

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1

第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王蕊燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响

赵伟^{1,2}, 高博², 刘明², 卢清², 马社霞², 孙家仁², 陈来国², 范绍佳^{1*}

(1. 中山大学大气科学学院, 广州 510275; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 基于2000~2015年香港地区的臭氧监测数据和气象数据, 分析了香港的臭氧污染特征及气象因素对臭氧污染的影响。结果表明: ①香港地区臭氧浓度呈现明显的季节变化特征, 其中秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季, 臭氧超标日集中在夏季和秋季, 超标日发生在冬季和春季的情形极少。②2000~2015年香港臭氧日最大8h平均浓度(MDA8)年均浓度呈增长趋势, 平均增长速率为 $0.77 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, 臭氧MDA8第90百分位数浓度同样呈增长趋势, 增长速率为 $1.49 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 。③较高的气温是香港地区臭氧污染发生的必要条件, 气温越高越容易导致更高浓度的臭氧污染。④绝大多数情况下, 臭氧浓度与相对湿度间呈负相关关系, 相对湿度越高, 香港地区的臭氧MDA8平均浓度及第90百分位数浓度均会降低。⑤当香港发生臭氧污染时, 盛行风往往从偏北风或偏东风转为偏西风。随着风速的增大, 臭氧平均浓度变化不大, 但是臭氧第90百分位数浓度会明显降低。⑥降水和云量是影响臭氧浓度的重要因素, 连续多日的无雨或少雨天气是臭氧污染事件发生的必要条件, 而随着云量的增加, 臭氧平均浓度和第90百分位数浓度会持续降低。⑦在太阳总辐射量 $\leq 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 或日照时长 $\leq 10 \text{ h}$ 的情况下, 臭氧浓度与太阳辐射及日照时长呈正相关关系。然而, 在太阳辐射强烈的情况下(太阳总辐射量 $> 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 或日照时长 $> 10 \text{ h}$), 随着太阳辐射增强或日照时长的增加地面臭氧浓度反而降低, 这是因为太阳辐射强烈的情况常出现在雨后天晴的背景下, 并盛行来自海洋的偏南风, 使得臭氧污染不易形成。⑧香港臭氧超标日的出现往往伴随着一系列气象条件的共同改变, 包括晴天少雨、辐射增强、边界层高度增加、相对湿度降低、风速变小以及气温升高等气象特征, 污染结束则伴随着相反的气象变化。

关键词: 香港地区; 臭氧污染; 气象因素; 气温; 相对湿度; 太阳辐射; 风速

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0055-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803151

Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong

ZHAO Wei^{1,2}, GAO Bo², LIU Ming², LU Qing², MA She-xia², SUN Jia-ren², CHEN Lai-guo², FAN Shao-jia^{1*}

(1. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Based on ozone monitoring and meteorological data from 2000 to 2015 in Hong Kong, the characteristics of ozone pollution and the influence of meteorological factors on the ozone pollution were analyzed. The results show that: ① A seasonal variation of the ozone concentration in Hong Kong is notable; autumn > spring > winter > summer. Days of ozone exceeding the standard value are concentrated in summer and autumn and rarely occur in winter and spring. ② The annual mean ozone concentration of the maximum daily 8-h average (MDA8) in Hong Kong increases from 2000 to 2015, with an average growth rate of $0.77 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$. The 90th percentile concentration of the ozone MDA8 also increases, with an average rate of $1.49 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$. ③ Higher temperatures are necessary for ozone pollution in Hong Kong. The higher the temperature is, the more ozone pollution likely occurs. ④ In most cases, the ozone concentration is negatively correlated with the relative humidity. The higher the relative humidity is, the lower are the ozone and 90th percentile concentrations in Hong Kong. ⑤ When ozone pollution occurs in Hong Kong, prevailing winds tend to shift from northerly or easterly to westerly. In addition, with the increase of the wind speed, the average ozone concentration changes little, but the 90th percentile ozone concentration significantly decreases. ⑥ Precipitation and cloud cover are important factors affecting the ozone concentration. Weather conditions without or with little rain for many consecutive days are necessary for the occurrence of ozone pollution events. However, with the increase of the cloud cover, the average ozone and 90th percentile concentrations continue to decrease. ⑦ In the case of a total solar radiation $\leq 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ or sunshine duration $\leq 10 \text{ h}$, the ozone concentration is positively correlated with the solar radiation and sunshine duration. However, in the case of intense solar radiation (total solar radiation $> 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ or duration of sunshine $> 10 \text{ h}$), the ozone concentrations decrease with increasing solar radiation or duration because strong solar radiation often occurs in the background of sunny weather after rain. At the same time, southerly winds from the sea often prevail, making it difficult for ozone pollution to occur in Hong Kong. ⑧ Ozone excess days in Hong Kong are often accompanied by changes of a series of meteorological conditions including less rain on sunny days, stronger radiation, higher boundary layer height, lower relative humidity, smaller wind speeds, and higher temperatures. The end of the pollution process is accompanied by the opposite weather changes.

Key words: Hong Kong; ozone pollution; meteorological factors; temperature; relative humidity; solar radiation; wind speed

收稿日期: 2018-03-22; 修订日期: 2018-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212600); 国家自然科学基金项目(41773127, 41807309); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(PM-zx703-201601-019)

作者简介: 赵伟(1984~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空气污染气象学, E-mail: zhaowei@scies.org

* 通信作者, E-mail: eesfsj@mail.sysu.edu.cn

近地面臭氧(O₃)作为一种二次污染物,主要是通过自然排放和人为排放的前体物,包括挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)等,在太阳辐射作用下发生光化学过程反应生成的^[1,2].有研究表明,光化学过程是近地面臭氧最主要的来源,其贡献是平流层臭氧输送通量的7~15倍^[3].高浓度的臭氧会通过呼吸系统影响人体健康^[4~7],还会对农作物、森林等造成严重的危害,影响农作物的产量,抑制森林的生长^[8~10].除此之外,对流层的臭氧还是一种温室气体,能够影响大气的辐射收支,据政府间气候变化专业委员会(IPCC)^[11]估算,臭氧造成的全球平均辐射强迫为(0.40±0.20)W·m⁻².

臭氧的生成主要受前体物排放和大气化学过程控制,但局地臭氧浓度的变化会受到气象因素的显著影响^[12~14],臭氧污染事件的发生往往是由高强度的排放和不利的天气条件共同造成的^[15,16].一般认为,臭氧污染事件常出现在气温高、辐射强、相对湿度小的条件下^[17~19],但受多种因素影响,不同地区光化学污染和气象条件之间的关系会有所不同,甚至有较大的差异^[15,20,21].一方面,影响城市和郊区臭氧污染的主要气象因子不同,美国的研究表明,气温是影响城市臭氧污染的主要气象因子,而风速、风向则是影响郊区臭氧浓度的主要因子^[20].另一方面,不同地区臭氧污染的影响因素也不同,有研究表明,相对湿度因子在美国东南部地区的作用更重要,而影响东北部区域臭氧浓度最主要的气象因子是气温^[15];此外,不同季节的情况也会有差异,有研究指出,北京地区臭氧浓度变化与气象因素的关系在不同季节有差异,其中在夏季与温度相关性较高,在冬季与风速相关性较高^[21];在

欧洲地区的研究发现,春季太阳辐射对臭氧浓度的作用要大于气温,而在夏季,气温反而成为最主要的影响要素^[22];Zhao等^[23]发现在香港地区臭氧极端重污染事件中,辐射相关因子的作用显著增强.

