

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



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM _{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型	周敏 (1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响	吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏 (2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响: 基于单颗粒微观尺度	张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军 (2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析	李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向铤鹏, 武文琪, 殷子渊 (2026)
临沂市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中元素分布特征及来源解析	陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽 (2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源	谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏 (2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征	何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军 (2050)
基于随机森林模型的中国 PM _{2.5} 浓度影响因素分析	夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富 (2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 PM _{2.5} 关联关系时空变异特征分析	杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华 (2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征	王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦俊 (2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 郑秀清, 梁永平 (2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析	唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹 (2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征	杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰 (2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征	付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠 (2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征	刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇 (2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笄文怡, 胡林娜 (2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征	张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳 (2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价	李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣 (2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响	王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超 (2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 岳智丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升 (2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征	张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜 (2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应	郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞 (2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素	林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社 (2210)
长江下游流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估	贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬 (2221)
太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评价	廉杰, 李祎飞, 王晓喧, 叶彬, 邹华, 史红星 (2229)
8 种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响	徐鑫磊, 刘建超, 陆光华 (2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律	朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰 (2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例	李永新, 王威, 何妹, 申泰铭 (2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系	李敏, 唐剑峰, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊 (2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性	聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱奔, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋 (2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君 (2281)
不同环境条件下铁矿物和针铁矿纳米颗粒稳定性	王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛 (2292)
向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ 体系降解苯甲酸	孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣 (2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶: 动力学及机制	丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利 (2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果	杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋 (2320)
新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮	赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇 (2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析	文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业 (2339)
连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能	秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元 (2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异	姜澄, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧彬, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良 (2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动	陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中 (2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果	王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋 (2381)
还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤	张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩堂, 葛嘉琦 (2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响	付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉 (2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响	王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李妍, 高明 (2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系	王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (2416)
施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响	王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光 (2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N ₂ O 排放的影响	张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇 (2434)
缙云山森林植被类型对土壤 N ₂ O 相关功能微生物的影响	王盛燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明 (2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N ₂ O 排放和反硝化细菌群落结构的影响	郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 阎伟 (2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响	储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉 (2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响	王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌 (2476)
海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异	李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓 (2485)
2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性	周婷, 马姣姣, 徐颂军 (2496)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征

王耀庭¹, 梁加成¹, 郑祚芳¹, 李青春¹, 李威², 窦有俊¹

(1. 北京城市气象研究院, 北京 100089; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 为了构建美好生态和人居环境,对粤港澳大湾区大气污染有准确充分了解,对大湾区大气污染状况开展深入调查. 基于2014年6月至2018年12月的地面环境观测数据和2000~2018年卫星遥感反演产品,从不同的时间尺度和不同空间上分析大湾区大气污染的时空分布特征、演变态势和潜在气候效应. 结果表明:①从站点观测的 $PM_{2.5}$ 日均值浓度看,每年在1、2和10~12月出现良好或者轻、中度污染情形,其余时间为优级;②基于卫星近20 a年平均 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征,呈现出以广州和佛山为中心向外辐射特征. 时间演变上大体呈现出 Ω 形态特征,从2000年开始逐渐增加,2008年最高,之后逐渐降低;③基于MISR卫星每隔10 a的月平均AOT数据看月度变化特征,第一时间段(2000~2009年)的AOT月均值大于第二时间段(2010~2018年)同月,最大值在3、4月,最小值在11、12月. 设想沿珠江口岸南北向划一条线,AOT值呈现出西部大于东部的空间分布特征;④从站点观测的 O_3 -8h日均值浓度数据看,大湾区 O_3 -8h的浓度主体为优级,2014年出现臭氧浓度为良好级别的城市最多,有5个城市,2018年最少,有1个城市. 臭氧浓度为良好级别最多的月份在9月,其次为6月和11月,再次为5月和7月. 近20 a卫星遥感监测的 O_3 月平均浓度时空分布也呈现出 Ω 形的先扬后抑特征,最大值在5月,空间上出现南北分界线的特征;⑤月平均气温年际变化与辐射之间存在较好的线性关系,而AOT与辐射之间不能用简单的线性关系描述.

关键词: 粤港澳大湾区; 大气污染; 时空特征; 演变态势; 调查

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2075-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906228

Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data

WANG Yao-ting¹, LIANG Jia-cheng¹, ZHENG Zuo-fang¹, LI Qing-chun¹, LI Wei², DOU You-jun¹

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The temporal and spatial distribution characteristics, evolution trend and potential climatic effects of air pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) were analyzed on different time scales and spatial spaces, based on ground environment observation data from June 2014 to December 2018 and satellite remote sensing inversion products from 2000 to 2018. The results show that: ① From the in-situ observed daily average concentration of $PM_{2.5}$, good or mild to moderate pollution occurred in January, February, October, November, and December every year, and the rest of the time was excellent. ② Based on the annual average $PM_{2.5}$ concentration obtained by satellite for the past 20 years, the spatial characteristics showed that the external radiation is centered on Guangzhou and Foshan. The time evolution shows the characteristics of an Ω shape, which increases gradually from 2000 to 2009, is highest in 2008, and then gradually decreases. ③ The monthly average aerosol optical thickness (AOT) value from the Multi-angle Imaging Spectro Radiometer satellite reversion every 10 years for a period (2000-2009 for a period, 2010-2018 for a period) was used to see the monthly variation. The monthly average AOT value in the first period was larger than that in the second period of the same month, the maximum value was in March and April, and the minimum value was in November and December. It is envisaged to draw a line along the north-south direction of the Pearl River Port, which basically shows that the AOT value in the west is greater than that in the east. ④ According to the observed daily average concentration data of O_3 -8h, the main concentration level of O_3 -8h in the GBA is excellent. The cities with good ozone concentration were most numerous in 2014, with five cities, and least in 2018, with only one city. The highest ozone concentration was in September, followed by June and November, and then May and July. In the past 20 years, the spatial distribution of the average concentration of O_3 monitored by satellite remote sensing showed a characteristic Ω shape, increasing initially and then decreasing. The maximum value was in May, and the north-south boundary line appeared in space. ⑤ There is a good linear relationship between the interannual variation of monthly mean temperature and radiation, whereas the relationship between AOT and radiation cannot be described by a simple linear relationship.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; air pollution; spatio-temporal characteristics; evolution; investigation

收稿日期: 2019-06-30; 修订日期: 2019-12-06

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(8171002); 国家重点研发计划项目(2017YFC0209604); 北京市自然科学基金项目(8202022)

作者简介: 王耀庭(1976~),男,博士,副教授,主要研究方向为大气污染和环境遥感, E-mail: ytwang@ium.cn

粤港澳大湾区不仅聚集了人口在数百万以上的国际化城市,也有几十个人口在几十万左右的中等城市,作为近 30 a 全球经济发展最快的地区之一,雾、霾问题日益严重,导致的环境及人类健康问题引起了越来越多的关注^[1]. 大气污染是大多数发展中国家在城市化、工业化进程中普遍面临的一个难题. 对大气环境状况的调查和研究越来越得到人们的重视. 国外许多国家较早开展了这方面的工作. 美国对可吸入颗粒物的研究始于 20 世纪 80 年代初,并于 1985 年美国国家环保署将原颗粒物指示物总悬浮颗粒物(TSP)修改为 PM_{10} . 欧美其他国家在 $PM_{2.5}$ 研究方面也做了大量的工作. 我国在这方面虽然起步比较晚,但也开展了卓越的研究工作,众多学者对珠三角地区大气环境问题开展了广泛研究.

