

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄朝峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化磷酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析

吴丹^{1,2}, 曹双^{1,2}, 汤莉莉³, 夏俊荣⁴, 陆建刚^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 杨孟^{1,2}, 李凤英^{1,2}, 盖鑫磊^{1,2}

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; 3. 江苏省环境监测中心, 南京 210036; 4. 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 在南京北郊使用 FA-3 型 9 级采样器对 2014 年 1~11 月颗粒物的粒径分布进行了采样分析. 首先将 FA-3 与中流量分级采样器 (KC-120H) 和环境保护局在线监测仪器的同期监测结果进行对比, 数据相关系数均在 0.95 以上, 对细粒子 FA-3 分别偏低 13.9% 和 16.6%, 而对 PM₁₀ 偏高 15.2% 和 13.3%, 但采样偏差在大气采样可接受范围之内, 说明其可以对大气颗粒物进行准确分级和采样. 南京北郊颗粒物污染严重, PM_{1.1}, PM_{2.1} 和 PM₁₀ 的年平均浓度分别为 (65.6 ± 37.6)、(91.0 ± 54.7) 和 (168.0 ± 87.0) μg·m⁻³, 污染以细粒子为主, 且大部分在 1.1 μm 以下; 颗粒物粒径呈双峰分布, 峰值位于 0.43~0.65 μm 和 9~10 μm 粒径段; 中值粒径为 1.83 μm, 为积聚模态污染. 颗粒物粒径分布在冬季细粒径段较高, 春季粗粒径段较高, 夏季细粒径段降低并不明显, 粗粒径段明显低于其他季节; 颗粒物浓度的昼夜变化在粗粒径段差异很小, 在细粒径段基本表现出夜晚大于白天的特征. 除了夏季, 降水对各个粒径范围的颗粒物都有清除作用, 且在细粒径段表现得更为明显; 霾发生时随着霾等级的加重, 0.43~2.1 μm 粒径段颗粒物浓度逐渐增加, 该粒径段颗粒物质量浓度与能见度呈显著负相关. 以相对湿度 70% 为界, 颗粒物粒径分布发生了明显变化, 湿度大于 70% 后, 小于 0.43 μm 粒径段颗粒物质量浓度显著降低, 而 0.43~2.1 μm 粒径段明显上升, 颗粒物的吸湿增长应是主要原因. 南京北郊的气团来源可以分为四类, 其中西北方向快速输送的气团最为洁净, 细粒径颗粒物浓度明显低于其它方向; 本地和周边近距离输送的气团污染最重, 粗细粒径颗粒物浓度都较高, 其传输距离短, 风速小, 发生污染的概率最大, 达到 73.9%, 对南京市的空气污染贡献较大.

关键词: 大气颗粒物; 粒径分布; 仪器对比; 降水清除; 霾天; 吸湿增长; 气团来源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3268-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.004

Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing

WU Dan^{1,2}, CAO Shuang^{1,2}, TANG Li-li³, XIA Jun-rong⁴, LU Jian-gang^{1,2}, LIU Gang^{1,2}, YANG Meng^{1,2}, LI Feng-ying^{1,2}, GAI Xin-lei^{1,2}

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 4. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing 210044, China)

Abstract: The size distribution of particulate was analyzed by the FA-3 9 stage sampler in Northern-suburb of Nanjing from January to November in 2014. First, the monitoring result from FA-3 was compared with the results of the same period obtained from a medium flow size grading sampler (KC-120H) and online monitoring instrument of the Environmental Protection Agency. The data correlation coefficients were all greater than 0.95. The fine particle concentration from FA-3 was lower by 13.9% and 16.6%, while PM₁₀ concentration was higher by 15.2% and 13.3% respectively. However, the deviations were in the acceptable range of atmospheric sampling which could indicate the accurate classification and sampling of particulate for FA-3. Particulate pollution in Northern-suburb Nanjing was serious in which the annual average concentrations of PM_{1.1}, PM_{2.1} and PM₁₀ were (65.6 ± 37.6), (91.0 ± 54.7) and (168.0 ± 87.0) μg·m⁻³ respectively; fine particles dominated and most of them had a diameter of less than 1.1 μm. Particle size distribution was bimodal with peaks at 0.43-0.65 and 9-10 μm; the median diameter was 1.83 μm which was in the accumulation mode. In winter, the concentration of fine particle size was higher and in spring the coarse particle size was higher; in summer, the fine particle size concentration was not significantly reduced but coarse particle size was obviously lower than those in other seasons. The differences of particle size distribution in day and at night were very small in coarse segment and in fine segment, the nocturnal concentrations were mostly higher than diurnal concentrations. The precipitation had cleaning effect for each size range of particulate

收稿日期: 2015-05-07; 修订日期: 2016-04-25

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20130998); 南京信息工程大学基金预研项目 (2014x003); 国家自然科学基金项目 (41301581, 91544220); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (KYLX-0857)

作者简介: 吴丹 (1983~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气环境和大气化学, E-mail: wudan_04@163.com

except in summer and the effect was more distinct in fine particle size. In haze days, with the aggravation of haze level, the particle concentration in the diameter range of 0.43-2.1 μm increased gradually while in this segment the particle concentration was significantly negatively correlated with visibility. Using relative humidity of 70% as the demarcation, the particle size distribution changed significantly: when humidity was greater than 70%, mass concentration of particle with a diameter of less than 0.43 μm reduced significantly but that with diameter range of 0.43-2.1 μm increased obviously which should be related to the particle hygroscopic growth. The air mass sources could be divided into four categories in northern-suburb of Nanjing. Air mass from the northwest with rapid transport velocity was the cleanest in which the fine particle size concentration was significantly lower than those in other directions; the air mass from local and surrounding was the most severely polluted with high concentrations in both fine and coarse segment, its transmission distance was short and wind speed was small which contributed greatly to air pollution of Nanjing with probability of occurrence of pollution reaching 73.9%.

Key words: aerosol; particle size distribution; comparison of samplers; precipitation scavenging; haze; particle hygroscopic growth; air mass sources

大气气溶胶是指悬浮在大气中,空气动力学直径为 0.001 ~ 100 μm 的液体和固体微粒体系,目前已成为我国大部分地区大气环境的主要污染物^[1],对空气质量、气候变化和人体健康都造成了严重影响.不同粒径的气溶胶粒子对健康和环境的影响不同,一般将 2.5 μm 作为粗细粒子的分界,而细粒子又可进一步分为爱根核模(<0.05 μm)和积聚模态粒子^[2].粒径较小的颗粒物在大气中存在时间较长,是影响空气质量最主要的颗粒物,与可见光波长(0.4 ~ 0.7 μm)相当的粒子消光作用最强^[3],造成大气能见度降低,同时对地气辐射平衡造成影响^[4];含有亲水性化学组分的粒子在高相对湿度条件下能够吸湿增长^[5],消光作用剧增,进一步降低大气能见度,还能够作为云凝结核影响云和降水的分布^[6];小于 10 μm 的粒子(PM_{10})又称为可吸入颗粒物,进入呼吸系统后随粒径沉积在人体不同部位^[7],对健康造成危害.同时,颗粒物的粒径分布特征还可以提供粒子来源,形成和增长机制等重要信息,因此掌握气溶胶粒子的粒径分布具有重要意义^[8].

目前,对 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 理化特性的研究较多,也有一些科研工作者使用气溶胶分级采样器对颗粒物的粒径分布进行研究,例如:文献[9~11]对北京、上海和长三角的城市大气颗粒物中水溶性离子,文献[12~14]对南京、香港和拉萨气溶胶中的有机碳和元素碳,文献[15~17]对北京、贵阳和日喀则气溶胶中的重金属元素的粒径分布特征进行了研究.这些研究主要对颗粒物中化学组分的粒径分布进行探讨,但缺乏对不同影响因素条件下颗粒物粒径分布变化的全面深入的分析,这些影响因素包括季节、昼夜、气象条件,如降水、霾和湿度等以及气团来源等;另外,使用 Anderson 或 MOUDI 等分级采样器进行采样时,开展不同仪器间的比对工作,对采样器的分级和采集效果进行评估是后续研究的基础,而

这方面的研究工作非常少^[18].