近年来,我国的臭氧污染问题不断凸显,特别是在京津冀、长三角和珠三角地区,臭氧污染最为严重^[24~28].由于我国大陆的臭氧监测工作起步较晚,绝大部分城市自2013年才开始对臭氧进行常规监测,而香港地区在20世纪90年代初就开展了臭氧的例行监测,积累了大量的历史数据,本研究将基于香港地区2000~2015年的6个站点臭氧逐时监测数据,分析气象因子对香港地区臭氧污染过程的影响,并探讨臭氧浓度与多种气象因子之间关系,以期为我国其他沿海城市的臭氧污染防治工作提供参考.

1 材料与方法

1.1 环境空气质量数据

本研究收集了2000~2015年香港地区6个环境空气质量自动监测站(包括东涌、元朗、塔门、中西区、葵涌和东区站)逐时臭氧浓度逐时数据.

香港地区6个空气质量监测站中,中西区站、东区和葵涌站位于香港中心城区,周边是成熟的商业区;元朗和东涌站位于郊区,但周边近年来发展迅速;塔门站位于香港的东北端,周边属于乡村地区,基本没有开发.总的来说,研究选取的6个监测站从西到东,从市区、郊区到乡村,覆盖了香港地区各种不同类型的下垫面,具有很高的代表性.

香港地区6个监测站的详细信息见表1和图1,监测数据来源于香港环保署(<http://epic.epd.gov.hk>).

表1 空气质量监测站基本信息

Table 1 Basic conditions at the air quality stations

序号	站点	英文名称	土地利用类型	站点高度/m
1	东区站	Eastern	市区;居住区	18
2	中西区站	Central/Western	市区;居住区	18
3	葵涌站	Kwai Chung	市区;居住、商业、工业混合区	13
4	东涌站	Tung Chung	郊区;居住区	21
5	元朗站	Yuen Long	郊区;居住区	25
6	塔门站	Tap Mun	农村地区	11

1.2 气象观测数据

本研究收集了2000~2015年香港国际机场基准气象站的地面气象数据,包括气温、气压、风向、

风速、总云量、相对湿度、降雨量等参数;同时还收集了2000~2015年京士柏气象站的日照时长数据.气象站基本情况见表2,空间分布见图1.

表2 气象站基本情况

Table 2 Basic condition at the weather stations

气象站	英文名称	气象参数
国际机场站	Hong Kong International Airport	气温、气压、风向、风速、总云量、相对湿度、降雨量
京士柏	King's Park	日照时长

本研究所用气象数据主要来源于美国国家气候数据中心 (NOAA's National Climatic Data Center, NCDC) 和香港天文台.

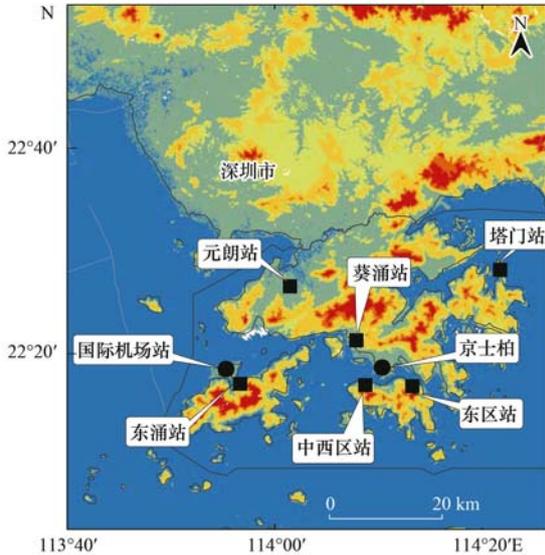


图1 空气质量监测站点及气象站分布
Fig. 1 Distribution of air quality monitoring and meteorological stations

1.3 ERA-Interim 再分析数据

ERA-Interim 再分析资料是欧洲中期天气预报中心使用目前业务运行的预报模式 IFS (Integrated Forecasting System), 采用四维变分同化技术, 将地面、高空常规观测数据以及卫星遥感数据同化在一起建立的数值产品^[29]. IFS 模型在垂直方向上包含 60 层, 最高层到达 0.1 hPa, 水平网格采用约 79 km 的经纬度网格. ERA-Interim 提供每天 4 次的同化分析数据, 分别为 00:00、06:00、12:00 和 18:00(世界时).

本研究使用了 2000 ~ 2015 年 ERA-Interim 再分析资料中香港区域格点的边界层高度、地面短波辐射和地面长波辐射 3 个参数的数据.

2 结果与讨论

2.1 香港地区臭氧污染特征

2000 ~ 2015 年香港地区的日最大 8 h 平均浓度

(MDA8) 多年平均值为 $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧 MDA8 第 90 百分位数浓度的多年平均值为 $105 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2015 年香港地区的臭氧 MDA8 的全年平均值为 $68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2015 年臭氧 MDA8 第 90 百分位数浓度为 $118 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于同期珠三角的臭氧污染平均水平 ($145 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[30].

2000 ~ 2015 年香港地区臭氧浓度呈现出明显的季节变化特征(图 2), 其中秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季, 从月浓度来看, 臭氧最大月均浓度出现在 10 月, 最小月均浓度出现在 7 月.

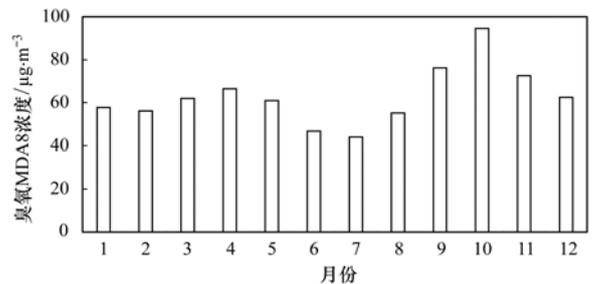


图2 2000 ~ 2015 年香港地区臭氧 MDA8 浓度年变化廓线
Fig. 2 Annual variation of the ozone MDA8 concentrations in Hong Kong from 2000 to 2015

监测数据表明, 2000 ~ 2015 年香港地区一共发生了 51 个臭氧超标日 (MDA8 浓度 $> 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其中 2012 年、2014 年和 2015 年发生超标日数最多, 各发生了 8 次, 其次是 2004 年和 2011 年, 各发生了 5 次, 其他年份超标日数较少(图 3).

从年变化来看, 臭氧超标日出现在 4 ~ 11 月, 其中 8 月出现的比例最高, 达到 35%, 其次是 9 月, 出现比例达到 25%, 7 月和 10 月的比例分别为 16% 和 10%. 从季节分布来看, 臭氧超标日主要集中在夏季, 出现比例高达 59%, 其次是秋季, 出现比例为 37%, 臭氧超标日发生在冬季和春季的情形很少, 合计为 4%(图 4).

