

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王飞龙, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522) 《环境科学》征稿简则 (722) 信息 (748, 899, 924)	

广州市 2020 年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响

裴成磊¹, 王宇骏¹, 毕燕茹², 廉秀峰^{3,4}, 周倩妮^{3,4}, 王在华⁵, 马理⁶, 李梅^{3,4*}

(1. 广东省广州生态环境监测中心站, 广州 510060; 2. 广州禾信仪器股份有限公司, 广州 510530; 3. 暨南大学质谱仪器与大气环境研究所, 广东省大气污染在线源解析系统工程技术研究中心, 广州 510632; 4. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 510632; 5. 广东省科学院资源综合利用研究所, 广州 510650; 6. 百色学院化学与环境工程学院, 百色 533000)

摘要: 利用 2020 年春节期间(1 月 21 ~ 28 日)广州市 21 个空气质量监测站气象和空气污染物数据及其中 4 个监测点位的单颗粒气溶胶质谱仪(single particle aerosol mass spectrometer, SPAMS)数据, 研究烟花爆竹燃放对广州市及 11 个行政区空气质量的影响, 并基于 SPAMS 建立了烟花爆竹快速溯源方法, 分析了烟花爆竹源单颗粒化学成分。结果表明, 烟花爆竹燃放对燃放区及禁止燃放区的空气质量都造成显著影响, 广州市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 质量浓度在除夕夜间迅速升高。烟花爆竹集中燃放时段(1 月 25 日 01:00 ~ 06:00), 主要影响了增城区、白云区、黄埔区及天河区部分区域的空气质量。建立了基于 SPAMS 以 Al^+ 为示踪物及最快 5 min 时间分辨率的烟花爆竹快速溯源方法。烟花爆竹源颗粒主要颗粒类型是左旋葡聚糖、富钾和矿物质类颗粒。烟花爆竹源颗粒含有丰富的硝酸盐, 但不利于铵盐的形成。

关键词: 烟花爆竹燃放; 空气质量; 单颗粒质谱; 快速溯源方法; 广州

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0546-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006045

Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020

PEI Cheng-lei¹, WANG Yu-jun¹, BI Yan-ru², LIAN Xiu-feng^{3,4}, ZHOU Qian-ni^{3,4}, WANG Zai-hua⁵, MA Li⁶, LI Mei^{3,4*}

(1. Guangzhou Ecological and Environmental Monitoring Center of Guangdong Province, Guangzhou 510060, China; 2. Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou 510530, China; 3. Guangdong Provincial Engineering Research Center for On-line Source Apportionment System of Air Pollution, Institute of Mass Spectrometry and Atmospheric Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 4. Guangdong-Hongkong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 510632, China; 5. Guangdong Institute of Resources Comprehensive Utilization, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 6. College of Chemistry and Environmental Engineering, Baise University, Baise 533000, China)

Abstract: Twenty-one air quality monitoring stations including four with single particle aerosol mass spectrometers (SPAMS) were used to observe air quality and aerosol particulates during the 2020 Spring Festival (from January 21 to 28) in Guangzhou. The effect of burning fireworks on the atmosphere of Guangzhou and its eleven administrative regions was examined, and the chemical composition of firework particles was detected and analyzed by single particle aerosol mass spectrometry. The results show that the burning of fireworks had a significant impact on air quality in the discharge area and the prohibited discharge area. The concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , and SO_2 sharply increased in Guangzhou on New Year's Eve. Air quality in Zengcheng District, Baiyun District, Huangpu District, and some areas of Tianhe District was also affected by the concentrated burning of fireworks on January 25 between 01:00 and 06:00. A method of fireworks tracing based on SPAMS using Al^+ as a tracer was established with a time resolution of 5 min. The main particle types emitted by the burning fireworks were levoglucan, potassium-rich, and mineral. These particles were well mixed with nitrate, but this was not conducive to the formation of ammonium.

Key words: burning fireworks; air quality; single particle mass spectrometry; source identification method; Guangzhou

春节期间(尤其是除夕、初一和元宵)烟花爆竹燃放是我国的传统习俗。春节期间大部分工业企业停工停产, 污染物本地源排放量显著降低^[1]。烟花爆竹集中燃放在短时间内向大气环境排放了大量细颗粒物($PM_{2.5}$ 和 PM_{10})^[2~8]、二氧化硫(SO_2)^[2,7]、水溶性无机离子(K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等)^[3,9~11]和重金属(铝、铜、镁、钡和镉等)^[2,3,7,8], 导致空气质量迅速

恶化, 影响人体健康。周国治等^[2]的研究表明, 2015 ~ 2019 年长沙市春节期间烟花燃放对 $PM_{2.5}$ 和

收稿日期: 2020-06-05; 修订日期: 2020-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41827804); 国家重点研发计划项目(2018YFE0106900); 广州经济技术开发区国际科技合作项目(2018GH08); 2019 广东省科技创新战略专项资金项目(2019B121205004)

作者简介: 裴成磊(1983 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境空气监测, E-mail: peichenglei@163.com

* 通信作者, E-mail: limei2007@163.com

PM_{10} 的小时浓度贡献率分别为 42.2%~84.3% 和 24.9%~81.3%。熊秋林等^[12]的研究表明,实施烟花禁放措施前(2017 年)江西省除夕夜和正月初一 大气中主要污染物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 较当年对应污染物 年平均浓度分别升高 49.6% 和 24.2%。邱飞等^[13] 的研究表明烟花集中燃放时间段,云南省 SO_2 日均 值显著升高,而 NO_2 、 O_3 和 CO 的日均值基本不受 烟花排放直接影响。周国治等^[2]在长沙市也观察到 相似的结果。已有的研究表明,烟花爆竹集中 燃放时段,细颗粒物中重金属^[2,3,14,15] 和水溶性离子^[9~11] 浓度较春节前明显增加,甚至达到污染水 平。谢瑞加等^[16]利用单颗粒气溶胶质谱仪观测泉 州市春节期间单颗粒气溶胶成分,发现除夕夜单颗 粒气溶胶中 Al^+ 、 Mg^+ 、 Ba^+ 和 Cu^+ 等颗粒数急剧上 升,污染过程分析表明 $PM_{2.5}$ 浓度与金属离子数浓度 的变化趋势具有趋同性。此外,烟花爆竹燃放还影 响气溶胶的光学性质^[17],尤其是在静稳态气象条件 下,由于区域传输和污染扩散能力差,烟花爆竹的燃 放导致空气质量迅速恶化,形成复合型空气污染。

为减少烟花爆竹对空气质量的影响,全国各地 出台春节期间烟花爆竹的禁限放措施。广州市是广 东省政治、经济和文化中心,1991 年,广州市颁布销 售燃放烟花爆竹管理的相关规定。2006 年,广州市 开始设置烟花爆竹的禁放区。2017 年起在每年春节 前期相应开展烟花爆竹禁限放的监管工作。郑亦佳 等^[18]的研究表明,2019 年春节期间烟花爆竹集中 燃放时段,广州市禁放区烟花爆竹燃放对 $PM_{2.5}$ 的贡 献率低于 20%,远低于 2017 年和 2018 年的 80%,非 禁放区的峰值浓度也有明显下降,但广州市烟花爆 竹燃放的贡献率在珠三角地区仍然处于较高水平。 2020 年春节前夕,广州市环保工作领导小组办公室 要求相关部门进一步加强禁放区烟花爆竹的监管工 作^[19]。因此仍需要对广州市这些禁限放措施的效果 进行持续关注与评估。现有烟花爆竹燃烧对空气 质量影响的评估工作主要是基于对 $PM_{2.5}$ 等污染物 浓度的贡献率或小时浓度变化趋势^[2~7],这两种评 估方法最高时间分辨率为 1 h,不能快速监测烟花爆 竹燃放对空气质量的影响,不能及时对烟花爆竹禁 燃放监管工作给予指导。单颗粒气溶胶质谱在线高 时间分辨率的特点为春节期间烟花爆竹源颗粒更快 地溯源提供了机遇,谢瑞加等^[16]的研究结果表明 金属离子是烟花爆竹源颗粒的潜在标志物,但其尚 未建立烟花爆竹源颗粒快速溯源方法。