南京市是长三角地区重要的经济文化中心,其空气质量问题受到广泛关注,也面临巨大挑战.本研究对南京北郊气溶胶的粒径分布进行分析,首先通过仪器对比对采样结果的准确性进行评估,接下来对气溶胶粒径分布的季节、昼夜变化,以及气象条件,包括降水、霾和湿度还有气团来源对其的影响进行了较为全面深入地分析,以揭示南京市大气气溶胶的污染和变化特征,以期对污染控制措施的制定提供一定的科学依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 采样地点

观测地点位于南京北郊浦口区,南京信息工程大学中国气象局综合观测培训实习基地(海拔 22 m,北纬 32°12',东经 118°42')内,距市中心约 15 km,向东 1.5 km 为宁六公路,东北方向约 10 km 是南京化学工业园,西边和北边为居民区、村庄和农田,南边为龙王山风景区,采样点同时受到工业源、交通源和生活源的共同影响,可以代表南京城乡结合部的污染特征.采样点地势开阔、平坦,没有局地污染源存在,下垫面为低矮草地,周围无高大建筑阻挡.

1.2 采样仪器

FA-3 型(辽宁康洁)气溶胶分级采样器是利用惯性撞击原理设计的采样器,在一定的气流速度下,惯性较大的粒子撞击到采集板上,而惯性较小的粒子随气流绕行进入下一级,由于孔径逐级减小,气流速度逐级增高,不同大小的粒子按空气动力学特征分别撞击在相应的采集板上,直到最后一级通过过滤收集.采样器一共有 9 级,分别对应如下粒径范围: < 0.43、0.43 ~ 0.65、0.65 ~ 1.1、1.1 ~ 2.1、2.1 ~ 3.3、3.3 ~ 4.7、4.7 ~ 5.8、5.8 ~ 9.0 和 9.0 ~ 10 μm . 采样流量设定为 28.3 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. 采样膜

使用特氟龙滤膜($\Phi 80$ mm,上海新亚),采样前后所用滤膜均已在干燥器中平衡 24 h,恒重后用电子天平(美国 OHAUS DV215CD,十万分之一)称量,根据称量前后膜的重量差计算得到气溶胶的分粒径质量浓度。

1.3 对比仪器

在同一地点,使用青岛崂山 KC-120H 型智能中流量采样器与 FA-3 同时采样,两种仪器采样原理相似,KC-120H 使用石英膜(美国 Pall)对 < 2.5 、 $2.5 \sim 5$ 、 $5 \sim 10$ 、 $> 10 \mu\text{m}$ 这 4 个粒径段的颗粒物进行采样,可以计算得到 TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的采样结果,采样流量为 $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,并具有流量补偿功能。

另外采用南京市环境保护局空气质量监测网位于浦口区的站点数据作为对比,站点临近南京工业大学浦口校区,与本文观测点相距约 16 km. 使用美国 Metone BAM-1020 型自动测尘仪在线监测大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度,仪器采用 β 射线衰减原理,使用玻璃纤维滤膜,每次测量的循环时间为 1 h.

1.4 采样时间

FA-3 和 KC-120H 分级采样器为同步采样,采样时间为 2014 年 1 ~ 11 月,每星期采样两次,工作日和周末各一次,一般为周三和周六,每次分昼夜进行采样,早 08:00 开始,晚 20:00 左右换膜,继续采样到第二天早上 08:00. 当遇到雨天和大雾等不利采样天气时,采样时间有所调整. 去除断电和仪器故障时的数据,一共得到 FA-3 白天样品 71 组,晚上样品 49 组,KC-120H 白天样品 61 组,晚上样品 41 组. 将环境保护局浦口站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在线连续观测数据求取平均,得到与 FA-3 相对应时段内的颗粒物平均质量浓度。

2 结果与讨论

2.1 采样结果的对比分析

将 3 种气溶胶采样仪器得到的结果进行比较,由于环境保护局在线连续监测仪器得到的是 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度,KC-120H 有相应的分级粒径,而 FA-3 与 $2.5 \mu\text{m}$ 相近的粒径为 $2.1 \mu\text{m}$,因此本文将 FA-3 采样器的 $\text{PM}_{2.1}$ 作为 $\text{PM}_{2.5}$ 近似值来进行比较。

FA-3 与环境保护局(HBJ)和 KC-120H 数据的散点分布见图 1. 对 $\text{PM}_{2.5}$,3 种采样仪器样本平均分别为 (91.0 ± 54.7) 、 (92.4 ± 53.3) 和 $(107.4 \pm 64.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; FA-3 与 HBJ 和 KC-120H 的采样结

果具有非常好的相关性,相关系数均达到了 99.9% 的置信度水平;但拟合曲线斜率均小于 1,说明 FA-3 采样结果偏低,与 HBJ 和 KC-120H 分别相差 $1.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对平均相对偏差进行计算,FA-3 低估约 13.9% 和 16.6%,主要原因可能是 FA-3 采样范围偏小($0 \sim 2.1 \mu\text{m}$)导致的;对于 PM_{10} ,3 种采样仪器样本平均分别为 (168.0 ± 87.0) 、 (146.0 ± 81.7) 和 $(150.0 \pm 84.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,FA-3 与 HBJ 和 KC-120H 的相关系数也非常高,但拟合曲线斜率均大于 1,说明 FA-3 对 PM_{10} 的采集结果偏高,这从一定程度上也说明 FA-3 $\text{PM}_{2.5}$ 采样结果偏低与粒径范围偏小有关;FA-3 的 PM_{10} 采样结果比 HBJ 和 KC-120H 分别高 $22.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $18.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其平均相对偏差分别为 15.2% 和 13.3%. 总的来看,虽然 FA-3 与其它两种仪器的采样结果存在差异,但结果相关性良好;由于大气污染物在空气中浓度很低,一般认为相对偏差在 25% 以内就能满足大气采样的要求^[19],因此 FA-3 的采样偏差在大气采样可接受范围之内. 虽然 FA-3 有更多的粒径分级,但限于对比仪器的采样粒径范围,无法进行更详细的比较和评估, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的比较结果能从一定程度上说明 FA-3 可以对大气颗粒物进行准确分级和采样。

2.2 颗粒物质量浓度水平和粒径分布特征

2.2.1 质量浓度水平

观测期间 FA-3 共采集到 118 个样本,包括 44 个昼夜连续采样日,25 个白天和 5 个夜晚采样日. 将昼夜连续采样样本取平均得到日均浓度,仅白天和夜晚采样的,以样本值代表当天 24 h 的日均浓度,得到南京北郊颗粒物浓度随时间的变化如图 2,其中还给出了对应时间气象要素的变化情况,边界层高度来自于 NOAA HYSPLIT^[20] 模式的输出结果,以 14:00 代表当天的最大边界层高度,其余气象要素均为基地常规地面观测日平均结果. 南京北郊颗粒物浓度和粒径分布随时间变化存在明显差异,以国家环境空气质量(GB 3095-2012)日均值二级标准($\text{PM}_{2.5}$: $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; PM_{10} : $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)对颗粒物浓度进行评估,表 1 给出了全年和各个季节的统计情况及之前的观测结果。

本研究中 $\text{PM}_{1.1}$ 、 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_{10} 的年平均浓度分别为 (65.6 ± 37.6) 、 (91.0 ± 54.7) 和 $(168.0 \pm 87.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_{2.1}$ 的比值分别为 54.2% 和 72.1%,污染以细粒子为主,且大部分在 $1.1 \mu\text{m}$ 以下,说明燃烧源(包括机动车、燃煤