吴兑等^[2]采用风矢量分析发现珠三角区域灰霾天气过程与区域静小风过程关系密切; Fan 等^[3]通过边界层探测试验研究发现高压反气旋、台风外围下沉气流以及海陆风会导致珠三角地区污染物高浓度积累. 也有涉及污染物跨区域输送对珠三角区域空气质量影响方面的研究,如王淑兰等^[4]和胡晓宇等^[5]分别采用 CALPUFF 和 Models-3/CMAQ 模式系统模拟珠三角地区污染物的扩散与输送特征,表明珠三角城市间污染物相互作用显著. 周军芳等^[6]和陈燕等^[7]分别采用监测和模拟的方法研究了珠三角地区快速城市化过程对环境气象要素及局地大气污染物扩散的影响,表明城市化过程导致城市风速减小、城市夜间逆温增强和污染物扩散范围变小. 李菲等对广州番禺大气成分站 2006 ~ 2010 年期间的 SO_2 资料进行分析,讨论了珠江三角洲地区地面 SO_2 体积分数的年、季节、月、日变化的特征和概率的分布特征^[8]. 符传博等^[9]利用线性回归、聚类分析及相关分析等统计方法对华南地区 57 个地面气象站的观测资料进行分析,探究近 54 年华南地区霾日数的时空变化特征及其气候成因. 结果表明,年平均霾日数大值区主要分布在广东珠江三角洲(珠三角)地区和广西中东部. 刘建等^[10]基于 2014 年 4 月至 2015 年 3 月珠江三角洲 56 个环境监测子站以及 9 个城市的逐时 $PM_{2.5}$ 浓度数据,对珠三角地区的颗粒物进行了系统聚类分析和相关性分析,将珠三角地区 $PM_{2.5}$ 的区域污染分为 3 种类区.

从 20 世纪开始,臭氧(O_3)浓度不断增加,如今已经成为城市低层重要的大气污染物之一. 在过去的 10 a 间,全球臭氧浓度都呈现出上升趋势^[11,12]. 2009 ~ 2010 年,有学者研究发现中国各地 O_3 污染现象也频繁发生,中国的中南部特别是沿海城市尤为突出^[13~15]. O_3 可增加大气的氧化性,促进大气中

SO_2 、 NO_2 和 VOCs 的氧化和气粒转化为颗粒物的过程,进而增强 $PM_{2.5}$ 等颗粒物污染. 高浓度的地面 O_3 也会增加城市光化学烟雾发生的频率^[16,17]. 随着城市的迅速发展,机动车数量急剧增加,城市空气中的 O_3 浓度也在急剧增加. 据 2015 年环境公报显示^[18]的数据, O_3 污染情况已经日趋严重. 为了解 O_3 浓度的日变化,段晓瞳等^[19]根据 2015 年全国 189 个城市的近地面臭氧浓度数据分析近地面臭氧浓度的变化特征.

尽管地基观测技术对大气污染物监测有精度高的优势,但短板也较为明显,以 $PM_{2.5}$ 观测为例,到目前为止,对 $PM_{2.5}$ 的观测手段相对缺乏,数据系统性较差,其站点分布相对稀疏,无法获取大范围 $PM_{2.5}$ 空间分布特征,而卫星遥感覆盖范围广,反演信息更全面,能够有效弥补地面监测站点在空间上的不足. 因此,利用卫星遥感资料分析 $PM_{2.5}$ 、大气气溶胶乃至其余大气成分的区域分布和变化逐渐成为目前重要的技术手段. 卫星遥感技术可以提供区域尺度乃至全球尺度上包含气溶胶光学厚度(AOD 或 AOT)在内的各种大气成分分布信息,为认识不同尺度上的污染分布、来源以及区域间传输过程提供有效手段^[20,21]. 大气中气溶胶含量显著增加,不仅使城市空气质量受到较大威胁,而且对区域环境和气候也造成巨大的影响^[22]. 有研究表明各城市间存在大气污染的相互影响和输送问题^[23,24],因此气溶胶的分布特征与污染物来源有着密切关系. 在表征气溶胶物理特性的参量中,AOD 反映了气溶胶粒子对太阳辐射的消光作用,能够推算气溶胶含量、评估大气污染程度^[25]. 在过去 20 a 中,通过卫星对地观测的技术手段绘制大气气溶胶丰度和空间粒子特性方面取得了重大进展. 从多角度成像光谱计 MISR (multi-angle imaging spectroradiometer)^[26]、中分辨率成像光谱辐射计 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)^[27]和宽视场水色扫描仪 SeaWiFS (sea-viewing wide field-of-view sensor)^[28]等卫星传感器实现对陆地背景上的气溶胶反演并成功用于推算全球范围内近地表细颗粒物浓度的空间分布,同时开展多年变化趋势的研究^[29,30].

上述学者们的研究成果对粤港澳大湾区大气污染现状调查、深入认识大气污染特征及污染成因有重要参考意义,但这些研究多是针对某一短期时间段,或者基于单个大气污染要素开展了长时间序列的分析. 而对污染物在不同时间尺度和不同空间上的分布现状调查、呈现出的长期变化规律和演变特征的探讨较少. 本文通过地基观测数据和长时序卫星遥感反演产品,以 AOD、 $PM_{2.5}$ 和 O_3 为例,分析粤

港澳大湾区大气污染现状,重点研究粤港澳地区污染在不同时间尺度和不同空间上呈现出来的污染特点及演变趋势,以期环境治理、环境保护和减排措施的制度建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区 (Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, GBA), 由香港、澳门两个特别行政区和广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门和肇庆 (珠三角) 这 9 个地市组成, 总面积 5.6 万 km^2 , 见图 1。2018 年末总人口已达 7 000 万

人, 是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一, 在国家发展大局中具有重要战略地位。大湾区的成立是新时代推动形成全面开放新格局的新举措, 也是推动“一国两制”事业发展的新实践。推进建设粤港澳大湾区, 有利于深化内地和港澳交流合作, 对港澳参与国家发展战略, 提升竞争力, 保持长期繁荣稳定具有重要意义^[31,32]。粤港澳大湾区不仅要建成充满活力的世界级城市群、国际科技创新中心、“一带一路”建设的重要支撑、内地与港澳深度合作示范区, 还要打造成宜居宜业宜游的优质生活圈, 成为高质量发展的典范。以香港、澳门、广州和深圳四大中心城市作为区域发展的核心引擎^[33]。

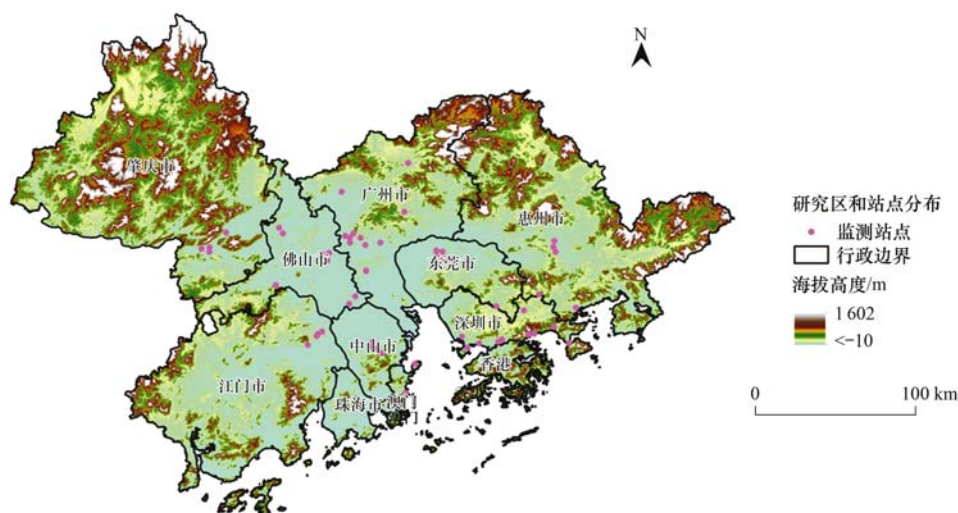


图1 粤港澳地区地形和大气环境监测站点分布

Fig. 1 Distribution of the terrain area and pollutant observation sites in the GBA

1.2 数据来源

本研究主要调查粤港澳大湾区各大气污染物现状, 分析不同大气污染物在不同时间尺度和不同空间上的时空分布特征及演变趋势。研究采用的数据直接来自大湾区区域空气监控网络和互联网上分发的卫星数据产品, 这些数据默认经过各种预处理和质量控制, 在本研究中不涉及数据修订问题。