2000 ~ 2015 年香港地臭氧 MDA8 的年平均浓度和 MDA8 的第 90 百分位数浓度的变化趋势如图 5 所示, 总的来看, 二者的变化特征基本一致, 总

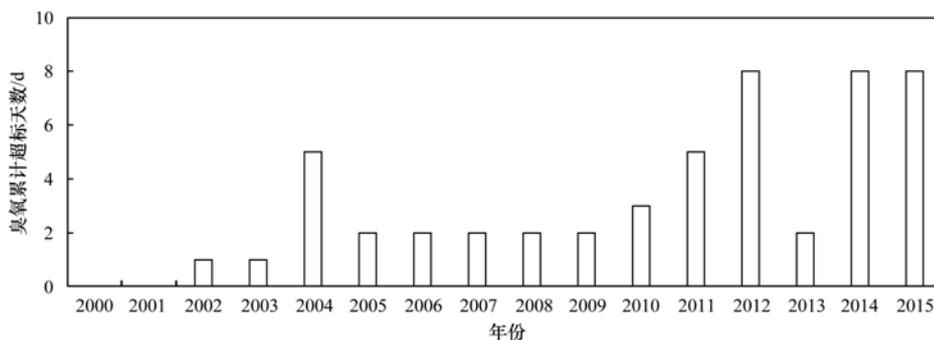


图3 2000 ~ 2015 年香港地区臭氧累计超标日年际变化

Fig. 3 Interannual variation of the ozone excess days in Hong Kong from 2000 to 2015

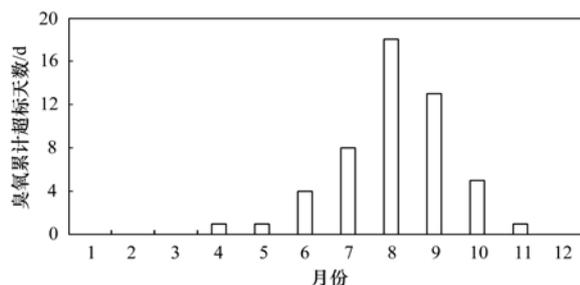


图4 2000~2015年香港地区臭氧累计超标日数年变化

Fig. 4 Annual variation of the ozone excess days in Hong Kong from 2000 to 2015

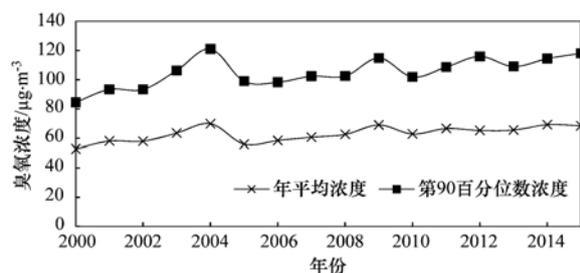


图5 2000~2015年香港臭氧MDA8年均浓度及其第90百分位数浓度变化

Fig. 5 Annual ozone MDA8 concentration and its 90th percentile concentration change in Hong Kong from 2000-2015

表3 2000~2015年香港臭氧MDA8年均浓度及其第90百分位数浓度的秩相关系数、*P*值和年增长率

Table 3 Rank correlation coefficients, *P* values, and annual growth rates of the annual ozone MDA8 and its 90th percentile concentrations in Hong Kong from 2000-2015

参数	秩相关系数	<i>P</i> 值	年增长率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$
臭氧MDA8年平均浓度	0.64	<0.01	0.77
臭氧MDA8第90百分位数浓度	0.68	<0.01	1.49

氧浓度增加,另外气温的升高往往伴随着辐射的增强、水汽的减少,并有利于异戊二烯的自然排放,这些因素共同作用导致气温增加的同时臭氧浓度也随着增加^[16, 33]。

从2000~2015年香港夏秋季的监测数据来看(表4),在20~25℃区间,香港地区臭氧MDA8的平均浓度最高,达到 $78\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其次是25~30℃区间,平均臭氧浓度为 $64\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,然后是>30℃的高温区间,臭氧MDA8的平均浓度为 $60\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最后是15~20℃和≤15℃两个区间。考虑到香港地区夏秋季绝大多数情况(97%)气温均大于20℃,在此

体呈波动中上升趋势。

为了进一步量化臭氧的变化趋势,本研究基于Sperman秩相关系数和拟合线性回归方程的斜率来判定香港地区臭氧浓度的历史变化趋势及臭氧年增长速率^[31]。结果表明(表3),2000~2015年香港地区臭氧MDA8年浓度呈增长趋势,臭氧年浓度平均增长速率为 $0.77\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$;臭氧MDA8第90百分位数浓度同样呈增长趋势,年均增长速率为 $1.49\ \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 。有研究指出,近年来香港臭氧浓度逐年增加的现象可能与区域输送的影响有关^[32]。

2.2 香港臭氧浓度与主要气象因子之间的关系

考虑到香港地区的臭氧超标日主要出现在夏季和秋季,为了避免季节因素的干扰,本节在研究气象因子与臭氧污染的关系时主要利用夏季和秋季的监测数据进行分析。

2.2.1 臭氧浓度与气温的关系

很多研究表明,气温是影响臭氧浓度最主要的一个气象要素,气温越高,臭氧的浓度也随着升高,因为气温的升高导致臭氧前体物的主要汇项——过氧酰基硝酸酯(PAN)浓度降低,从而使臭

情况下,随着气温的升高,臭氧平均浓度反而降低。这说明高温天气并不一定带来高浓度臭氧污染,这可能与高温天气发生时可能伴随的其他气象不利条件,比如降雨、高湿度、大风等有关。

从气温与臭氧MDA8浓度的相关性来看,气温与臭氧浓度并不是简单的正相关关系,在不同的气温区间二者呈不同的相关性。由表4可见,在出现频率最高的25~30℃区间,气温与臭氧浓度间呈负相关关系(秩相关系数 = -0.28 , $P < 0.01$),除此在外,在其他4个气温区间,臭氧浓度与气温间均呈正的相关关系。

表4 不同气温区间臭氧浓度和秩相关系数

Table 4 Ozone concentration and rank correlation coefficient for different temperature ranges in summer and autumn

日均气温/℃	频率/%	臭氧MDA8平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第90百分位臭氧浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
>30	25.62	60	0.24 ($P < 0.01$)	126
25~30	58.34	64	-0.28 ($P < 0.01$)	116
20~25	13.14	78	0.18 ($P < 0.01$)	110
15~20	2.76	59	0.19 ($P = 0.09$)	88
≤15	0.14	36	0.95 ($P = 0.05$)	—
全部	100	65	-0.23 ($P < 0.01$)	116

除了臭氧的平均浓度, 人们更加关注高分位数臭氧浓度的情况, 将不同气温区间及其对应的第 90 百分位数臭氧浓度进行分析, 研究发现随着气温的升高, 其对应的第 90 百分位数浓度随着升高. 以上分析说明, 气温越高越容易导致更高浓度臭氧污染的发生, 虽然其对应的臭氧平均浓度不一定升高, 因此, 较高的气温是臭氧污染发生的必要条件.

2.2.2 臭氧浓度与相对湿度的关系

相对湿度是影响臭氧浓度的另一个重要因素, 从 2000 ~ 2015 年香港夏秋季的监测数据来看(表 5), 在 50% ~ 60% 区间, 香港地区臭氧 MDA8 的平均浓度最高, 达到 $104 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其次是 $\leq 50\%$ 区间, 平均臭氧浓度为 $96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 然后是 60% ~ 70%、70% ~ 80%、80% ~ 90% 和 $> 90\%$ 的区间. 由于夏秋季绝大多数情况下(97%)的相对湿度均

大于 50%, 因此, 一般情况下, 相对湿度越高, 臭氧的平均浓度越低.