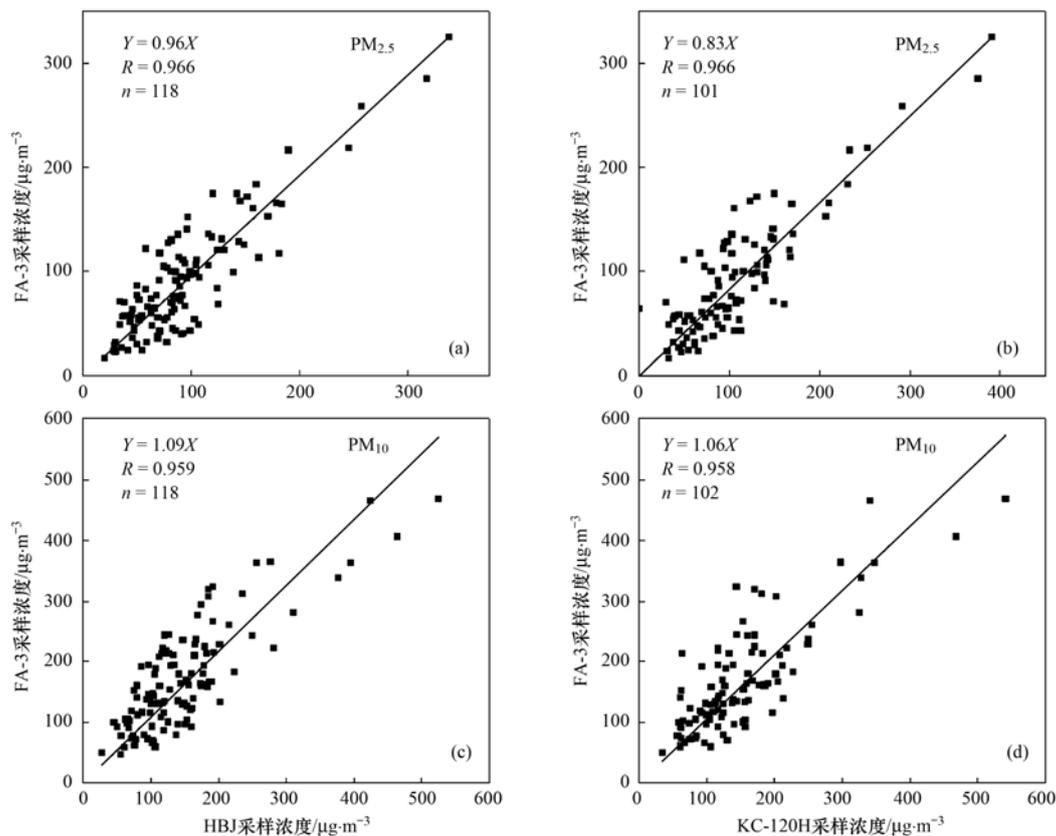


图 1 不同大气气溶胶采样仪器结果对比

Fig. 1 Comparison of concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} obtained from different particulate samplers

表 1 颗粒物质量浓度水平和超标率的统计结果

Table 1 Statistical result of particulate concentrations and exceeding rates

项目	$PM_{1.1}$ $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$PM_{2.1}$ $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM_{10} $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$PM_{1.1}/PM_{2.1}$ /%	$PM_{2.1}/PM_{10}$ /%	$PM_{2.5}$ 超标率 /%	PM_{10} 超标率 /%
冬季	83.3 ± 48.1	113.5 ± 77.8	186.4 ± 103.8	76.5	58.3	66.7	50.0
春季	60.7 ± 28.3	83.1 ± 40.0	190.4 ± 96.6	74.4	44.0	47.6	61.9
夏季	56.2 ± 24.7	80.8 ± 36.1	132.1 ± 56.3	70.4	61.2	35.0	35.0
秋季	61.4 ± 31.2	84.0 ± 43.2	157.2 ± 66.9	74.1	52.5	57.1	38.1
全年	65.6 ± 37.6	91.0 ± 54.7	168.0 ± 87.0	72.1	54.2	50.0	45.9
2010~2011 年 ^[21]	46.6	65.8	129.1	70.8	51.0		

和生物质燃烧)和大气光化学反应的贡献很大. 与 2010~2011 年^[21] 观测结果相比, 颗粒物污染有加重趋势, 且细粒子增加比例更多. 不同季节比较来看, 冬季细粒子污染最为严重, 而春季粗粒子污染最重, 夏季空气质量最优, 与污染排放和气象条件的变化密切相关. 冬季气温低, 取暖的需求增加了燃煤排放, 同时大气层结稳定, 边界层高度最低, 且降水稀少, 不利于污染物的扩散和清除, 导致细粒子污染严重, 浓度和超标率均最高; 春季风速明显高于其它季节, 而相对湿度最低, 干燥的气候和大风, 使地面扬尘增多, 且受到西北沙尘天气输送的影响, 使粗粒子浓度增加; 而夏季气温高, 大气对流强烈, 且降水

频繁, 另外, 青奥会(2014-08-16~2014-08-28)期间南京市实行了一系列管控措施, 使颗粒物浓度和超标率最低, 但夏季 $PM_{2.1}/PM_{10}$ 比值最高, 与夏季光化学反应强烈生成细粒子且粗粒子浓度较低有关, 同时 $PM_{1.1}/PM_{2.1}$ 最低, 这可能是因为夏季相对湿度高, 通过光化学反应生成的细粒子由于吸湿增长更倾向于往大粒径偏移, 从 $PM_{1.1}/PM_{2.1}$ 最低的 4 月 27 日对应着相对湿度的激增可以一定程度上说明这一点. 气溶胶浓度高值出现时往往对应着不利的气象条件: 1 月 18 日的重污染天气对应着较低的边界层高度, 且相对湿度很高, 细粒子浓度非常高; 而 3 月 18 日的重污染则是由粗粒子所引起, 这天风速达到

了 $3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 应为大风刮起的局地扬尘造成; 而 5 月 28 日重污染时则几乎处于静风, 污染物不易扩散, 粗细粒子污染均较为严重. 当有降水发生时, 颗粒物污染往往较轻, 春节期间(01-30 ~ 02-14)南京

市有大量的雨雪雾天气过程, 颗粒物质量浓度水平较低, 但烟花爆竹的燃放使 $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{10}$ 较高. 总体来看, 南京市的颗粒物污染处于较严重的污染程度, 空气质量的改善面临巨大压力.