1.2.1 地面观测数据

研究采用的第一类地面数据为环境监测数据。数据来自中华人民共和国生态环境部 (<http://www.mee.gov.cn/>) 提供的大湾区 56 个观测站点在 2014 ~ 2018 年间的 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 -8h 和 CO 等大气污染物逐时监测数据。第二类地面数据是“中国气象数据网”上提供的中国地面国际交换站气候资料日值数据集 (V3.0) 中广州、深圳、香港和澳门这 4 个站点 2000 ~ 2018 年逐时气象数据。

1.2.2 气溶胶光学厚度和年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据

AOD 数据来自 MISR 卫星平台。该数据集在

NASA 的兰利 (Langley) 研究中心生成并存档, 该产品经过严格验证, 供全球免费使用。该数据是一个同化数据集, 融合了多种气象观测要素和卫星数, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。本研究从中提取出粤港澳地区 2000 年 3 月至 2018 年 8 月的月平均 AOD。

年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据是根据 2014 年 5 月至 2016 年 12 月粤港澳大湾区地基 $\text{PM}_{2.5}$ 观测数据和同期的 MODIS、SeaWiFS 和 MISR 这 3 个卫星平台的 AOD 产品, 利用戈达德地球观测系统化学传输模型 GEOS-Chem 将大气柱含量 AOT 和地表 AOT 关联起来, 得到该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合估算值, 最后利用地基观测数据和非地基观测数据之间的年际变化, 将格点上的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度外推到 2000 年^[34]。从而得到 2000 ~ 2016 年长时间序列的 $\text{PM}_{2.5}$ 格点数据, 空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。

1.2.3 O_3 和 NO_2 数据

基于卫星的 O_3 产品来自 <http://projects.knmi.nl/omi/research/product/>, 时间范围为 2004 年 10 月至 2018 年 12 月, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。 NO_2

网格数据是基于 GOME (global ozone monitoring experiment)、SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography) 和 GOME-2 卫星反演得到. 利用 GEOS-Chem 数值模式模拟卫星反演的对流层 NO_2 柱密度和地面 NO_2 浓度之间的关系, 并由此生成 NO_2 平均浓度栅格数据, 空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$.

以上各种卫星数据的处理均采用 MeteoInfo 软件^[35].

2 结果与讨论

2.1 地基实测污染物年际变化特征

由于研究区域广、数据量庞大且受篇幅所限, 该内容仅以 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 -8h 两个地面大气污染监测要素为例展开分析, 以示抛砖引玉.

2.1.1 基于地面实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间空间分布特征

大湾区 9 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年际变化见图 2 (香

港和澳门地面污染监测数据缺失).

图 2 是基于环境监测站点观测数据绘制的 2014~2018 年间不同城市日平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和污染等级随时间变化. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度等级划分依据参见文献 [36]. 从中可以看出, 9 个城市从 2014 年 6 月至 2018 年 12 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值浓度和污染等级的时空分布有以下共同特征: ①近 5 年, 大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值浓度主体在 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内, 空气质量指数级别为一级和二级, 指数类别为优级和良好, 见图 2 中绿色和黄色所示. ②每个年度的优级空气质量基本出现在 3~9 月. 非优级空气质量出现在每年的秋冬季节, 即 1、2 和 10~12 月. ③ $\text{PM}_{2.5}$ 日均值浓度等级没有出现重度及以上的污染等级.

呈现出的个体差异也很明显: ①近 5 年中, 肇庆出现优级的天数最少, 是 9 个城市中 $\text{PM}_{2.5}$ 环境质量最差的. 除 2016 年 1、2 月之外, 每年的 1、2 和 10~12 月均出现轻度和中度污染等级. ② $\text{PM}_{2.5}$ 环境

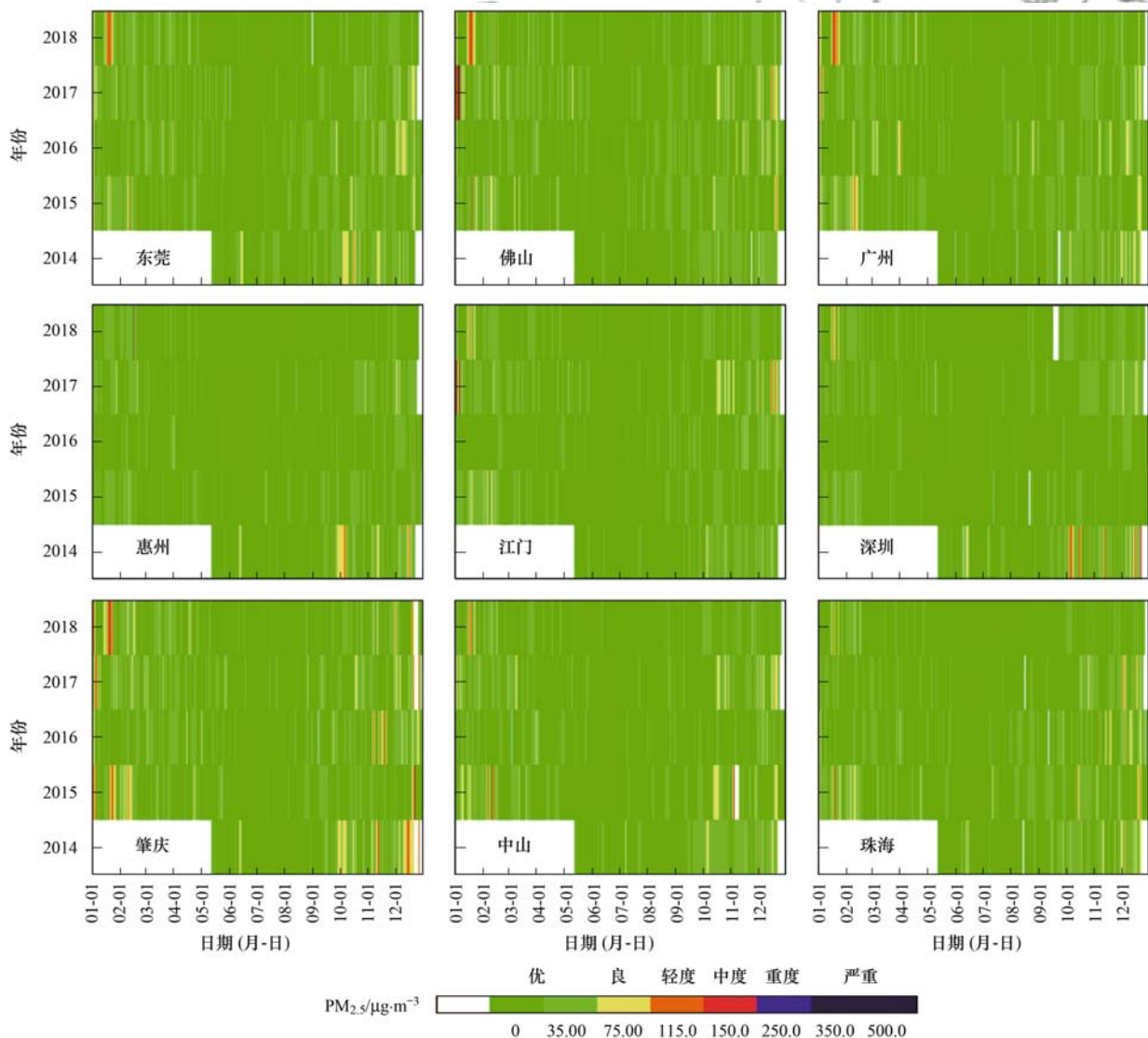


图 2 9 个城市 2014~2018 年地面观测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年际变化特征

Fig. 2 Interannual variation of $\text{PM}_{2.5}$ based on ground observation in nine cities in 2014-2018

质量好且稳定的是惠州市和深圳市. 珠海、东莞、中山和佛山这 4 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量分布极为相似. 每一年的秋冬季节都有良好等级和轻度污染等级发生, 天数近似. ③2014 年 10 ~ 12 月, 肇庆市和深圳市出现多日轻度、中度污染天气, 其次是惠州、东莞和珠海. 2015 年 1、2 月, 除了惠州和深圳优级、江门良好外, 其余 6 个城市均有轻度或中度污染. 10 ~ 12 月, 肇庆、佛山和中山这 3 个城市出现轻度和中度等级污染. 2016 年度, 广州、肇庆出现多日良好和轻度污染天气. 惠州、江门、深圳和中山最好, 均为优级. 而东莞、佛山和珠海为一类, 出现良好和轻度污染天气. 2017 年度, 肇庆、佛山和江门出现轻、中度污染. 广州、深圳和惠州为优级, 其余的中山、东莞和珠海为一类. 2018 年 1 月, 除惠州外, 均出现轻、中度污染天气特征. 肇庆、佛山、广州和珠海最为严重. 其余的江门、深圳、中山和东莞为轻度等级. 惠州的污染延迟到 2 月出现.