从相对湿度与臭氧 MDA8 浓度的相关性来看, 在绝大多数情况下, 相对湿度与臭氧浓度间呈负相关关系. 只在小于 60% 的相对湿度时, 二者呈正相关关系, 但是这种低湿度情况在香港夏秋季出现的频率不高, 仅为 11% 左右.

同时, 高分位臭氧浓度与相对湿度之间也呈现类似的关系, 除相对湿度 $\leq 50\%$ 的少数情况外, 一般情况下, 随着相对湿度的升高, 其对应的第 90 百分位数浓度不断降低. 以上分析说明, 相对湿度越高, 臭氧平均浓度越低, 同时越不容易发生臭氧污染事件. 这是因为相对湿度越高, 降水的概率就会越高, 湿清除作用会迅速地降低臭氧的浓度.

表 5 夏秋季不同相对湿度区间臭氧 MDA8 浓度和秩相关系数

日均相对湿度 /%	频率 /%	臭氧 MDA8 平均浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第 90 百分位臭氧浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
> 90	0.51	34	$-0.05 (P=0.86)$	67
80 ~ 90	14.16	38	$-0.19 (P<0.01)$	64
70 ~ 80	44.31	54	$-0.21 (P<0.01)$	95
60 ~ 70	29.58	81	$-0.38 (P<0.01)$	127
50 ~ 60	8.08	104	$0.07 (P=0.31)$	141
≤ 50	3.36	96	$0.23 (P<0.05)$	139
全部	100	65	$-0.60 (P<0.01)$	116

另一方面, 在非降水期间, 相对湿度的增加同样会造成臭氧浓度的显著降低(表 6), 这说明除了雨水的冲刷作用外, 相对湿度还可能通过其它机制抑制臭氧的生成和累积. 从气象方面来看, 相对湿度增大时, 往往伴随着云量增多、风速增大等不利

于臭氧生成和污染累积的气象条件, 导致臭氧浓度降低^[15]; 其次, 化学机制方面的相关研究认为, 在污染较重的城市地区, 由于大量臭氧前体物的存在, 水汽的增加会促进 NO_2 转换为硝酸, 从而抑制臭氧的生成^[16].

表 6 夏秋季无降水日不同相对湿度区间臭氧 MDA8 浓度和秩相关系数

日均相对湿度 /%	频率 /%	臭氧 MDA8 平均浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第 90 百分位臭氧浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
> 80	1.01	45	$-0.34 (P=0.16)$	80
70 ~ 80	36.30	60	$-0.16 (P<0.01)$	100
60 ~ 70	44.18	82	$-0.39 (P<0.01)$	128
50 ~ 60	13.06	103	$0.04 (P=0.59)$	140
≤ 50	5.46	97	$0.24 (P<0.05)$	139
全部	100	77	$-0.51 (P<0.01)$	127

2.2.3 臭氧浓度与风向、风速的关系

风向与风速影响臭氧污染物的输送和扩散, 由于香港面向大海, 背靠珠三角, 不同的风场会显著地影响到香港的臭氧浓度. 2000 ~ 2015 年的气象数据表明, 香港地区全年盛行偏东风, 而臭氧超标日出现最多的夏季和秋季则盛行偏东风和偏南风(图 6).

然而, 当发生臭氧污染时, 香港本地的盛行风从前一天的偏北风或偏东风转为偏西风(图 7), 这与邻近的深圳市的情况类似^[34]. 本研究选取的气象站位于香港西部边缘地区, 偏西风是海风的风向, 说明香港臭氧污染严重时, 海陆风现象较为强烈, 珠三角地区及其他地区的臭氧及其前体物可能通过珠江口吹向两岸的海风输送到香港地区. 另一

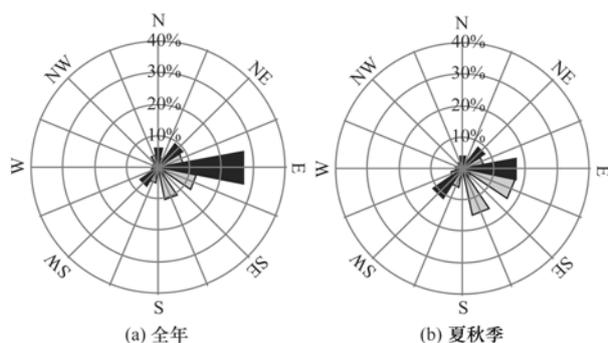


图 6 香港风玫瑰图

Fig. 6 Wind rose chart for Hong Kong

方面,海陆风发生时一般伴随着天气晴朗、风速较小等气象条件,这些因素也有利于臭氧的生成和积累。

从香港地区臭氧浓度与日均风速的关系来看(表 7),在风速 $\leq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间,香港地区臭氧 MDA8 的平均浓度最高,达到 $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其次是 $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间,平均臭氧浓度为 $68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,此后,随着风速的增加,臭氧平均浓度继续降低,但是下降速度缓慢。从相关系数来看,风速与臭氧浓度的相关性并不显著。

表 7 夏秋季不同风速区间臭氧浓度和秩相关系数

Table 7 Ozone concentration and rank correlation coefficient for different wind speed ranges in summer and autumn

日均风速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	频率 /%	臭氧 MDA8 平均浓度 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第 90 百分位臭氧浓度 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
> 6	13.76	59	0.01 ($P = 0.89$)	98
$5 \sim 6$	16.53	61	-0.05 ($P = 0.28$)	107
$4 \sim 5$	24.49	65	-0.04 ($P = 0.32$)	114
$3 \sim 4$	28.21	67	0.03 ($P = 0.42$)	121
$2 \sim 3$	16.60	68	-0.01 ($P = 0.89$)	132
≤ 2	0.41	90	-0.22 ($P = 0.50$)	167
全部	100	65	-0.05 ($P < 0.01$)	116

为了更进一步研究风场对香港地区臭氧污染的影响,利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA ARL)提供的 GDAS 数据,结合 Hysplit4 软件对香港站点 2000~2015 年发生的 51 次臭氧超标日进行 48 h 后向轨迹反演模拟,污染气流起始点坐标为 22.309°N , 113.922°E ,高度设置为 500 m,根据计算结果对轨迹进行聚类分析,聚类为 8 种后向轨迹,具体如图 8 所示。

后向轨迹结果表明,香港地区出现臭氧超标日时,有一半以上的气流从江西等地进入广东及珠三角,然后到达香港地区,其次有 20% 的气流直接来自于珠三角地区,有 8% 的气流从福建进入粤东、珠三角以及香港地区,还有 8% 超标日的气流来自于南部海洋,最后有 4% 的臭氧污染气流从粤西进入珠三角和香港地区。