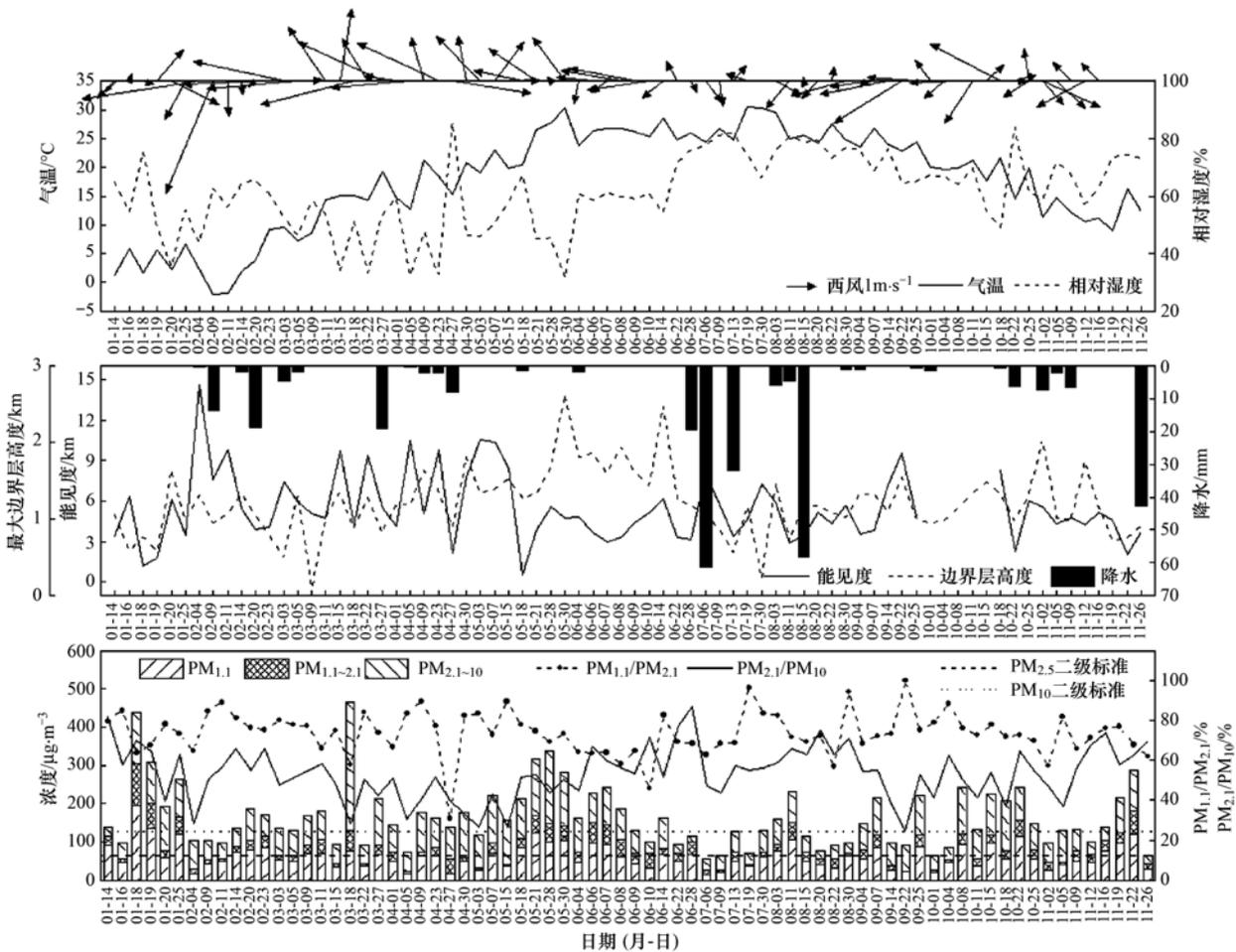


图 2 南京北郊大气颗粒物质量浓度和气象要素的时间变化

Fig. 2 Temporal changes of particulate concentrations and meteorological elements in Northern-suburb of Nanjing

2.2.2 粒径分布特征

将 FA-3 的采样结果对粒径归一化后得到南京北郊大气颗粒物全年的粒径分布如图 3, 可以看到, 颗粒物粒径呈双峰分布, 峰值位于 $0.43 \sim 0.65$ 和 $9 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径段, 与薛国强等^[22] 于 2010 年在南京北郊的观测结果一致. 质量浓度在小于 $1.1 \mu\text{m}$ 的 3 个粒径上明显高于其它粒径, 分别为 (52.4 ± 26.3) 、 (86.8 ± 59.8) 和 $(53.3 \pm 44.0) \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\mu\text{m})^{-1}$; 其后颗粒物浓度逐步降低, 在大于 $2 \mu\text{m}$ 的粒径段浓度值相差不大, 直到 $5.8 \sim 9 \mu\text{m}$ 达到最低值 $(5.7 \pm 3.7) \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\mu\text{m})^{-1}$, $9 \sim 10 \mu\text{m}$ 出现明显回升, 形成第二个峰值, 但远小于细粒径段峰值. 对中心粒径进行计算, 南京北郊颗粒物的质

量浓度中值粒径为 $1.83 \mu\text{m}$, 为积聚模态污染.

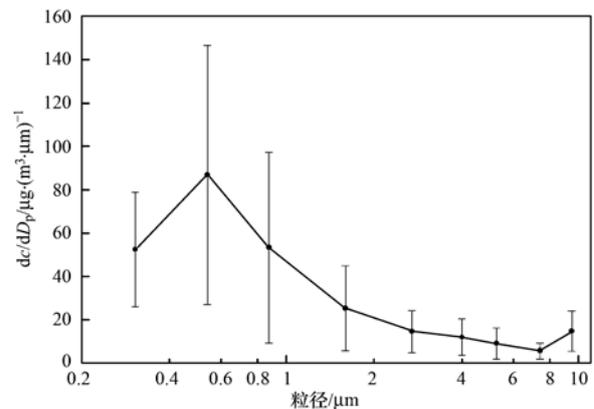


图 3 南京北郊大气颗粒物的粒径分布特征

Fig. 3 Size distribution of particulate in Northern-suburb of Nanjing

2.3 不同季节和昼夜颗粒物粒径分布变化

2.3.1 不同季节颗粒物粒径分布变化

不同季节南京北郊颗粒物粒径分布变化如图 4。从中可以看到, 4 个季节颗粒物具有相同的粒径分布特征, 均为双峰且峰值都位于 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 和 $9 \sim 10 \mu\text{m}$ 。冬季颗粒物在细粒径段, 特别是 $0.65 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 粒径段的浓度显著高于其他季节, 这与冬季排放源的增加和不利的天气条件有关, 而冬季颗粒物的长期悬浮有利于颗粒物的老化, 使其向大粒径偏移, 可能是 $0.65 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 粒径段比其它季节高出 $1.5 \sim 2$ 倍的原因^[23]。春季颗粒物的粒径分布在粗粒径段明显高于其它季节, 反映了土壤来源颗粒物的特征; 夏季颗粒物浓度最低, 但在细粒径段降低并不明显, 与夏季光化学反应强烈、二次粒子生成有关; 且夏季高温, 空调制冷增加了耗电量, 也会使燃煤排放的细颗粒物增多; 而粗粒子各粒径段明显低于其它季节, 夏季降水较多, 植被茂盛, 使粗粒子浓度较低; 秋季在粒径 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 的峰值最高, 可能与秋季南京受到江苏中部和北部及安徽北部地区秸秆焚烧的影响有关, 且随着青奥会管控措施的结束, 企业也可能增加排放。

2.3.2 昼夜颗粒物粒径分布变化

观测期间为昼夜分开采样, 选取白天和晚上均有采集数据的样本, 对不同季节粒径分布的昼夜平均结果进行对比, 如图 5。颗粒物浓度的昼夜变化在

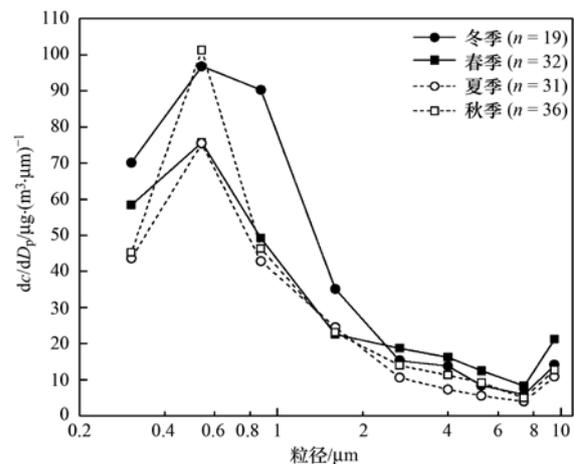


图 4 不同季节颗粒物粒径分布对比

Fig. 4 Comparison of size distribution of particulate in different seasons

粗细粒径段表现出不同的特征, 在粗粒径, 差异很小, 在细粒径, 除了冬季 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 粒径段, 基本表现出夜晚大于白天的特征, Wang 等^[24] 使用连续在线监测仪器对南京北郊 $\text{PM}_{2.5}$ 的观测也发现颗粒物夜间浓度大于白天。颗粒物昼夜变化的影响因素较多, 包括污染物的源排放和沉降、二次粒子的生成、气象条件的变化等。夜晚相对白天, 人为活动排放降低, 光化学反应导致的气粒转化过程受限, 但夜间边界层高度有很大降低, 风速也减小(表 2), 限制了污染物的扩散和传输, 同时, 夜间气温降低, 相对湿度明显升高, SO_2 和 N_2O_5 的液相氧化会增加