通过以上对 5 a 实测 $\text{PM}_{2.5}$ 观测资料细化研究

可以看出, 大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值浓度和污染等级的年际变化在不同时间不同空间上具有很大差异. 说明污染物不仅在局地区域高浓度累积, 也存在区域间相互输送影响.

2.1.2 基于地面观测的 O_3 -8h 浓度时间空间分布特征

臭氧如今已经成为城市近地层重要的大气污染物之一. 图 3 显示的是 2014 年 6 月至 2018 年 12 月大湾区地面环境观测站点 O_3 -8h 日平均浓度和污染等级时空分布. 可以看出, 整个区域臭氧浓度主体在 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 质量等级为优, 未出现轻度污染及以上的情形. 每一年出现臭氧浓度为良好等级的时间及城市如下: 2014 年 5 个城市, 分别为佛山(6 月)、广州(10 月)、江门(7 月)、中山(7 月)和珠海(9 月). 2015 年 2 个城市, 广州(9 月)和深圳(9、10 月). 2016 年 3 个城市, 广州(5 月)、江门(11 月)和中山(11 月). 2017 年 4 个城市, 东莞(9 月)、佛山(6 月)、江门(11 月)和深圳(5 月). 2018 年 1

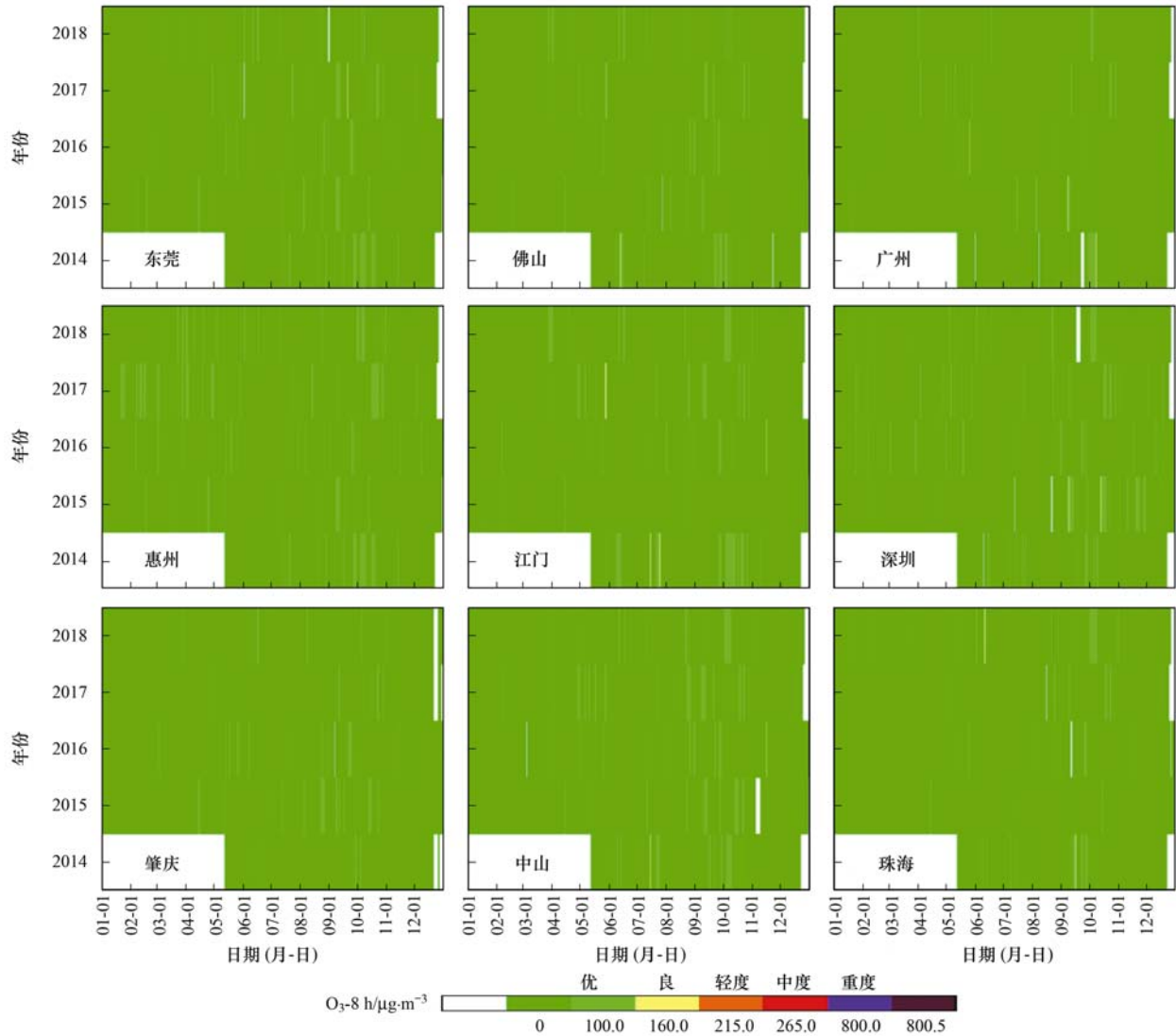


图 3 9 个城市 2014 ~ 2018 年地面观测 O_3 -8h 浓度年际变化特征

Fig. 3 Interannual variation of O_3 -8h based on ground observation in nine cities in 2014-2018

个城市,珠海(6月).可以看出,2014年有最多的城市臭氧浓度在良好级别,最少在2018年.

按月统计臭氧浓度出现良好等级的次数.5月为2次,6月为3次,7月为2次,9月为4次,10月为2次,11月为3次,其余月份未发现.臭氧浓度为良好级别最多的月份为9月,其次在6月和11月.再次为5月和7月.

通过对地面观测的 O_3 -8h浓度数据的日均值年际变化分析可以发现,大湾区臭氧空间分布相对比较均一,臭氧浓度出现良好等级的时间范围广,最早可以出现在5月,最迟可以在11月出现.

2.2 年平均 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布的时间演变特征

以上内容是基于站点观测的2014~2018年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 -8h日均值浓度来分析污染浓度和污染等级年际变化特点和空间差异特征.属于对单站、单要素、逐时的污染情形进行具体描述.为了能在更长时间尺度上更全面、更综合地对整个大湾区的大气环境状况进行调查并研究分析大气污染的时空演变特征,引入相关卫星产品,以弥补地基观测在时间和空间上的不足.

图4为将地面观测的环境数据、气象数据和卫星数据同化后得到的2000~2016年年平均 $PM_{2.5}$ 浓度格点数据,空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,可以满足对大湾区逐年年平均 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布细节分析的需要.

从图4可以看到大湾区年平均 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化有明显的特点.从2000~2016年,大湾区年平均 $PM_{2.5}$ 浓度均在 $60 \mu g \cdot m^{-3}$ 以下.随机一年的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布呈现出水波纹放射状的特点.根据这个特点,可以简单将大湾区分为3个子区域.以广州、东莞、中山和佛山4个市为第一子区域,为“高值区中心”.从该区域向外扩散,该研究结果与罗毅等对近20 a中国典型区域 $PM_{2.5}$ 时空分布研究的结果较为一致^[37].肇庆、惠州、江门市和深圳划为第二子区域.剩下的港、珠、澳为第三子区域.至于扩散所达覆盖面,取决于该年度的年平均 $PM_{2.5}$ 浓度和各种热力、动力等因素.比如2001年,扩散影响范围很小,而2008年扩散范围最广,之后扩散范围又开始收缩.这就不得不分析 $PM_{2.5}$ 浓度在不同空间上随时间变化特征.大湾区年平均 $PM_{2.5}$ 浓度年际变化总体上呈现出“Ω型”的特征,即从2000年开始逐渐上扬,大约到2008年达到顶峰,之后基本上开始逐年下降,2014年出现逆向波动.