本研究利用 2020 年广州市春节期间 21 个环境 空气质量自动监测发布点位 6 项污染物在线监测数

据以及 4 个监测点位的单颗粒气溶胶质谱在线监测 数据,通过对比烟花爆竹燃放前后污染物浓度、主要 示踪物的变化趋势以及烟花爆竹源颗粒物的质谱特 征和化学成分,探讨 2020 年春节烟花爆竹燃放对广 州市各行政区空气质量的影响,建立快速检测烟花 爆竹燃放活动的单颗粒气溶胶质谱方法。

1 材料与方法

1.1 污染物和气象数据来源及研究方法

1.1.1 数据来源

本文空气质量监测数据来源于广州市空气质量 实时发布系统^[20]。各站点监测指标包括 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 这 6 项环境空气污染物,同步 监测温度、湿度、气压、风速和风向等气象要素。各 个监测点位使用的仪器设备均符合国家合格产品名 录,各仪器的运行和质控均符合环境空气自动技术 规范。

本研究选取 2020 年 1 月 21~28 日(共 8 d, 1 月的 24 日和 25 日为农历除夕及正月初一)21 个空 气质量国控评价点(国控点),监测点位覆盖广州市 11 个行政区,包含 4 个单颗粒质谱观测点(公园前、 黄埔大沙地、黄埔九龙和花都新华),如图 1 所示。

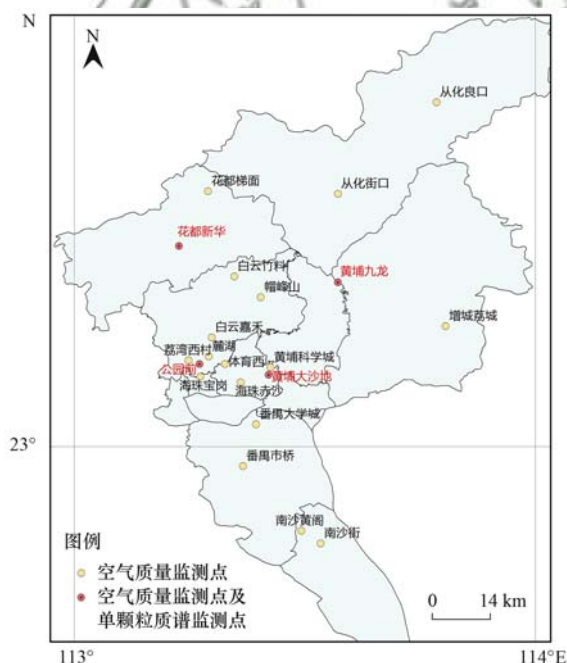


图 1 广州市空气质量监测点位置示意

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring stations in Guangzhou

表 1 为观测期间全市各气象要素的平均值,1 月 21~24 日(春节前)广州市平均风速较低,主导 风向为东南风,平均气温在 20℃ 左右,天气以阴天 和多云为主。1 月 25 日午后开始风速明显增大,主 导风转为东北风或西北风,且出现明显降雨,平均气 温降至 20℃ 以下。

表 1 观测期间广州市平均气象要素

Table 1 Average meteorological variables in Guangzhou during the sampling period

项目	日期(月-日)							
	01-21	01-22	01-23	01-24	01-25	01-26	01-27	01-28
平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.1	0.8	1.0	0.9	1.7	2.3	2.4	2.1
主导风向	东南	东南	东南	东南	东北	西北	西北	东北
平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	18.0	20.4	22.9	22.2	17.1	11.5	10.3	10.7
平均相对湿度/%	65.9	68.4	67.9	72.7	72.6	72.6	57.0	50.1
天气情况	阴/多云	多云	多云	阴/小雨	阴/大雨	中雨/多云	多云	阴/多云

1.1.2 研究方法

为定量评估烟花爆竹燃放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响,本文参考文献[7,18,21]的研究成果,利用烟花爆竹集中燃放时段 $\text{PM}_{2.5}$ 的 6 h 浓度与非燃放时段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值对比,评估全市 11 区烟花爆竹燃放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献. 烟花爆竹燃放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率计算公式如下:

$$P = \frac{A - B}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式中, P 为集中燃放时段烟花爆竹燃放对 $\text{PM}_{2.5}$ 6 h 贡献率, A 为集中燃放时段 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度, B 为非燃放时段 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均浓度. 根据本研究广州市 11 区烟花爆竹集中燃放时段的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐时变化特征,将初一(1 月 25 日)01:00~06:00 设定为烟花爆竹集中燃放时段,除夕(1 月 24 日)01:00~06:00 为非燃放时段. 考虑到两个时段的大气扩散条件相似,CO 浓度在 1 月 25~26 日可能受到本地排放源影响,本研究结果未使用 CO 浓度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行归一化处理.

1.2 单颗粒质谱采样及数据分析

1.2.1 数据采集

根据文献[19]可知,越秀区、海珠区、荔湾区、天河区和白云区范围内,禁止任何单位和个人燃放烟花、爆竹;花都区、番禺区、黄埔区、从化区和增城区部分特定区域内禁止燃放烟花爆竹. 设立 4 个单颗粒气溶胶质谱监测点位为(图 1):公园前(代表城市中心区域同时又为禁止烟花爆竹燃放区域);部分禁止燃放烟花爆竹的区域,代表点位分别为:花都新华(北部区域)、黄埔大沙地(中部区域)和黄埔九龙(东北部郊区).

利用 4 个站点单颗粒气溶胶质谱仪^[22](SPAMS 0525,广州禾信分析仪器有限公司)在 1 月 21~28 日对广州市大气进行连续监测. 大气颗粒物经 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头,通过直径 1 cm 的导电硅胶管进入 SPAMS 进行测量. 监测期间采样信息见表 2,4 个站点平均采样频率为每分钟 41~56 个颗粒. 4 个站点采集颗粒数与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著相关(r 为 0.726~0.907, $P < 0.01$),可以反映大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势.

