

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)
南昌市场尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe) 可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉珊(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612)	《环境科学》征稿简则(1787)
信息(1663, 1796, 1833)	

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态

于兴娜¹, 时政¹, 马佳², 李梅^{3,4}, 龚克坚⁵

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 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, 广州 510632; 4. 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; 5. 中国民用航空西北地区空中交通管理局宁夏分局气象台, 银川 750009)

摘要: 利用单颗粒气溶胶飞行时间质谱(SPAMS)于2015年12月1~31日对南京江北新区大气单颗粒进行了测量, 共采集到同时含有正负离子谱图的颗粒747.8万个。结果表明, 监测期间南京江北新区总体空气质量较差, 污染天气占比为49.2%, SPAMS所捕获的颗粒数与PM_{2.5}质量浓度的相关性达到0.83, 因此颗粒物数浓度在一定程度上能够用来反映大气污染状况, 监测点主要污染源包括燃煤源以及机动车尾气源, 工业工艺源污染占比居第3位, 3种源的总贡献率达到63.5%。从整体上看, PM_{2.5}质量浓度的升高大多伴随着燃煤及机动车尾气占比的升高, EC、混合碳(ECOC)与OC在生物质燃烧、扬尘、汽车尾气排放、燃煤燃烧以及工业源中均与NO₂⁻、NO₃⁻以及SO₄⁻有较高的混合程度。

关键词: 在线源解析; 单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS); 机动车尾气; 燃煤; 混合状态

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1521-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809195

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area

YU Xing-na¹, SHI Zheng¹, MA Jia², LI Mei^{3,4}, GONG Ke-jian⁵

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou 510530, China; 3. Institute of Mass Spectrometer and Atmospheric Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 4. Guangdong Provincial Engineering Research Center for On-line Source Apportionment System of Air Pollution, Guangzhou 510632, China; 5. Meteorological Observatory of Ningxia Branch Northwest Air Traffic Management Bureau Civil Aviation Administration of China, Yinchuan 750009, China)

Abstract: To characterize the ambient particles in the Nanjing Jiangbei New Area, a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) was deployed from December 1 to 31, 2015. A total of 7.478 million particles were analyzed with both positive and negative ion spectra. The air quality of Nanjing during the measurement period was poor, and the percentage of pollution days was 49.2%. The correlation (*R*) between the SPAMS particle number and PM_{2.5} concentration was 0.83, showing that the particle number could reflect the trend in the variation of atmospheric pollution. The dominant pollutant source at the monitoring site was coal combustion, followed by vehicle emissions and industrial emissions, with a contribution ratio of 63.5%. The increase in the PM_{2.5} mass concentration was accompanied by a high proportion of coal combustion or vehicle emissions. A high mixing state between EC, ECOC, and OC and NO₂⁻, NO₃⁻, and SO₄⁻ was observed for the sources of biomass burning, dust, vehicle emissions, coal combustion, and industrial emissions.

Key words: on-line source apportionment; single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS); vehicle emission; coal combustion; mixing state

大气颗粒物是影响我国环境空气质量的重要污染物^[1~3], 大气颗粒物能够通过散射和吸收太阳辐射或作为云凝结核间接影响气候系统, 并且其能够降低大气能见度, 危害人体健康而引起人们的广泛关注^[4,5], 由于大气气溶胶的来源和化学转化过程不同, 其形态、大小、化学组成和混合状态有着明显的特征, 因此对单颗粒气溶胶的分析和研究对于认识气溶胶的形成机制、老化过程以及识别和解析排放来源有着重要意义^[6]。

与目前发展迅速的颗粒物在线观测相比, 许多研究学者对于气溶胶粒子分析仍然主要采用离线采

集-分析方法, 即利用 Teflon 膜、石英纤维滤膜等采集大气颗粒物, 样品经处理后用离子质谱、离子色谱、热光碳分析仪、X 射线荧光法、ICP-MS 等仪器分析样品化学成分^[7~11], 但以上方法时间分辨率较低, 颗粒物的理化性质可能会在分析过程中发生改变^[12]。传统颗粒物源解析较为常用的方法是经上

收稿日期: 2018-09-26; 修订日期: 2018-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203501); 国家自然科学基金项目(91544229, 41475142, 41775154); 江苏省“六大人才高峰”项目(JNHB-057); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 于兴娜(1979~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为大气环境, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

