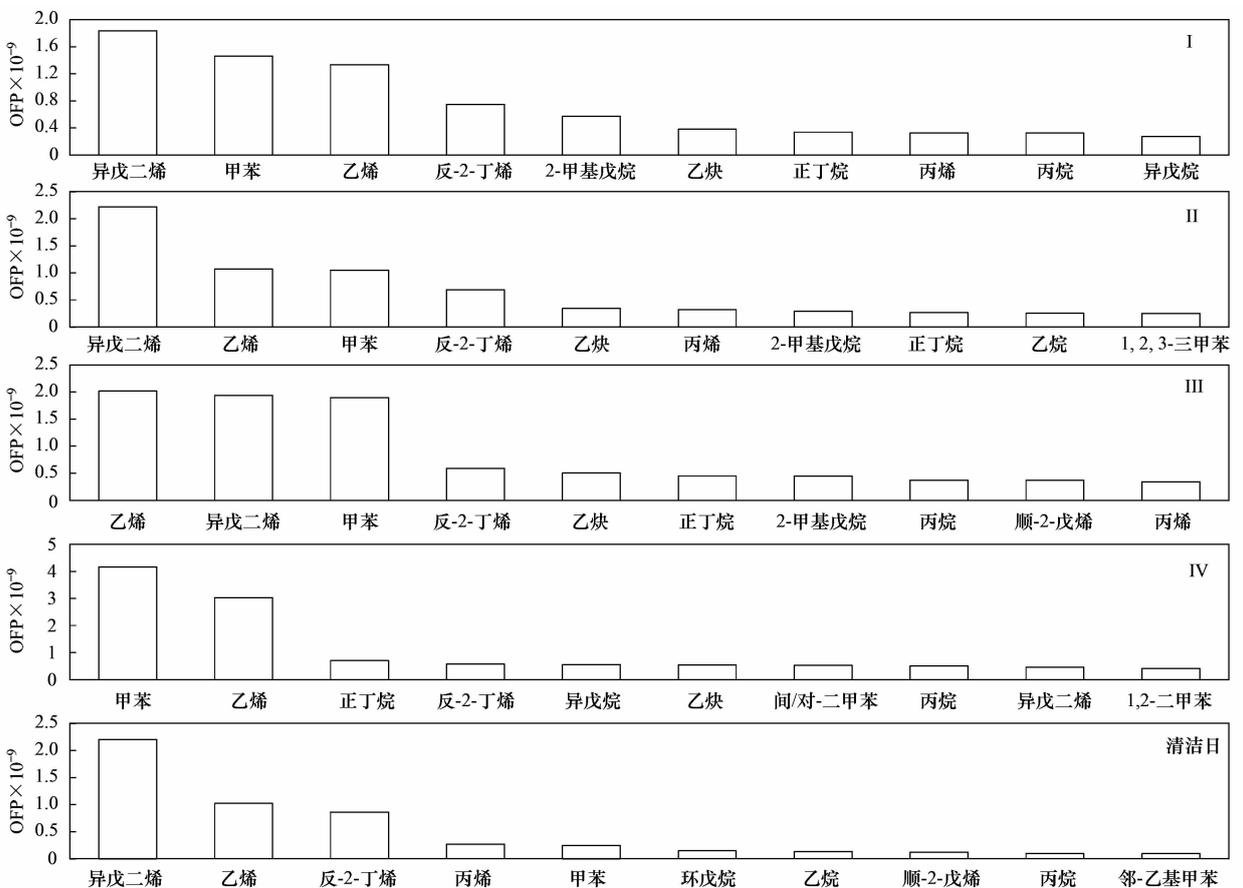


图 17 观测期间不同过程 OFP 排名前 10 物种

Fig. 17 Top ten species of OFP at different periods during the measurement

表 3 2019 年 11 月五指山背景点气象要素以及空气质量主要污染物统计结果

Table 3 Statistical results of meteorological elements and air quality major pollutants at the Wuzhishan background site in November 2019

