

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长风, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析

段家乐, 巨天珍*, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 为了解粤港澳(Guangdong-Hong Kong-Macao, GHM)大湾区气溶胶污染现状, 基于 OMAERUV 日产品数据, 对粤港澳大湾区 2008~2019 年吸收性气溶胶指数(ultraviolet aerosol index, UVAI)的时空分布、未来趋势变化和潜在源区进行了分析, 并对其影响因素进行了探讨。结果表明, GHM 大湾区年时间序列上 UVAI 呈现出下降的趋势, 年均下降为 2.3%; 月时间序列上从春季开始呈现倒“V”形, 季节特征春季最高, 冬、秋次之, 夏季最低; 空间上呈现中部区域一直属于高值区, 12 年年均 UVAI 高达 0.35; UVAI 分布在时间序列主要表现为可持续, 有 82.69% 的区域在未来 UVAI 将呈现下降的趋势; GHM 大湾区外部潜在源主要是东部工业产生的碳质源和海洋带来的生物源; UVAI 潜在源区春季以碳质源和生物质源为主, 夏季以生物质气溶胶源为主, 秋季以碳质源占比最大, 冬季沙尘性质气溶胶源有所增加; 通过相关性分析, 气溶胶和 $PM_{2.5}$ 之间是相互依附的关系, 工业生产活动是大气气溶胶的重要组成部分, 降水可以降低大气中因工业生成所产生的气溶胶含量, 第二产业活动在气温升高的情况下会加快气溶胶的生成。

关键词: 吸收性气溶胶指数(UVAI); 粤港澳(GHM)大湾区; 时空分布; 未来趋势; 污染潜在源区; 影响因素

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3652-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012203

Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

DUAN Jia-le, JU Tian-zhen*, HUANG Rui-rui, LIANG Zhuo-hong, FAN Jia-chen

(Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study examines the current aerosol pollution scenario in the Guangdong-Hong Kong-Macao (GHM) Greater Bay Area, based on OMAERUV daily data products, to define the spatial and temporal distribution from 2008 to 2019 and predict variation trends of the ultraviolet aerosol index (UVAI). Changes and potential source areas were analyzed, and their influencing factors were identified. The annual time series of UVAI in the GHM Greater Bay Area showed a downward trend, with an average annual decrease of 2.3%; the monthly time series showed an inverted “V” shape beginning in spring, with the highest seasonal UVAI occurring in spring, followed by winter and autumn. Summer exhibited the lowest UVAI; spatially, the central region has consistently exhibited high values, with an average annual UVAI of 0.35 calculated over 12 years. The distribution of UVAI in the time series is mainly sustainable, and 82.69% of the area will show a downward trend in the future. The main potential sources from beyond the study area are carbon sources and marine biological sources produced by eastern industry; the main potential sources of UVAI are carbon and biomass sources in spring, biomass aerosol sources in summer, and carbon sources in autumn. It accounts for the largest proportion, and aerosol sources of sand and dust in winter have increased. Through correlation analysis, aerosols and $PM_{2.5}$ were found to be interdependent. Industrial production activities are an important contributor of atmospheric aerosols, and precipitation can reduce the atmosphere. Due to the aerosol content produced by industrial production, secondary industrial activities will accelerate the formation of aerosols when the temperature rises.

Key words: ultraviolet aerosol index (UVAI); Guangdong-Hong Kong-Macao (GHM) Greater Bay Area; temporal and spatial distribution; future trends; potential sources of pollution; influencing factors

大气颗粒物凝结成核是全球大气中气溶胶颗粒的主要来源^[1], 并且是影响气候的重要原因, 大气气溶胶在地球大气辐射能量平衡中起着至关重要的作用, 悬浮在大气中的颗粒物可以通过散射和吸收太阳辐射直接影响气候, 也可以通过改变云的性质间接影响气候^[2~6], 大气气溶胶在全球气候变化中具有很大不确定性^[7~9]. 部分气溶胶不仅可以通过呼吸道直接进入人体肺部, 还可以进一步渗透到人体血液中甚至通过血液输送到脑部, 严重影响人类健康^[10,11]. 根据对太阳辐射的吸收程度, 气溶胶可分为吸收性气溶胶和非吸收性气溶胶, 由于吸收性

气溶胶的寿命短、来源广泛和性质多变, 其分布具有空间差异和时间变化特征, 因此, 详细了解吸收性气溶胶的需求极为迫切^[12]. 对预测气候变化和对天气影响, 具有重要的意义。

气溶胶的观测手段主要包括卫星遥感、地基观测两大类. 地面监测精度高且可同时获得多种大气

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-02-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500907); 兰州市科技计划项目(2017-RC-69)

作者简介: 段家乐(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染, E-mail: DJL3221259903@163.com

* 通信作者, E-mail: 3221259903@nwnu.edu.cn

环境参数,但地面站点监测分布稀疏且费用高昂^[13,14]. 卫星遥感观测恰恰弥补了不足,其空间覆盖率高、时间连续性强,可以在同一时间内观测较大空间范围内的气溶胶光学性质用以全面反映大气污染特征^[15~18].

已有众多国内外研究学者都对大气气溶胶进行了研究. 张宸赫等^[19]对东北三省气溶胶光学厚度(AOD)的研究中发现,AOD 高值区出现 AOD 增大、AOD 低值区出现 AOD 减小的“两极分化”趋势,人为活动和气象条件变化是导致该两极分化趋势出现的原因. 陈斌^[20]利用卫星和 AERONET 观测资料发现了获取吸收性气溶胶来源分类的方法,比如沙尘、黑碳和有机碳气溶胶等;杨晓旻等^[21]对南京黑碳气溶胶的研究中发现南京黑碳气溶胶存在明显的季节差异,即春季>冬季>秋季>夏季. 王璐等^[22]对成都地区黑碳气溶胶的研究中发现各季节受到气团来源的影响存在差异,但主要以成都周边及以东至重庆区域影响为主. 方言等^[23]在对东海地区的研究中发现气溶胶在夏季主要受到海洋源的影响较大,冬季则主要受到人为排放源的输入影响. 李逢帅等^[24]在对甘肃省吸收性气溶胶的研究中发现,工业排放、汽车尾气和建筑粉尘均是吸收性气溶胶的重要来源. 曾唯等^[25]对北碚区气溶胶光学厚度的研究中分析了 AOD 与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 之间的相关性,得出 AOD 与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 之间全年均呈正相关性,且不同季节下的决定系数和相关函数均有差异,其中冬季相关性最好. 基于此,对粤港澳(GHM)大湾区(Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area)吸收性气溶胶指数潜在源区年际变化和月际变化进行了深入的分析,并对其未来趋势及影响因素进行了探讨,以期今后 GHM 大湾区空气质量管理的经验和经验提供可靠性技术支撑,并为政府部门在治理大气污染、制定环保政策方面提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

粤港澳(GHM)大湾区($21^{\circ}56' \sim 24^{\circ}40'N$, $111^{\circ}35' \sim 115^{\circ}41'E$)隶属于广东省,由珠三角城市群和中国香港、澳门两个特别行政区组成. GHM 大湾区占地总面积 $5.6 \times 10^4 km^2$,平均海拔高度为 132 m(图 1),地属亚热带季风型气候. 2018 年底 GHM 大湾区森林覆盖率达 51.84%,远远高出全国森林覆盖率 22.96% 的平均水平. GHM 大湾区占全国陆地总面积的 0.58%,2018 年末总人口达 7 000 万人,常住人口约占全国总量的 5.02%,2018 年 GDP 占全国的 12.07%. GHM 大湾区城市群是继美国纽约

湾区、美国旧金山湾区和日本东京湾区之后的第四大世界级湾区,是国家建设世界级城市和参与全球竞争的空间载体,是我国开放程度最高、经济活力最强的城市群之一,在经济快速发展的同时,也面临着严重的大气污染^[26,27].