1.2.2 数据分析

采集到的单颗粒质谱数据导入到广州禾信仪器股份有限公司开发的基于 Matlab 平台的数据处理软件 COCO V_1.4P 进行质谱特征、示踪物提取及颗粒物类别分析. 类别分析是通过自适应共振神经网络算法(adaptive resonance theory-based neural network, ART-2a)^[23]对颗粒物进行自动算法分类,分类过程中使用的参数为:相似度 0.75,学习效率 0.05,迭代次数 20. ART-2a 分类后根据颗粒质谱特征,将颗粒物类别进一步合并为富钾、左旋葡聚糖、矿物质、重金属、元素碳、有机碳、混合碳和其它等 8 个颗粒类型. 富钾颗粒指的是单颗粒谱图中,除 K^+ 外,只含有二次无机组分(硫酸盐和硝酸盐等)的颗粒;左旋葡聚糖颗粒含有峰度较强的 K^+ 、有机碎片、左旋葡聚糖碎片($\text{C}_3\text{H}_7\text{O}^-$ 、 $\text{C}_4\text{H}_9\text{O}^-$)及 K_2Cl^+ ;矿物质颗粒主要含有镁、铝、钙、铁或硅等元素;重金属颗粒主要含 Fe^+ 、 Cu^+ 、 Zn^+ 和 Pb^+ 等金属离子及金属化合物;元素碳颗粒含有明显碳簇离子($m/z = \pm 12n, n = 1, 2, 3, \dots$);有机碳颗粒含有明显的有机碎片(m/z 为 27、37、43、51、63 和 77 等);混合碳颗粒指同时

表 2 4 个站点监测信息

Table 2 Information for four monitoring stations

站点	监测时段	采集颗粒数 /个	平均采样频率 /个 $\cdot\text{min}^{-1}$	采集颗粒数与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数 ¹⁾
公园前	2020-01-21T00:00~2020-01-28T24:00 (8 d)	570 242	50	0.726 **
黄埔大沙地		472 874	41	0.907 **
黄埔九龙		639 836	56	0.880 **
花都新华		597 251	52	0.879 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

含元素碳和有机碳颗粒特征且两者信号强度相当; 不属于以上类别的颗粒归入其它。

2 结果与讨论

2.1 烟花爆竹燃放对主要污染物浓度影响

2.1.1 春节前后全市 6 项污染物总体变化趋势

图 2 为 2020 年 1 月 21~28 日环境空气 6 项污染物全市小时平均浓度逐时变化趋势。1 月 21~25 日各项污染物浓度明显大于其在 1 月 26~28 日的浓度值, 一方面是受春节集中回乡出行的影响, 另一方面是春节期间气象条件较春节前更有利于污染物

扩散。在烟花爆竹集中燃放时段, 自 1 月 25 日 00:00 起, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均出现明显上升。与 1 月 24 日 19:00~24:00 污染物浓度 6 h 均值相比, 烟花集中燃放时段 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别升高 60% 和 39%; SO_2 浓度上升幅度较 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的更显著, 在 1 月 25 日 01:00 达到峰值 ($18 \mu g \cdot m^{-3}$)。该峰值是 1 月 24 日 19:00~24:00 SO_2 平均浓度 ($5.6 \mu g \cdot m^{-3}$) 的 3.2 倍; CO 浓度持续上升, 上升幅度不大; O_3 浓度略有下降; 温度和相对湿度没有明显变化。烟花爆竹燃放主要引起广州市 $PM_{2.5}$ 和 SO_2 浓度的显著增加。

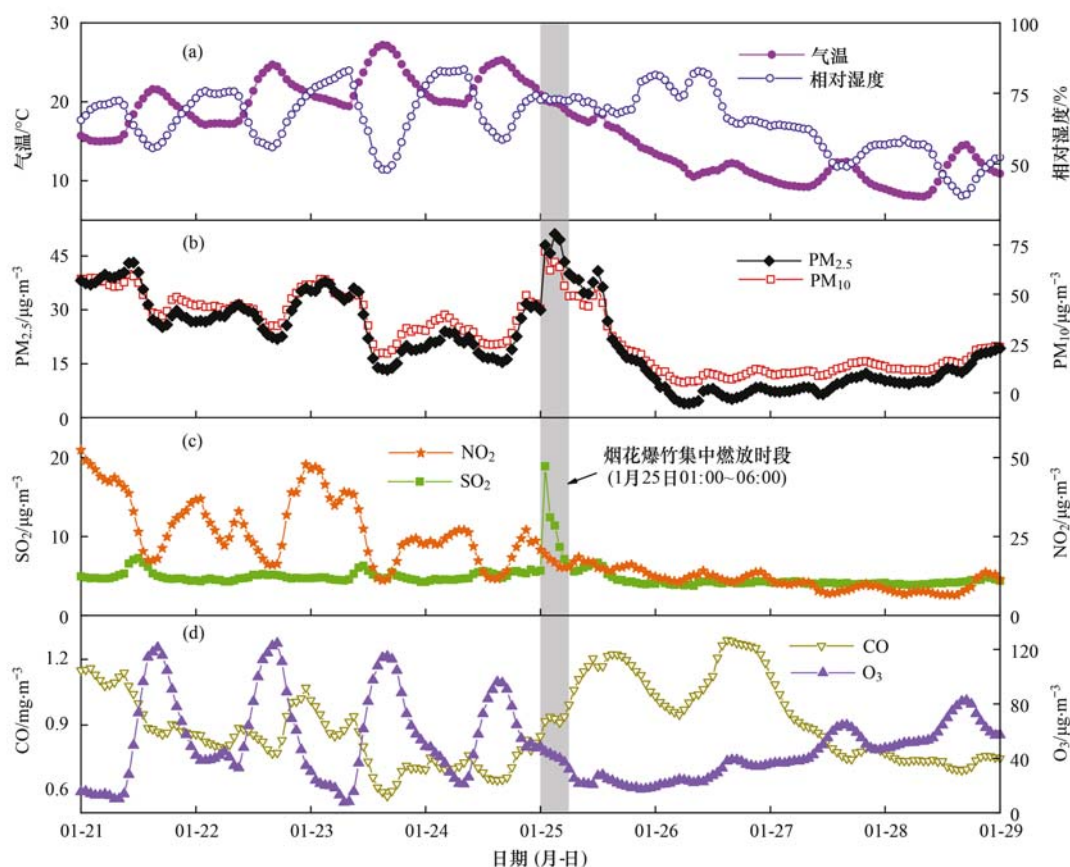


图 2 观测期间温湿度及污染物浓度 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO、 O_3 和 NO_2) 时间序列