过程	温度 (小时平均) /°C	相对湿度 (小时平均) /%	风速 (小时平均) /m·s <sup>-1</sup>	$\rho(\text{O}_3\text{-1 h})$ (小时平均) /μg·m <sup>-3</sup>	$\rho(\text{O}_3\text{-8 h})$ (平均) /μg·m <sup>-3</sup>	$\rho(\text{NO}_2)$ (小时平均) /μg·m <sup>-3</sup>	$\rho(\text{NO})$ (小时平均) /μg·m <sup>-3</sup>	$\varphi(\text{VOCs})$ (小时平均) ×10 <sup>-9</sup>	污染天数 /d
I	17.9	89.9	1.7	176	203	6.0	0.0	5.1	9
II	18.3	95.4	1.2	134	154	3.9	0.0	4.4	1
III	17.5	91.3	1.5	144	158	5.3	0.2	6.1	2
IV	16.3	99.7	2.0	104	128	6.1	0.2	7.6	0
清洁日	19.4	95.1	1.4	80	88	1.3	0.1	2.0	0
平均值	18.3	93.2	1.5	126	143	4.0	0.1	4.2	12

过程 I 中 OFP 排名前 10 的物种由大到小依次为异戊二烯、甲苯、乙烯、反-2-丁烯、2-甲基戊烷、乙炔、正丁烷、丙烯、丙烷和异戊烷(图 17)。在 11 月太阳辐射减弱和气温有所下降的情况下,异戊二烯体积分数显著降低,然而异戊二烯的 OFP 仍最高,表明植物源对过程 I 的 OFP 仍具有一定贡献。异戊烷、甲苯、乙烯、乙炔、乙烷、反-2-丁烯、2-甲基戊烷和正丁烷等均是机动车尾气排放或油气挥发的示踪物<sup>[45-47]</sup>,说明过程 I 期间机动车尾气和油气挥发排放源对五指山背景点 VOCs 的 OFP 有重要贡献。过程 II 和过程 III 中 OFP 排名前列的物种与过程 I 相近。过程 IV 相对于前 3 个过程,甲苯的 OFP 显著增加,此外 OFP 排名前 10 的物种中还出现了间/对-二甲苯和 1,2-二甲苯,异戊二烯的 OFP 显著下降,表明溶剂使用源对过程 IV 的 OFP 贡献要大于其它 3 个过程。

### 3 结论

(1)  $\text{O}_3$  是影响五指山背景点空气质量的关键污染物,五指山背景点  $\text{O}_3$  日最大 8 h 浓度平均值与海口市和三亚市显著相关。五指山背景点的  $\text{O}_3$  月均浓度与海口、三亚的变化趋势和浓度水平高度一致,  $\text{O}_3$  高值出现在 9~12 月;其  $\text{NO}_2$  浓度显著低于城市点,处于极低浓度水平。

(2) 背景点和城市点  $\text{O}_3$  浓度变化与风向有密切关系,春夏季偏南风频率较高,偏北风频率较低,污染物浓度相对较低。秋冬季以东北风为主,南风频率较小,极易受内陆污染输送影响,浓度较高。

(3) 五指山背景点非污染天和污染天  $\text{O}_3$  浓度日变化波动均较小;海口市和三亚市  $\text{O}_3$  浓度日变化较为明显,均呈单峰型日变化特征,但  $\text{O}_3$  污染天峰值出现时间偏晚。

(4) 五指山背景点春夏季 VOCs 体积分数低于秋冬季,但对应的 OFP 高于秋冬季;其中异戊二烯夏季体积分数显著高于秋冬季,且其夏季体积分数

占总挥发性有机物的比例最高,对应的 OFP 贡献率可达 70% 以上,  $\text{O}_3$  则表现出秋冬季显著高于夏季的特征。受太阳辐射和气温的影响,不同季节异戊二烯日变化均呈单峰型,且呈现冬季 < 秋季 < 春季 < 夏季的特征。人为源 VOCs 季节日变化与异戊二烯相反,呈现夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季的特征,且秋冬季人为源 VOCs 变化幅度要强于春夏季。在植物源排放强度较大和 TOFP 较高的夏季,  $\text{O}_3$  却处在全年最低值,表明海上清洁气流的稀释可能是一个重要影响因素。