近年来,GHM 大湾区通过实施一系列举措,使得空气质量呈现改善趋势. 但由于持续的经济增长和能源消耗,GHM 大湾区仍有空气严重污染现象发生. 已有研究表明,经济发展阶段、产业结构、城市化水平和人口密度等诸多社会经济因素影响地区空气污染水平^[28].

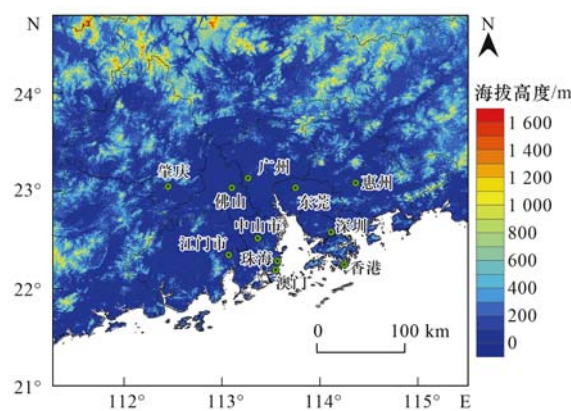


图 1 粤港澳(GHM)大湾区地形示意

Fig. 1 Topography of the Guangdong-Hong Kong-Macao (GHM) Greater Bay Area

1.2 数据来源

1.2.1 UVAI 数据

本文所使用的 UVAI 数据来源于搭载在 EOS-Aura 卫星上的 OMI 传感器. Aura 卫星是一颗由多国共同研制的极轨、太阳同步探测卫星,轨道高度 705 km,过赤道的时间为 $13:45 \pm 15 min$. OMI 是荷兰宇航计划总局和荷兰气象研究所提供,波长范围 270 ~ 500 nm,平均波谱分辨率 0.5 nm,星下点分辨率 $13 km \times 24 km$,扫描宽度 2 600 km,覆盖全球只需 1 d^[29].

臭氧监测仪(OMI)是一种高分辨率的光谱仪,可测量太阳光谱的紫外线和可见光^[30]. 本文选用 UVAI 资料是在紫外波段下获得的数据,此产品由比利时太空大气研究所(BIRA-ISAB)反演,并发布在 NASA 官网上的 GES DISC,OMI 反演的紫外吸收性气溶胶指数(UVAI)是利用两个紫外通道光谱的辐射通量之比来定义的^[31,32].

1.2.2 其他辅助数据

本文使用的 $PM_{2.5}$ 数据由多颗卫星气溶胶光学深度产品数据与化学传输模型相结合,通过地理加权回归得出的估算值,并使用地面太阳光度计的观测值确定其可靠性. 所得的 $PM_{2.5}$ 样本估计值与实际

观测值交叉验证得出 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的一致性 ($R^2 = 0.81$). 其获取得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据主要是人为源浓度^[33].

本文所采用的 DEM、降水和气温数据来源于中国科学院资源科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 人口密度数据来源于 LandScan 数据网站 (<https://landscan.ornl.gov/>), 诸多社会经济及人类活动数据如: GDP、第二产业生产总值、房屋建筑施工面积、能源消耗总量和烟气粉尘排放量来自于中华人民共和国国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn/>) 和广东省统计局 (<http://stats.gd.gov.cn/tjsj186/index.html>) 发布的统计年鉴数据.

1.3 研究方法

1.3.1 基于像元的未来趋势分析

根据英国水文专家 Hurst 提出的基于重标极差 (R/S) 分析的 Hurst 指数计算原理, 结合 UVAI 数据, 利用 Matlab 软件实现 Hurst 指数的像元空间计算^[34,35]. 基于重标极差 (R/S) 分析方法的 Hurst 指数可预测某一时间或时空序列未来发展趋势, 其基本原理是: 设有时间序列 $\{\zeta(t)\}$, $t=1, 2, \dots$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$.

均值序列:

$$\langle \zeta \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \zeta(t) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (1)$$

累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\zeta(u) - \langle \zeta \rangle_\tau] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (3)$$

标准差:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{\zeta(t) - \langle \zeta \rangle_\tau\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

R 、 S 和 τ 满足关系式:

$$R(\tau)/S(\tau) = a \cdot \tau^H \quad (5)$$

式中, a 为常数, $R(\tau)/S(\tau)$ 为重标极差, H 为 Hurst 指数.

如果 $H=0.5$, 则说明 UVAI 时间序列为一个随机序列, 不存在长期相关性; 当 $0 < H < 0.5$, 表明未来的变化状况与过去趋势相反, 即该过程具有反持续性; 当 $0.5 < H < 1$, 则表明未来的变化状况与过去趋势一致, 即该过程具有持续性; 且 H 越接近 1, 持续性越强.

1.3.2 污染源区的 WPSCF 算法

污染源区的计算使用了由中国气象科学研究院

王亚强研究员开发的适用于 GIS 程序和科学计算的应用软件 (MeteoInfo). PSCF 算法是一种基于气流轨迹分析识别源区的方法, 也被称为滞留时间分析法^[36,37]. 利用该方法确定影响空气质量的污染源区. 通常是将研究期间气流轨迹覆盖的区域按照经纬度划分成单元格, 单元格对应不同的 PSCF 值, 值的不同就代表了污染源概率的大小. PSCF 的值就是计算各网格内特定气流轨迹的占比, 具体公式计算:

$$\text{PSCF}_{(i,j)} = m_{(i,j)} / n_{(i,j)} \quad (6)$$

式中, $n_{(i,j)}$ 为落在网格点 (i,j) 的轨迹或者是轨迹节点的数量; $m_{(i,j)}$ 为落在网格 (i,j) 内的对应受体点污染水平超过设定浓度水平的轨迹或者是轨迹节点的数量.

由于 PSCF 分析存在一定的缺陷, 即在研究点的远端位置, 气流轨迹数较少, 这样计算公式中的分母部分的 $n_{(i,j)}$ 就会比较小, 导致 PSCF 的值比较高, 就会出现与实际不符的问题, 所以在研究计算的时候引入权重因子对 PSCF 值进行修正. 即根据不同的分母大小在 PSCF 值上乘以一个小于 1 权重因子. 具体的公式如下:

$$W_{(i,j)} = \begin{cases} 1.0, & 80 > n_{(i,j)} \\ 0.75, & 20 < n_{(i,j)} \leq 80 \\ 0.5, & 10 < n_{(i,j)} \leq 20 \\ 0.15, & 0 < n_{(i,j)} \leq 10 \end{cases} \quad (7)$$

对 PSCF 进行加权计算得:

$$\text{WPSCF}_{(i,j)} = W_{(i,j)} \times \text{PSCF}_{(i,j)} \quad (8)$$

1.3.3 偏相关分析方法

偏相关分析也称净相关分析, 它在控制其他变量的线性影响的条件下分析两变量间的线性相关性, 所采用的工具是偏相关系数 (净相关系数)^[38]. 控制变量个数为一时, 称为一阶偏相关系数; 控制变量个数为二时, 称为二阶相关系数; 控制变量个数为零时, 称为零阶偏相关系数.

$$r_{y_{x_1}, x_2} = \frac{r_{y_1} - r_{y_2} r_{12}}{\sqrt{(1 - r_{y_2}^2)(1 - r_{12}^2)}} \quad (9)$$

式中, r_{y_1} 、 r_{y_2} 和 r_{12} 分别代表 y 与 x_1 的相关系数、 y 与 x_2 的相关系数和 x_1 与 x_2 的相关系数. 其中, 偏相关分析的检验统计量为 T 统计量, 它的数学定义为:

$$T = R \sqrt{\frac{n - q - 2}{1 - R^2}} \quad (10)$$

式中, R 为偏相关系数, n 为样本量, q 为阶数. T 统计量服从 n 度的分布.