述化学分析后再运用受体模型解析其污染来源^[13],其缺点是从样品采集、化学组分分析到模型结果的获取周期长,一定时间内平均化的数据无法捕捉瞬时(如几分钟或几小时)的高浓度污染过程,难以满足对短时间内突发重污染事件来源解析的需求^[14].南京作为长三角经济区重要的大都市之一,同时也是国家重要的区域中心城市,虽长期进行大气污染治理工作,但在极为有限的环境容量下,当前的污染排放总量仍旧较大,大气污染形势依旧严峻.目前对于南京地区单颗粒质谱的研究已有诸多成果,如龚宇麟等^[15]利用单颗粒气溶胶质谱仪于2015年秋季对南京北郊大气细颗粒物的连续观测发现,污染天气下 EC 和 Metal(富金属颗粒)颗粒对细颗粒物污染贡献较大,除 OC 颗粒外,粒径普遍向大粒径段偏移,强降水对于各类颗粒物尤其是大粒径段颗粒物具有明显的清除作用.秦鑫等^[16]通过对含 Pb 气溶胶粒子数据进行质谱分类分析发现,南京北郊含 Pb 气溶胶粒子主要来自于钢铁冶炼、城市扬尘、燃油排放和化工排放.此类研究主要针对污染颗粒物的来源与空间分布进行分析,但目前缺乏气溶胶混合状态研究以及对于理化特性的更进一步讨论.单颗粒气溶胶质谱仪(single particle aerosol mass spectrometry, SPAMS)具备检测单个颗粒物粒径大小及其化学组成的能力,并具备极高的时间分辨率,已有众多研究将其应用于颗粒物源解析^[17]、颗粒物化学组分^[18]以及颗粒物的混合状态等领域^[19].因此,本研究采用广州禾信分析仪器有限公司研制的单颗粒气溶胶质谱仪,测量了2015年南京江北新区冬季气溶胶污染过程中单颗粒气溶胶的粒径分布和化学组成及其混合状态,以期对南京北郊污染治理提供可靠的技术支撑.

1 材料与方法

1.1 单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪(SPAMS)简介

SPAMS 的工作原理、基本性能和质量控制已有文献进行了详细地阐述^[20-22].简单来说,气溶胶颗粒通过 0.1 mm 的进样微孔引入到空气动力学透镜,被聚焦成为笔直运动的粒子束进入真空测径系统.粒子束触发双测径激光完成粒径测定和颗粒数目统计,并触发电离激光,在电离腔内将颗粒物打击成离子碎片,再由双极飞行时间质量分析器对气溶胶颗粒化学组分进行检测.

1.2 采样时间和地点

在线单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪放置在南京信息工程大学内气象楼 12 楼中国气象局气溶胶与

云降水重点开放实验室内; β 射线颗粒物连续监测仪放置在南京信息工程大学内气象楼楼顶,其时间分辨率为 30 min;CAWSD600 型自动气象站观测地点位于南京信息工程大学内的中国气象局综合观测培训实习基地,其采样间隔为 1 h,本研究采用 24 h 平均值,并剔除明显的异常值.仪器采样时段均为 2015 年 12 月 1~31 日,监测地点位于江苏省南京市浦口区南京信息工程大学(32°03'N, 118°46'E),海拔高度 62 m,东面紧邻宁六公路,东北和东南方向则分布着扬子石化,南京钢铁集团等大型化工、能源企业,南面毗邻龙王山风景区,西北两侧则为住宅区及农田.该地区处于西风带,属于季风性气候,春夏季多为东南风,秋冬季则以偏北风为主,位置见图 1.



图 1 监测地点示意

Fig. 1 Geographical location of the observation site

1.3 数据分析

颗粒的粒径及质谱信息输入到 MATLAB r2011a 上运行的 SPAMS Data Analysis V3.1 软件包进行处理.首先通过自适应共振理论神经网络算法(ART-2a)对采集到的颗粒进行自动分类^[23],该算法能够根据颗粒质谱中离子峰的种类及强度自动将相似的颗粒归为同一类,本研究使用的 ART-2a 算法参数如下:警戒因子为 0.60,学习率为 0.05,迭代次数为 20. ART-2a 将所有的颗粒分成了数百种颗粒类型,然后再通过人工根据化学成分特征将其合并为 7 类:元素碳(element carbon, EC)、有机碳(organic carbon, OC)、混合碳(mixed carbon, ECOC)、富钾颗粒(K-rich, K)、左旋葡聚糖颗粒(levoglucosan, LEV)、重金属颗粒(heavy metal, HM)和矿物质颗粒(mineral dust, MD),它们占总颗粒数的 90% 以上.然后,根据各类污染源的排放特征,采用示踪离子法将采集到的环境颗粒物分为扬尘、生物质燃烧、汽车尾气、燃煤、工业工艺源、二次无机源及其他 7 种来源.

2 结果与讨论

2.1 采样期间空气质量

图2为监测期间PM_{2.5}质量浓度小时均值及SPAMS采集的颗粒物数浓度时间序列。采样期间平均PM_{2.5}质量浓度为85.8 μg·m⁻³，高于2012年公布的《GB 3095-2012 环境空气质量标准》^[24]所规定二类标准24 h平均限值(75 μg·m⁻³)。根据环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)^[25]，空气质量分指数(IAQI)为100时，对应的PM_{2.5}质量浓度恰为二类环境空气功能区24 h的平均值(75 μg·m⁻³)。南京江北新区冬季PM_{2.5}在研究期间均为每日的首要污染物，因此，PM_{2.5}的空气质量分指数(IAQI)即为AQI。空气质量指数、级别、大气污染程度与PM_{2.5}质量浓度的对应关系如表1所示。观测期间优、良天气占比为50.8%，污染天气占比为49.2%，说明南京江北新区2015年冬季空气质

量较差，PM_{2.5}小时平均浓度最高达到266 μg·m⁻³，达到了严重污染水平，出现在12月25日13:00。

监测期间共采集了2046.4万个颗粒，其中有正、负谱图信息的颗粒物747.8万个。由SPAMS采样获得的颗粒物个数和PM_{2.5}质量浓度随时间变化(图2)看出，SPAMS所测得颗粒物数浓度与PM_{2.5}质量浓度变化趋势较为一致(相关系数r=0.83)，说明SPAMS所得颗粒物数浓度在一定程度上可以反映大气细颗粒物的污染状况。