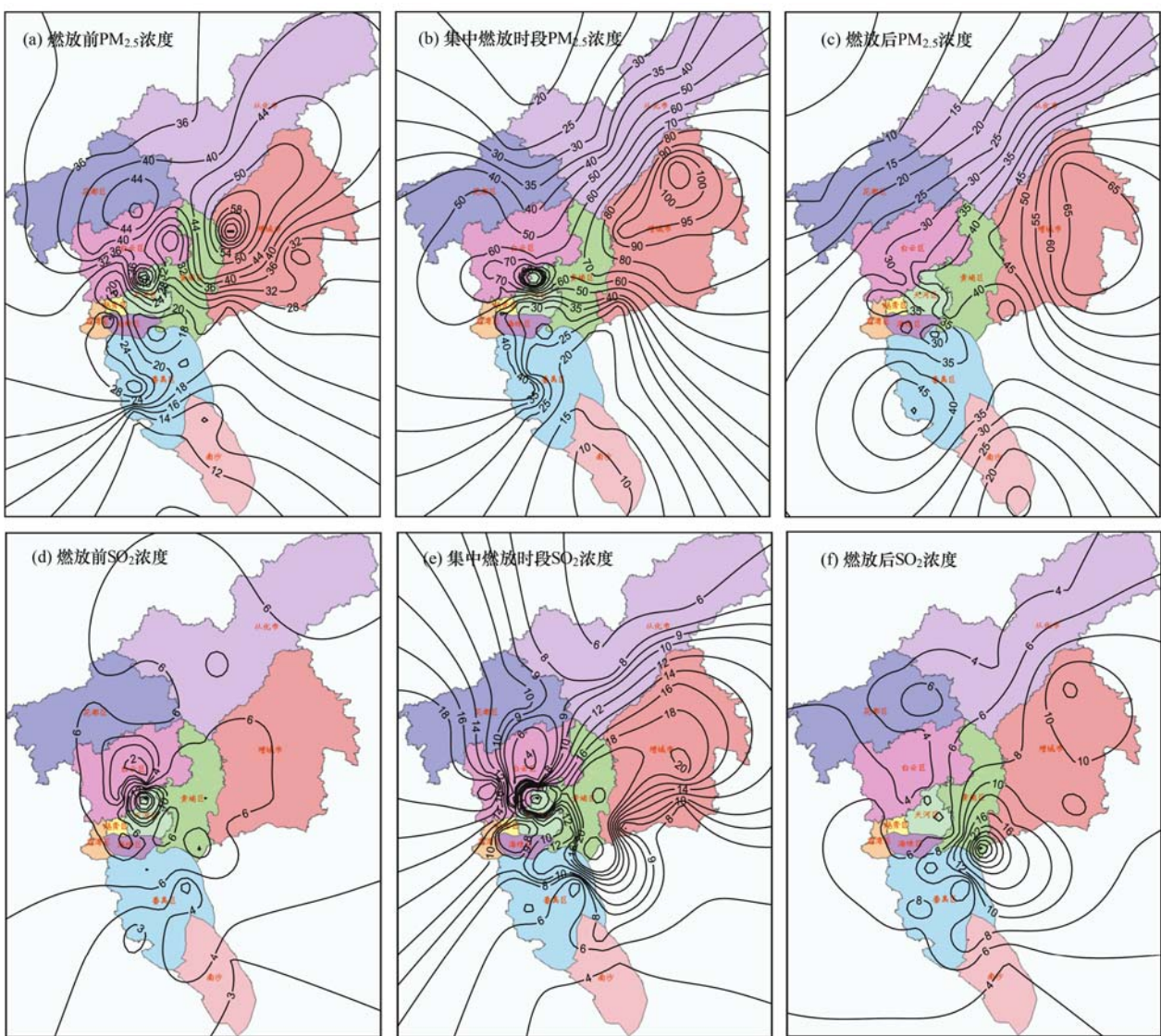
Fig. 2 Time series data of temperature, relative humidity, and pollutant concentrations ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO, O_3 , and NO_2) during the sampling period

2.1.2 烟花爆竹燃放对各行政区 $PM_{2.5}$ 和 SO_2 浓度的影响

图 3 分别为烟花爆竹燃放前 (1 月 24 日 19:00~24:00)、烟花爆竹集中燃放时段及烟花爆竹燃放后 (1 月 25 日 07:00~12:00) 广州市 $PM_{2.5}$ 和 SO_2 浓度分布情况。烟花爆竹燃放前, 全市除南沙和番禺南部区域 $PM_{2.5}$ 浓度 ($12 \sim 18 \mu g \cdot m^{-3}$) 较低外, 其余区域 $PM_{2.5}$ 浓度在 $20 \sim 50 \mu g \cdot m^{-3}$, 增城与黄埔交界区域的浓度稍高, 大于 $60 \mu g \cdot m^{-3}$ 。烟花爆竹集中燃放时段, 南沙、番禺南部、花都北部及从化西北部

区域 $PM_{2.5}$ 浓度变化不大, 其余区域均出现不同程度上升, 全市 $PM_{2.5}$ 浓度高值区及增值较大区位于增城区的中北部地区、白云区和天河区中部交界区域及黄埔区中北部区域。烟花爆竹燃放后, 番禺和南沙区 $PM_{2.5}$ 浓度不降反升, 其余区域的 $PM_{2.5}$ 浓度均下降。

烟花爆竹集中燃放期间 SO_2 浓度高值区主要出现在增城中东部、白云和天河中部交界及黄埔南部等区域, 增城中东部区域及黄埔南部区域的浓度升幅达到 3 倍以上 (从 $6 \mu g \cdot m^{-3}$ 上升至 $20 \mu g \cdot m^{-3}$ 以



PM_{2.5} 和 SO₂ 浓度单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 烟花爆竹燃放前指 1 月 24 日 19:00 ~ 24:00, 集中燃放时段指 1 月 25 日 01:00 ~ 06:00, 燃放后指 1 月 25 日 07:00 ~ 12:00

图 3 烟花爆竹燃放前、集中燃放时段和燃放后 PM_{2.5} 和 SO₂ 浓度等值线

Fig. 3 Contour map of PM_{2.5} and SO₂ concentrations before fireworks, during the peak firework period, and after the fireworks

上). 综上所述,烟花爆竹集中燃放对增城区、白云区、黄埔区和天河区的部分区域 PM_{2.5} 和 SO₂ 质量浓度上升有明显影响.

2.1.3 春节烟花爆竹集中燃放时段对 PM_{2.5} 的贡献

利用公式(1)对 2020 年广州市烟花爆竹集中燃放时段对 PM_{2.5} 6 h 浓度贡献进行估算,因烟花爆竹燃放具有较强的局地性,并且站点监测数据时刻会受到气象条件的影响,因此有些站点年初一的 PM_{2.5} 浓度比除夕低,认为该点位未受到影响,因此在计算中贡献率做 0% 处理,对全市 11 区 PM_{2.5} 6 h 浓度贡献进行估算时只将贡献率非 0 的站点纳入计算. 图 4 为烟花爆竹燃放对广州市 11 个行政区 PM_{2.5} 贡献率. 结果表明,烟花爆竹集中燃放时段对增城区的 PM_{2.5} 贡献率(81%)最高;对荔湾区、越秀

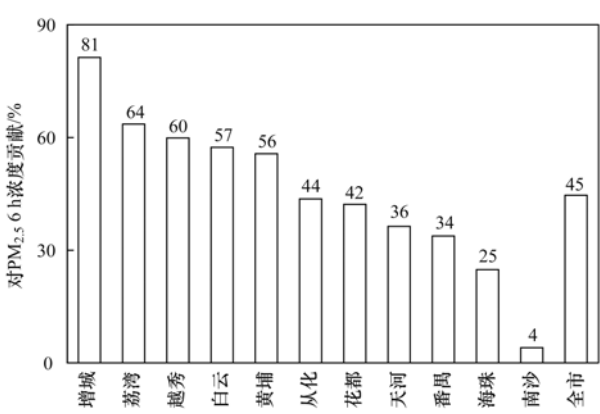


图 4 春节烟花爆竹燃放对广州市 11 区 PM_{2.5} 6 h 浓度贡献估算

Fig. 4 Estimates of average contributions of fireworks and firecrackers to PM_{2.5} concentration in eleven districts of Guangzhou during the peak six-hour period of use during the 2020 Spring Festival

区、白云区和黄埔区的贡献率为 54%~56%；对从化区、花都区、天河区、番禺区和海珠区的贡献率为 25%~44%；对南沙区的贡献率最小,小于 10%；全市 11 区的平均贡献率约为 45%。这些结果表明,在城市中心的外围区域,仍存在烟花爆竹的燃放活动.烟花爆竹的燃放对燃放点所在地区(增城区、白云区、黄埔区和天河区的部分区域)的空气质量造成瞬时较大影响,且随着大气的不断扩散,相邻区域(荔湾区和越秀区等)乃至全市也会受到不同程度的影响.