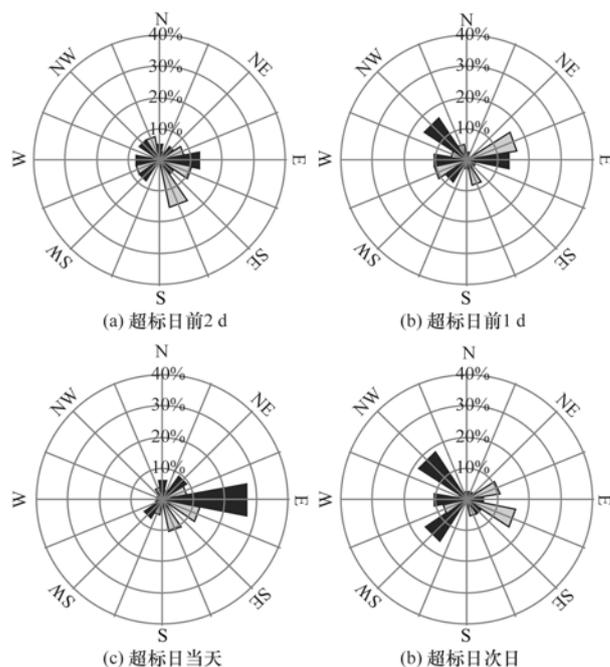


图 7 臭氧超标日前后 4 d 风玫瑰图

Fig. 7 Wind rose chart before and after ozone excess days

高分位臭氧浓度与风速的关系更加明显,随着风速的增加,其对应的第 90 百分位数浓度明显降低,说明低风速更容易导致高浓度的臭氧污染。

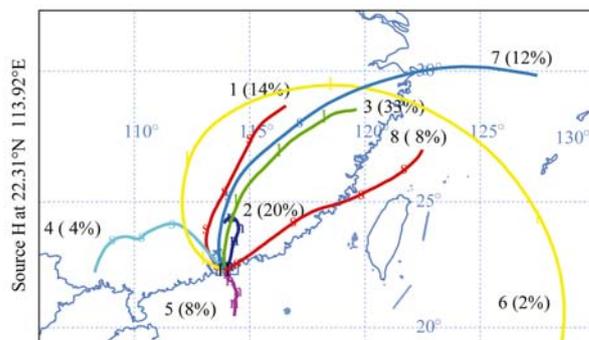


图 8 2000~2015 年香港地区臭氧超标日的 48 h 后向轨迹聚类图

Fig. 8 Cluster of 48 h back trajectories arriving in Hong Kong for ozone excess days, 2000-2015

结合臭氧超标日的后向轨迹结果和地面风场情况,可以进一步推断,香港地区的臭氧超标日发生时,臭氧及其前体物主要从江西、福建等地途经珠

三角地区, 然后随着偏西海风从珠江口海面进入香港地区. 这也说明由于香港地区的臭氧前体物排放较少, 本地直接生成的臭氧贡献比例不大, 臭氧污染受珠三角地区污染输送作用的影响明显^[35,36].

2.2.4 臭氧浓度与降水量的关系

降水是影响臭氧浓度的另一个重要因素, 从香港地区臭氧浓度与降水量的关系来看, 在 2000 ~ 2015 年发生的 51 个臭氧超标日中, 只有 5d 发生了降水, 最大日降水量仅为 4.4 mm, 51 个臭氧超标日中, 连续 3d 的累计降水量均小于 25 mm, 说明连续多日的无雨或少雨天气是臭氧污染事件发生的必要条件.

香港地区臭氧浓度与日降雨量的关系来看(表 8), 晴天香港地区臭氧 MDA8 的平均浓度最高, 达到 77 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 其次是在日降水 < 5 mm 的情况下,

浓度为 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 在出现暴雨(日降水 50 ~ 100 mm)和大暴雨(日降水 > 100 mm)的情况下, 臭氧浓度最低, 仅为 39 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 36 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从相关系数来看, 降雨量与臭氧 MDA8 浓度之间呈显著的负相关关系(秩相关系数 = -0.46, $P < 0.01$).

从高分位臭氧浓度与降雨量的关系来看, 晴天臭氧第 90 百分位数浓度最高, 达到 127 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其次是在日降水 < 5 mm 的情况下, 浓度为 90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 在出现暴雨(日降水 50 ~ 100 mm)和大暴雨(日降水 > 100 mm)的情况下, 臭氧第 90 百分位数浓度最低, 仅为 62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

总的来说, 雨天大气光化学反应极弱, 同时降雨的湿清除作用明显, 导致臭氧不容易生成和积累, 这也是香港及珠三角地区臭氧的夏季平均浓度较低的主要原因.

表 8 夏秋季不同降水区间臭氧浓度和秩相关系数

日降水 /mm	频率 /%	臭氧 MDA8 平均浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第 90 百分位臭氧浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
>100	1.38	36	-0.08 ($P=0.65$)	57
50~100	2.99	39	0.04 ($P=0.73$)	62
25~50	5.24	43	-0.09 ($P=0.22$)	80
10~25	9.10	44	0.02 ($P=0.71$)	76
5~10	6.07	43	-0.18 ($P<0.05$)	78
0~5	20.56	50	-0.12 ($P<0.01$)	90
晴天	69.99	77		127
全部	100	65	-0.46 ($P<0.01$)	116

2.2.5 臭氧浓度与云量的关系

2000 年 ~ 2015 年香港地区夏秋季臭氧浓度与云量监测数据表明(表 9), 当云量 ≤ 2 成时, 臭氧 MDA8 浓度最高, 达到 107 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 此后随着云量

的增加, 臭氧 MDA8 浓度不断降低, 在云量 > 6 成时, 臭氧 MDA8 浓度平均值为 45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 总的来说, 二者呈现出较好的负相关关系(秩相关系数 = -0.47, $P < 0.01$).

表 9 夏秋季不同云量区间臭氧浓度和秩相关系数

云量 /成	频率 /%	臭氧 MDA8 平均浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第 90 百分位臭氧浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
>6	23.36	45	-0.18 ($P<0.01$)	80
5~6	10.79	53	-0.01 ($P=0.82$)	94
4~5	16.19	60	0.07 ($P=0.14$)	104
3~4	22.10	67	-0.14 ($P<0.01$)	114
2~3	18.61	81	-0.12 ($P<0.01$)	132
≤ 2	8.95	107	0.05 ($P=0.45$)	145
全部	100	65	-0.47 ($P<0.01$)	116

高分位臭氧浓度与云量之间同样存在上述负相关关系, 即随着云量的增加, 臭氧第 90 百分位数浓度持续降低, 当云量 ≤ 2 成时, 臭氧第 90 百分位数浓度为 145 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 至云量 > 6 成时, 臭氧第 90 百分位数浓度为 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2.6 臭氧浓度与太阳总辐射、日照时长的关系

香港地区 2000 ~ 2015 年的监测数据表明, 太

阳总辐射和日照时长两个参数的关系密切, 它们呈现出极强的正相关性(秩相关系数 = 0.91, $P < 0.01$). 因此, 本节将这二者与臭氧浓度的关系一并讨论.