监测期间气温、气压、相对湿度与风速风向变化如图3所示，南京北郊2015年12月平均气温6.0℃，平均相对湿度为67.7%，平均风速仅为1.6 m·s⁻¹，气压范围为994.9~1021.3 hPa；主导风向为西风 and 西北风，且风速高值也较多集中于该风向。以监测期间PM_{2.5}质量浓度最高值出现时间12月25日为例，当日平均温度，风速分别为7℃与1.8 m·s⁻¹，平均相对湿度则达到71%。

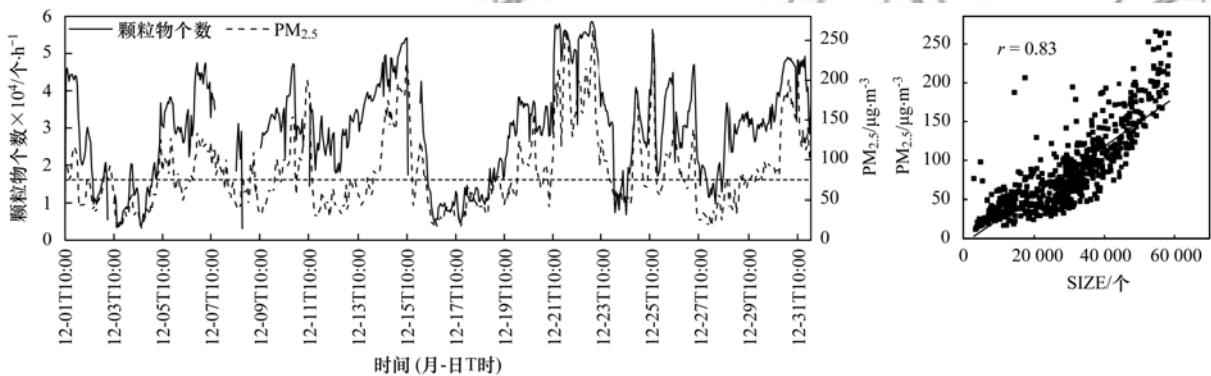


图2 2015年12月颗粒物个数与PM_{2.5}质量浓度随时间变化

Fig. 2 Time series of the particle number and the PM_{2.5} mass concentrations in December 2015

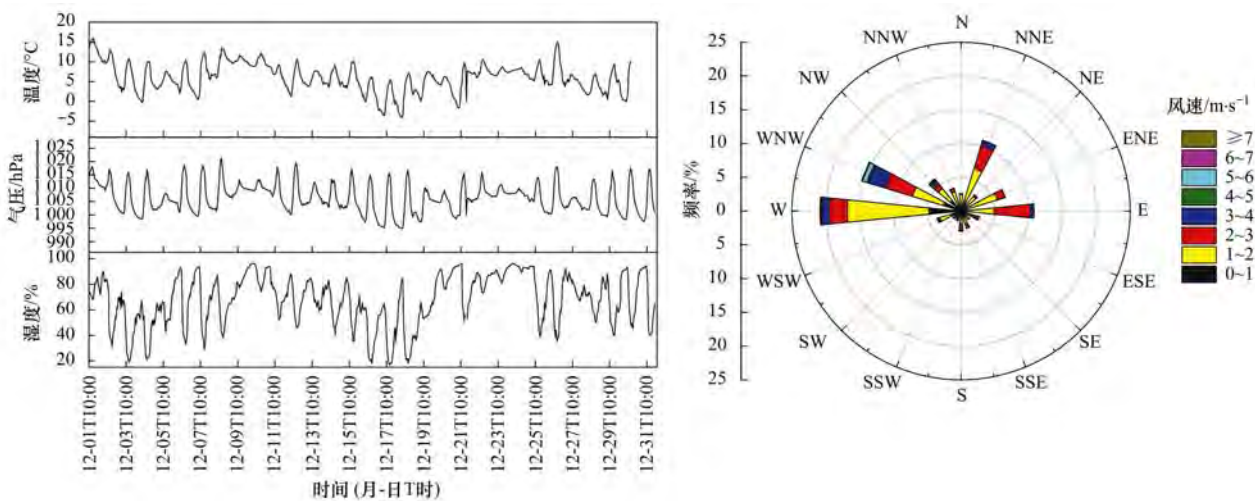


图3 观测期间气温、气压、相对湿度时间序列及风玫瑰图

Fig. 3 Time series of meteorological factors: temperature, relative humidity, pressure, and wind rose diagram during the measurement period

2.2 颗粒物来源分析

图4为监测期间南京江北新区PM_{2.5}源解析结果，可以看出，南京北郊冬季的首要污染物来源为

燃煤源，占比超过四分之一，机动车尾气源次之，这两种主要污染源占所有源贡献的50%左右，因此对于南京江北新区冬季污染治理需要加强对燃煤燃

烧的控制以及限制机动车尾气的排放. 工业工艺源贡献率为 16%, 仅次于燃煤燃烧与机动车尾气排放, 值得注意的是二次无机源的贡献率达到 12.7%, 说明 SO_2 和 NO_x 等二次转化生成的气溶胶粒子对南京冬季大气污染也具有一定贡献. 贡献率最低的为其他源、生物质燃烧以及扬尘源, 贡献率均不足 10%.