2.2 烟花爆竹燃放单颗粒成分影响分析

2.2.1 单颗粒烟花爆竹质谱特征分析

图 5 为公园前、黄埔大沙地、黄埔九龙和花都新华这 4 个单颗粒质谱监测站点在烟花爆竹集中燃放时段和非燃放时段的颗粒物差分质谱图(将质谱图

上每个质谱峰的相对峰面积通过差值计算得到).与非燃放时段相比,4 个站点烟花爆竹集中燃放时段颗粒物含有更丰富的 Al^+ 、 Mg^+ 、 K^+ 、 K_2Cl^+ 、 Ba^+ 、 Cl^- 及左旋葡聚糖碎片($\text{C}_3\text{H}_7\text{O}^-$ 和 $\text{C}_4\text{H}_9\text{O}^-$),及质荷比为 -109 和 -111 的离子峰.由于 1 月 24 日受到明显的机动车源影响,为避免干扰,本研究未讨论硝酸盐在集中燃放时段与非燃放时段的变化.这表明广州市禁放区域、部分禁止燃放区域及城市中心外围区域空气质量均受到烟花爆竹源的影响.结合本次观测结果并参考已有的单颗粒质谱研究成果^[7,16,24],将 Ba^+ 、 Mg^+ 、 Cl^- 、 Al^+ 、 K_2Cl^+ 和 Fe^+ 等离子作为烟花爆竹源颗粒的特征峰,获得公园前、黄埔大沙地、黄埔九龙和花都新华 4 个站点烟花爆竹集中燃放时段的烟花爆竹源在总颗粒中的颗粒数占比分别为 44.6%、43.3%、54.0% 和 48.2%.

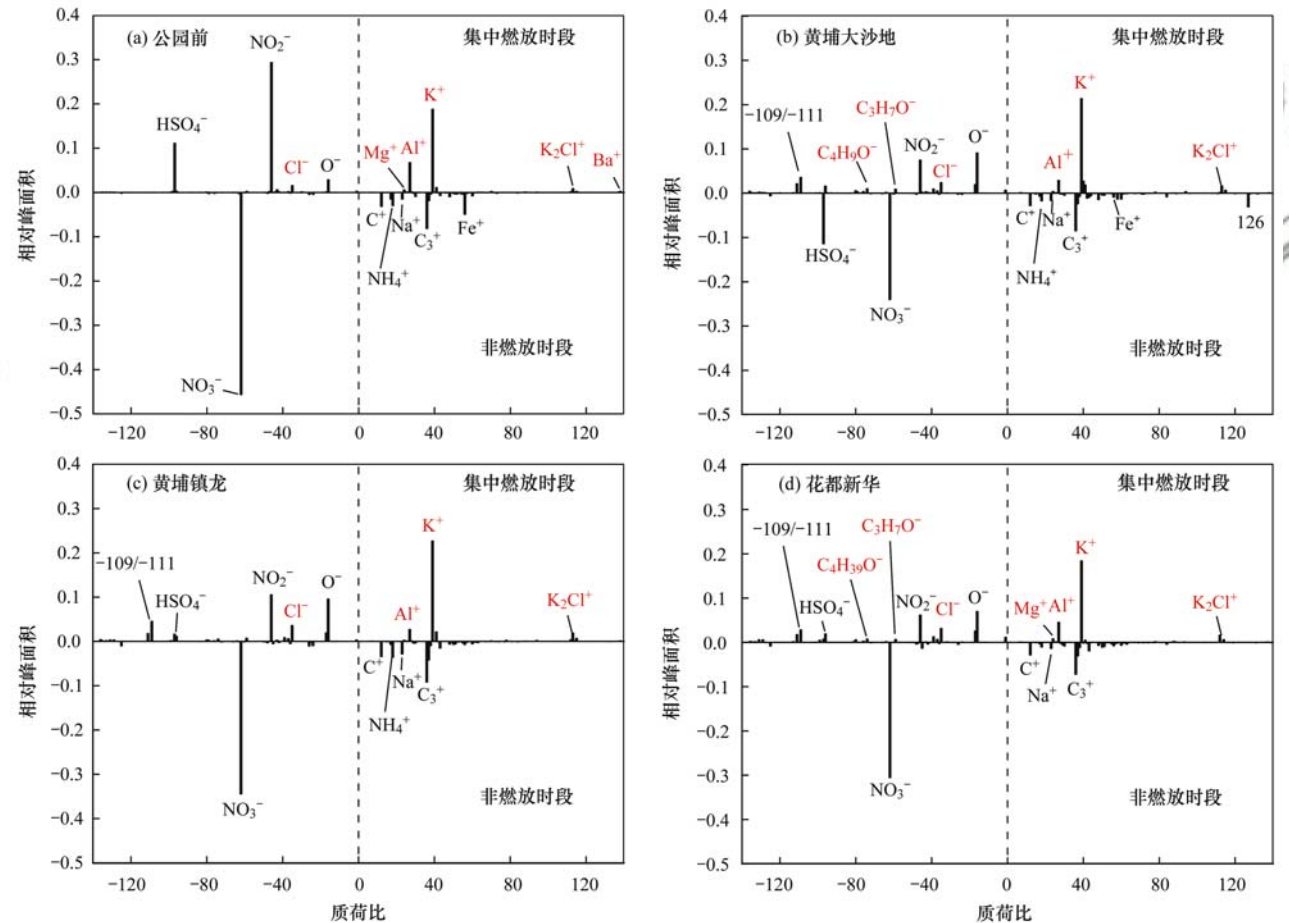


图 5 4 个站点烟花爆竹集中燃放时段与非燃放时段颗粒物差分质谱图

Fig. 5 Mass spectral subtraction plot of the average mass spectrum corresponding to firework burning minus non-firework-burning particles at four monitoring stations

2.2.2 烟花爆竹源特征离子分析

图 6 为观测期间公园前、黄埔大沙地、黄埔九龙及花都新华这 4 个站点烟花爆竹源特征离子小时数浓度及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时间序列.各特征离子数浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化趋势一致,均在烟花爆竹集中燃放时段出现明显高值.如表 3 所示,烟花爆竹集中

燃放时段,烟花爆竹源各单颗粒特征离子与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈显著正相关.其中, Al^+ 数浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关性最好,相关性系数 r 均大于 0.94.此外, Al^+ 还是烟花爆竹源中颗粒数占比最高(48%~74%),各站点波动较小(表 4).因此,进一步探讨 Al^+ 做为特征离子快速检测烟花爆竹源的可行性.