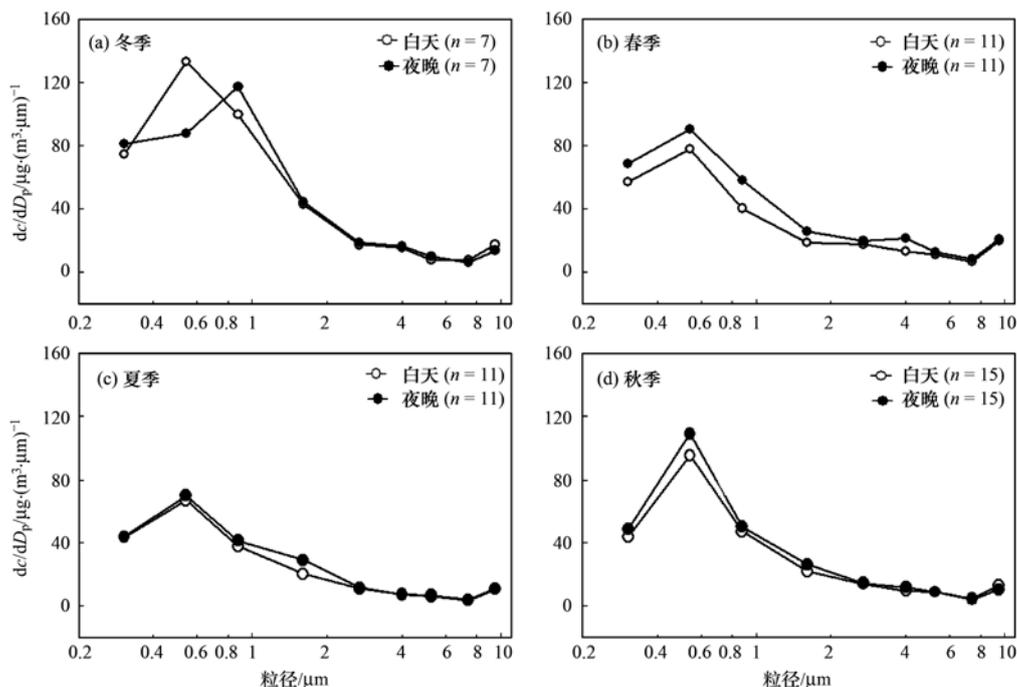


图 5 昼夜颗粒物粒径分布对比

Fig. 5 Comparison of size distribution of particulate in day and night

细粒径的颗粒物^[25];另外,夜间稳定的大气条件也不利于细粒子的干沉降^[26],导致其浓度增加.对于粗粒子,由于扬尘对其贡献很大,风速降低导致其污

染源的减少可能与夜间边界层高度降低导致的浓度增加呈现出相互抵消的作用,使其昼夜浓度变化很小.

表2 不同季节昼夜气象要素变化

Table 2 Changes of meteorological elements in day and night of different seasons

季节	时间	气温/°C	相对湿度/%	风速/m·s ⁻¹	边界层高度 ¹⁾ /m
冬季	白天	5.1	47.9	2.18	965.6
	夜晚	2.1	65.8	1.62	221.8
春季	白天	20.3	38.4	2.51	1401.9
	夜晚	14.3	65.4	1.84	127.2
夏季	白天	28.6	59.2	1.41	1300.0
	夜晚	23.7	81.2	1.01	127.9
秋季	白天	19.9	54.9	1.76	1219.0
	夜晚	15.2	79.7	1.25	172.5

1)数据来源于 NOAA HYSPLIT 模式输出结果,白天为 14:00 结果,夜晚为 02:00 结果;其它要素为以早晚 08:00 为界的 12 h 平均值

4 个季节相比,春季在细粒径的差异最为明显,与其较大的昼夜边界层高度和风速差异有关^[27];而夏季昼夜相差最小,且在 1.1~2.1 μm 粒径段表现得较为明显,可能与夏季夜间大的相对湿度导致气溶胶吸湿增长向大粒径偏移有关;冬季在 0.43~0.65 μm 粒径段表现出不同特征,通过对数据进行分析发现,冬季的成对样本数较少,而其中有 4 对样本对应着严重的霾污染过程,颗粒物浓度表现出白天高,夜晚低,甚至能见度夜间也高于白天,对这一粒径段的颗粒物浓度造成了较大影响,这可能与颗粒物在雾霾过程中的转化和湿清除有关,具体原因还要进一步分析.从全年平均来看,细粒子 PM_{2.1} 夜晚比白天高 12.4 μg·m⁻³,升高比率为 14.0%;粗粒子白天浓度略高,高出约 4.8%;PM_{2.1}/PM₁₀ 昼夜平均比例分别为 53.9% 和 56.0%,夜晚细粒子污染加重.

2.4 气象条件对颗粒物粒径分布的影响

气象条件对污染物的扩散、转化和清除起着重要作用,本文分别研究了降水、灰霾和不同湿度条件下,气溶胶粒径分布的变化,以揭示其对颗粒物污染的影响.

2.4.1 降水对颗粒物粒径分布的影响

降水对大气污染物的清除作用明显,降水发生时大气颗粒物的浓度一般都会显著降低^[28,29],但降水对颗粒物粒径分布的影响研究很少.由于本文很少在降水发生时采样,而降水清除大气污染物对空气质量的改善会有一定的持续时间,本文将采样当天或前两天有雨时定义为有降水,认为样本受到降水影响,当天和前两天都没有降水则定义为无降水.

一共得到受降水影响的采样 33 d,无降水的 41 d.

对 4 个季节有降水和无降水的样本分别取平均,其粒径分布对比如图 6.从中可以看到,除了夏季,其它季节降水对各个粒径范围的颗粒物都有清除作用,且细粒径范围颗粒物的清除表现得更为明显,特别是冬季,在 0.65~1.1 和 1.1~2.1 μm 粒径段,去除效率高达 66.9% 和 69.0%.根据 Greenfield 对粒子湿清除的研究,降水对直径位于 0.2~2 μm 之间气溶胶粒子的捕获效率较低,这一区域通常称作“Greenfield”缺口,而对于较大粒径颗粒物,清除系数随着粒径增大而增加^[30].康汉青等^[31]和王瑛^[32]利用雨滴谱和气溶胶粒径谱仪在南京北郊和黄山山顶对粒子湿清除的研究结果显示低清除区大约在 0.5 μm 左右,与本研究冬春季 <0.43 μm 粒径段低的清除结果一致;而图 6 中相比于粗粒子,降水对细颗粒物的显著清除应与南京北郊高的细粒子背景浓度有关,这也符合降水后空气质量和能见度明显改善的主观感受.4 个季节对比,冬季细粒子的清除最为有效,可能是因为冬季降水中降雪较多,有研究显示,降雪对气溶胶粒子的清除效率远高于降水^[33];春季在粗粒径的清除较其它季节明显,与春季粗粒子的浓度较高有关;秋季降水的清除效率较低;而夏季在一些粒径段甚至出现了浓度增加的现象,徐宏辉等^[34]在临安、孙根厚^[35]在上甸子站也发现有降水之后,气溶胶及其组分浓度升高,认为受到降水期间气团运动的影响;另外,降水过后,空气湿度增加,在夏季高温高湿和充足光照条件下,新排放的污染物快速转化为颗粒物可能也是原因之一.