香港地区臭氧浓度与太阳总辐射量的关系来看(表 10 和图 9), 太阳总辐射量在 15 ~ 20 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 区间, 臭氧 MDA8 浓度最高, 达到 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 其次

是在 $10 \sim 15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 区间, 平均浓度为 $66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 再其次是太阳辐射最强的区间 ($>20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), 平均浓度为 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 最后是太阳辐射最弱的区间 ($\leq 10 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), 平均浓度为 $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

从高分位臭氧浓度与太阳辐射量的关系来看, 二者之间存在同样的上述关系, 即臭氧第 90 百分位数浓度最高的情况出现在 $15 \sim 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 区间, 而不是在太阳辐射最强的区间,

表 10 夏秋季不同太阳总辐射量区间臭氧浓度、秩相关系数

总辐射量 / $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	频率 /%	臭氧 MDA8 平均浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第 90 百分位臭氧浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
>20	23.36	60	$-0.35 (P < 0.01)$	118
$15 \sim 20$	30.64	80	$0.06 (P = 0.05)$	131
$10 \sim 15$	21.99	66	$0.15 (P < 0.01)$	110
≤ 10	24.01	49	$0.20 (P < 0.01)$	87
全部	100	65	$0.13 (P < 0.01)$	116

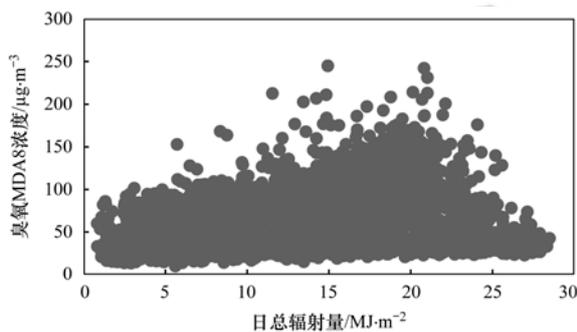


图 9 夏秋季臭氧 MDA8 浓度与太阳总辐射量的散点图

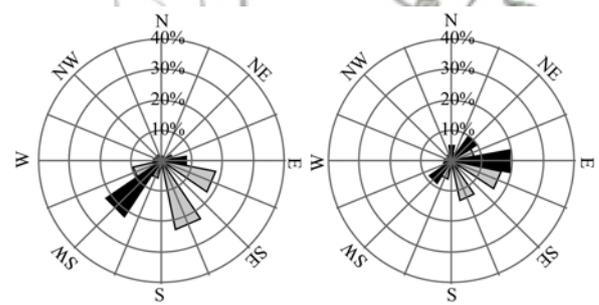
Fig. 9 Scatter diagram of the ozone MDA8 concentration and total solar radiation in summer and autumn

为何在太阳辐射强烈时臭氧浓度反而下降, 本研究认为这种现象可能与两方面因素有关: 一是太阳辐射强烈 (总辐射量 $>20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) 的情况常出现在雨后天晴的背景下, 降水对气溶胶的湿清除提高了大气透明度, 导致雨后的太阳辐射明显加强^[37]. 监测数据表明, 在无降雨的背景下, 当日总辐射量 $>20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 前 2 d 的累计降雨量为 8.19 mm , 而当日总辐射量 $\leq 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 的背景下, 前 2 d 的累计降雨量为 4.88 mm , 说明了太阳辐射强烈与降雨过程有关. 而降水的湿清除作用大幅降低了臭氧及其前体物的浓度, 从而导致放晴后空气中的臭氧污染较轻. 另一方面, 香港地区太阳辐射强烈的时候往往吹偏南风 (图 10), 来自海洋的清洁空气会使得香港的臭氧污染得以稀释, 这也是香港夏季臭氧平均浓度低的另一个原因.

臭氧浓度与日照时长的关系与太阳辐射的情况类似 (表 11 和图 11), 即臭氧浓度最高的情况出现在 $8 \sim 10 \text{ h}$ 的太阳日照区间, 而不是在日照最长的区间, 而臭氧浓度最低的情况则出现在日照时长最

而臭氧第 90 百分位数浓度最低的情况则在太阳辐射最弱的区间.

从相关系数来看, 太阳总辐射量与臭氧 MDA8 浓度之间呈正相关关系 (秩相关系数 = 0.13 , $P < 0.01$), 但在不同辐射情况下有明显差异, 特别是在太阳辐射最强的区间 ($>20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), 二者间反而呈现出显著的负相关关系 (秩相关系数 = -0.35 , $P < 0.01$).



(a) 日总辐射量 $>20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$

(b) 日总辐射量 $\leq 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$

图 10 夏秋季不同太阳辐射强度日的风玫瑰图

Fig. 10 Wind rose charts for different solar radiation intensity days in summer and autumn

短区间. 高分位臭氧浓度与日照时长之间存在同样的关系.

从相关系数来看, 日照时长与臭氧 MDA8 浓度之间呈正相关关系 (秩相关系数 = 0.25 , $P < 0.01$), 但是在日照时长最长的区间 ($>10 \text{ h}$), 二者间反而呈现出显著的负相关关系 (秩相关系数 = -0.30 , $P < 0.01$). 这种现象出现的原因与上述的太阳辐射的情况类似, 不再赘述.

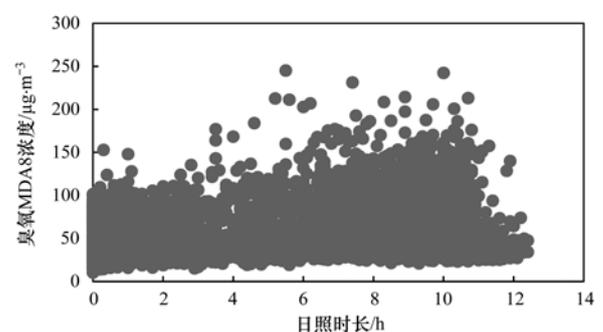


图 11 夏秋季臭氧 MDA8 浓度与日照时长的散点图

Fig. 11 Scatter plot of the ozone MDA8 concentration and sunshine duration in summer and autumn

表 11 夏秋季不同日照时长区间臭氧浓度和秩相关系数

Table 11 Ozone concentration and rank correlation coefficient for different sunshine ranges in summer and autumn

日照时长 /h	频率 /%	臭氧 MDA8 平均浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	秩相关系数	第 90 百分位臭氧浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
>10	15.92	67	-0.30 ($P < 0.01$)	126
8~10	22.58	81	0.06 ($P = 0.16$)	132
6~8	15.20	75	0.00 ($P = 0.94$)	128
4~6	11.71	62	0.03 ($P = 0.52$)	112
2~4	10.38	55	0.09 ($P = 0.13$)	96
≤ 2	24.21	48	0.13 ($P < 0.01$)	87
全部	100	65	0.25 ($P < 0.01$)	116

2.3 臭氧超标日前后的气象变化

上文分析了 2000~2015 年香港臭氧浓度与多种气象参数之间的一一对应的关系性，本节从污染过程的角度，关注臭氧超标日前后各种气象要素的综合变化情况。

首先，将 2000~2015 年香港地区 51 次臭氧超标日及其前后各两天的气象数据进行平均(表 12)，结果表明，香港地区的臭氧超标日当天晴天少雨，日平均气温为 30.2℃，平均相对湿度为 66%，平均日照时间达到 8.1 h，日均太阳总辐射为 18.1 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表 12 臭氧超标日前后 5d 的气象要素

Table 12 Variation of meteorological elements five days before and after ozone excess days

参数	前 2 d	前 1 d	超标日	后 1 d	后 2 d
MDA8/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	77	100	184	118	81
平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3.8	3.4	3.2	4.4	4.7
雨量/mm	3.10	1.35	0.18	5.26	17.16
平均气温/℃	28.7	29.1	30.2	29.8	29.1
平均气压/hPa	1 007	1 007	1 005	1 005	1 006
相对湿度/%	69	68	66	68	72
云量/成	3.8	3.4	2.8	3.5	4.0
边界层高度/m	1 119	1 227	1 305	1 158	1 028
日照时间/h	6.1	7.3	8.1	6.1	4.6
总辐射量/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	16.1	17.5	18.1	15.9	13.6

