

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 吴起鑫, 韩贵琳 (2145)

成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)

太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)

环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)

南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)

青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)

城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)

基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)

浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)

福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析 李雪丁 (2210)

HSPF 水文水质模型应用研究综述 李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)

城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)

利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)

嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)

重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)

南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)

宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)

影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)

大型底栖动物生物评价指数比较与应用 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)

青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)

青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)

用物理-生态集成技术局部控制富营养化 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)

太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)

富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)

巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)

南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)

东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)

嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)

电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)

基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)

渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)

崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)

白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)

西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)

氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)

Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)

声电氧化处理扑热息痛的研究 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)

粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)

利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)

Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究 王小蓉, 吴平霄 (2432)

核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究 武国正, 徐宗学 (2438)

A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)

系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究 蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)

氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 反硝化特性研究 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)

1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)

蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)

双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放特征及品种筛选研究 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜 (2475)

闽江河口短叶茳芰湿地 CH₄ 和 N₂O 排放对氮输入的短期响应 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)

青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)

不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)

土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)

多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)

不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)

废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 伊元荣, 韩敏芳 (2522)

中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 卢愿清, 史军 (2528)

《环境科学》征稿简则(2431) 《环境科学》征订启事(2532) 信息(2157, 2271, 2367, 2418)

南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布

张红亮^{1,2}, 樊曙先^{3*}, 顾凯华⁴, 朱彬², 范洋², 祖繁², 李红双¹, 孟庆紫², 何佳宝²

(1. 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; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 南京 210044; 4. 上海市崇明县气象局, 上海 202125)

摘要: 为了研究南京市市区与郊区气溶胶中多环芳烃 (PAHs) 污染状况和分布特征, 利用气-质联用仪 (GC-MS) 分析了 2010 年 1 月 1 ~ 10 日日间和夜间分别在南京大学和南京信息工程大学采集的气溶胶样品, 得到南京市市区与郊区 17 种 PAHs 浓度, 总浓度分别为 41.36 ~ 220.35 ng·m⁻³ 和 45.10 ~ 200.86 ng·m⁻³, 其中约 66% ~ 67% 分布于细粒子 ($D_p \leq 2.1 \mu\text{m}$) 中. 研究发现, 南京市市区和郊区气溶胶中 PAH 总浓度均处于较高的水平; 但两者昼夜变化趋势不同, 即市区 PAH 总浓度日间高于夜间, 郊区 PAH 总浓度日间低于夜间. 主导风向的改变和高压天气系统对 PAH 浓度变化影响较大; 在市区其影响主要表现在细粒子部分, 而郊区主要表现在粗粒子部分. 市区和郊区不同环数的 PAHs 粒径分布不同; 2 ~ 3 环 PAHs, 郊区含量高于市区; 而 4 ~ 6 环 PAHs, 市区含量高于郊区. 高环数 (4 ~ 6 环) PAHs 在粗模态出现较大浓度峰可能是由于南京地区粗模态气溶胶中碳含量较高. 市区和郊区相似的特征比值说明两者的 PAHs 具有相同污染来源, 主要为生物质及煤的燃烧和汽车尾气, 表明南京市 PAHs 受到郊区工业源排放影响较大.

关键词: 多环芳烃; 粒径分布; 诊断参数; 南京; 来源分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2172-08

Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China

ZHANG Hong-liang^{1,2}, FAN Shu-xian³, GU Kai-hua⁴, ZHU Bin², FAN Yang², ZU Fan², LI Hong-shuang¹, MENG Qing-zi², HE Jia-bao²

(1. Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Meteorology Bureau of Chongming County, Shanghai 202125, China)