2.4.2 霾日颗粒物粒径分布的变化

灰霾是目前我国大部分城市所面临的环境挑

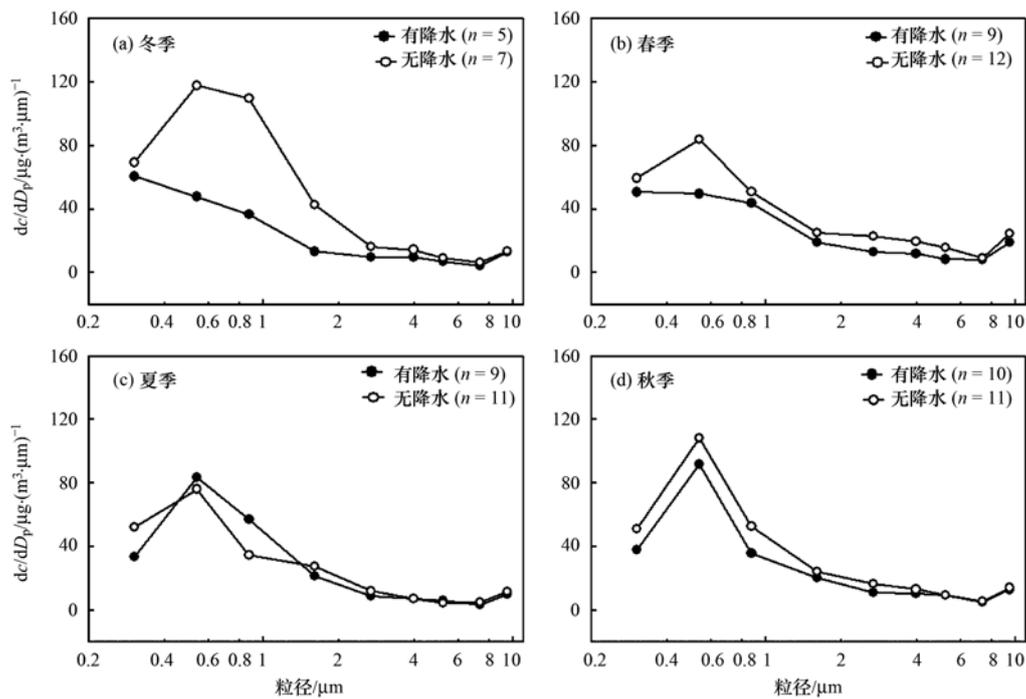


图 6 降水对颗粒物粒径分布的影响

Fig. 6 Influence of precipitation on size distribution of particulate

战,目前,南京市每年都有 100 多天的霾天,占到了年总天数的 1/3^[36]. 关于霾的判定标准至今没有统一论,根据 2010 年发布的《中华人民共和国气象行业标准——霾的观测和预报等级》(QX/T 113-2010)规定,将能见度小于 10 km,湿度小于 80% 的天气定义为霾天,相对湿度为 80% ~ 95% 时,根据 PM_{2.5} 的质量浓度进一步判识; 根据能见度的大小,又可将霾天进一步分为轻微、轻度、中度和重度这 4 个等级. 为避免早晨辐射雾、接地逆温的影响,以每天 14:00 的能见度和湿度进行判定,且以 PM_{2.1} 浓度来替代 PM_{2.5}. 本研究采样日判定为霾天的有 52 d,非霾天 15 d,另外 7 d 由于能见度数据缺失无法判断,霾发生概率达 77.6%,具体的分级和颗粒物浓度情况见表 3. 从中可以看到,非霾天时,颗粒物浓度最低,PM_{2.1}/PM₁₀ 比值也最低,不到 50%; 霾发生时随着能见度降低霾等级的加重,颗粒物浓度显著增加,重度霾天时,PM_{2.1} 和 PM₁₀ 分别达到了 200 μg·m⁻³ 和 300 μg·m⁻³ 以上,其中细粒子增加比重更大,特别是从轻微到轻度变化时,PM_{2.1}/PM₁₀ 比值从小于 50% 增大到了 63% 以上,与霾天稳定的气象条件促进了污染物的转化和积累有关; 随后,PM_{2.1}/PM₁₀ 比值较为稳定,重度时略有增加,说明重污染过程的出现与不利的气象条件导致污染物的积聚关系更大.

不同等级霾日下颗粒物的粒径分布变化如图 7,从中可以看到,从非霾天到轻微、轻度和中度霾天,小于 0.43 μm 和大于 2 μm 的粒径段,颗粒物浓度变化较小,主要体现在 0.43 ~ 2.1 μm 粒径段颗粒物浓度的增加; 对不同粒径段颗粒物质量浓度与能见度的关系进行分析发现,除了 9 ~ 10 μm,其它粒径段与能见度都呈现出负相关,特别是 0.43 ~ 2.1 μm 粒径段,随着颗粒物质量浓度的增加,能见度呈指数形式递减(图 8). 颗粒物对大气的消光贡献中,与可见光波长(0.4 ~ 0.7 μm)接近的积聚模

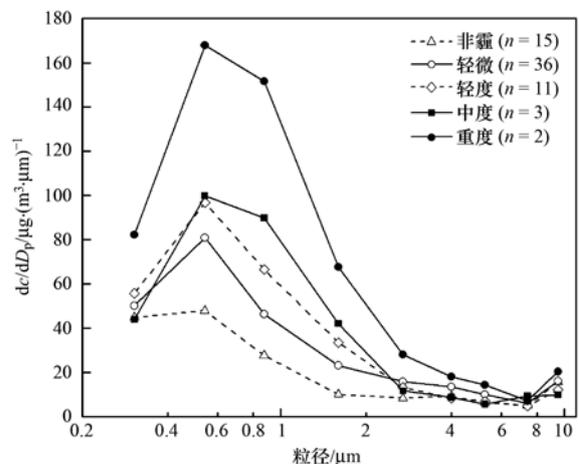


图 7 不同等级霾日颗粒物粒径分布对比

Fig. 7 Comparison of size distribution of particulate in haze day with different grades

态粒子消光作用最强^[3], 本研究中 0.43 ~ 2.1 μm 粒径段与能见度的负相关最显著体现了这一点, 不过略有向大粒径偏移, 在 1.1 ~ 2.1 μm 粒径段与能见度的负相关系数最高, 不同等级霾日颗粒物粒径

分布的变化与其对应的能见度的降低极为符合. 重度霾污染时, 细粒子各粒径段都大幅度升高, 粗粒径段也有增加, 由于霾污染时风速较低, 粗粒子的增加进一步反映了气象条件导致的污染物的积累过程.

表 3 不同等级霾日的分布和颗粒物质量浓度水平

Table 3 Distribution of haze day in different grades and corresponding particulate concentration

类型	霾等级	区分标准 ¹⁾	天数/d (比例/%)	PM _{2.1} 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM ₁₀ 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM _{2.1} /PM ₁₀ /%
非霾天	—	$V > 10.0 \text{ km}$ 或 $80\% < R < 95\%$, $\text{PM}_{2.1} < 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	15 (22.4)	52.4 ± 23.3	113.8 ± 44.1	46.0
霾天	轻微	$5.0 \leq V < 10.0$	36 (53.7)	83.4 ± 31.8	168.4 ± 80.9	49.5
	轻度	$3.0 \leq V < 5.0$	11 (16.4)	108.7 ± 43.3	171.3 ± 68.1	63.4
	中度	$2.0 \leq V < 3.0$	3 (4.5)	123.4 ± 73.3	196.0 ± 97.8	63.0
	重度	$V < 2.0$	2 (3.0)	208.1 ± 137.5	326.0 ± 157.7	63.8

1) R 为相对湿度(%), V 为能见度(km)

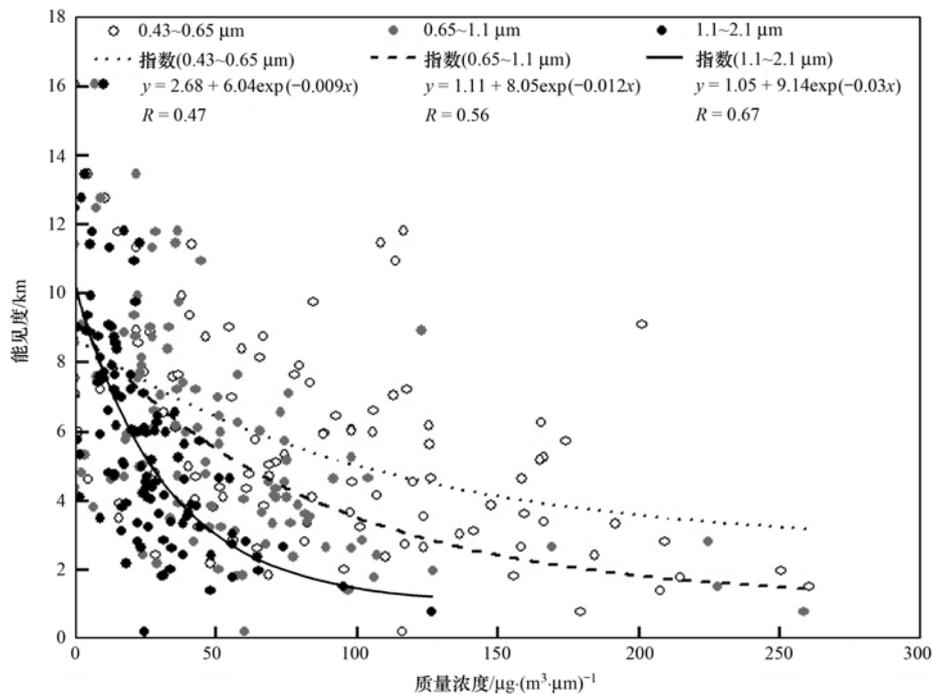


图 8 不同粒径段颗粒物质量浓度与能见度的回归分析

Fig. 8 Regression analysis between particulate concentrations in different size ranges and visibility