表 1 空气质量指数、级别与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对应关系

Table 1 Air quality index, air quality level, and the corresponding $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations			
空气质量指数 (AQI)	空气质量级别	大气污染程度	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
0 ~ 50	一级	优	0 ~ 35
51 ~ 100	二级	良	35 ~ 75
101 ~ 150	三级	轻度污染	75 ~ 115
151 ~ 200	四级	中度污染	115 ~ 150
201 ~ 300	五级	重度污染	150 ~ 250
> 300	六级	严重污染	> 250

在线源解析的优势在于高时间分辨率, 可以得到每类污染源以及颗粒物成分实时的贡献比例的变化趋势, 故对监测期间南京江北新区冬季各类污染源及颗粒物成分变化趋势进行了分析, 见图 5 和图 6. 其中横轴为时间, 纵轴为各类源或成分所占比例, 纵轴跨度越大, 代表贡献率越高. 从图 5 可以看出, 监测期间数浓度出现最高的两个污染源为燃煤燃烧与机动车尾气排放, 生物质燃烧以及扬尘源



图 4 2015 年 12 月南京江北新区大气颗粒物来源解析
Fig. 4 Source apportionment of the particulate matter in December 2015 in the Nanjing Jiangbei New Area

中出现数量最低. 燃煤源、机动车尾气排放源以及生物质燃烧源的占比随时间变化波动幅度较为明显, 其余污染源随时间变化波动幅度较为平稳, 燃煤源占比最高时间段为 12 月的 4 ~ 6 日与 16 ~ 20 日, 其中以 12 月 20 日占比最高为 46.2%; 机动车尾气排放源占比最高的时间段为 12 月的 1 ~ 2 日与 21 ~ 31 日, 其于 12 月 1 日达到最高占比为 38.6%; 生物质燃烧所占比例较高的时间段为 12 月的 3 ~ 5 日与 17 ~ 19 日, 其余时间段占比几乎可以忽略. 整体来看, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的升高大多伴随着燃煤及机动车尾气占比的同步升高. 由图 6 可知, 不同粒径中燃煤源、扬尘源以及工业工艺源所占比例波动幅度较大. 以燃煤源为例, 与 $0.5\ \mu\text{m}$

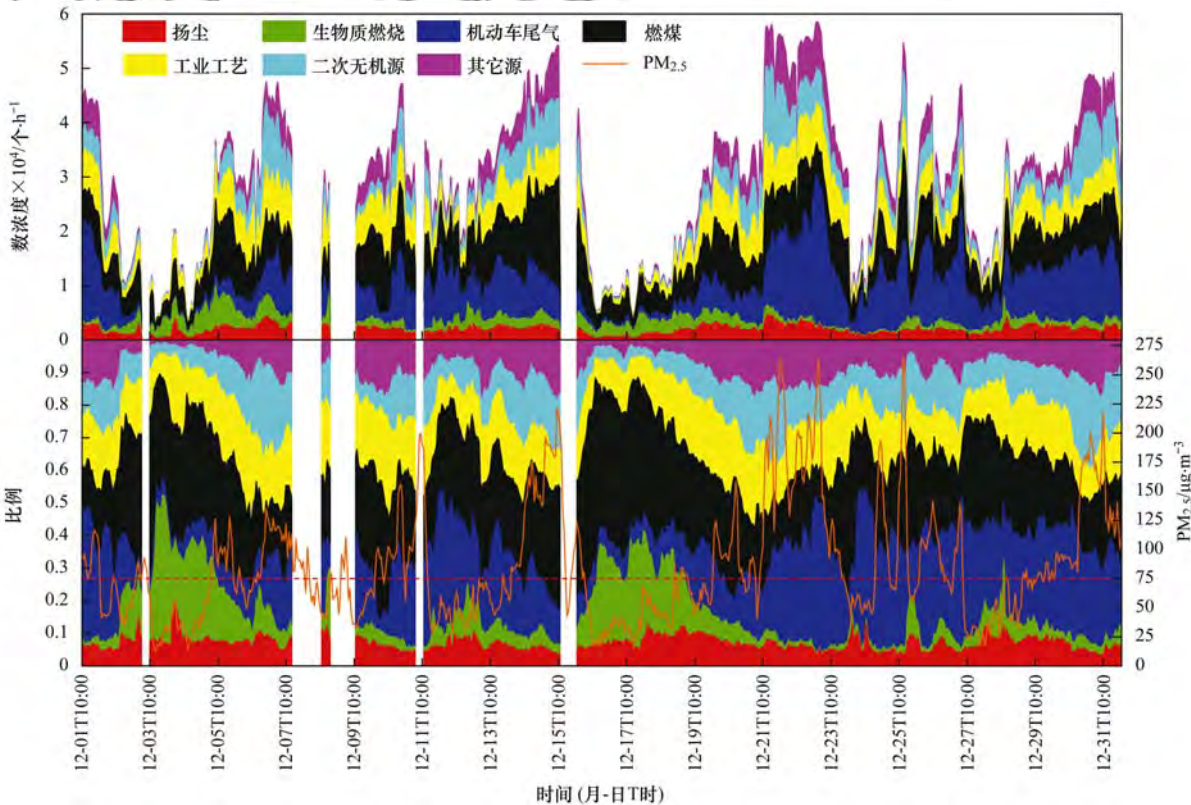


图 5 观测期间颗粒物来源比例及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随时间变化

Fig. 5 $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration, number concentration of particles, and percentage of different sources during the measurement period