(5) 五指山背景点  $\text{O}_3$  高浓度时段乙炔和芳香烃的体积分数较清洁日出现较大上升,其中乙炔占比上升比例超过 10%,同时乙炔和芳香烃对应的 OFP 较清洁日显著上升。VOCs 优势物种和 OFP 主要贡献物种的分析结果表明,  $\text{O}_3$  高浓度时段机动车尾气和油气挥发排放源对五指山背景点 VOCs 的化学组成和 OFP 有重要贡献。

致谢:感谢中国环境监测总站提供的五指山背景点常规六项污染物观测数据。

#### 参考文献:

- [1] 王文兴,柴发合,任阵海,等. 新中国成立 70 年来我国大气污染防治历程、成就与经验[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1621-1635.  
Wang W X, Chai F H, Ren Z H, et al. Process, achievements and experience of air pollution control in China since the founding of the People's republic of China 70 years ago[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1621-1635.
- [2] 齐冰,牛彧文,杜荣光,等. 杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 443-451.  
Qi B, Niu Y W, Du R G, et al. Characteristics of surface ozone concentration in urban site of Hangzhou [J]. China Environmental Science, 2017, 37(2): 443-451.
- [3] 高平,庄立跃,王龙,等. 广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3527-3538.  
Gao P, Zhuang L Y, Wang L, et al. Characteristics of surface ozone and impact factors at different station types during the autumn in Guangzhou [J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3527-3538.
- [4] 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.
- [ 5 ] 徐文帅, 邢巧, 孟鑫鑫, 等. 海口市臭氧污染特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(4): 186-193.
- Xu W S, Xing Q, Meng X X, *et al.* Characteristics of ozone pollution in Haikou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 186-193.
- [ 6 ] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 PM<sub>2.5</sub> 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
- Li H, Peng L, Bi F, *et al.* Strategy of coordinated control of PM<sub>2.5</sub> and ozone in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
- [ 7 ] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1755-1762.
- Wang Y J, Zhang S J, Hao J M. Air pollution control in China: progress, challenges and future pathways [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1755-1762.
- [ 8 ] 苏彬彬, 刘心东, 陶俊. 华东森林及高山背景区域 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO 本底特征[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(6): 15-21.
- Su B B, Liu X D, Tao J. Pollution characteristics of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO in forest and mountain background region of East China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(6): 15-21.
- [ 9 ] Liu N W, Lin W L, Ma J Z, *et al.* Seasonal variation in surface ozone and its regional characteristics at global atmosphere watch stations in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **77**: 291-302.
- [ 10 ] 王剑琼, 祁栋林, 薛丽梅. 瓦里关全球大气本底站站址环境及部分观测要素变化特征[J]. *环境化学*, 2020, **39**(8): 2084-2092.
- Wang J Q, Qi D L, Xue L M. Characteristics of the station environment and some atmospheric compositions of China global atmosphere watch baseline observatory at Mt. Waliguan [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(8): 2084-2092.
- [ 11 ] 张煜娴, 曹芳, 贾小芳, 等. 中国主要背景区域冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中非极性有机化合物组成及来源解析[J]. *地球与环境*, 2022, **50**(1): 45-57.
- Zhang Y X, Cao F, Jia X F, *et al.* Composition and source apportionment of non-polar organic compounds in PM<sub>2.5</sub> in winter in major background regions of China [J]. *Earth and Environment*, 2022, **50**(1): 45-57.
- [ 12 ] Zhang Y, Jin J L, Yan P, *et al.* Long-term variations of major atmospheric compositions observed at the background stations in three key areas of China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, **11**(4): 370-380.
- [ 13 ] 张霞, 余益军, 解淑艳, 等. 全国大气背景地区黑碳浓度特征[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(1): 32-40.
- Zhang X, Yu Y J, Xie S Y, *et al.* The Characteristic of black carbon concentration at national ambient air background stations [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(1): 32-40.