2.4.3 相对湿度对颗粒物粒径分布的影响

大气气溶胶的吸湿性是研究其理化特性和环境效应时必须考虑的重要因素之一, 颗粒物的吸湿增长会增强其消光效应, 使大气能见度降低, 许多研究发现, 在颗粒物浓度不太高, 但相对湿度较大时, 也会出现严重的大气污染^[3,37]. 对不同相对湿度条件下, 颗粒物粒径分布的变化进行研究, 如图 9. 根据不同湿度下的粒径谱分布特征将湿度划分为 4 个区间, 从图 9 中可以看到, 以 70% 为界, 颗粒物的粒径分布发生了明显变化, 小于 70% 的两个湿度区间细粒子分布非常接近, 湿度大于 70% 后, 小于 0.43 μm

粒径段颗粒物的质量浓度显著降低, 而 0.43 ~ 2.1 μm 粒径段浓度明显上升, 在 0.43 ~ 0.65 μm 粒径段最为明显, 湿度越高, 浓度越大. 根据王轩^[38]采用加湿迁移差分分析 (HTDMA) 系统对颗粒物中主要无机组分硫酸铵亚微米粒子吸湿特性的研究, 其潮解点在 $75\% \pm 2\%$, 相对湿度低于 70% 时, 吸湿增长不明显, 湿度大于 70% 后, 粒子由于潮解生长因子骤然变大, 之后随湿度增加而增大; 而一些对细粒子消光特性与相对湿度关系的研究中也能发现当相对湿度大于 70% 后, 气溶胶的消光效率有较大幅度的升高^[39,40], 因此笔者推断颗粒物的吸湿增长是

造成本研究中细粒子粒径谱分布变化的主要原因。在粗粒径段,湿度小于 70% 时,颗粒物质量浓度较高且随湿度增大而降低,湿度大于 70% 后,颗粒物浓度较低且在大多数粒径段浓度非常接近;湿度低时,空气干燥,使土壤尘和建筑尘等粗粒子在风的作用下更易悬浮在大气中,而当湿度增加后,粗粒子中的一些吸湿性组分,如 NaCl 、 NaNO_3 、 CaCl_2 等也会发生潮解和吸湿增长,导致粗粒子粒径进一步增大并容易通过重力沉降从大气中去除,从而造成了粗粒子浓度的降低。

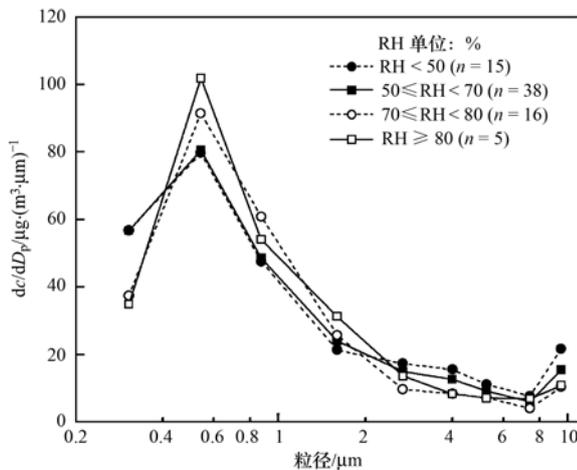


图 9 不同湿度条件下颗粒物的粒径分布
Fig. 9 Size distribution of particulate under different humidity conditions

2.5 气团来源对颗粒物粒径分布的影响

大气颗粒物的污染特征除了受局地排放影响,还与远距离输送密切相关,不同发源地以及气流途经地区的空气状况对局地污染物有着重要影响,研究不同气团输送轨迹与颗粒物污染的关系,可以定性地了解颗粒物的潜在来源和输送特征. 应用美国 NOAA 开发的轨迹模式 HYSPLIT4, 计算每个采样日下午 14:00 (世界时 06:00) 72 h 的后向轨迹,并进行聚类分析,该模式被广泛应用于大气污染物的输送研究^[20]. 考虑到 500 m 高度风场较能准确反映边界层的平均流场特征,故模拟高度选为 500 m^[41],所采用的气象资料是分辨率为 1° 的 GDAS 数据. 根据聚类分析结果,南京北郊的气团来源可以大致分为 4 类(图 10),其对应颗粒物粒径分布的平均状况如图 11.

从图 10 中可以看到,到达南京北郊的气团中,从东边黄海输送过来的气团所占比例最大,与南京北郊风向以东风为主相符(图略),被归为第 1 类;其次是在采样点周边各个方向的气团输送,气团移

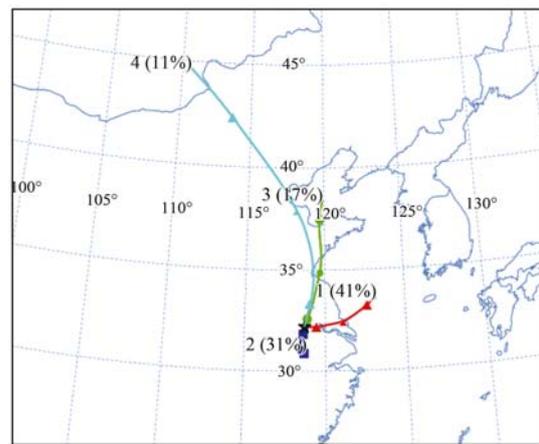


图 10 南京北郊气团来源聚类分析结果

Fig. 10 Cluster analysis result of air mass sources in Northern-suburb of Nanjing

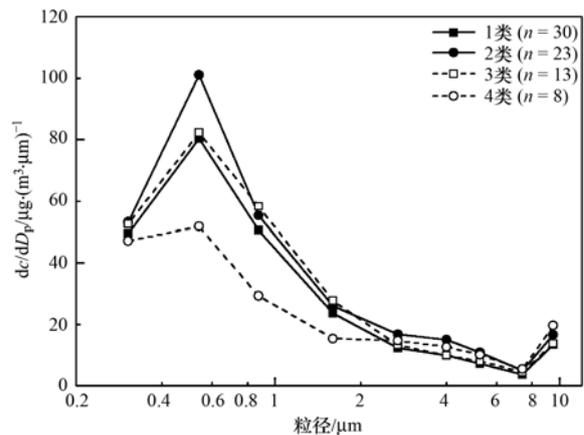


图 11 不同气团来源所对应的颗粒物粒径分布
Fig. 11 Size distribution of particulate corresponding to different air mass sources

动速度慢且在上空盘旋,被归为第 2 类;从北边渤海湾和西北快速输送的气团所占比例较为接近,分别为第 3 和第 4 类. 不同方向气团所对应的颗粒物质量浓度存在显著差异,2 类气团对应的颗粒物浓度最大, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度分别为 $(96.2 \pm 47.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(186.9 \pm 97.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 4 类气团对应的颗粒物浓度最低, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别为 $(60.2 \pm 39.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(149.4 \pm 84.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 1 和 3 类气团对应的浓度居中. 各个来向的气团都可以出现大气污染,污染发生频率最高的是 2 类气团,达到 73.9%,重度以上污染比例达 21.7%. 从不同来向气团的颗粒物粒径分布对比可以看到,差异主要存在于细粒径段,从西北方向来源的气团,在细粒径段明显低于其它方向,虽然该方向气团输送过程中经过了污染严重的京津冀区域,但其起始点空气

洁净,且输送高度高,另外,其运动速度快,风速较大,有利于局地污染物的扩散;2类气团对应的细粒子浓度较高,特别是在0.43~0.65 μm 粒径段,其对应的粗粒子浓度也较高,这类气团传输距离短,风速小,结合其发生污染的概率最大,可以推断,稳定的天气形势,不利的扩散和输送条件使污染物得到了累积;从黄海和渤海来源的气团,颗粒物粒径分布非常相似,渤海略高于黄海. 从不同气团来源时颗粒物的粒径分布可以说明,南京市的空气污染受到近距离排放的影响较大,本地和周边城市排放的污染物在不利的天气条件下积累易形成较重的大气污染.

3 结论

(1)本研究所用仪器FA-3与HBJ和KC-120H的采样结果相关系数均达到了0.95以上,但对细粒子FA-3结果分别偏低13.9%和16.6%;对 PM_{10} 分别偏高15.2%和13.3%,采样偏差在大气采样可接受范围之内,其可以对大气颗粒物进行准确分级和采样.