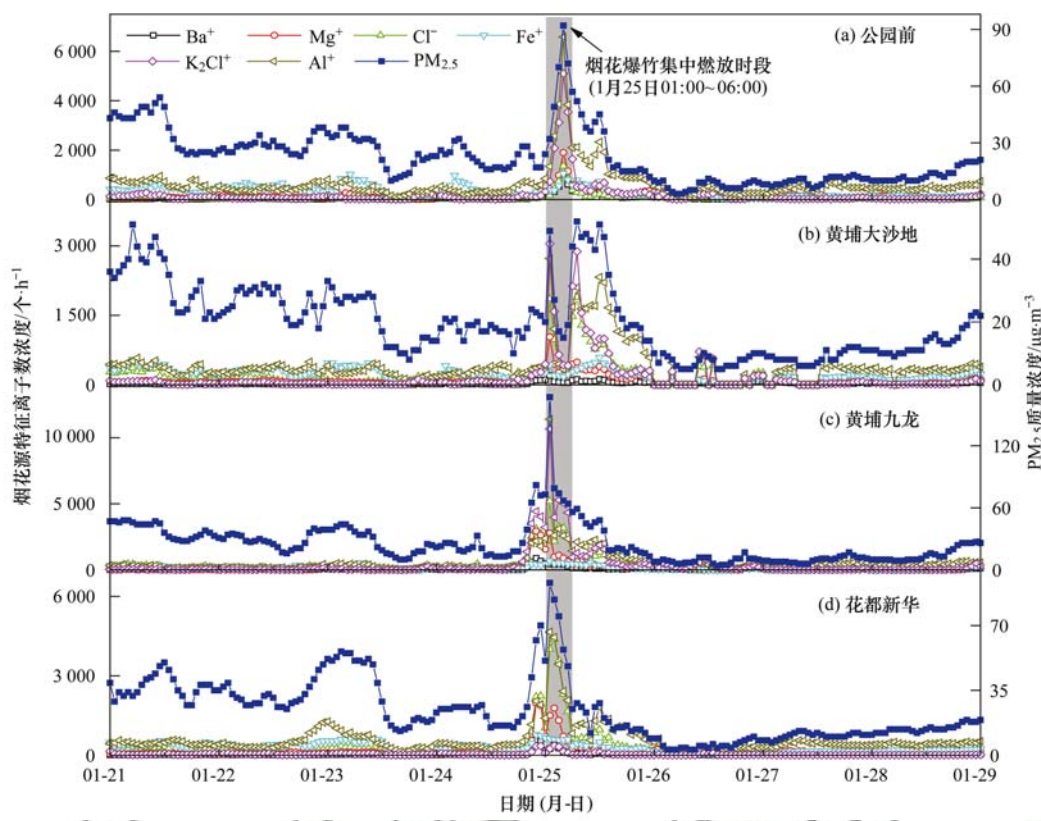


图 6 观测期间 4 个站点烟花爆竹燃放特征离子小时数浓度及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度小时变化

Fig. 6 Time-series of the number concentrations of characteristic firework ions and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during the sampling period at four monitoring stations

表 3 烟花爆竹集中燃放时段 4 个站点烟花爆竹燃放特征离子数浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关系数¹⁾

Table 3 Correlations between the number concentrations of characteristic firework ions and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations at four monitoring stations

站点	烟花爆竹源	Ba^+	Mg^+	Fe^+	Al^+	K_2Cl^+	Cl^-
公园前	0.965 **	0.926 **	0.928 **	0.921 **	0.949 **	0.970 **	0.965 **
黄埔大沙地	0.954 **	0.886 *	0.858 *	0.882 *	0.963 **	0.968 **	0.985 **
黄埔九龙	0.974 **	0.526	0.988 **	0.933 **	0.994 **	0.919 **	0.828 *
花都新华	0.973 **	0.857 *	0.950 **	0.807	0.993 **	0.892 *	0.980 **

1) *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$

表 4 烟花爆竹集中燃放时段 4 个站点烟花爆竹燃放特征离子在烟花爆竹源中的数浓度占比/%

Table 4 Proportion of characteristic ions in firework source particles during the firework-burning period at four monitoring stations/%

站点	Ba^+	Mg^+	Fe^+	Al^+	K_2Cl^+	Cl^-
公园前	2.1	15.0	5.0	74.0	57.6	7.2
黄埔大沙地	1.1	21.3	3.3	61.3	67.8	44.5
黄埔九龙	1.6	11.7	2.9	48.0	69.1	35.6
花都新华	4.4	24.4	3.3	70.6	4.4	62.2

2.2.3 Al^+ 快速诊断潜在烟花爆竹源的能力分析

表 5 为含 Al^+ 颗粒在烟花爆竹集中燃放时段不同时间分辨率 (1 h、30 min、15 min、10 min 和 5 min) 的颗粒数浓度与起始数浓度 (1 月 25 日 00:00 含 Al^+ 的颗粒数浓度) 的比值. 当含 Al^+ 颗粒的数浓度与起始数浓度比值大于 3 时, 可认为含 Al^+ 颗粒数浓度已经排除背景数浓度的干扰, 表明环境中

表 5 烟花爆竹集中燃放时段 4 个站点 Al^+ 峰值数浓度与起始数浓度比值¹⁾

Table 5 Ratio of peak number concentration to initial number concentration of Al^+ during the firework-burning period at four monitoring stations

站点	1 h	30 min	15 min	10 min	5 min
公园前	7.8	8.1	7.9	7.9	8.5
黄埔大沙地	6.8	8.9	10.1	11.2	12.3
黄埔九龙	5.0	3.8	2.9	2.4	2.3
花都新华	3.8	4.2	4.0	3.8	2.6

1) 起始数浓度为 1 月 25 日 00:00 含 Al^+ 离子的颗粒数浓度

烟花爆竹源颗粒. 单颗粒气溶胶质谱实际观测结果显示, 受烟花爆竹源排放量、空气质量污染程度及仪器检测能力的影响, 不同站点检测到烟花爆竹源颗粒的时间分辨率各不相同. 最快速检测到烟花燃放源颗粒的是公园前和黄埔大沙地站点, 检测到时间

是 5 min. 黄埔九龙和花都新华站点最快检测时间是 15 min. 各站点检测所需时间相比污染物浓度的 1 h,均有明显的提升.

2.2.4 单颗粒烟花爆竹源颗粒化学成分和混合状态

利用自适应共振神经网络算法 (ART-2a) 对上述 4 个站点在烟花爆竹集中燃放时段的烟花爆竹源颗粒进行成分分类,结果如图 7 所示. 4 个站点的烟花爆竹源颗粒主要成分类别为左旋葡聚糖、矿物质和富钾类颗粒. 左旋葡聚糖在黄埔九龙站点的颗粒数占比高达 57.7%,远超过其它区域;左旋葡聚

糖和富钾颗粒在公园前和黄埔大沙地站点的颗粒数占比分别为 48.8% 和 62.8%. 公园前站点的有机碳颗粒占比远高于其他站点,达到 39.0%,可能是由于其位于禁燃区域,比其他站点烟花爆竹源颗粒经历更长时间的老化. 黄埔大沙地和花都新华比公园前和黄埔九龙站点含有更丰富的矿物质. 区别于爆竹,为达到闪光效果烟花中还要添加镁、铝、铁等金属类火焰着色物^[16]. 结果表明黄埔大沙地和花都新华站点比其他站点附近有更多的烟花燃放活动.