Abstract: The contamination status and distribution characteristics of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were investigated in aerosols of urban and suburban Nanjing. A total of 17 PAHs were analyzed in the aerosol samples collected in daytime and nighttime during January 1st to 10th, 2010 in Nanjing University (NU) and Nanjing University of Information Science & Technology (NUIST). The PAH concentrations at the urban and suburban sites were 41.36-220.35 ng·m⁻³ and 45.10-200.86 ng·m⁻³, respectively, of which about 66% -67% was absorbed by fine particles ($D_p \leq 2.1 \mu\text{m}$). High levels of particulate PAHs were detected at both sampling sites with different diurnal variations. The higher total-PAH concentration occurred in the daytime at the urban site and in the nighttime at the suburban site. The change of prevailing wind direction and high-pressure weather system had significant impact on the variation of PAH concentrations, which were dominated by fine and coarse particles in urban and suburban regions, respectively. Difference in PAH size distributions was found for low weight molecular PAHs (LWM-PAH) and high weight molecular PAHs (HWM-PAH) in urban and suburban areas. The concentrations of 2-3 ring PAHs were higher at the suburban site than those at the urban site, whereas larger amounts of 4-6 ring PAHs were found at the urban site than at the suburban site. The concentration peaks in coarse particle size of high-molecular-weight PAHs found in our study were larger than those in some of the previous studies, which might be due to the high carbon content in coarse particles in the atmosphere at our sites. Analysis of diagnostic ratios indicated that the PAHs particles at both two sites have the same sources, including combustion of coal and biomass, vehicular exhaust and suburban industrial emission.

收稿日期: 2011-09-28; 修订日期: 2012-01-09

基金项目: 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(08KJA170002); 江苏省青蓝工程云雾降水物理学与气溶胶研究创新团队项目; 国家自然科学基金项目(40775012); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB426313); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 张红亮 (1982 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气成分及其环境特征, E-mail: liang_mail2008@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shuxianf@nuist.edu.cn

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); size distribution; diagnostic ratios; Nanjing; source apportionment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 主要由含碳物质不完全燃烧产生, 排放源包括机动车尾气、工业废气、露天焚烧等, 已经发现多种 PAHs 对动物有致癌性或致突变性. PAHs 的蒸汽压决定了它们在大气中固-气相之间的分配, 2~3 环 PAHs 主要以气相形式存在, 5~6 环 PAHs 主要吸附在 $D_p < 2.1 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子表面^[1,2]. 气溶胶粒子中 PAHs 浓度有明显的季节性差异和昼夜变化的规律性^[3-6]. 大气是影响 PAHs 传输和沉积的重要介质, Duan 等^[7]认为光化学反应和挥发再凝结使 PAHs 的粒径分布在传输过程中会发生改变; Evagelopoulos 等^[8]研究得出, 希腊 Kozani 市的矿区 Klitos 大气 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PAHs 的浓度均高于邻近 Kozani 市区的 PAHs 浓度.

南京是长三角地区第二大城市, 是中国重要的综合性工业生产基地, 大气颗粒物污染一直是该城市面临的主要环境问题之一. 部分学者针对南京市气溶胶及气溶胶中 PAHs 污染状况开展了初步研究^[9-13], 但对其粒径分布及市区和郊区 PAHs 污染相互影响仍有待进一步分析. 本研究在南京市区和郊区设置采样点, 于 2010-01-01~2010-01-10 分白天、夜间同步采集大气气溶胶 PM_{10} 的 9 级粒径样品, 使用 GC-MS 测定了 17 种优控 PAHs, 以对比研究南京冬季市区和郊区大气 PM_{10} 中 PAHs 的粒径分布、昼夜变化和组分特

征等环境性质, 以期在城市大气化学研究及认识有机气溶胶的大气环境特征提供依据.