2000年,第一子区域年平均 $PM_{2.5}$ 浓度约在 $25 \sim 35 \mu g \cdot m^{-3}$,第二子区域约在 $5 \sim 15 \mu g \cdot m^{-3}$,第三子区域约为 $15 \sim 20 \mu g \cdot m^{-3}$.年平均 $PM_{2.5}$ 浓度最

高值最小,约 $30 \mu g \cdot m^{-3}$,空间分布最均匀,全区域在 $35 \mu g \cdot m^{-3}$ 以下.

之后,年平均 $PM_{2.5}$ 浓度在空间分布上的差异逐渐体现出来,这种差异既体现在基于“广佛”核心区向外围扩散形成的梯度层次,又体现在年平均 $PM_{2.5}$ 浓度高低.到2004年, $PM_{2.5}$ 的空间分布差异性又开始逐渐弱化,到2008年趋于均匀.但与2000年相比,2004年年平均 $PM_{2.5}$ 浓度最大值增大到 $45 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右,2008年更达到了约 $60 \mu g \cdot m^{-3}$.从2000~2008年,各区域上的 $PM_{2.5}$ 浓度也在逐渐增大.比如到2008年,第一区域的广佛约 $60 \mu g \cdot m^{-3}$,第二区域约 $40 \mu g \cdot m^{-3}$,第三区域珠港澳也达到 $30 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右.

2008年之后,不同区域上的年平均 $PM_{2.5}$ 浓度基本上逐年减低,仅有2014年反常,出现跳跃, $PM_{2.5}$ 浓度逆向增加的原因或许受厄尔尼诺事件的影响^[38]. $PM_{2.5}$ 浓度在各区域上的分布差异又逐年变得明显,到了2016年,不但各个区域上的 $PM_{2.5}$ 浓度高值明显下降,如广佛区 $PM_{2.5}$ 降低到了 $30 \sim 40 \mu g \cdot m^{-3}$,其余区域不到 $20 \mu g \cdot m^{-3}$.而且空间差异最明显,又呈现出广佛中心区的特征,该研究成果与文献^[37]一致.

通过以上分析可以看出,大湾区年平均 $PM_{2.5}$ 浓度有明显的时空演变特征.时空变化受“人与自然”因素的影响.自然因素方面,中长期天气气候背景的波动在一定程度上影响着大湾区空气质量变化,但这个问题非常复杂,研究难度很大^[38].人为因素方面主要受政府政策影响,如产业结构调整、重点污染源整治、能源结构调整、清洁能源使用、节能减排等.在2008年以来,广东省实施“腾笼换鸟”和“双转移”战略,将高耗能、高污染企业从“广、佛、东”核心区外迁.为了2010年16届亚运会的举办,实施车辆限行,采取区域性源排放限制等方案.所有这些措施对年 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出如图4所示的时、空变化有一定贡献.

2.3 月平均AOT空间分布的时间演变特征

为了更深入细致地调查大湾区大气污染状态,并研究污染在更短时间尺度上的时空演变特征,对基于MISR的2000~2018年的月平均AOD卫星产品进行分析(图5).将整个时间段(2000~2018年)分为两段:一段为2000~2009年,另一段为2010~2018年.

从图5可以看出大湾区月平均AOT在两个时间段上呈现出各自的时空特征.两个时间段的月平均AOT不仅数量上有明显的差异,而且空间上呈现出的分布特征差异也很明显.同比来看,1~12月逐月,第一时间段(2000~2009年)大于第二时间段

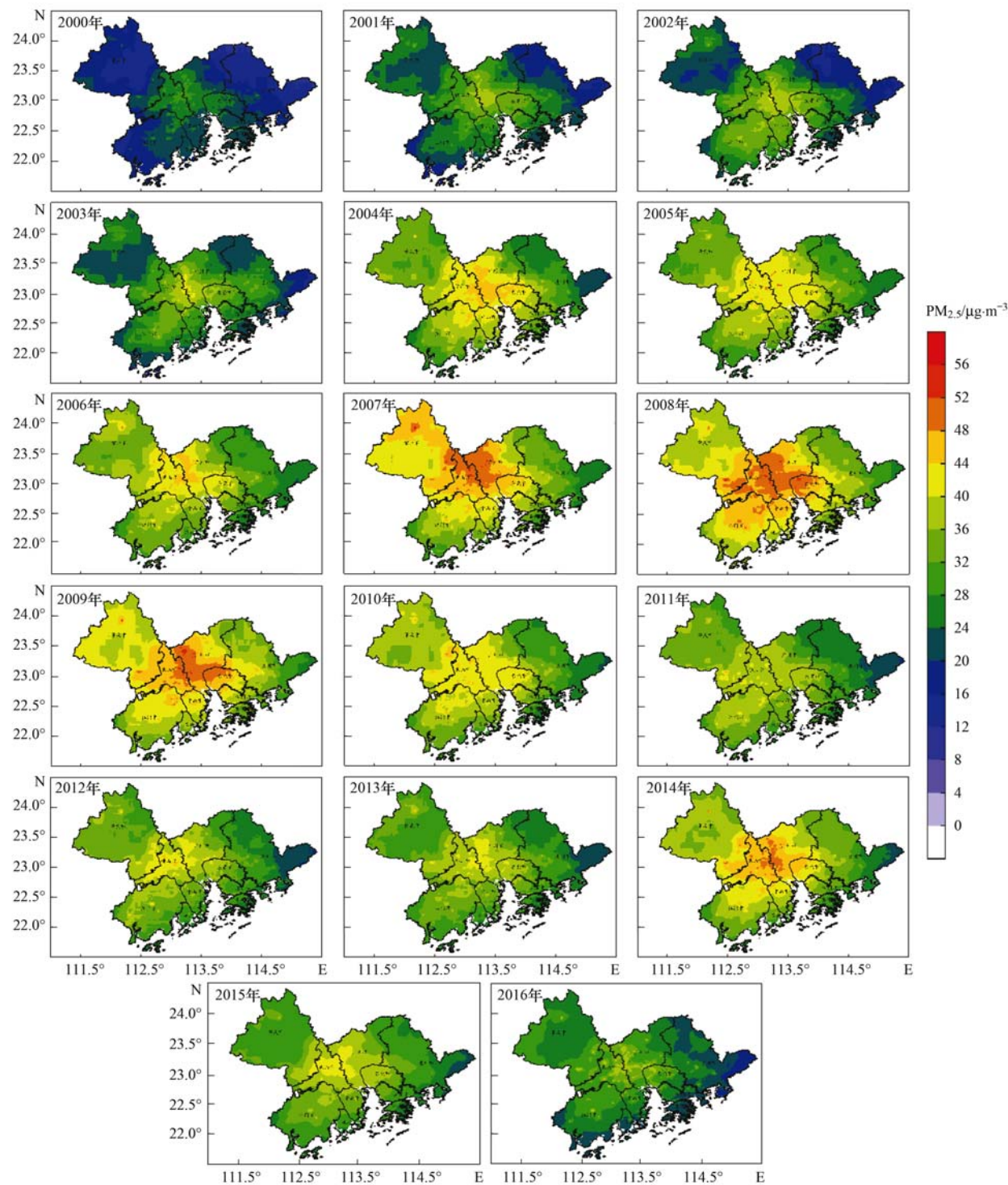


图4 粤港澳大湾区 2000 ~ 2016 年 $PM_{2.5}$ 年均值空间分布

Fig. 4 Annual mean $PM_{2.5}$ concentration from 2000-2016 over the GBA

(2010 ~ 2018 年). 只有 4 月的同比是第二时间段明显大于第一个时间段. 环比来看, 根据 AOT 数值大小且空间分布广泛程度做个简单排序, 第一时段, 排序为 3、6、9、10、2、8、4、7、5、1、11 和 12 月. AOT 最大值接近 1.0, 出现的时间在 3 和 4 月, 出现的位置中有一个值得关注, 即 3 月出现在肇庆的最南部, 6 月出现在肇庆的北部. 最小值出现在 11 和 12 月, 为 0.1 ~ 0.2 之间. 第二时段排序为 4、3、5、10、6、8、7、9、

1、2、11 和 12 月. AOT 最大值为接近 1.0, 出现在 4 月, 位置在广州和佛山, 最小值在 1、2、11 和 12 月. 可以看出月平均 AOT 值呈现春季高, 夏秋开始递减, 这与文献[39]的研究结果较为一致.