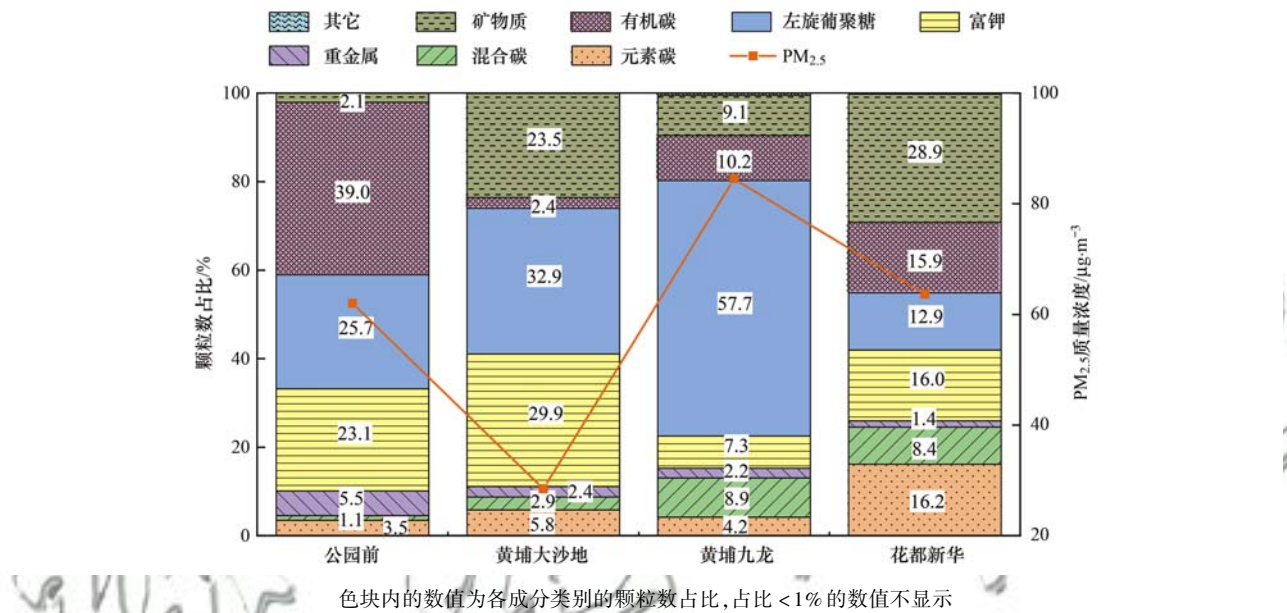


图 7 4 个站点烟花爆竹集中燃放时段烟花爆竹源颗粒 ART-2a 成分类别分布

图 8 为 4 个站点在烟花爆竹集中燃放时段的硝酸盐、硫酸盐和铵盐在烟花爆竹源颗粒中的占比及在总颗粒中的占比. 对比可见, 4 个站点硝酸盐在烟花爆竹源颗粒的颗粒数占比 (86.2% ~ 90.9%) 明

显高于其在总颗粒中的占比 (65.5% ~ 76.7%), 这可能是由于一方面烟花爆竹原材料中本身含有硝酸钾^[9], 另一方面由于碱金属促进氮氧化物转化为硝酸盐^[25]. 4 个站点硫酸盐在烟花爆竹源颗粒中的颗粒数占比显著低于其在总颗粒中的占比. 铵盐在总颗粒中的占比为 17.4% ~ 37.1%, 在烟花爆竹源颗粒中的颗粒数占比仅为 1.7% ~ 5.9%, 表明烟花爆竹源颗粒不利于铵盐的形成. 如 2.2.1 节所述, 烟花爆竹源颗粒正谱图主要化学成分是 Ba⁺、Mg⁺、Al⁺ 和 Fe⁺ 等, 推测这些金属离子消耗了大量的硝酸盐和硫酸盐的酸性结合位点, 导致只有极少量的酸性结合位点与氨气结合, 形成铵盐.

3 结论

(1) 2020 年除夕至初一期间的烟花爆竹燃放影响了广州市空气质量, 使广州市 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度尤其是 SO₂ 浓度迅速增加, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度分别升高 60% 和 39%, SO₂ 浓度是烟花爆竹燃放前的 3.2 倍. 烟花爆竹集中燃放时段 (1 月 25 日 01:00 ~ 06:00)

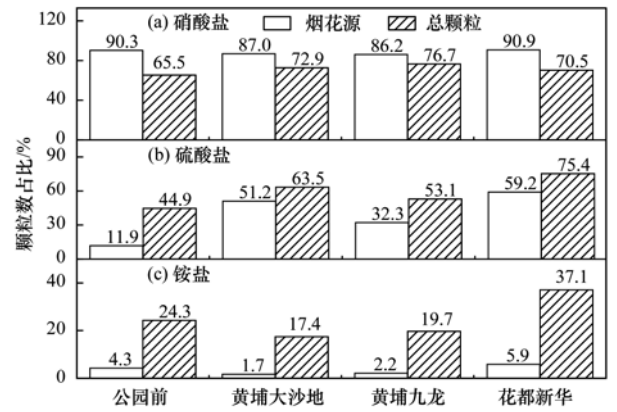


图 8 4 个站点烟花爆竹集中燃放时段的二次离子在烟花爆竹源及在总颗粒中的颗粒数占比

Fig. 8 Proportion of secondary ions in firework source particles and the total particles during the firework-burning period at four monitoring stations

烟花爆竹燃放对全市 $\text{PM}_{2.5}$ 6 h 浓度平均贡献为 45%。烟花爆竹燃放对空气质量影响较大的区域主要集中在增城区、白云区、黄埔区及天河区的部分区域,可能存在禁燃区燃放烟花爆竹的现象,建议扩大烟花爆竹禁燃区范围及加强禁燃管控力度。

(2)建立了基于单颗粒气溶胶质谱、以 Al^+ 为示踪物的高时间分辨率烟花爆竹排放在线溯源的方法,时间分辨率受到烟花爆竹源排放量、空气质量污染程度及仪器检测能力的影响。实际观测的 4 个单颗粒站点中,最高时间分辨率可达 5 min,相比污染物浓度的 1 h,有明显的提升,可用于快速诊断烟花爆竹潜在排放源,便于环境管理部门对烟花爆竹源的实时监控预警。

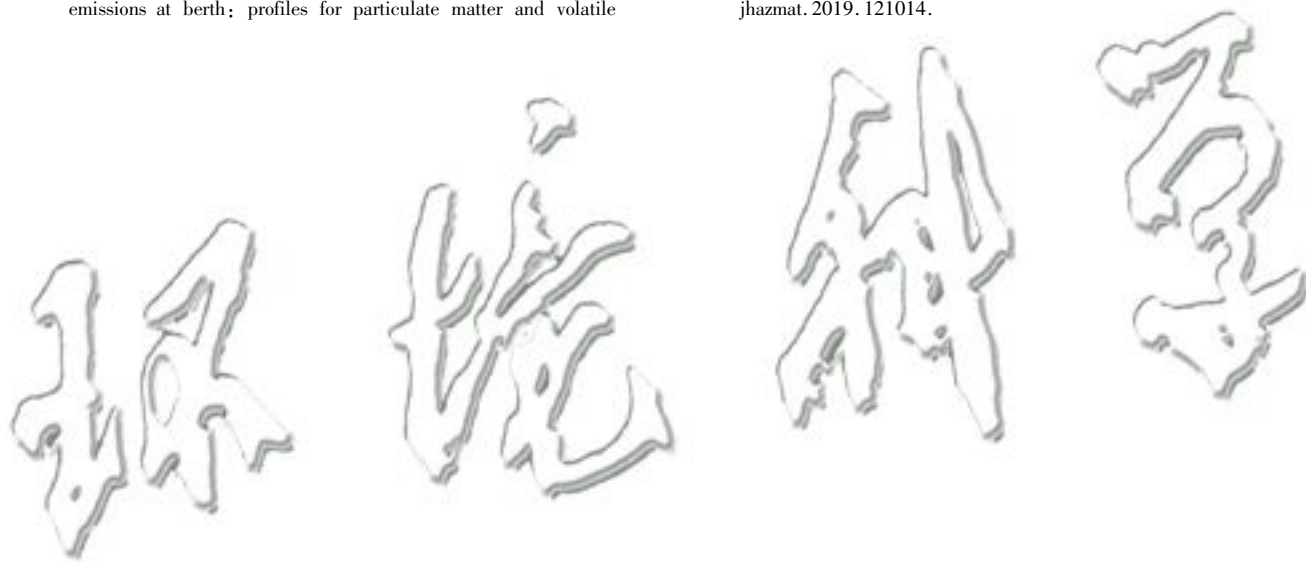
(3)烟花爆竹源颗粒主要有矿物质、左旋葡聚糖、有机碳、富钾、重金属、混合碳和元素碳这 7 种颗粒类型。不同区域颗粒物类型占比有明显差异,左旋葡聚糖在黄埔九龙站点的颗粒数占比远超过其它区域;左旋葡聚糖和富钾颗粒在公园前和黄埔大沙地站点的颗粒数占比比较高,公园前站点的有机碳颗粒占比远高于其他站点,达到 39.1%,可能是由于其位于禁燃区域,比其他站点烟花爆竹源颗粒经历更长时间的老化。黄埔大沙地和花都新华比公园前和黄埔九龙站点含有更丰富的矿物质。