P 值是假设两变量无线性相关而言的. 一般假设检验的显著性水平为 0.05, 如果 P 值小于 0.05,

说明两变量有线性相关的关系,他们无线性相关的可能性小于 0.05;如果大于 0.05,则一般认为无线性相关关系,相关的程度由偏相关系数 R 决定, R 绝对值越大,说明越相关. R 正负值代表与 y 的相关性的正负关系

1.3.4 通径分析

通径系数分析(通径分析)是在 1921 年首先由赖特提出并经过不断完善应用于动植物遗传育种和作物栽培等其他领域^[39,40].多元线性回归系数间不能直接比较各因子间的效应大小,因为各回归系数间都带有不同的量纲,在多变量的关系中,往往都不是独立的,有时还要研究 x_i 通过 x_j 对依变量 y 的影响,而通径系数就能有效地表示相关变量间原因对结果的直接影响或间接影响的效应,从而区分因子的相对重要性及其关系.

$$p_{ij} = b_i \frac{\delta_{x_i}}{\delta_y} \tag{8}$$

式中, p_{ij} 为通径系数, b_i 为偏回归系数; δ_{x_i} 为 x_i 标准差, δ_y 为 y 的标准差.

2 结果与讨论

2.1 GHM 大湾区 UVAI 空间分布

2.1.1 UVAI 年际空间分布

图 2 为 2008~2019 年 GHM 大湾区 UVAI 空间

逐年分布,其值从 0~0.6 均分为 6 个等级.从中可知:研究区 2008~2019 年 UVAI 空间上整体分布趋势为西部的佛山市、江门市和中部中山市接壤区域一直属于高值区,这 12 a 年均值高达 0.35,其他区域如西部肇庆市的西北部、江门市的西南部、东部惠州市的北部和中部广州市的东北部一直处于低值水平.

2008 年 UVAI 最高值 0.201,为研究期间 12 a 中的最低值年,2009~2010 年 UVAI 较 2008 年呈现持续走高的趋势,2010 年为 12 a 中均值最高值年,除西部肇庆市西北部、中部广州市的东北部和东部惠州市的大部分区域,其余区域 UVAI 皆高于 0.4;UVAI 在 2011 年急剧下降,2012~2014 年较 2011 年再次出现略微增加的趋势,且中部污染严重的区域有向南部中山市扩散的趋势,2015 年起 UVAI 开始走低,其中 2011~2015 年这 5 a 为研究期间污染最为严重的时期,这与国家十二个五年计划大力发展经济带来大气环境污染有密切的关系;从 2016~2018 年 UVAI 持续走低,这和 2016 年初开始加大力度实施的大气污染减排防治措施有很大的影响,但佛山市、中山市和江门市污染严重的区域有扩大的趋势;在 2019 年 UVAI 呈现出较前几年反增加的状态,这可能是受地区降水、气温、极端天气和气象因素的影响.

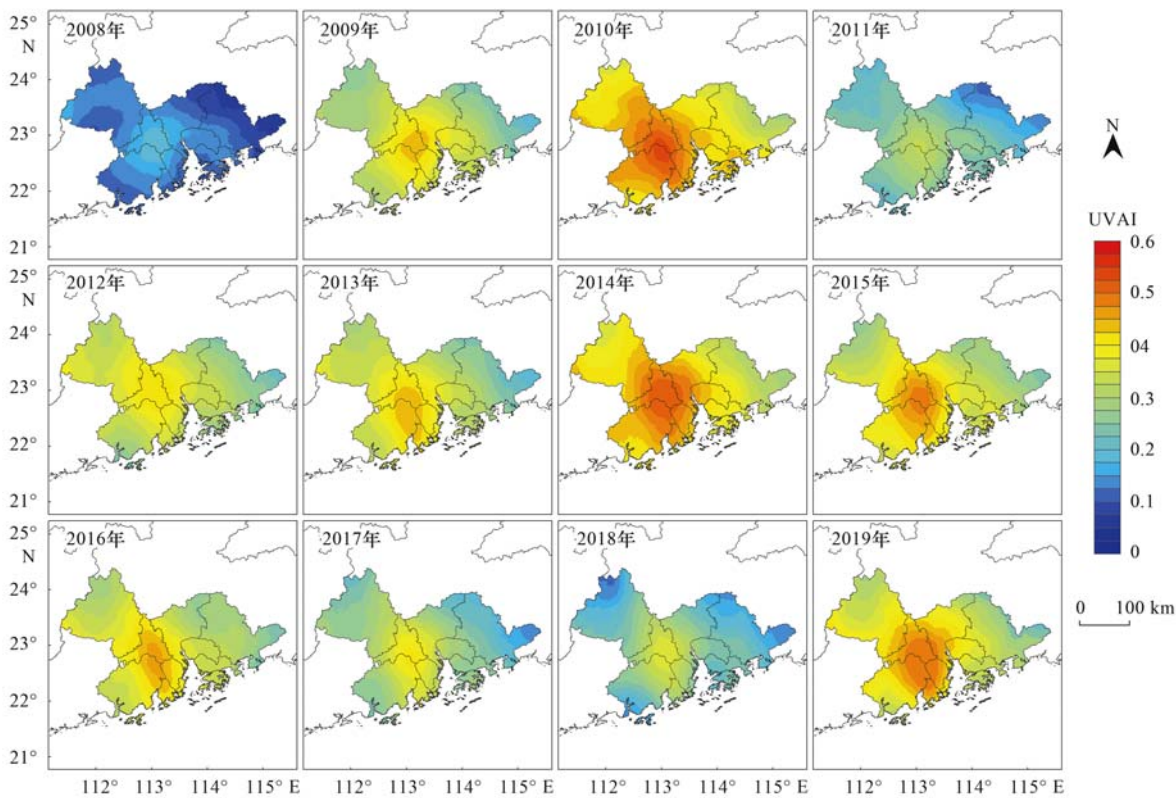


图 2 2008~2019 年 GHM 大湾区 UVAI 空间逐年分布

Fig. 2 Annual spatial distribution of UVAI in the GHM Greater Bay Area from 2008 to 2019

2.1.2 UVAI 月际空间分布

图3为2008~2019年GHM大湾区UVAI逐月空间分布变化,为便于说明将UVAI从-0.1~1.1均分为12个等级.总体来看,GHM大湾区空间分布的最高值区域随月份变化存在明显的差异,但整体上依旧呈现出中部区域高,其他区域低的分布特征.

3~5月GHM大湾区UVAI呈现出持续降低的趋势,3月为1a中的最高值月,出现大面积高值区域,4月最高值区为江门市的东北部,5月UVAI显著降低,最高值为佛山市和江门市的接壤区域以及惠州市的北部,此时节为春季,气温回升,且天气干燥,地表解冻土质疏松,表面植被稀少,易引起沙尘

高暴发,沙尘性气溶胶对UVAI贡献较大;6~8月出现略微增加的趋势,且污染最严重的区域由GHM大湾区的中南部向中部扩散至中北部,即污染最严重的区域由江门市向佛山市扩散至广州市,UVAI为1a中最低值季节,此时节为夏季,雨水多发,降雨对气溶胶的冲刷和沉淀效果较好;9~11月GHM大湾区UVAI出现了1a中增加的态势,且污染最严重的区域随月份变化由中部向南部辐射扩散并在11月达到了较高的水平;12月~次年2月GHM大湾区依旧出现持续走高的趋势,但并没有达到峰值,可能是由于南方较北方温度高,没有暖气采暖引发黑碳气溶胶升高,较北方出现季节性冬春季的差异^[41,42].