为了方便直观地比较臭氧超标日发生、消亡过程伴随的气象条件变化情况，本研究将臭氧超标日前后共 5 d 的气象参数进行简单的标准化处理，标准化公式如下：

$$\text{标准化数据} = \frac{\text{原始数据}}{\text{原始数据均值}} \times 100$$

经过标准化处理后，臭氧超标日前后 5 d 的气象参数变化如图 12 所示。臭氧超标日的出现伴随

着一系列气象条件的变化，包括相对湿度降低、总辐射量增加、边界层高度抬升、气温升高、云量减少、日照时间延长、风速降低、降雨减少等。臭氧超标日结束的气象变化情况则正好相反，表现为相对湿度增加、总辐射量减少、边界层高度降低、气温降低、云量增加、日照时间变短、风速增加、降雨增加等，但是与污染形成过程相比，结束过程的气象要素变化速度更快。

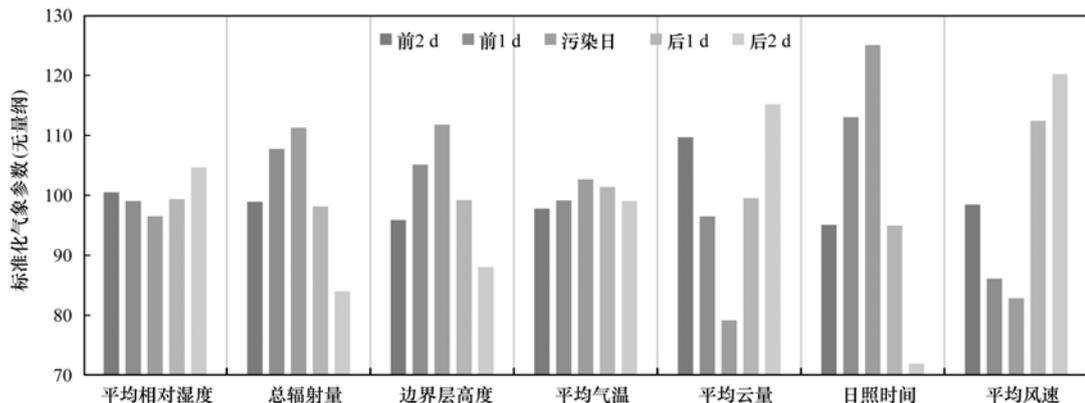


图 12 臭氧超标日前后 5 d 的标准化气象变化

Fig. 12 Variation of standardized meteorological elements five days before and after ozone excess days

另一方面, 通过对比香港臭氧超标日与全年的臭氧逐时浓度变化廓线可见(图 13 和图 14), 臭氧超标日的浓度峰值出现在下午 15:00, 谷值出现在早晨 08:00 左右, 但明显不同的是, 臭氧超标日的臭氧小时峰值平均为 $215 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远远大于全年平均的峰值($62 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 而二者的臭氧谷值浓度则差距不

大, 这导致超标日的峰值浓度是谷值浓度的 7.3 倍, 远远大于全年平均情况下的 2.2 倍. 这个现象说明受晴天少雨、太阳辐射强烈、相对湿度较低、边界层高度抬升、风速变小等气象条件影响, 香港地区臭氧超标日的光化学生成反应激烈, 臭氧得以迅速生成和并不断积累, 从而出现了臭氧污染事件.

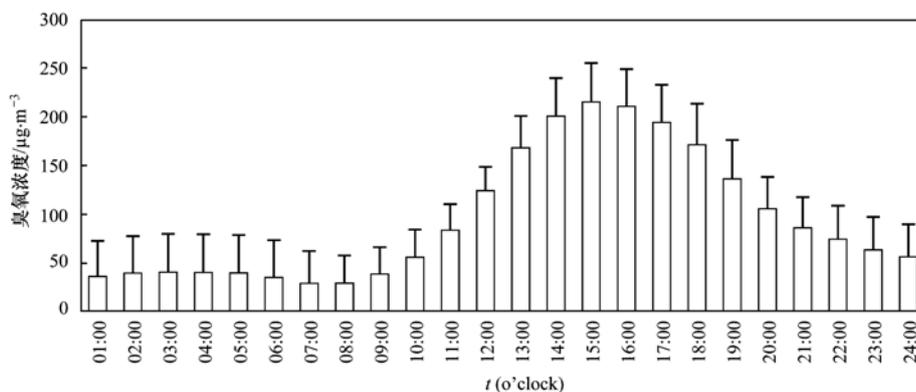


图 13 2000 ~ 2015 年香港地区臭氧超标日的浓度日变化廓线

Fig. 13 Diurnal variation profile of the ozone concentration in Hong Kong during the ozone excess days, 2000-2015

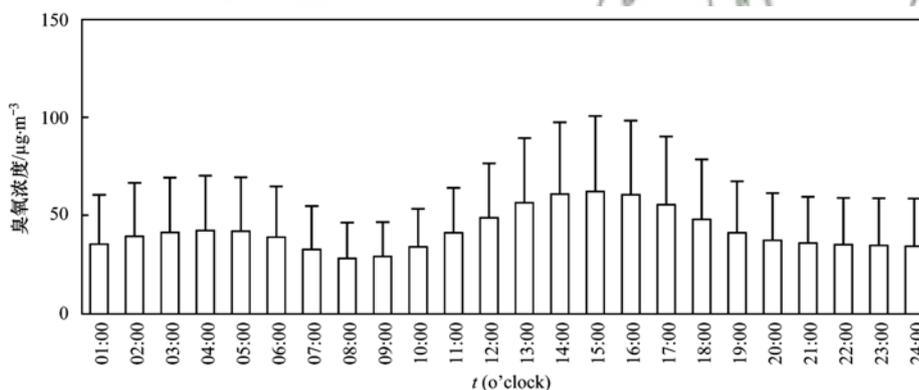


图 14 2000 ~ 2015 年香港地区臭氧浓度平均日变化廓线

Fig. 14 Diurnal variation profile of the ozone concentration in Hong Kong, 2000-2015

3 结论

(1) 2000 ~ 2015 年香港地区臭氧 MDA8 浓度平均值为 $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 臭氧 MDA8 第 90 百分位数浓度的多年平均值为 $105 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 香港臭氧污染呈现明显的季节变化特征, 其中秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季. 香港的臭氧超标日主要集中在夏季, 出现比例高达 59%, 其次是秋季, 出现比例为 37%, 超标日发生在冬季和春季的情形极少.

(2) 2000 ~ 2015 年香港臭氧 MDA8 年均浓度呈增长趋势, 平均增长速率为 $0.77 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, 臭氧 MDA8 第 90 百分位浓度同样呈增长趋势, 增长速率为 $1.49 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$.

(3) 臭氧浓度与气温之间并不是简单的正相关关系, 在不同的气温区间二者呈不同的相关性, 但是较高的气温仍然是香港地区臭氧污染发生的必要

条件, 气温越高越容易导致更高浓度臭氧污染的发生. 在绝大多数情况下, 相对湿度与臭氧浓度间呈负相关关系, 即相对湿度越高, 香港地区的臭氧平均浓度及第 90 百分位数浓度均会降低.

(4) 风速和风向会影响臭氧及其前体物的输送, 是影响地区臭氧浓度的重要因素. 当香港发生臭氧污染时, 盛行风往往从前一天的偏北风或偏东风转为偏西风. 随着风速的增大, 臭氧平均浓度变化不大, 但臭氧第 90 百分位数浓度会明显降低, 说明低风速是臭氧污染发生的必要条件.