(4)大于 85% 的烟花爆竹源颗粒与硝酸盐内混,明显高于在总颗粒物中的占比,硫酸盐和铵盐则相反,在烟花爆竹源颗粒中的颗粒数占比均显著低于其在总颗粒中的占比;铵盐在烟花爆竹源颗粒中的颗粒数占比仅为 1.7%~5.9%,表明烟花爆竹源颗粒物不利于铵盐的形成。

参考文献:

- [1] 石佳, 刘宇嘉, 王源程, 等. 2017 年成都市春节期间烟花爆竹对空气质量的影响[J]. 四川环境, 2017, **36**(S1): 51-56.
Shi J, Liu Y J, Wang Y C, *et al.* The impact of fireworks on air quality during the Spring Festival in Chengdu of 2017 [J]. Sichuan Environment, 2017, **36**(S1): 51-56.
- [2] 周国治, 唐岳晖, 潘海婷. 2015~2019 年春节期间烟花燃放对长沙空气质量的影响分析[J]. 四川环境, 2020, **39**(3): 67-73.
Zhou G Z, Tang Y H, Pan H T. Influence of burning fireworks on air quality during the spring festival from 2015 to 2019 in Changsha[J]. Sichuan Environment, 2020, **39**(3): 67-73.
- [3] 赵旭辉, 童欢欢, 董昊, 等. 2015-2018 年春节期间合肥烟花爆竹燃放对空气质量的影响[J]. 中国环境监测, 2020, **36**(2): 126-137.
Zhao X H, Tong H H, Dong H, *et al.* Effects of fireworks on the air quality during the spring festival of 2015 to 2018 in Hefei City [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, **36**(2): 126-137.
- [4] Zhang Y Y, Wei J M, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ during 2015 Spring Festival in Beijing, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(5): 1169-1180.
- [5] Wang S S, Yu R L, Shen H Z, *et al.* Chemical characteristics, sources, and formation mechanisms of $\text{PM}_{2.5}$ before and during the Spring Festival in a coastal city in Southeast China [J]. Environmental Pollution, 2019, **251**: 442-452.
- [6] Feng J L, Yu H, Su X F, *et al.* Chemical composition and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ during Chinese Spring Festival at Xinxiang, a heavily polluted city in North China: fireworks and health risks [J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 176-188.
- [7] 杨志文, 吴琳, 元洁, 等. 2015 年春节期间天津烟花爆竹燃放对空气质量的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 69-75.
Yang Z W, Wu L, Yuan J, *et al.* Effect of fireworks on the air quality during the Spring Festival of 2015 in Tianjin City [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 69-75.
- [8] Shivani R G, Saxena M, Sharma S K, *et al.* Short-term degradation of air quality during major firework events in Delhi, India [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2019, **131**(4): 753-764.
- [9] 马莹, 吴兑, 刘建. 珠三角春节期间 $\text{PM}_{2.5}$ 及水溶性离子成分的变化——以 2012 年为例[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 2890-2895.
Ma Y, Wu D, Liu J. The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and its water soluble ions during Spring Festival in PRD in 2012 [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 2890-2895.
- [10] Tanda S, Ličbinsky R, Hegrová J, *et al.* Impact of New Year's Eve fireworks on the size resolved element distributions in airborne particles [J]. Environment International, 2019, **128**: 371-378.
- [11] 程念亮, 陈添, 张大伟, 等. 2015 年春节北京市空气质量分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3150-3158.
Cheng N L, Chen T, Zhang D W, *et al.* Air quality characteristics in Beijing during Spring Festival in 2015 [J]. Environmental science, 2015, **36**(9): 3150-3158.
- [12] 熊秋林, 张如心, 宁文丽, 等. 春节期间烟花燃放对江西省城市环境空气质量影响研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2020, **43**(3): 280-287.
- [13] 邱飞, 刘慧, 向峰, 等. 燃放烟花爆竹对云南省环境空气质量的影响[J]. 环境科学导刊, 2018, **37**(S1): 74-81.
Qiu F, Liu H, Xiang F, *et al.* Impact of fireworks on air quality in Yunnan Province [J]. Environmental Science Survey, 2018, **37**(S1): 74-81.
- [14] Yao L, Wang D F, Fu Q Y, *et al.* The effects of firework regulation on air quality and public health during the Chinese Spring Festival from 2013 to 2017 in a Chinese megacity [J]. Environment International, 2019, **126**: 96-106.
- [15] Liu J W, Chen Y J, Chao S H, *et al.* Levels and health risks of $\text{PM}_{2.5}$ -bound toxic metals from firework/firecracker burning during festival periods in response to management strategies [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **171**: 406-413.
- [16] 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山. 烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)成分图谱[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1484-1492.
- [17] Xie R J, Hou H X, Chen Y S. Analysis of the composition of atmospheric fine particles ($\text{PM}_{2.5}$) produced by burning fireworks [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1484-1492.
- [17] Singh A, Pant P, Pope F D. Air quality during and after festivals: aerosol concentrations, composition and health effects [J]. Atmospheric Research, 2019, **227**: 220-232.
- [18] 郑亦佳, 李楠, 廖程浩, 等. 2019 年春节期间广东省烟花爆

- 竹燃放管控成效评估研究[J]. 环境科学与管理, 2019, **44** (11): 92-97.
- Zheng Y J, Li N, Liao C H, *et al.* Evaluation on control effect of fireworks in Guangdong province during Spring Festival in 2019 [J]. Environmental Science and Management, 2019, **44**(11): 92-97.
- [19] 广州市生态环境局. 关于做好 2020 年春节、元宵节期间烟花爆竹禁限放监管工作的通知[A]. 2020-01-10.
- [20] 广州市空气质量实时发布系统[EB/OL]. http://112.94.64.160:8023/gzaqi_new/RealTimeDate.html, 2020-12-17.
- [21] 胡丙鑫, 段青春, 刘世杰, 等. 2018 年春节期间京津冀及周边地区烟花禁放效果评估[J]. 环境科学研究, 2019, **32** (2): 203-211.
- Hu B X, Duan J C, Liu S J, *et al.* Evaluation of the effect of fireworks prohibition in the Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas during the Spring Festival of 2018 [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(2): 203-211.
- [22] Xiao Q, Li M, Liu H, *et al.* Characteristics of marine shipping emissions at berth: profiles for particulate matter and volatile organic compounds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(13): 9527-9545.
- [23] 张莉. 基于单颗粒气溶胶质谱信息的分类方法研究及其应用[D]. 上海: 上海大学, 2013.
- Zhang L. Aerosols cluster methods study and its application based on single particle aerosol mass spectra information [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013.
- [24] 王宇骏, 李梅, 吴清柱, 等. 广州秋季灰霾生消过程气溶胶单颗粒组成特征研究[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(4): 614-620.
- Wang Y J, Li M, Wu Q Z, *et al.* Characterizing single particle aerosols during the formation and removal of a haze event in the autumn of Guangzhou[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(4): 614-620.
- [25] Peng L, Li L, Lin Q H, *et al.* Does atmospheric processing produce toxic Pb-containing compounds? A case study in suburban Beijing by single particle mass spectrometry [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **382**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121014.



CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)