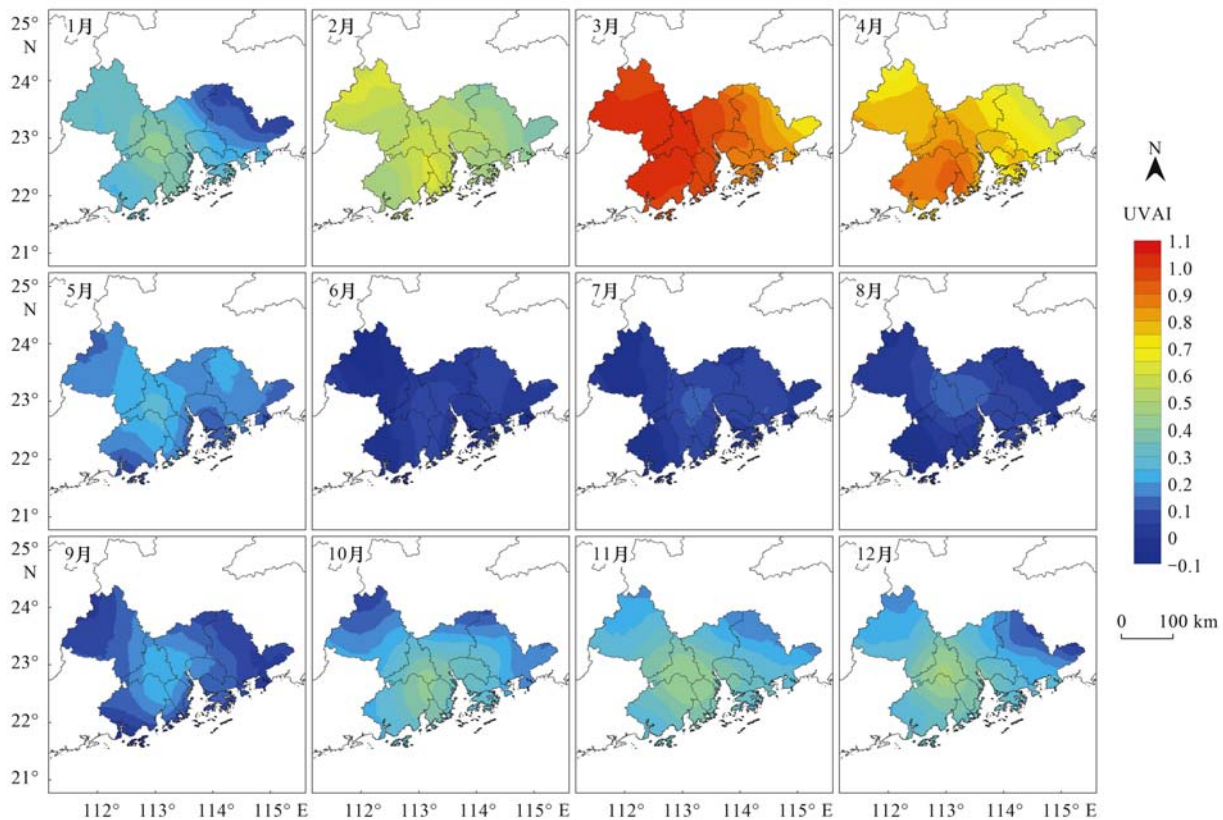


图3 2008~2019年GHM大湾区UVAI逐月空间分布

Fig. 3 Monthly spatial distribution of UVAI in the GHM Greater Bay Area from 2008 to 2019

2.2 GHM 大湾区 UVAI 时间变化

2.2.1 UVAI 年际时间变化

图4为GHM大湾区2008~2019年这12a的UVAI不同等级占比和三值变化.总体来看,UVAI随年际变化整体上呈现出略微下降的趋势,年均下降2.3%,重度污染的年份出现在2010、2014和2019年.为方便说明,将此图的等级划分与图2一致.

2009~2010年UVAI较2008年三值均呈现显著增加的趋势,且在2010平均值达到最大值0.425;UVAI在2011年呈现出急剧下降的趋势,较2010年下降45.2%;2012~2013年中占比最大的

区域为0.3~0.4,均超过了59.6%;2014年0.4~0.5类区占主导地位,2015~2018年这4a间UVAI持续走低,到2018年0.1~0.2的低值区占比28.9%;2019年UVAI呈现出较前几年增加的态势,最低高值达0.23.

2.2.2 UVAI 月际时间变化

图5为GHM大湾区2008~2019年不同月份UVAI不同等级占比和三值变化.总体来看,UVAI从春季(3~5月)开始随月份变化呈现出“V”字形.为方便说明,将此图的等级划分与图3一致.

3月GHM大湾区1.0~1.1区间等级达到了

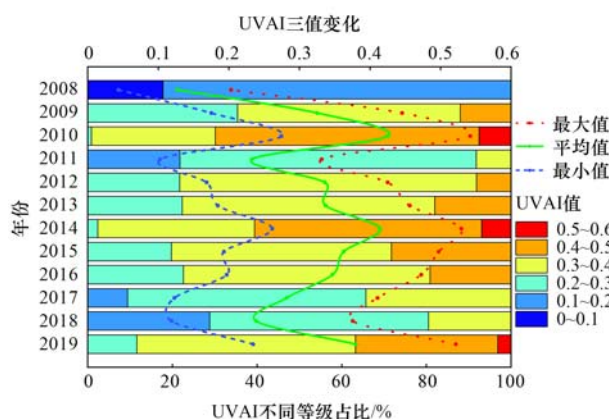


图4 GHM 大湾区 UVAI 不同年份等级占比和三值变化

Fig. 4 UVAI percentages in the GHM Greater Bay Area and changes in three values in different years

53.20%,其平均值也高达0.695,为1 a 中的最高值月,4~5月显著降低,5月最高值为0.27,首次出现月份低于年均值0.317;6月UVAI首次出现了负值,且6月为1 a 中的最低值月,7~8月UVAI的三值均呈现出略微增加的趋势,3个月中0~0.1区间占比均超过65.5%;9月UVAI依旧较低且只占划分的3个区间,10~11月出现0.4~0.5取值区间;12月UVAI较11月最大值略有升高,但平均值出现下降的趋势,1~2月UVAI显著增加,且2月UVAI平均值高达0.52.并由此也可得出UVAI的季节性变化为春季>冬季>秋季>夏季^[43,44].

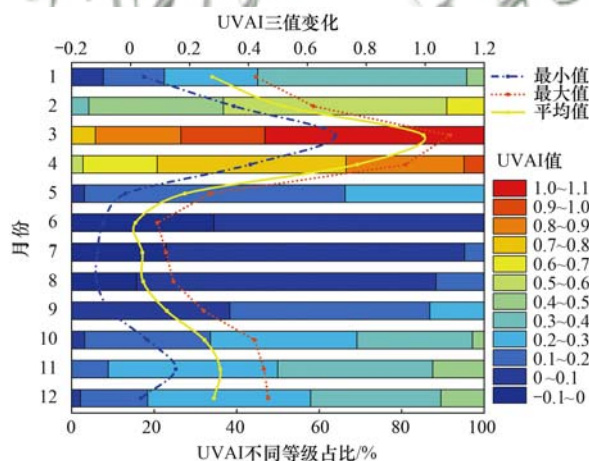


图5 GHM 大湾区 2008~2019 年不同月份 UVAI 等级占比和三值变化

Fig. 5 GHM Greater Bay Area UVAI grade percentage and changes in three values in different months from 2008 to 2019

2.3 GHM 大湾区 UVAI 未来趋势变化

基于对 GHM 大湾区 2008~2019 年 UVAI 时空分布的研究,为了能对 GHM 大湾区未来 UVAI 时空变化进行研究和预测,本文基于 R/S 分析的原理,得出 GHM 大湾区年 UVAI 浓度变化的 Hurst 指数空间分布(图6).Hurst 指数(H)的取值范围为 0.28~

0.87,并将其分为4类:反持续性($0 < H < 0.3$)、弱反持续性($0.3 < H < 0.5$)、弱持续性($0.5 < H < 0.7$)和强持续性($0.7 < H < 1$).