(2)南京北郊颗粒物污染以细粒子为主,且大部分在1.1 μm 以下;冬季细粒子污染最重,春季粗粒子污染最重,夏季空气质量最优,与污染排放和气象条件变化密切相关. 颗粒物质量浓度高值出现时往往对应着不利的气象条件;有雨雪时,污染较轻. 颗粒物粒径呈双峰分布,峰值位于0.43~0.65和9~10 μm 粒径段;质量浓度中值粒径为1.83 μm ,为积聚模态污染.

(3)南京北郊颗粒物粒径分布在冬季细粒径段质量浓度较高,与冬季排放源增加、不利的气象条件以及颗粒物老化有关;春季粗粒径段浓度较高,反映了土壤来源颗粒物的特征;夏季颗粒物细粒径段降低并不明显,与光化学反应强烈有关;秋季在0.43~0.65 μm 峰值最高,可能受到秸秆焚烧影响. 颗粒物浓度的昼夜变化在粗粒径,差异很小,在细粒径,基本表现出夜晚大于白天的特征.

(4)除了夏季,降水对各个粒径范围的颗粒物都有清除作用,且在细粒径段表现得更为明显. 霾发生时随着霾等级的加重,颗粒物特别是细粒子质量浓度逐渐增加,其中0.43~2.1 μm 粒径段表现得最为明显,而该粒径段颗粒物与能见度呈显著负相关. 以相对湿度70%为界,颗粒物粒径分布发生了明显变化,湿度大于70%后,小于0.43 μm 粒径段颗粒物质量浓度显著降低,而0.43~2.1 μm 粒

径段明显上升,在0.43~0.65 μm 粒径段最为明显,湿度越高,浓度越大,颗粒物的吸湿增长应是主要原因;而在粗粒径段,颗粒物浓度随湿度增大而呈降低趋势,与其吸湿沉降有关.

(5)南京北郊的气团来源可以分为4类,其中西北方向快速输送的气团最为洁净,细粒径颗粒物浓度明显低于其它方向;黄海和渤海来源的气团颗粒物污染居中,粒径分布非常相似;本地和周边近距离输送的气团污染最重,粗细粒径颗粒物浓度都较高,其传输距离短,风速小,发生污染的概率最大,对南京市的空气污染影响较大.

致谢:感谢南京信息工程大学大气物理学院朱彬和安俊琳老师及王红磊博士在采样和实验室分析中给予的指导和帮助,对其他参与课题组工作的左芬、陈利珍、刘帆等同学表示感谢.

参考文献:

- [1] Zhang Y L, Cao F. Fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) in China at a city level [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 14884, doi: 10.1038/srep14884.
- [2] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京:高等教育出版社,2006. 268-290.
- [3] 袁亮,银燕,李琦,等. 亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4052-4060.
- [4] Gettelman A, Shindell D T, Lamarque J F. Impact of aerosol radiative effects on 2000-2010 surface temperatures[J]. *Climate Dynamics*, 2015, **45**(7): 2165-2179.
- [5] Sun Y L, Wang Z F, Fu P Q, et al. The impact of relative humidity on aerosol composition and evolution processes during wintertime in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 927-934.
- [6] Wang C. Impact of anthropogenic absorbing aerosols on clouds and precipitation: a review of recent progresses[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 237-249.
- [7] Li X Y, Yan C Q, Patterson R F, et al. Modeled deposition of fine particles in human airway in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**(Part B): 387-395.
- [8] Li X R, Wang L L, Ji D S, et al. Characterization of the size-segregated water-soluble inorganic ions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration: spatial/temporal variability, size distribution and sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 250-259.
- [9] Yang Y J, Zhou R, Wu J J, et al. Seasonal variations and size distributions of water-soluble ions in atmospheric aerosols in Beijing, 2012 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **34**: 197-205.
- [10] Tao Y, Yin Z, Ye X N, et al. Size distribution of water-soluble inorganic ions in urban aerosols in Shanghai [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, **5**(4): 639-647.
- [11] Wang H L, Zhu B, Shen L J, et al. Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in five sites in the Yangtze River Delta, China: size-fractionated, seasonal variations and sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 370-379.

- [12] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 451-457.
- [13] Gao Y, Lee S C, Huang Y, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of size-resolved particles in Hong Kong sub-urban area[J]. Atmospheric Research, 2016, **170**: 112-122.
- [14] Wan X, Kang S C, Xin J Y, *et al.* Chemical composition of size-segregated aerosols in Lhasa city, Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2016, **174-175**: 142-150.
- [15] Wang Q Q, Ma Y L, Tan J H, *et al.* Characteristics of size-fractionated atmospheric metals and water-soluble metals in two typical episodes in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2015, **119**: 294-303.
- [16] Zhang G P, Li H X, Wei X F, *et al.* Preliminary assessment of size distribution of airborne metals and metalloids in the urban aerosols of Guiyang, southwest China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2015, **6**(4): 635-643.
- [17] 杨勇杰, 刘俊卿, 狄一安, 等. 青藏高原不同粒径大气颗粒物元素分析[J]. 环境化学, 2013, **32**(6): 968-973.
- [18] 聂玮. 我国典型地区大气颗粒物测量技术、粒径分布及长期变化趋势[D]. 济南: 山东大学, 2012. 44-54.
- [19] 吴丹, 王跃思, 潘月鹏, 等. 被动采样法观测研究京津冀区域大气中气态污染物[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2844-2851.
- [20] ARL. HYSPLIT-hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model [EB/OL]. <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>. 2016-04-20.
- [21] 张秋晨, 朱彬, 龚佃利. 南京地区大气气溶胶及水溶性无机离子特征分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 311-316.
- [22] 薛国强, 朱彬, 王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- [23] 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.
- [24] Wang H L, An J L, Cheng M T, *et al.* One year online measurements of water-soluble ions at the industrially polluted town of Nanjing, China; sources, seasonal and diurnal variations [J]. Chemosphere, 2016, **148**: 526-536.
- [25] Squizzato S, Masiol M, Brunelli A, *et al.* Factors determining the formation of secondary inorganic aerosol: a case study in the Po Valley (Italy) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(4): 1927-1939.
- [26] Liu J K, Zhu L J, Wang H H, *et al.* Dry deposition of particulate matter at an urban forest, wetland and lake surface in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2016, **125**: 178-187.
- [27] 杜川利, 唐晓, 李星敏, 等. 城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J]. 高原气象, 2014, **33**(5): 1383-1392.
- [28] Ge X L, Zhang Q, Sun Y L, *et al.* Effect of aqueous-phase processing on aerosol chemistry and size distributions in Fresno, California, during wintertime [J]. Environmental Chemistry, 2012, **9**(3): 221-235.
- [29] 韩燕, 徐虹, 毕晓辉, 等. 降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 193-200.
- [30] Greenfield S M. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1957, **14**(2): 115-125.
- [31] 康汉青, 朱彬, 樊曙先. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. 气候与环境研究, 2009, **14**(5): 523-530.
- [32] 王瑛. 气溶胶云下降雨清除的理论及观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. 27-37.
- [33] Zhao S P, Yu Y, He J J, *et al.* Below-cloud scavenging of aerosol particles by precipitation in a typical valley city, northwestern China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **102**: 70-78.
- [34] 徐宏辉, 刘洁, 王跃思, 等. 临安本底站大气气溶胶水溶性离子浓度变化特征[J]. 环境化学, 2012, **31**(6): 796-802.
- [35] 孙根厚. 上甸子站夏季降水期间气溶胶湿清除影响的观测研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012. 45-75.
- [36] Cheng Z, Wang S X, Jiang J K, *et al.* Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2013, **182**: 101-110.
- [37] Cheng Y, He K B, Du Z Y, *et al.* Humidity plays an important role in the PM_{2.5} pollution in Beijing [J]. Environmental Pollution, 2015, **197**: 68-75.
- [38] 王轩. 气溶胶吸湿特性研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2010. 28-36.
- [39] Lin Z J, Tao J, Chai F H, *et al.* Impact of relative humidity and particles number size distribution on aerosol light extinction in the urban area of Guangzhou [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(3): 1115-1128.
- [40] 杜荣光, 齐冰, 胡德云, 等. 杭州市区相对湿度及 PM_{2.5} 对能见度的影响分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2015, **51**(3): 473-480.
- [41] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(4): 357-363.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行