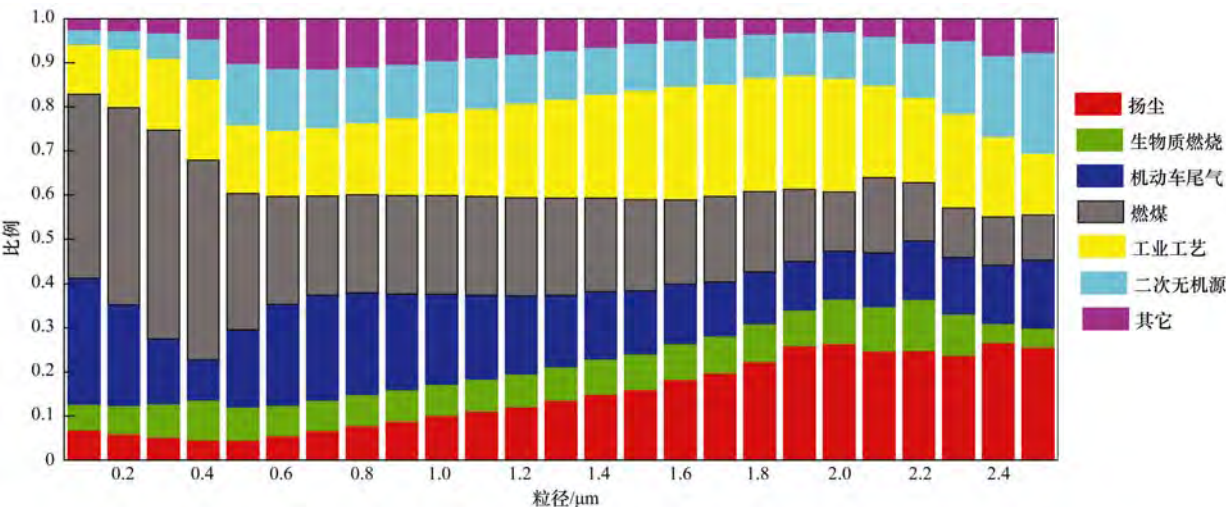


图 6 在各粒径段分布中颗粒物来源的比例

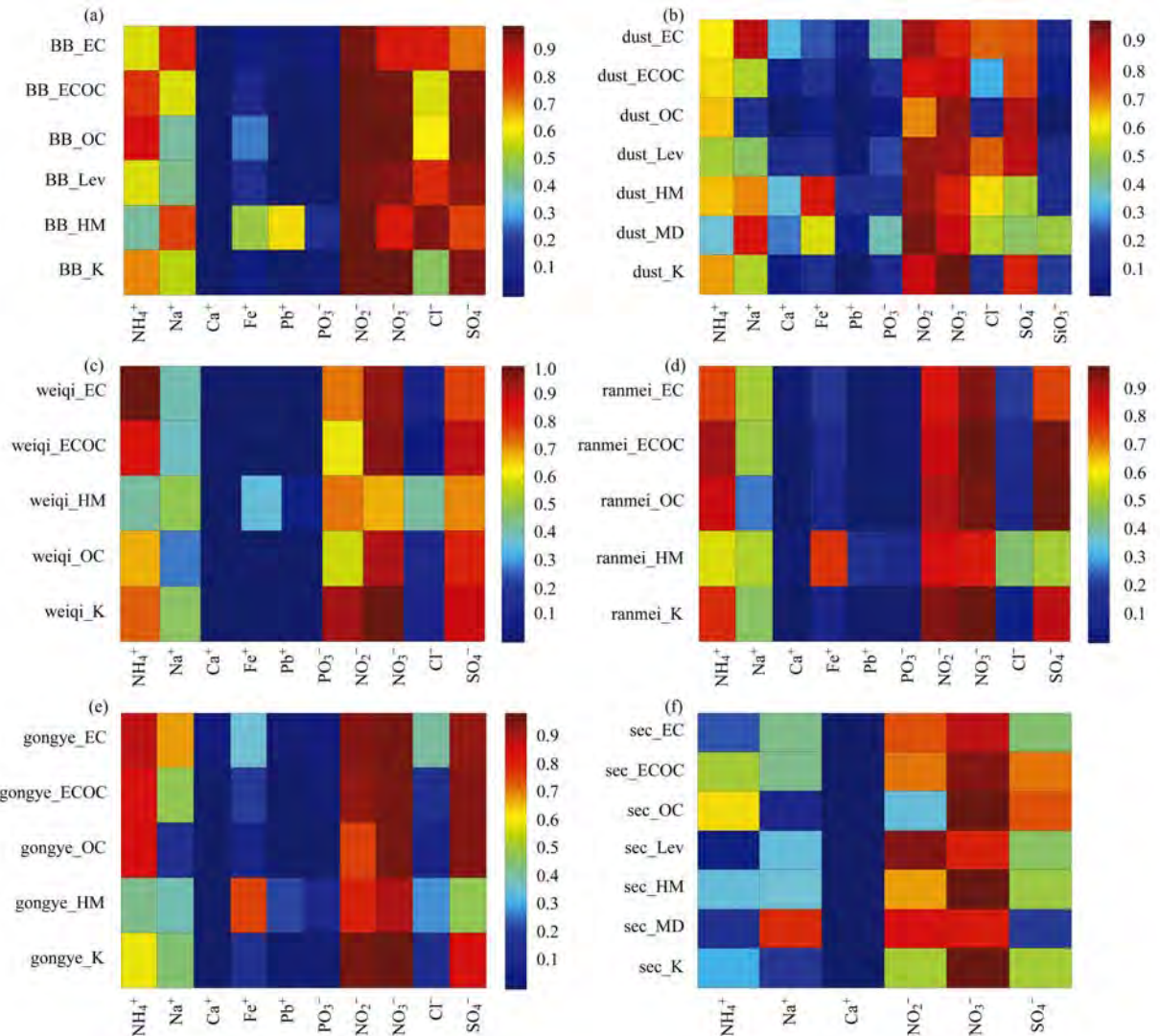
Fig. 6 Percentages of the pollutant sources in different size bins