为了深入了解 UVAI 未来变化趋势,将一元线性回归分析法结合逐像元空间数据得出的趋势空间分布结果(GHM 大湾区全境内呈现下降趋势)与 Hurst 指数空间分布格局进行叠加,即与图6空间分布结果一致.可以发现研究区 UVAI 浓度呈现弱反持续增加的区域面积占 17.22%,主要分布在肇庆市西北角和东北角、广州市大部分区域和惠州市的中部和西北部,该区域的 UVAI 靠内陆,地势相对高,污染物排放后易在此聚集;呈现弱持续降低的区域面积占 72.75%,为 GHM 大湾区大部分区域,该区域持续性受人为排放源排放污染降低,减排力度增加的影响和自然因素尤其是植被影响较为强烈;呈现持续降低的区域面积占 9.94%,主要分布在 GHM 大湾区的南部沿海部分区域,该区域受海路风的影响,在白天通过气压梯度力的影响下把高空的污染物输送至海洋区域^[45].

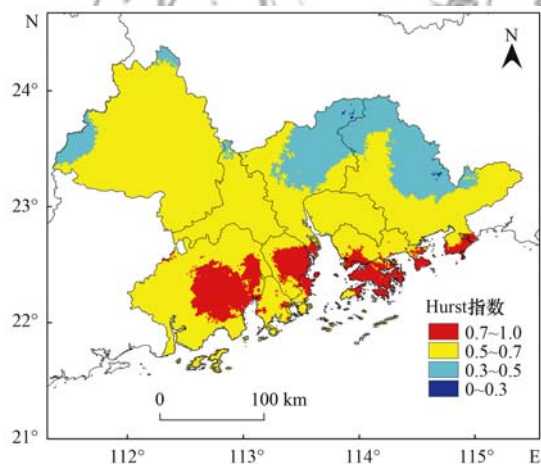


图6 GHM 大湾区 Hurst 指数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of Hurst index in the GHM Greater Bay Area

2.4 GHM 大湾区 UVAI 潜在源区分析

为了解 GHM 大湾区气溶胶污染潜在源区,本文选取 UVAI 每天浓度均值,结合每天一条后向轨迹且轨迹时长为 36 h 的路线,按 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的格网对轨迹路线进行网格化处理,绘制出潜在源区,并使用 Python 语言对图片结果进行优化.对广州极不同年份和月份吸收性气溶胶潜在源区进行研究,WPSCF 结果越大,该地更大可能是受体位置 UVAI 的源区.

根据广州极 WPSCF 值的空间分布并结合前人研究^[46~49],为方便说明,将其划分为 5 个潜在源区(图7和图8).1号框:北风源主要为第二级阶梯黄土高原部分区域、河南南部、湖北和湖南东部,其中北风源的黄土高原地区多为黄土荒漠,植被覆盖率

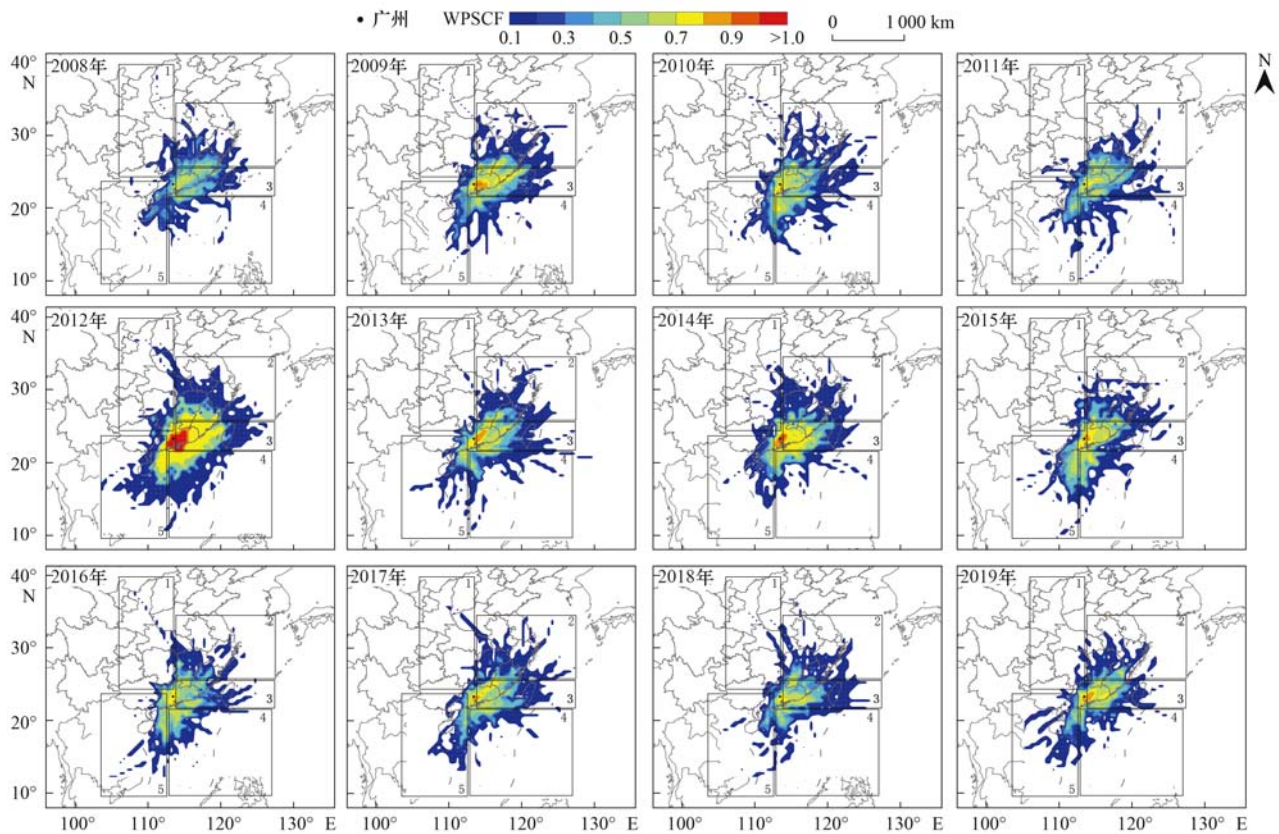


图7 2008~2019年不同年份广州级潜在源区

Fig. 7 Potential source areas for Guangzhou in different years from 2008 to 2019

低,且向南地势逐步降低,沙尘性质气溶胶为主要来源;2号框:东北风源包括长江中下游平原东部、浙江省南部、江西省大部分地域和福建省北部,此地有四大工业基地的沪宁杭工业基地和众多工业中心,该区域为碳质源的主要贡献区;3号框:东风源主要包括中国台湾省大部分区域、台湾海峡和福建省南部,此地为海陆接壤区域,既有工业中心产生的碳质源,又有海洋输送来的生物源;4号框:南风源主要为南海海域,海洋生物质气溶胶是唯一的来源.5号框:西南风源包括广西壮族自治区东南部、海南省大部 and 南海海域,因此为工业中心产生的碳质源和海域产生的生物源的共同作用源.

2.4.1 潜在源区年际变化

图7为GHM大湾区广州级2008~2019年这12a逐年UVAI的潜在源区,总体来看,广州级UVAI潜在源区常年主要以碳质源和生物源为主.

2008~2009年广州级UVAI的潜在源区以东部为主,且2008年为历年最低值年;2010年东南沿海带来的生物质气溶胶源比重有所增加;2011~2012年较前几年西南方向由碳质源和生物源的混合源区相对开始呈现增加的趋势,2011年北方沙尘源开始降低,且2012年潜在污染源区所占达到历年最大;2013~2014东南方向生物质气溶胶源显著降低,

2014年潜在污染源区相对更加集中;2015~2017年南部和西南部带来的碳质源和生物质源明显增加,2015年南部源区历年输送最远,2016年东南方生物质源占比增加,2017年由东部浙江来的碳质源开始上升;北方沙尘源在2018年外部源贡献明显下降,且WPSCF值较低;在2019年外部源明显上升,潜在源主要为东部浙江和江西带来的碳质源.

2.4.2 潜在源区月际变化

图8为GHM大湾区广州级累计12a不同月份UVAI的潜在源区,总体来看,广州级UVAI潜在源区在不同月份上存在明显的差异,外部潜在源贡献源在季节上整体呈现出与UVAI值一样的趋势,即春季高于冬、秋季,夏季次之.