1 材料与方法

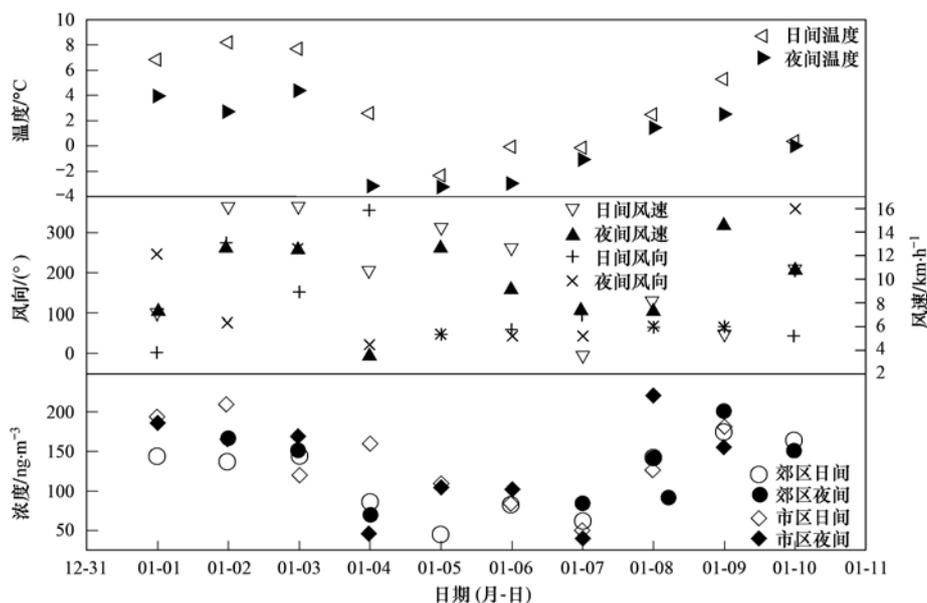
1.1 仪器与试剂

大气气溶胶采集所用仪器为气溶胶粒度分布采样器 (FA-3 型, 辽阳康洁仪器研究所, 分级粒子的切割粒径段: < 0.43 、 $0.43 \sim 0.65$ 、 $0.65 \sim 1.1$ 、 $1.1 \sim 2.1$ 、 $2.1 \sim 3.3$ 、 $3.3 \sim 4.7$ 、 $4.7 \sim 5.8$ 、 $5.8 \sim 9.0$ 、 $9.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$, 流速 $28.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$); 称重采用电子微量天平 (MX5, METTLER TOLEDO 公司, 最大称量值 5.1 g , 最小刻度 $1 \mu\text{g}$); 分析采用气相色谱-质谱仪 (GC-MS 6890/5975B, 美国 Agilent 公司).

16 种 PAHs 混合标准样品 ($2000 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, 美国 SUPELCO 公司), Benzo (e) pyrene 标样 ($100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, Dr. Ehrenstorfer 公司); 二氯甲烷 (农残分析级, 德国 CNW 公司), 实验所用其它试剂均为分析纯或优于分析纯; 玻璃纤维滤膜 ($\Phi = 80 \text{ mm}$, 孔径 $= 0.22 \mu\text{m}$, 上海兴亚净化材料厂).

1.2 PM_{10} 分级样品采集及 PAHs 分析方法

样品分别采集于南京市鼓楼区南京大学知行楼二楼顶和浦口区南京信息工程大学中区气象观测场, 确保采样点不会受到单个污染源的直接影响 (图 1). PM_{10} 分级样品的采集、样品预处理和 PAHs



风向设北风为 0° , 随风向顺时针旋转而增加

图 1 2010 年 1 月采样期间的温度、风向和风速、多环芳烃总浓度

Fig. 1 Temperature, wind direction and speed, and total PAH concentration during the sampling period in January, 2010

分析方法详见文献[9], 本文不再赘述. 采样是在 2010-01-01 ~ 2010-01-10, 每天分日间、夜间采集气溶胶 9 级粒径样品, 采集时间为 08:00 ~ 19:00 (日间), 20:00 ~ 次日 07:00 (夜间), 雨天不采集样品, 共计采集样品 328 套, 其中日间 168 套, 夜间 160 套. 同时记录温度、风速、风向等气象资料. 本研究将 $D_p \leq 2.1 \mu\text{m}$ 的采样粒子 ($\text{PM}_{2.1}$) 作为细粒子, 将 $D_p \geq 2.1 \mu\text{m}$ 的采样粒子作为粗粒子.