- [ 14 ] Zhao R J, Dou X Y, Zhang N, *et al.* The characteristics of inorganic gases and volatile organic compounds at a remote site in the Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **234**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104740.
- [ 15 ] 赵江伟, 红都孜, 王定定, 等. 阿克达拉大气本底站 CO 浓度特征及传输路径分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(6): 115-121.
- Zhao J W, Hong D Z, Wang D D, *et al.* Analysis of CO concentration characteristics and transmission path of Akdala atmospheric observatory [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(6): 115-121.
- [ 16 ] 赵权威, 何清, 王慧琴, 等. 阿克达拉大气本底站 NO<sub>2</sub> 输送路径及潜在源分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(3): 874-885.
- Zhao Q W, He Q, Wang H Q, *et al.* Identification of transport pathways and potential source areas of NO<sub>2</sub> in Akedala [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 874-885.
- [ 17 ] 刘心东, 刘明, 张若宇, 等. 华东高山背景点大气气态汞含量与传输特征[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2758-2764.
- Liu X D, Liu M, Zhang R Y, *et al.* Level and transport characteristic of gaseous elemental mercury at a background mountain site of East China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2758-2764.
- [ 18 ] Hong Z Y, Li M Z, Wang H, *et al.* Characteristics of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) at a mountainous forest site and two urban sites in the southeast of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 1491-1500.
- [ 19 ] 肖龙, 王帅, 周颖, 等. 中国典型背景站夏季 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(5): 2014-2027.
- Xiao L, Wang S, Zhou Y, *et al.* The characteristics and source apportionments of VOCs at typical background sites during summer in China [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(5): 2014-2027.
- [ 20 ] Pu W W, Shi X F, Wang L L, *et al.* Potential source regions of air pollutants at a regional background station in Northern China [J]. *Environmental Technology*, 2019, **40**(26): 3412-3421.
- [ 21 ] 韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 等. 上甸子区域背景站 VOCs 污染特征及其对臭氧生成贡献[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2586-2595.
- Han T T, Li Y R, Qiu Y L, *et al.* Characteristics of VOCs and their roles in ozone formation at a regional background site in Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2586-2595.
- [ 22 ] 吴进, 李琛, 马志强, 等. 基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4864-4873.
- Wu J, Li C, Ma Z Q, *et al.* Influence of meteorological conditions on ozone pollution at Shangdianzi station based on weather classification [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4864-4873.
- [ 23 ] 葛宝珠, 徐晓斌, 林伟立, 等. 上甸子本底站臭氧生成效率的观测研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1444-1450.
- Ge B Z, Xu X B, Lin W L, *et al.* Observational study of ozone production efficiency at the Shangdianzi regional background station [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1444-1450.
- [ 24 ] Shao P, Xu X B, Zhang X L, *et al.* Impact of volatile organic compounds and photochemical activities on particulate matters during a high ozone episode at urban, suburb and regional background stations in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **236**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117629.
- [ 25 ] Han T T, Ma Z Q, Li Y R, *et al.* Real-time measurements of aromatic hydrocarbons at a regional background station in North China: seasonal variations, meteorological effects, and source implications [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **250**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105371.
- [ 26 ] Han T T, Ma Z Q, Li Y R, *et al.* Chemical characteristics and source apportionments of volatile organic compounds (VOCs) before and during the heating season at a regional background site in the North China Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105778.