3~5月为春季,3月外部潜在来源为1a中的最高值月,主要潜在源为内部源、东部碳质源和生物质源为主,4月南部和东南部的生物质源占比呈现明显增加的趋势,且5月潜在来源对本地的影响明显下降;6~8月为夏季,6月为1a中的最低值月,WPSCF值较低,且6~7月以南部和西南部带来的生物质气溶胶为主,尤以7月最为显著,8月东部产生的碳质源开始增加;9~11月为秋季,9月东北方向产生的碳质源显著增加,10月开始,南部和西南部的生物质源开始显著降低,10月以东北方向

的碳质源最为显著,11月以东部的碳质气溶胶源和生物质气溶胶源为主;12月~次年2月为冬季,12月由北方黄土高原带来的沙尘性质气溶胶源开始增加,1月污染源区相对集中外部污染源也较低,2月潜在来源尤其以南部和西南部带来的生物质气溶胶源开始增加。

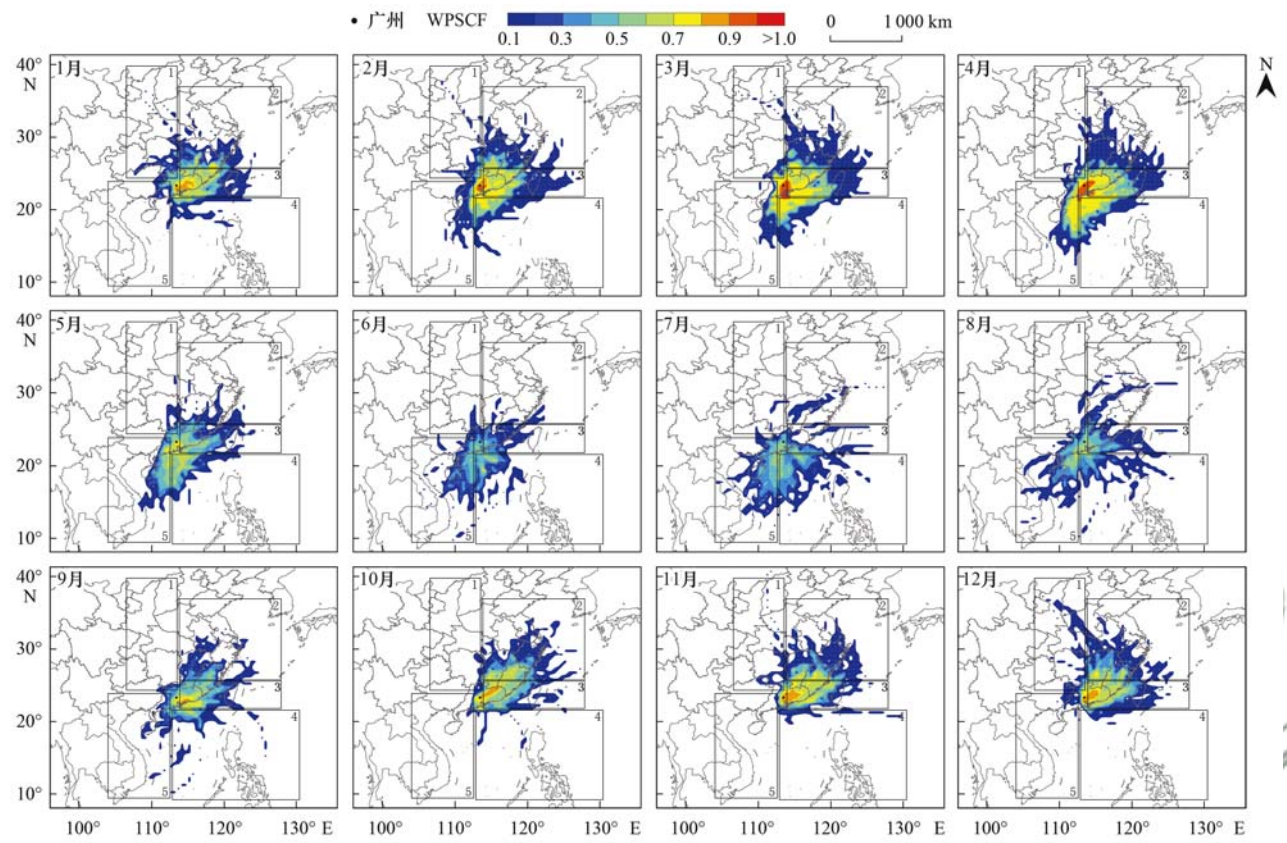


图8 2008~2019年不同月份广州级潜在源区
Fig. 8 Potential source areas for Guangzhou in different months from 2008 to 2019

2.5 GHM大湾区UVAI浓度的影响因素

有很多因素影响气溶胶的浓度,主要分为自然因素和人为因素.自然因素包括自然排放粉尘性质污染物和气象要素(降水、风速、风向、气压和湿度等)对大气中吸收性气溶胶存在不同程度的影响^[50,51].人为因素中人们的生产生活活动、工业生产和城市建设等也会产生大量气溶胶。

2.5.1 UVAI偏相关分析

为研究了解气溶胶与PM_{2.5}、房屋建筑施工面积和烟气粉尘排放量等因子间的关系,对年UVAI数据进行偏相关分析.表1为GHM大湾区2008~2019年UVAI与影响因素之间偏相关分析结果。

UVAI的影响因子中,PM_{2.5}、第二产业和降水量通过了P值为0.05的检验,气温通过了P值为0.1的检验.UVAI与PM_{2.5}浓度值存在极显著偏相关关系,偏相关性系数高达0.9679,P值为0.0026,表明气溶胶和PM_{2.5}之间是相互依存的关系;UVAI与第二产业即工业的偏相关亦高达0.8602,T检验值为2.921,可以得知工业生产也是大气气溶胶的重要组成部分;UVAI与降水量之间偏相关性系数为

-0.8529,由此表明可通过人工降水来控制空气中气溶胶的浓度;UVAI和气温亦存在较强的正相关关系.偏相关分析通过两次逐步回归,剔除两个影响因素小的因子,得出线性回归方程:

$$Y = -3.290\,475\,89 + 0.029\,530\,466\,190\,X_1 \text{ (PM}_{2.5}\text{)} - 0.000\,004\,351\,264\,764\,X_2 \text{ (房屋建筑施工面积)} - 0.000\,023\,855\,685\,591\,X_3 \text{ (GDP)} + 0.000\,101\,793\,879\,48\,X_4 \text{ (第二产业)} + 0.000\,099\,170\,941\,45\,X_5 \text{ (降水)} + 0.073\,967\,009\,90\,X_6 \text{ (气温)} - 0.000\,008\,612\,982\,681\,X_7 \text{ (烟气粉尘排放量)}$$

表1 GHM大湾区2008~2019年UVAI的影响因素偏相关分析
Table 1 Partial correlation analysis of factors influencing UVAI in the GHM Greater Bay Area from 2008 to 2019

项目	偏相关系数	T 检验值	P 检验值
r(UVAI,PM _{2.5})	0.967 9	6.673 8	0.002 6
r(UVAI,房屋建筑施工面积)	-0.547 2	1.132 5	0.320 7
r(UVAI,GDP)	-0.756 4	2.003 1	0.115 7
r(UVAI,第二产业)	0.860 2	2.921	0.043 2
r(UVAI,降水)	-0.852 9	2.830 2	0.047 3
r(UVAI,气温)	0.844 6	2.732 3	0.052 3
r(UVAI,烟气粉尘排放量)	-0.738 7	1.897 9	0.130 5

2.5.2 UVAI 的通径系数分析

为进一步弄清 UVAI 和影响因子之间直接和间接关系,进行通径系数分析.表 2 为 GHM 大湾区 UVAI 和影响因子通径分析模型输出的结果,其中,总决定系数 $R^2 = 0.969\,81$, 剩余通径系数: $0.173\,76$.