两个时段的月平均 AOT 在空间分布上也具有明显特征. 设想沿珠江口岸南北向划一条线, 将大湾区划分为东西两部分. 空间分布上呈现出一个基本共性特征是西部月平均 AOT 值大于东部. 但空间特

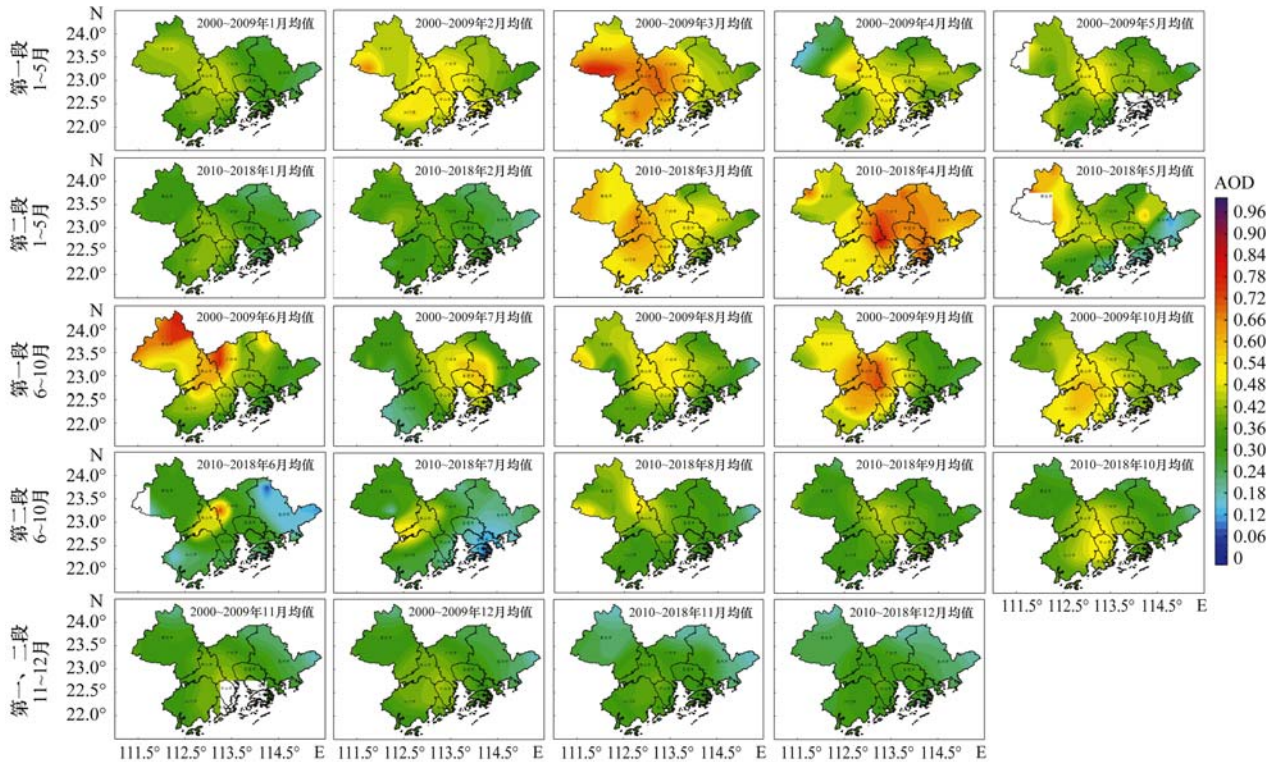


图5 2000~2009年和2010~2018年两个时段月平均AOT空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of monthly average AOT in 2000-2009 and 2010-2018

征差异也较为明显,第一时段内,第2、3、4、6、9和10月,AOT空间分布具有明显的等级特征,剩余月份,AOT空间分布相对平缓.而第二阶段,仅在第3、4和5月AOT在空间分布上具有明显等级特征.第二时段的4月较为特殊,AOT高值中心虽然在西部,但是东部区内的AOT整体上大于西部.

2.4 月平均 O_3 浓度和近15年 NO_2 浓度空间分布特征

图6为基于卫星的2005~2018年11个城市月平均 O_3 浓度时空分布,可以看出其时空分布有两个特征:①臭氧浓度在空间上分布相对均匀,

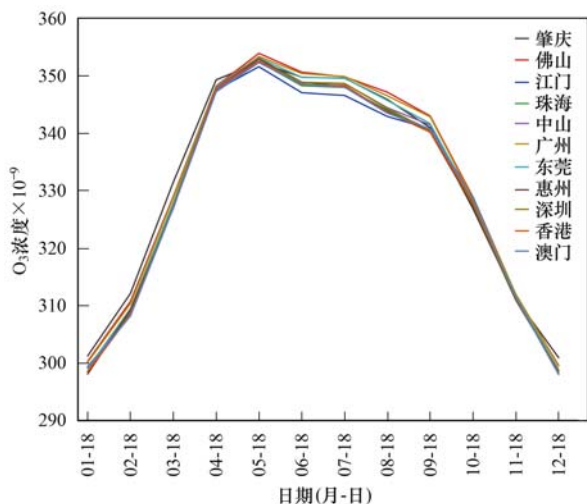


图6 2005~2018年 O_3 月平均浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of O_3 in the GBA in 2005-2018

空间差异小.在夏季6~8月存在明显的南北空间差异,而在1、2月,空间上东西差异更明显.②月平均 O_3 浓度随时间的分布呈现出先扬后抑的特征.从1月逐渐增加,到了5月达到最大,文献[40]基于地基观测数据也有同样的研究结果.之后开始下降,到12月,与1月的情形近似.臭氧浓度之所以在5月达到全年最大,是因为臭氧浓度与气温具有良好的相关性,随着气温的升高,臭氧浓度会增加.除了受温度影响之外,相对湿度对臭氧浓度也有明显影响,有研究表明,当相对湿度在60%~90%时,相对湿度越大臭氧浓度越低^[41,42],在高相对湿度条件下,空气中水汽所含的 $\cdot OH$ 、 $HO_2\cdot$ 等自由基迅速将 O_3 分解为 O_2 ,降低 O_3 浓度.夏季6~8月虽然气温比5月高,但此时也是大湾区开始进入频繁的降水天气季节,降水量和雨日数也是一年中最高的月份,这样的气象条件会抑制 O_3 的形成.

图7是大湾区2005~2018多年平均 NO_2 柱浓度空间分布.从中看到 NO_2 空间分布有明显的高值区,为 $1900 \times 10^{15} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$,该中心区位于广佛,与文献[40]的研究结果较为一致.高浓度 NO_2 沿中心向外摊开,浓度逐渐降低为 $1000 \times 10^{15} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$,在肇庆、惠州和江门等山区地方, NO_2 浓度值最小($200 \times 10^{15} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$). NO_2 浓度的空间分布呈现出来的特点或许与人类活动有密切的关系.

2.5 大气污染与城市气候潜在关系初探

大气气溶胶产生的直观影响是大气污染问题,而大气气溶胶潜在影响比直观影响更深远,如在区域尺度乃至全球尺度上的大气辐射强迫效应所产生的气候问题.利用NCAR的CERES(clouds and earth’s radiant energy system)提供的近20 a晴空地面(surface free cloud-SFC)长波(long wave-LW)、短波(short wave-SW)和净(NET)通量格点数据,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$.结合同期AOD和月平均气温年际变化(2000~2018年)数据,以香港为例,对气溶胶气候辐射强迫效应开展探索性分析,见图8.其余3个代表性城市(澳门、广州和深圳)的相关特征见表1.