(5) 降水和云量也是影响臭氧浓度的重要因素. 连续多日的无雨或少雨天气是臭氧污染事件发生的必要条件, 这是因为雨天大气光化学反应极弱, 同时降雨的湿清除作用明显, 导致臭氧不容易生成和积累, 这也是香港及珠三角地区臭氧的夏季平均浓度低的主要原因. 臭氧平均浓度和高分位臭

氧浓度与云量之间存在负相关关系, 随着云量的增加, 臭氧平均浓度和第 90 百分位数浓度会持续降低。

(6) 臭氧浓度与太阳辐射的关系较复杂。在太阳总辐射量 $\leq 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 或日照时长 $\leq 10 \text{ h}$ 情况下, 臭氧浓度与太阳辐射及日照时长呈正相关关系, 即随着太阳总辐射量或日照时长的增加, 臭氧平均浓度也随着增加。然而, 在太阳辐射强烈的情况下(太阳总辐射量 $> 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 或日照时长 $> 10 \text{ h}$), 随着辐射的增强或日照时长的增加臭氧平均浓度反而降低, 这是因为太阳辐射强烈的情况常出现在雨后天晴的背景下, 同时当日往往盛行来自海洋的偏南风, 使得香港地区的臭氧污染不易形成。

(7) 臭氧超标日的出现往往伴随着一系列气象条件的共同变化, 包括晴天少雨、辐射增强、边界层高度增加、相对湿度降低、气温升高、风速较小等气象特征, 这些因素导致光化学反应增强, 高空高浓度臭氧向地面扩散加速, 地面臭氧迅速积累, 从而造成严重的光化学污染事件。超标日结束时往往伴随着相反的气象变化, 包括降雨、多云、湿度增大、太阳辐射减弱、风速增大等气象特征, 且变化更加剧烈, 这些因素一方面大大削弱了臭氧的光化学反应过程, 另一方面加快了污染物的水平输送和稀释, 从而导致本地臭氧浓度迅速降低。

参考文献:

- [1] The Royal Society. Ground-level Ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications[R]. Royal Society policy document, 15/08, RS1276. London: Royal Society.
- [2] Monks P S, Granier C, Fuzzi S, *et al.* Atmospheric composition change-global and regional air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(33): 5268-5350.
- [3] Young P J, Archibald A T, Bowman K W, *et al.* Pre-industrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(4): 2063-2090.
- [4] Tilton B E. Health effects of tropospheric ozone [J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, **23**(3): 257-263.
- [5] Horstman D H, Folinsbee L J, Ives P J, *et al.* Ozone concentration and pulmonary response relationships for 6.6-hour exposures with five hours of moderate exercise to 0.08, 0.10, and 0.12 ppm [J]. *American Review of Respiratory Disease*, 1990, **142**(5): 1158-1163.
- [6] American Lung Association. American Lung Association state of the air 2015 [R]. Chicago, IL: American Lung Association, 2015.
- [7] Fishman J, Creilson J K, Parker P A, *et al.* An investigation of widespread ozone damage to the soybean crop in the upper Midwest determined from ground-based and satellite measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(18): 2248-2256.
- [8] Hewitt C N, Kok G L, Fall R. Hydroperoxides in plants exposed to ozone mediate air pollution damage to alkene emitters [J]. *Nature*, 1990, **344**(6261): 56-58.
- [9] Skärby L, Sellén G. Effects of ozone on crops and forests [J]. *Ambio*, 1984, **13**(2): 68-72.
- [10] Van Dingenen R, Dentener F J, Raes F, *et al.* The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 604-618.
- [11] IPCC. Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [12] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(12): 1821-1845.
- [13] Hidy G M. Ozone process insights from field experiments-part I: overview [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2001-2022.
- [14] Solomon P, Cowling E, Hidy G, *et al.* Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 1885-1920.
- [15] Camalier L, Cox W, Dolwick P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(33): 7127-7137.
- [16] Jacob D J, Winner D A. Effect of climate change on air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 51-63.
- [17] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 813-820.
- [19] Liu J, Wu D, Fan S J, *et al.* Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 813-820.
- [19] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
- [20] Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing City in 2014 [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
- [20] Ordóñez C, Mathis H, Furger M, *et al.* Changes of daily surface ozone maxima in Switzerland in all seasons from 1992 to 2002 and discussion of summer 2003 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(5): 1187-1203.
- [21] 安俊琳, 王跃思, 孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 944-951.
- [21] An J L, Wang Y S, Sun Y. Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(3): 944-951.
- [22] Otero N, Sillmann J, Schnell J L, *et al.* Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, **11**(2): 024005.
- [23] Zhao W, Fan S J, Guo H, *et al.* Assessing the impact of local meteorological variables on surface ozone in Hong Kong during 2000-2015 using quantile and multiple line regression models [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 182-193.
- [24] 中华人民共和国生态环境保护部. 2017 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lngzhjzkgb/>, 2018-05-31.

- [25] Ma Z Q, Xu J, Quan W J, *et al.* Significant increase of surface ozone at a rural site, North of eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(6): 3969-3977.
- [26] Wang T, Wei X L, Ding A J, *et al.* Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of southern China, 1994-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(16): 6217-6227.
- [27] Xu W Y, Lin W L, Xu X B, *et al.* Long-term trends of surface ozone and its influencing factors at the Mt Waliguan GAW station, China-part 1: overall trends and characteristics [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(10): 6191-6205.
- [28] 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 等. 2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4976-4982.
Duan X T, CAO N W, WANG X, *et al.* Characteristics analysis of the surface ozone concentration of China in 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4976-4982.
- [29] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, *et al.* The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, **137**(656): 553-597.
- [30] 中华人民共和国生态环境部. 2015 中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lzghjzkgb/>, 2016-06-01.
- [31] Simon H, Reff A, Wells B, *et al.* Ozone trends across the United States over a period of decreasing NO_x and VOC emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(1): 186-195.
- [32] Wang Y, Wang H, Guo H, *et al.* Long-term O₃-precursor relationships in Hong Kong: field observation and model simulation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(18): 10919-10935.
- [33] Sillman S, Samson P J. Impact of temperature on oxidant photochemistry in urban, polluted rural and remote environments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D6): 11497-11508.
- [34] 梁碧玲, 张丽, 赖鑫, 等. 深圳市臭氧污染特征及其与气象条件的关系 [J]. *气象与环境学报*, 2017, **33**(1): 66-71.
Liang B L, Zhang L, Lai X, *et al.* Analysis of the characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological conditions in Shenzhen [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2017, **33**(1): 66-71.
- [35] Lam K S, Wang T J, Wu C L, *et al.* Study on an ozone episode in hot season in Hong Kong and transboundary air pollution over Pearl River Delta region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(11): 1967-1977.
- [36] Ding A J, Wang T, Fu C B. Transport characteristics and origins of carbon monoxide and ozone in Hong Kong, South China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(16): 9475-9488.
- [37] 王欣, 文军, 刘蓉, 等. 降水过程对巴丹吉林沙漠近地面太阳辐射的影响 [J]. *干旱气象*, 2011, **29**(4): 427-432.
Wang X, Wen J, Liu R, *et al.* Analysis of rainfall influence on solar radiation near land surface in the Badain-Jaran Desert [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, **29**(4): 427-432.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)