表 2 列出了不同因素与 UVAI 之间直接和间接通径系数,从通径系数可以看出,自变量 X 对 Y 的直接通径作用是: $X_1Y = 1.707\,6$; $X_2Y = -0.468\,7$; $X_3Y = -4.720\,7$; $X_4Y = 7.466\,7$; $X_5Y = -0.478$; $X_6Y = 0.421\,3$; $X_7Y = -0.778\,3$. 可知第二产业对气溶胶的影响最为显著.

通过计算间接通径系数, X_1 通过 X_4 对 Y 的间

接通径系数为: $6.375\,9$, 说明第二产业产生的 $PM_{2.5}$ 对气溶胶存在为较强的影响; X_1 通过 X_6 对 Y 的间接通径系数为: $0.044\,2$; X_2 通过 X_3 对 Y 的间接通径系数为 $-4.472\,1$, 表明在 GDP 的高速发展下房屋建筑业相对减缓发展,对气溶胶的产生有所改善; X_5 通过 X_4 对 Y 的间接通径系数为: $-2.004\,8$, 即可得知,在第二产业产生的气溶胶的情况下,降水可以降低大气中因工业所产生的气溶胶含量; X_6 通过 X_4 对 Y 的间接通径系数为: -2.016 , 在气温升高的情况下,第二产业活动会加速气溶胶的生成; X_7 通过 X_3 对 Y 的间接通径系数为: $-4.474\,8$, 表明在 GDP 的高速发展下烟气粉尘排放量相对降低排放,降低了大气中由烟气粉尘产生的气溶胶含量.

表 2 GHM 大湾区 UVAI 和影响因子之间通径分析

Table 2 Path analysis between UVAI and impact factors in the GHM Greater Bay Area

变量	直接通径系数	间接通径系数						
		X_1-Y	X_2-Y	X_3-Y	X_4-Y	X_5-Y	X_6-Y	X_7-Y
$PM_{2.5}(X_1)$	1.707 6	—	0.379 5	4.059 5	6.375 9	0.211 9	0.044 2	0.648 5
房屋建筑面积(X_2)	-0.468 7	-1.382 5	—	-4.472 1	7.103 6	0.063 3	-0.108 2	-0.693 8
GDP(X_3)	-4.720 7	-1.468 4	-0.444	—	7.451 7	0.128	-0.094 9	-0.737 8
第二产业(X_4)	7.466 7	-1.458 1	-0.445 9	-4.711 2	—	-0.128 3	-0.113 7	-0.736 7
降水(X_5)	-0.478	-0.756 9	-0.062	-1.263 9	-2.004 8	—	-0.020 3	-0.100 9
气温(X_6)	0.421 3	0.179 2	0.120 3	1.063 7	-2.016	-0.023 1	—	0.156 2
烟气粉尘排放量(X_7)	-0.778 3	-1.422 8	-0.417 8	-4.474 8	7.067 3	0.062	-0.084 6	—

3 结论

(1) GHM 大湾区 2008 ~ 2019 年年均 UVAI 整体呈现出下降的趋势, UVAI 年均降幅为 2.3%, 尤其以 2011 年下降最为显著. UVAI 逐月变化特征从春季开始呈现倒“V”形, 季节变化特征为: 春季最高, 冬、秋次之, 夏季最低. 空间上呈现出中部区域一直属于高值区, 12 a 年均值高达 0.35, 其他区域低的趋势特征.

(2) 用 Hurst 指数对 GHM 大湾区未来 UVAI 时空变化预测研究, Hurst 指数大于 0.5 的区域占整个研究区的 82.69%, 其平均值为 0.68. 表明 GHM 大湾区 UVAI 分布的时间序列主要表现为可持续, 将趋势空间分布结果与 Hurst 指数进行叠加, 有占比 17.31% 的区域在未来 UVAI 呈现增加的趋势, 预测结果与 GHM 大湾区整体浓度下降的趋势一致.

(3) GHM 大湾区广州极常年主要以东部工业产生的碳质源和海洋带来的生物源为主要外部潜在源区, 尤以 2012 年外部潜在气溶胶来源最为严重; UVAI 潜在源区在不同季节上存在明显的差异, 春季以碳质源和生物源为主, 夏季以生物质气溶胶源为主, 秋季以碳质源占比最大, 冬季沙尘性质气溶胶源开始增加. 可知 GHM 大湾区气溶胶潜在源是

碳质源和生物质源.

(4) UVAI 与影响因子间偏相关顺序为: $PM_{2.5} >$ 第二产业 $>$ 降水 $>$ 气温 $>$ GDP $>$ 烟气粉尘排放量 $>$ 房屋建筑面积, 表明气溶胶和 $PM_{2.5}$ 之间是相互依存的关系; UVAI 与第二产业即工业的偏相关亦高达 0.860 2, 可以得知工业生产也是大气气溶胶的重要组成部分; 计算间接通径系数, 可知第二产业产生的 $PM_{2.5}$ 对气溶胶为相互产生促进作用; 第二产业生产在有气溶胶生成的情况下, 降水可以降低大气中因工业生成所产生的气溶胶含量, 在气温升高的情况下, 第二产业活动会加速气溶胶的生成.

致谢: 本研究卫星数据 UVAI 来自美国 NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GESDISC), 在此表示衷心感谢.

参考文献:

[1] Kulmala M, Kontkanen J, Junninen H, *et al.* Direct observations of atmospheric aerosol nucleation [J]. Science, 2013, **339** (6122): 943-946.

[2] Kaskaoutis D G, Kosmopoulos P, Kambezidis H D, *et al.* Aerosol climatology and discrimination of different types over Athens, Greece, based on MODIS data [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41** (34): 7315-7329.

[3] Alam K, Trautmann T, Blaschke T, *et al.* Aerosol optical and radiative properties during summer and winter seasons over Lahore and Karachi [J]. Atmospheric Environment, 2012, **50**: 234-245.