从图8可以看出,气温年际变化与晴空下的3个辐射量,即地面长波向下辐射、地面短波向下辐射和大气层顶向下净辐射变化趋势的吻合度非常好,

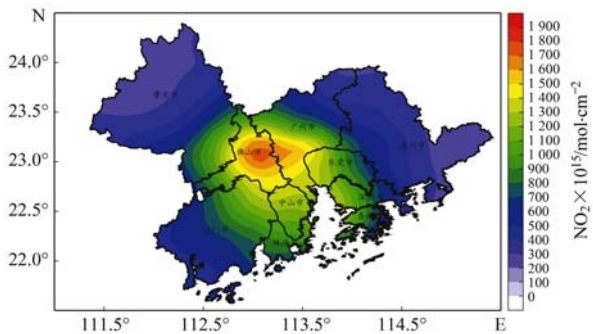


图7 2005~2018年NO₂多年平均柱浓度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of annual average column concentration of NO₂ in 2005-2018 in the GBA

而气溶胶光学厚度与这3个辐射量的吻合度要差一些.为了定量分析二者间的关系,求得两两组合的皮尔森相关系数,见表1.

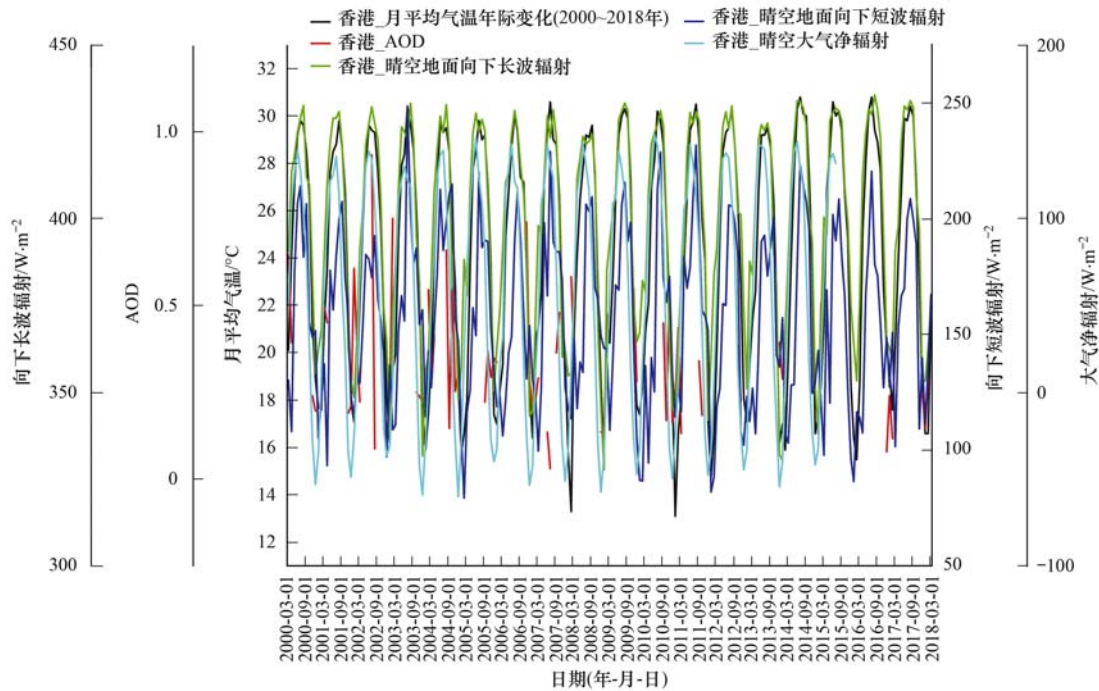


图8 香港地区气温、AOT、向下长波辐射、向下短波辐射和大气向下净辐射的时间变化

Fig. 8 Temperature, AOT, sfc_lw_down radiation, sfc_sw_down radiation, and atmospheric downward net radiation changes with time in Hong Kong

表1 两要素之间的皮尔森相关系数 *r*

Table 1 Pearson correlations *r* between two variables

城市	项目	AOT	晴空地面向下长波	晴空地面向下短波	晴空大气净辐射
香港	气温年际变化	0.006 14	0.936 99	0.792 68	0.793 11
	AOT		0.069 43	-0.101 06	0.062 76
澳门	气温年际变化	-0.153 35	0.910 77	0.823 28	0.760 8
	AOT		-0.129 52	-0.019 38	-0.010 15
广州	气温年际变化	0.248 38	0.919 59	0.798 33	0.777 2
	AOT		0.303 05	0.108 65	0.299 35
深圳	气温年际变化	0.019 46	0.928 38	0.825 09	0.780 53
	AOT		0.057 14	-0.048 99	0.046 27

从表1中可以看到,近20 a月平均温度的年际变化与同期的长波、短波和净辐射之间存在简单但是效果很好的线性关系,其中,与晴空地面向下长波的相关性在0.90以上。而AOD与长波、短波和净辐射之间的线性关系不明显。

3 结论

(1)近5 a的地面观测 $PM_{2.5}$ 日均值数据表明,粤港澳大湾区空气质量每年的3~9月为优级,1、2月和10~12月出现良好或者轻、中度污染情形。具体到不同时间和不同空间上, $PM_{2.5}$ 的污染现状和污染分布特征具有很大的时间和空间差异。

(2)基于卫星的年平均 $PM_{2.5}$ 浓度数据表明,粤港澳大湾区的 $PM_{2.5}$ 空间分布呈现出以广州、佛山为中心的水波纹放射状特点。时间演变大体呈现出 Ω 形态特征,从2000年开始,逐年增加,到2008年浓度数值最高和扩散范围最广,之后开始逐渐降低。

(3)将基于卫星的近20 a月平均AOT分成两段(2000~2009年为一,2010~2018年为一)。每个月的同比,除了4月之外,都是第一时间段AOT月平均值大于第二时间段的同月。在同一个时段内不同月份的AOT值差异也明显,最大值在春季的3、4月,最小值出现在11、12月。设想沿珠江口岸南北向划一条线,基本呈现出西部的AOT值大于东部的空间分布特征。

(4)大湾区近5 a的地基 O_3 -8h监测数据表明大湾区臭氧未出现轻度及以上污染等级。2014年发生臭氧浓度为良好级别的城市个数最多,5个城市。最少在2018年,1个城市。发生月份最多的在9月,其次为6月和11月,再次为5月和7月。出现良好等级的时间范围广,最早出现在5月,最晚在11月。基于卫星的2005~2018近15年月平均 O_3 浓度时空分布表明,月平均 O_3 浓度分布也呈现出先扬后抑特征,5月出现最大值,之后逐月递减。 O_3 相对 $PM_{2.5}$ 而言,在空间上的分布更均匀,臭氧分布出现有南北分界线的特征。

(5)月平均气温年际变化(2010~2018年)与同期地面长波向下辐射、地面短波向下辐射和晴空下的大气层顶向下净辐射变化趋势吻合度非常好,存在简单但是效果较好的线性关系。而AOD与长波、短波和净辐射之间不能用简单的线性关系描述。

致谢:本研究环境监测数据源自中华人民共和国生态环境部(<http://www.mee.gov.cn/>);气象数据来自中国地面国际交换站气候资料数据集;卫星遥感数据产品来自美国戈达地球科学数据和信息中心(Goddard Earth Science Data and Information

Services Center)和NASA的兰利(Langley)中心,在此对各数据监制单位表示感谢。

参考文献:

- [1] 刘思瑶,濮江平,周毓荃,等.河北气溶胶浓度垂直分布特性研究[J].气象与环境科学,2016,39(2):41-45.
Liu S Y, Pu J P, Zhou Y Q, et al. Study on the vertical distributive characters of aerosol concentration in Hebei[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(2): 41-45.
- [2] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等.珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J].应用气象学报,2008,19(1):1-9.
Wu D, Liao G L, Deng X J, et al. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(1): 1-9.
- [3] Fan S J, Wang B M, Tesche M, et al. Meteorological conditions and structures of atmospheric boundary layer in October 2004 over Pearl River Delta area[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(25): 6174-6186.
- [4] 王淑兰,张远航,钟流举,等.珠江三角洲城市间空气污染的相互影响[J].中国环境科学,2005,25(2):133-137.
Wang S L, Zhang Y H, Zhong L J, et al. Interaction of urban air pollution among cities in Zhujiang Delta[J]. China Environmental Science, 2005, 25(2): 133-137.
- [5] 胡晓宇,李云鹏,李金凤,等.珠江三角洲城市群 PM_{10} 的相互影响研究[J].北京大学学报(自然科学版),2011,47(3):519-524.
Hu X Y, Li Y P, Li J F, et al. Interaction of ambient PM_{10} among the cities over the Pearl River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(3): 519-524.
- [6] 周军芳,范绍佳,李浩文,等.珠江三角洲快速城市化对环 境气象要素的影响[J].中国环境科学,2012,32(7):1153-1158.
Zhou J F, Fan S J, Li H W, et al. Impact of urbanization on meteorological factors in Pearl River Delta[J]. China Environmental Science, 2012, 32(7): 1153-1158.
- [7] 陈燕,蒋维楣,郭文利,等.珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响[J].环境科学学报,2005,25(5):700-710.
Chen Y, Jiang W M, Guo W L, et al. Study on the effect of the city group development in Pearle River Delta on local air pollutant dispersion by numerical modeling[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 700-710.
- [8] 李菲,谭浩波,邓雪娇,等.2006~2010年珠三角地区 SO_2 特征分析[J].环境科学,2015,36(5):1530-1536.
Li F, Tan H B, Deng X J, et al. Characteristics analysis of sulfur dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010[J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1530-1537.
- [9] 符传博,丹利,唐家翔,等.1960~2013年华南地区霾污染的时空变化及其与关键气候因子的关系[J].中国环境科学,2016,36(5):1313-1322.
Fu C B, Dan L, Tang J X, et al. Temporal and spatial characteristics of haze days and their relations with climatic factor during 1960~2013 over South China[J]. China Environmental Science, 2016, 36(5): 1313-1322.
- [10] 刘建,吴兑,范绍佳.珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征[J].环境科学,2015,36(11):3989-3998.
Liu J, Wu D, Fan S J. Distribution of regional pollution and the characteristics of vertical wind field in the Pearl River Delta[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 3989-3998.
- [11] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and

- trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(21): 3431-3442.
- [12] Xu X, Lin W, Wang T, *et al.* Long-term trend of surface ozone at a regional background station in eastern China 1991-2006: enhanced variability[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(10): 2595-2607.
- [13] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖, 等. 2012 年夏季天津城区 BTEX 污染特征与臭氧潜势分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 793-798.
- Yao Q, Han S Q, Cai Z Y, *et al.* The diurnal variation and ozone production potential of BTEX in Tianjin in the summer of 2012[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 793-798.
- [14] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- Yi R, Wang Y L, Zhang Y J, *et al.* Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- [15] 李浩, 李莉, 黄成, 等. 2013 年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市 O₃ 来源识别[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 1-10.
- Li H, Li L, Huang C, *et al.* Ozone source apportionment at urban area during a typical photochemical pollution episode in the summer of 2013 in the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 1-10.
- [16] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州市区大气臭氧浓度变化及气象要素影响[J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(5): 602-611.
- Hong S M, Jiao L, He X, *et al.* The Variation of ozone concentrations in urban districts of Hangzhou and their relationship with meteorological factors[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, **20**(5): 602-611.
- [17] Affre C, Carrara A, Lefebvre F, *et al.* Aircraft measurement of ozone turbulent flux in the atmospheric boundary layer[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(10): 1561-1574.
- [18] 环境保护部. 2015 年中国环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部(现中华人民共和国生态环境部), 2016. 9-17.
- [19] 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.
- [20] Che W W, Zheng J Y, Wang S S, *et al.* Assessment of motor vehicle emission control policies using Model-3/CMAQ Model for the Pearl River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(9): 1740-1751.
- [21] Rodrigues-Silva F, de Paula Santos U, Saldiva P H N, *et al.* Health risks and economic costs of absenteeism due to air pollution in São Paulo, Brazil[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, **12**(5): 826-833.
- [22] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 826-840.
- Shi G Y, Wang B, Zhang H, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 826-840.
- [23] 刘璇, 朱彬, 侯雪伟, 等. 基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析——以长江三角洲地区一次严重重霾污染过程为例[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 641-651.
- Liu X, Zhu B, Hou X W, *et al.* Analysis of haze events based on satellite remote sensing and field observations: a case study of severe haze pollution over the Yangtze River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(3): 641-651.
- [24] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2005, **35**(S1): 177-186.
- Li C C, Mao J T, Lau A K H, *et al.* Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2005, **48**(S2): 209-219.
- [25] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET-a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **66**(1): 1-16.
- [26] Martonchik J V, Kahn R A, Diner D J. Retrieval of aerosol properties over land using MISR observations[A]. In: Kokhanovsky A A, de Leeuw G (Eds.). *Satellite Aerosol Remote Sensing over Land*[M]. Berlin: Springer, 2009. 267-293.
- [27] Levy R C. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(11): 2989-3034.
- [28] Sayer A M, Hsu N C, Bettenhausen C, *et al.* Global and regional evaluation of over-land spectral aerosol optical depth retrievals from SeaWiFS[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, **5**(7): 1761-1778.
- [29] Boys B L, Martin R V, van Donkelaar A, *et al.* Fifteen-year global time series of satellite-derived fine particulate matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(19): 11109-11118.
- [30] Crawford J, David D C, Stelcer E, *et al.* Long term fine aerosols at the cape grim global baseline station: 1998 to 2016[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **166**: 34-46.
- [31] 新华网. 习近平出席《深化粤港澳合作 推进大湾区建设框架协议》签署仪式[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/2017-07/01/c_1121247167.htm, 2018-04-10.
- [32] 新华网. 粤港澳大湾区建设领导小组办公室: 携手粤港澳三地共建国际一流湾区 增进民生福祉[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/2019-02/18/c_1210062217.htm, 2019-02-18.
- [33] 新华社. 中共中央 国务院印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-02/18/content_5366593.htm#1, 2019-02-18.
- [34] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, **123**(2): 135-143.
- [35] Wang Y Q. MeteInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis[J]. *Meteorological Applications*, 2014, **21**(2): 360-368.
- [36] 人民网. 《环境空气质量标准》修改单等获生态环境部原则通过[EB/OL]. <http://env.people.com.cn/n1/2018/0801/c1010-30183871.html>, 2018-08-02.
- [37] 罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 等. 近 20 年来中国典型区域 PM_{2.5} 时空演变过程[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- Luo Y, Deng Q F, Yang K, *et al.* Spatial-Temporal change evolution of PM_{2.5} in typical regions of China in recent 20 years[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- [38] 吴兑, 刘启汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子(PM_{2.5})污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(11): 2660-2669.
- Wu D, Alexis K H L, Leung Y, *et al.* Hazy weather formation and visibility deterioration resulted from fine particulate (PM_{2.5})

- pollutions in Guangdong and Hong Kong [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(11): 2660-2669.
- [39] 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 等. 1990~2017年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2572-2581.
- Liu Y, Lin A W, Qin W M, *et al.* Spatial-temporal distribution of aerosol optical depth and its main influence types in China during 1990-2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2572-2581.
- [40] 廖志恒, 孙家仁, 范绍佳, 等. 2006~2012年珠三角地区空气污染变化特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 329-336.
- Liao Z H, Sun J R, Fan S J, *et al.* Variation characteristics and influencing factors of air pollution in Pearl River Delta area from 2006 to 2012 [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 329-336.
- [41] 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.
- [42] 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 O₃ concentrations in mountain background region of east China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2519-2525.

欢迎订阅 2020 年《环境科学》

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

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

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

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

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

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai: Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Staw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EDTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yang, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)