粒径段以下所占比例相比，0.5 ~ 2.5 μm 粒径段中燃煤源所占比例出现了较为明显的下降，说明燃煤产生的颗粒物在 0.5 μm 以下的粒径中占有较大优势，而扬尘源则随颗粒物粒径增大表现出比例增高

的趋势，这与扬尘主要存在于粗粒子中有关。

2.3 各污染源颗粒物混合状态

由不同污染源中颗粒物混合状态可以发现(图 7)，生物质燃烧(BB)、扬尘(dust)、汽车尾气排放



(a) 生物质燃烧, (b) 扬尘, (c) 机动车尾气, (d) 燃煤, (e) 工业工艺, (f) 二次无机源

图 7 不同来源颗粒物混合程度

Fig. 7 Mixed state of the aerosol particles from different pollutant sources

(weiqi)、燃煤燃烧(ranmei)以及工业源(gongye)中颗粒物混合状态较为类似,EC、ECOC、OC、Lev(左旋葡聚糖)、HM(重金属)和K(富钾颗粒)均与 NO_2^- 、 NO_3^- 以及 SO_4^- 有较高的混合程度,与 Ca^+ 、 Fe^+ 以及 Pb^+ 混合程度则较低,说明在这些污染源中,当粒子从排放位置扩散到观测地点的过程中与大量的硝酸盐和硫酸盐发生了一系列的化学或物理反应;而在二次污染中EC、ECOC、OC、Lev、HM和K与3种主要二次离子 SO_4^- 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 保持较高的混合度,其中与 NO_3^- 混合度最高,均在70%以上.从单项上看,燃煤源中,含碳颗粒(EC、ECOC、OC)除了与二次无机盐(NO_2^- 、 NO_3^- 以及 SO_4^-)混合度较高外,与 Pb^+ 、 Fe^+ 、 Cl^- 也保持一定的混合度,工业源与之类似,含碳物质与 NO_3^- 和 SO_4^- 具有较高的混合度,结合观测地毗邻工业园区,说明工业污染主要来自于周围化工厂排放的 SO_2 与 NO_2 .

2.4 污染过程分析

表2为污染过程中高峰、低谷时间段及对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时间序列及特征时段源解析(图8).从时段编号1~3, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度显著上升,在此期间,燃煤的贡献率由18.7%逐渐上升并在时段编号3中达到最高值29.4%,同样保持持续上升趋势的还有二次无机源,其贡献率由11%上升至15.3%.因此,燃煤燃烧及来自于周边化工厂 SO_2 与 NO_2 的大量排放可能是造成 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度不断攀升并于12月25日达到最高值的原因,机动车尾气源贡献率随时间变化大幅降低,降