- [27] Yang Y J, Zhou R, Yu Y, *et al.* Size-resolved aerosol water-soluble ions at a regional background station of Beijing, Tianjin, and Hebei, North China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **55**: 146-156.
- [28] Liu S, Fang S X, Liang M, *et al.* Temporal patterns and source regions of atmospheric carbon monoxide at two background stations in China[J]. *Atmospheric Research*, 2019, **220**: 169-180.
- [29] Liu S, Fang S X, Liang M, *et al.* Study on CO data filtering approaches based on observations at two background stations in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 675-684.
- [30] 矫健, 贾小芳, 颜鹏, 等. 2016—2017 年中国中东部本底地区 PM<sub>10</sub> 化学特性[J]. *应用气象学报*, 2021, **32**(1): 65-77.  
Jiao J, Jia X F, Yan P, *et al.* Chemical characteristics of PM<sub>10</sub> at background stations of central and eastern China in 2016-2017 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2021, **32**(1): 65-77.
- [31] 康晖, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角典型站点冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC、EC 污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 961-971.  
Kang H, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characterization and variation of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> during the winter in the Yangtze River Delta region, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 961-971.
- [32] 梁林林, 孙俊英, 张养梅, 等. 临安夏季霾和清洁天气 PM<sub>2.5</sub> 化学组成特征比较[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3042-3050.  
Liang L L, Sun J Y, Zhang Y M, *et al.* Comparison of chemical components characteristics of PM<sub>2.5</sub> between haze and clean periods during summertime in Lin'an [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3042-3050.
- [33] Lei X W, Cheng H R, Peng J, *et al.* Impact of long-range atmospheric transport on volatile organic compounds and ozone photochemistry at a regional background site in central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118093.
- [34] 廖敏萍, 龚道程, 王少霞, 等. 国庆期间南岭背景大气中 PAN 的浓度特征与来源[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(6): 2493-2503.  
Liao M P, Gong D C, Wang S X, *et al.* Concentration characteristics and sources of PAN at Nanling background station during the National Day holidays [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2493-2503.
- [35] 张诗扬, 龚道程, 王好, 等. 南岭国家大气背景站异戊二烯的在线观测研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(7): 2504-2512.  
Zhang S Y, Gong D C, Wang H, *et al.* Online measurement of isoprene at a national air background monitoring station in the Nanling Mountains, South China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2504-2512.
- [36] 罗岳平, 彭庆庆, 金红红, 等. 衡阳市区和衡山背景站臭氧浓度变化规律的对比分析[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(3): 100-108.  
Luo Y P, Peng Q Q, Jin H H, *et al.* The characteristics of ozone concentration of Hengyang and Heng Mountain background station [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(3): 100-108.
- [37] 廖乾邑, 张巍, 范文武, 等. 南亚次大陆对中国大气传输影响及海螺沟背景站监测的指示效应[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(2): 41-46.  
Liao Q Y, Zhang W, Fan W W, *et al.* The South Asian subcontinent impact on atmospheric pollutants transport in China and the indicating effect analysis of monitoring in Hailuoguo background station [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(2): 41-46.
- [38] 雷育涛, 刘明, 陈来国, 等. 海南五指山大气气态总汞含量变化特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 817-823.  
Lei Y T, Liu M, Chen L G, *et al.* Variation characteristics of total gaseous mercury at Wuzhi mountain (Wuzhishan) background station in Hainan [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 817-823.
- [39] Liu M, Chen L G, Xie D H, *et al.* Monsoon-driven transport of atmospheric mercury to the South China Sea from the Chinese mainland and Southeast Asia—Observation of gaseous elemental mercury at a background station in South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(21): 21631-21640.
- [40] Gao Z Q, Sun J R, Liu M, *et al.* Variational characteristics and implications of gaseous elemental mercury for three continuous typhoons in China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, **70**(4): 692-699.
- [41] 马社霞, 张啸, 陈来国, 等. 海南五指山背景点 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(S1): 103-107.  
Ma S X, Zhang X, Chen L G, *et al.* Characteristics of PAHs concentration in the atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Wuzhi Mountain background in Hainan, South China [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(S1): 103-107.
- [42] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications[EB/OL]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?jsessionid=CEBF34A967AA19A68EC520D7DF83D81C?doi=10.1.1.478.2529&rep=rep1&type=pdf>, 2009-06-22.
- [43] 云龙, 李成柳, 张明棣, 等. 珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4191-4201.  
Yun L, Li C L, Zhang M D, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of atmospheric VOCs in the coastal background of the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4191-4201.
- [44] 苏彬彬. 华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2519-2525.  
Su B B. Characteristics and impact factors of O<sub>3</sub> concentrations in mountain background region of East China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2519-2525.
- [45] 陈乃华, 杨育姗, 邓以勤, 等. 海峡西岸清洁岛屿秋季 VOCs 特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(12): 4400-4409.  
Chen N H, Yang Y S, Deng Y Q, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs on a clean island city along the West Coast of the Taiwan Straits [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(12): 4400-4409.
- [46] 王鸣, 项萍, 牛其恺, 等. 南阳市冬春交替期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2233-2241.  
Wang M, Xiang P, Niu Q K, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs during alternating period between winter and spring in Nanyang City, Henan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2233-2241.
- [47] 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5316-5324.  
Xu C X, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds pollution in summer in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5316-5324.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM <sub>2.5</sub> Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	Ji Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO <sub>2</sub> Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)