- [4] Zhao H J, Gui K, Ma Y J, *et al.* Climatology and trends of aerosol optical depth with different particle size and shape in Northeast China from 2001 to 2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **763**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142979.
- [5] Ding Q J, Sun J N, Huang X, *et al.* Impacts of black carbon on the formation of advection-radiation fog during a haze pollution episode in eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(11): 7759-7774.
- [6] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰. 艾比湖地区气溶胶光学特性分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3484-3491.
Zhang Z, Ding J L, Wang J J. Aerosol optical properties over the Ebinur region [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3484-3491.
- [7] Viswanatha Vachaspati C, Reshma Begam G, Nazeer Ahammed Y, *et al.* Characterization of aerosol optical properties and model computed radiative forcing over a semi-arid region, Kadapa in India [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **209**: 36-49.
- [8] Yang J H, Kang S C, Ji Z M, *et al.* Vital contribution of residential emissions to atmospheric fine particles ($PM_{2.5}$) during the severe wintertime pollution episodes in western China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 519-530.
- [9] Chen L, Zhang F, Yan P, *et al.* The large proportion of black carbon (BC)-containing aerosols in the urban atmosphere [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114507.
- [10] Pöschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005, **44**(46): 7520-7540.
- [11] Tan C H, Zhao T L, Xu X F, *et al.* Climatic analysis of satellite aerosol data on variations of submicron aerosols over East China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 392-398.
- [12] Che H Z, Zhao H J, Wu Y F, *et al.* Application of aerosol optical properties to estimate aerosol type from ground-based remote sensing observation at urban area of northeastern China [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, **132**: 37-47.
- [13] Khan R, Kumar K R, Zhao T L. The climatology of aerosol optical thickness and radiative effects in southeast Asia from 18-years of ground-based observations [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113025.
- [14] 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.
- [15] Li R K, Li Z P, Gao W J, *et al.* Diurnal, seasonal, and spatial variation of $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. *Science Bulletin*, 2015, **60**(3): 387-395.
- [16] Guo J P, Xia F, Zhang Y, *et al.* Impact of diurnal variability and meteorological factors on the $PM_{2.5}$ -AOD relationship: implications for $PM_{2.5}$ remote sensing [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **221**: 94-104.
- [17] Xiao Q, Zhang H, Choi M, *et al.* Evaluation of VIIRS, GOCI, and MODIS collection 6 AOD retrievals against ground sunphotometer observations over East Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1255-1269.
- [18] Shen L J, Wang H L, Zhao T L, *et al.* Characterizing regional aerosol pollution in central China based on 19 years of MODIS data: spatiotemporal variation and aerosol type discrimination [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114556.
- [19] 张宸赫, 赵天良, 王富, 等. 2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 476-484.
Zhang C H, Zhao T L, Wang F, *et al.* Variations in aerosol optical depth over Three northeastern provinces of China, in 2003-2014 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 476-484.
- [20] 陈斌. 利用卫星和 AERONET 观测资料对东亚地区吸收性气溶胶识别及其光学特征分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
Chen B. Detection light-absorbing aerosols and their properties from satellite and AERONET observations over east Asia [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [21] 杨晓旻, 施双双, 张晨, 等. 南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 620-629.
Yang X W, Shi S S, Zhang C, *et al.* Temporal evolution and main influencing factors of black carbon aerosol in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 620-629.
- [22] 王璐, 袁亮, 张小玲, 等. 成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1561-1572.
Wang L, Yuan L, Zhang X L, *et al.* Characteristics and source apportionment of black carbon in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1561-1572.
- [23] 方言, 曹芳, 范美益, 等. 中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1025-1035.
Fang Y, Cao F, Fan M Y, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of water-soluble ions in atmosphere aerosols over the east China sea island during winter and summer [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1025-1035.
- [24] 李逢帅, 巨天珍, 马超, 等. 基于卫星遥感的甘肃省吸收性气溶胶的研究 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(10): 4082-4092.
Li F S, Ju T Z, Ma C, *et al.* Absorption aerosol in Gansu province based on satellite remote sensing [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4082-4092.
- [25] 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 等. 北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1067-1077.
Zeng W, Hao Q J, Zhao Z J, *et al.* Characteristics of aerosol optical depth in the urban area of Beibei and its correlation with particle concentration [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1067-1077.
- [26] 张智胜, 陶俊, 陆俊卿, 等. 粤港澳大湾区空气质量改善面临的挑战及国外湾区经验启示 [J]. *环境保护*, 2019, **47**(23): 61-63.
Zhang Z S, Tao J, Lu J Q, *et al.* Challenges for improving air quality in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and lessons from foreign bay areas [J]. *Environmental Protection*, 2019, **47**(23): 61-63.
- [27] 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.
- [28] 魏满霞, 黄琦琪. 粤港澳大湾区联动治理现状、困境及对策 [J]. *探求*, 2019, (4): 40-45.
- [29] 李逢帅, 巨天珍, 贾维平, 等. 基于 OMI 数据的兰州地区吸收性气溶胶指数时空分布特征研究 [J]. *环境科学学报*,

- 2018, **38**(12): 4582-4591.
- Li F S, Ju T Z, Jia W P, *et al.* Temporal and spatial distribution of absorbing aerosols index in Lanzhou based on remote sensing data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(12): 4582-4591.
- [30] Torres O, Tanskanen A, Veihelmann B, *et al.* Aerosols and surface UV products from ozone monitoring instrument observations: an overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**, doi: 10.1029/2007JD008809.
- [31] Baek K H, Kim J H, Park R J, *et al.* Validation of OMI HCHO data and its analysis over Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **490**: 93-105.
- [32] Hu K, Kumar K R, Kang N, *et al.* Spatiotemporal characteristics of aerosols and their trends over mainland China with the recent collection 6 MODIS and OMI satellite datasets [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(7): 6909-6927.
- [33] Hammer M S, van Donkelaar A, Li C, *et al.* Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998-2018) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(13): 7879-7890.
- [34] 李逢帅. 基于 OMI 数据的中国吸收性气溶胶研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- Li F S. Chinese absorption aerosol study based on OMI data[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [35] 张永佳, 葛建团, 徐敏, 等. 广东省对流层 HCHO 柱浓度时空动态分布及影响分析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(8): 2869-2881. Zhang Y J, Ge J T, Xu M, *et al.* Spatiotemporal dynamic distribution and influence analysis of HCHO column concentration in troposphere of Guangdong province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(8): 2869-2881.
- [36] 沈素婷, 易明建, 戴海夏, 等. 蚌埠市 PM_{2.5} 输送路径和潜在源贡献分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020, **43**(4): 543-551.
- Shen S T, Yi M J, Dai H X, *et al.* Analysis of PM_{2.5} transport path and potential source contribution in Bengbu city[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2020, **43**(4): 543-551.
- [37] 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 等. 中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 19-29.
- Miao Q Q, Jiang N, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5} pollution in typical cities of the central plains urban agglomeration in autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 19-29.
- [38] 唐小雨, 高凡, 孙晓懿, 等. 基于滑动偏相关法的水文气象序列变异诊断[J]. *人民黄河*, 2020, **42**(5): 13-18, 23.
- Tang X Y, Gao F, Sun X Y, *et al.* Variation diagnosis of hydrological and meteorological joint sequences in Tarim River based on sliding partial correlation coefficient method[J]. *Yellow River*, 2020, **42**(5): 13-18, 23.
- [39] 刘世敏, 王同芹, 刘兆丽, 等. 黄淮海玉米区试品种农艺性状与产量的相关性及其通径分析[J]. *安徽农业科学*, 2020, **48**(21): 30-32.
- Liu S M, Wang T Q, Liu Z L, *et al.* Correlation and path analysis between agronomic characters and yield of maize varieties in Huang-Huai-Hai regional trials [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(21): 30-32.
- [40] 宋小园, 朱仲元, 张圣微, 等. 气象因素对锡林河融雪径流影响的通径分析[J]. *中国水土保持科学*, 2016, **14**(5): 74-81.
- Song X Y, Zhu Z Y, Zhang S W, *et al.* Path analysis about the impacts of atmosphere factors on snow-melt runoff of Xilin river [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, **14**(5): 74-81.
- [41] Kant Y, Shaik D S, Mitra D, *et al.* Black carbon aerosol quantification over North-West Himalayas: seasonal heterogeneity, source apportionment and radiative forcing [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113446.
- [42] Wei M, Liu H F, Chen J M, *et al.* Effects of aerosol pollution on PM_{2.5}-associated bacteria in typical inland and coastal cities of northern China during the winter heating season [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114188.
- [43] Shao P, Xin J Y, An J L, *et al.* The empirical relationship between PM_{2.5} and AOD in Nanjing of the Yangtze River delta [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, **8**(2): 233-243.
- [44] Zhang H Y, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Investigating the aerosol mass and chemical components characteristics and feedback effects on the meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 495-502.
- [45] 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.
- [46] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at XiAn, China during spring [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **368**(2-3): 875-883.
- [47] 闫世明, 王雁, 郭伟, 等. 太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- Yan S M, Wang Y, Guo W, *et al.* Characteristics, transportation, pathways, and potential sources of air pollution during autumn and winter in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- [48] 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 等. 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2634-2647.
- Liu M X, Li L, Yu R X, *et al.* Analysis of space-time and potential source of absorbing aerosol in Fenwei plain [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2634-2647.
- [49] 黄超. 武汉市黑碳气溶胶分布规律及潜在源区分析[D]. 武汉: 湖北大学, 2018.
- Huang C. The distribution law of black carbon aerosol in Wuhan city and analysis of potential source area[D]. Wuhan: Hubei University, 2018.
- [50] Yang J H, Kang S C, Ji Z M, *et al.* Modeling the origin of anthropogenic black carbon and its climatic effect over the Tibetan Plateau and surrounding regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(2): 671-692.
- [51] Zhao S Y, Tie X X, Cao J J, *et al.* Seasonal variation and four-year trend of black carbon in the Mid-West China: the analysis of the ambient measurement and WRF-Chem modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 430-439.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)