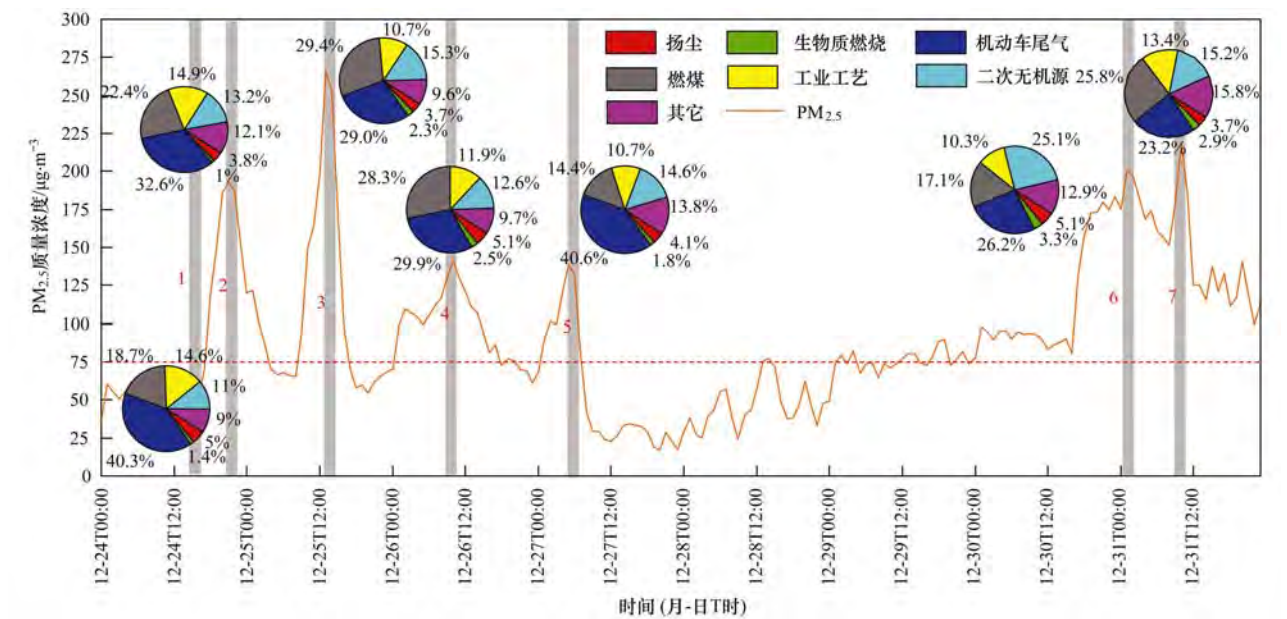
幅达28%.时段编号4~5期间, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度不断下降,同时燃煤源贡献率也从28.3%逐渐下降至时段编号5中的14.4%,而机动车尾气排放源与其他源的贡献率则相反,呈现出上升趋势,其中机动车尾气排放贡献率在此期间提升了11.6%,这可能与早间监测点附近宁六公路较大的机动车流量有关.此后一段时间内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化较为平稳,至12月30日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度再次出现明显上升.时段编号5~6期间的二次无机源贡献率上升幅度较大,由14.6%上升至25.1%,结合相对湿度可以看出时段编号6相对湿度持续升高并保持在90%以上,此外燃煤源呈现小幅上升,可见时段编号6主要受到高湿天气下气态污染物二次转化的影响.至时段编号7,燃煤源明显升高并成为首要污染源,二次无机源贡献随着相对湿度的降低明显减少.综上所述,此次典型污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度上升可能主要与燃煤燃烧、工业工艺源的影响以及气态污染物的二次转化有关.

表2 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度高峰、低谷分析时段¹⁾

Table 2 Peaks and valleys of the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations

编号	时间段	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
1	12-24T14:00~16:00	47
2	12-24T20:00~22:00	189
3	12-25T12:00~14:00	239
4	12-26T08:00~10:00	134
5	12-27T04:00~06:00	131
6	12-30T21:00~23:00	180
7	12-31T09:00~11:00	195

1) 高峰分析时段编号2、4、6、7; 低谷分析时段编号1、4、5



图中1~7对应表2中的时段编号

图8 干净天气时段与污染天气时段污染源贡献率变化

Fig. 8 Proportion of pollutant sources during clean and polluted time periods

3 结论

(1) 监测期间南京江北新区日平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $85.8 \mu g \cdot m^{-3}$, 其中优、良天气占比为 50.8%, 污染天气占比为 49.2%, 总体空气质量较差。

(2) 南京江北新区冬季首要污染源为燃煤燃烧, 机动车尾气排放源次之, 两者贡献率分别达 47.5%。工业工艺源与二次无机污染源仅次于燃煤燃烧及机动车尾气排放, 占比分别为 16% 与 12.7%。其他源、生物质燃烧以及扬尘源占比较低, 贡献率均不足 10%。

(3) 燃煤源、机动车尾气排放源以及生物质燃烧源的占比随时间变化波动幅度较为明显, 其余污染源随时间变化波动幅度较为平稳, 整体来看, $PM_{2.5}$ 质量浓度的升高大多伴随着燃煤及机动车尾气占比的同步升高。不同粒径中燃煤源、扬尘源以及工业工艺源所占比例波动幅度较大。

(4) 冬季的重度污染过程中, $PM_{2.5}$ 质量浓度升高的每个阶段均伴随燃煤燃烧源占比相应的升高。在时段 1 至时段 3 与时段 6 至时段 7 中, 其贡献率分别上升 10.7% 与 8.6%, 同时伴随二次无机源或工业工艺源的升高; 时段 4 至时段 5 期间, $PM_{2.5}$ 质量浓度不断下降, 燃煤源贡献率从 28.3% 逐渐下降至 14.4%, 机动车尾气排放源与其他源的贡献率则呈现上升趋势。

参考文献:

- [1] 吴国平, 胡伟, 滕恩江, 等. 我国四城市空气中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的污染水平[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 133-137.
Wu G P, Hu W, Teng E J, et al. $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution level in the four cities in China[J]. China Environmental Science, 1999, 19(2): 133-137.
- [2] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 1-6.
Ren Z H, Wan B T, Su F Q, et al. Several characteristics of atmospheric environmental quality in China at present[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(1): 1-6.
- [3] 赵越, 潘钧, 张红远, 等. 北京地区大气中可吸入颗粒物的污染现状分析[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 67-69.
Zhao Y, Pan J, Zhang H Y, et al. Analysis of inhalable particles pollution in the atmosphere in Beijing area[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(1): 67-69.
- [4] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: the scientific basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [5] Prather K A. Our current understanding of the impact of aerosols on climate change[J]. ChemSusChem, 2009, 2(5): 377-379.
- [6] 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 等. 利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒老化与混合状态[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1188-1198.
Huang Z L, Zeng L M, Dong H B, et al. Analysis of single particle aging and mixing state at an agriculture site (Quzhou) in the North China Plain in summer using a single particle aerosol mass spectrometer[J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 1188-1198.
- [7] Marcazzan G M, Ceriani M, Valli G, et al. Source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Milan (Italy) using receptor modelling[J]. Science of the Total Environment, 2003, 317(1-3): 137-147.
- [8] 崔明明, 王雪松, 苏杭, 等. 广州地区大气可吸入颗粒物的化学特征及来源解析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(3): 459-466.
Cui M M, Wang X S, Su H, et al. Chemical characters and sources identification of PM_{10} in Guangzhou area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(3): 459-466.
- [9] 唐玉翔, 黄平, 钱新明, 等. 西安市 $PM_{2.5}$ 污染的时空分布[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 368-373.
Tang Y X, Huang P, Qian X M, et al. On the spatial and temporal distribution regularity of $PM_{2.5}$ pollutants in Xi'an[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(4): 368-373.
- [10] 张晶, 陈宗良, 王玮. 北京市大气小颗粒物的污染源解析[J]. 环境科学学报, 1998, 18(1): 62-67.
Zhang J, Chen Z L, Wang W. Source apportionment on fine particulates in atmosphere in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(1): 62-67.
- [11] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气细粒子 $PM_{2.5}$ 的化学组成[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(12): 1605-1608.
Yang F M, He K B, Ma Y L, et al. Chemical characteristics of $PM_{2.5}$ species in Beijing ambient air[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2002, 42(12): 1605-1608.
- [12] 康苏花, 李海峰, 杨丽杰, 等. 石家庄市大气颗粒物碳组分特征分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(30): 280-282, 288.
Kang S H, Li H F, Yang L J, et al. Carbon fraction analysis of atmospheric particles in Shijiazhuang[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(30): 280-282, 288.
- [13] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3535-3542.
Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, et al. Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Nanjing by PMF[J]. China Environmental Science, 2015, 35(12): 3535-3542.
- [14] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 1141-1154.
Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, et al. Review of $PM_{2.5}$ source apportionment methods in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6): 1141-1154.
- [15] 龚宇麟, 银燕, 陈魁, 等. 南京北郊秋季气溶胶理化特征及潜在源区分布[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4032-4043.
Gong Y L, Yin Y, Chen K, et al. Physical and chemical characteristics and potential source region distribution of aerosols over the northern suburb of Nanjing, during autumn[J]. China Environmental Science, 2017, 37(11): 4032-4043.
- [16] 秦鑫, 张泽锋, 李艳伟, 等. 南京北郊春季含 Pb 气溶胶粒子来源分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 641-646.
Qin X, Zhang Z F, Li Y W, et al. Sources analysis of Pb-containing aerosols in north suburb of Nanjing in spring[J]. Acta

- Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(3): 641-646.
- [17] 周静博, 任毅斌, 洪纲, 等. 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- Zhou J B, Ren Y B, Hong G, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a multi-day haze in the winter of Shijiazhuang using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) [J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- [18] 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 等. 利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2071-2080.
- Mu Y Y, Lou S R, Chen C H, *et al.* Aging and mixing state of particulate matter during aerosol pollution episode in autumn Shanghai using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) [J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2071-2080.
- [19] Zhang G, Bi X, Li L, *et al.* Mixing state of individual submicron carbon-containing particles during spring and fall seasons in urban Guangzhou, China: a case study [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(9): 4723-4735.
- [20] 张俊, 吉祝美, 咸月, 等. 大气细颗粒物实时在线源解析技术解析盐城市大气细颗粒物来源[J]. 污染防治技术, 2015, **28**(2): 18-22.
- Zhang J, Ji Z M, Xian Y, *et al.* Sources analysis of particulate matter ($PM_{2.5}$) in ambient air of Yan-cheng city by mass spectrometry direct measurement on line [J]. Pollution Control Technology, 2015, **28**(2): 18-22.
- [21] Li L, Huang Z X, Dong J G, *et al.* Real time bipolar time-of-flight mass spectrometer for analyzing single aerosol particles[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2011, **303**(2-3): 118-124.
- [22] 李梅, 李磊, 黄正旭, 等. 运用单颗粒气溶胶质谱技术初步研究广州大气矿尘污染[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(6): 632-636.
- Li M, Li L, Huang Z X, *et al.* Preliminary study of mineral dust particle pollution using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) in Guangzhou [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, **24**(6): 632-636.
- [23] Song X H, Hopke P K, Fergenson D P, *et al.* Classification of single particles analyzed by ATOFMS using an artificial neural network, ART-2A [J]. Analytical Chemistry, 1999, **71**(4): 860-865.
- [24] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [25] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)