1.3 气象资料处理

气象资料来源于 <http://english.wunderground.com/>. 原始资料的风记录分辨率为小时, 本实验以采样时长 11 h 求出其主导风向. 若频率最大的风向大于 1 个, 但是若这些风向的风频之和不小于 30%, 且风向角最大差值低于 45° , 则将这些风向的平均值记为主导风向^[14].

1.4 目标化合物清单

17 种优控 PAHs 及缩写如下: 萘 (Nap, 2-rings)、二氢萘 (Ace, 2-rings)、萘 (Acy, 2-rings)、芴 (Flu, 2-rings)、菲 (Phe, 3-rings)、蒽 (Ant, 3-rings)、荧蒽

(Fla, 4-rings)、芘 (Pyr, 4-rings)、苯并 [a] 蒽 (BaA, 4-rings)、䟰 (Chr, 4-rings)、苯并 [b] 荧蒽 (BbF, 5-rings)、苯并 [k] 荧蒽 (BkF, 5-rings)、苯并 [e] 芘 (BeP, 5-rings)、苯并 [a] 芘 (BaP, 5-rings)、二苯并 [a, h] 蒽 (DahA, 5-rings)、茚并 [1, 2, 3-cd] 芘 (IcdP, 6-rings) 以及苯并 [ghi] 芘 (BghiP, 6-rings).

2 结果与讨论

2.1 昼夜特征

采样期间, 南京冬季 PM_{10} 的 $\sum 17\text{PAHs}$ 浓度 (17 种 PAHs 平均浓度之和), 市区白天在 $47.26 \sim 209.51 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 夜晚在 $41.36 \sim 220.35 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间; 而郊区是 $45.10 \sim 173.12 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (白天) 和 $68.74 \sim 200.86 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (夜间). $\text{PM}_{2.1}$ 的 $\sum 17\text{PAHs}$ 浓度, 市区变化范围为 $33.74 \sim 146.94 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (白天) 和 $19.34 \sim 144.47 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (夜间), 郊区为 $25.42 \sim 117.32 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (白天) 和 $38.54 \sim 133.10 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ (夜间), 见表 1.

表 1 南京市与郊区 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.1}$ 中 $\sum 17\text{PAHs}$ 浓度 (平均值 \pm 标准差) / $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Concentrations of total-PAHs in PM_{10} and $\text{PM}_{2.1}$ at urban and suburban sites (ave. \pm stdev.) / $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

位置	项目	PM_{10}		$\text{PM}_{2.1}$	
		日间	夜间	日间	夜间
郊区 ¹⁾	总浓度	117.55 \pm 45.54	127.99 \pm 45.07	77.05 \pm 34.05	85.63 \pm 30.14
	东北风	124.26 \pm 50.72	130.05 \pm 48.20	73.68 \pm 43.76	85.39 \pm 27.54
	偏西风	110.15 \pm 36.71	123.88 \pm 47.76	73.64 \pm 17.71	86.10 \pm 41.68
市区	总浓度	135.96 \pm 53.40	132.24 \pm 62.07	90.79 \pm 37.09	87.14 \pm 43.90
	东北风	108.87 \pm 57.04	131.65 \pm 62.26	69.72 \pm 36.84	84.89 \pm 44.92
	偏西风	158.78 \pm 50.78	133.42 \pm 75.60	112.13 \pm 36.43	91.63 \pm 51.18

1) 对郊区采样点来说, 东北风时, 采样点处于工业区下风向, 偏西风时处于其上风向

表 1 给出了南京冬季市区、郊区 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.1}$ 的 $\sum 17\text{PAHs}$ 在日间和夜间的平均浓度值以及不同主导风向影响的平均浓度值. 可看出市区日间与夜间, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.1}$ 的 $\sum 17\text{PAHs}$ 浓度均相应地高于郊区, 且市区日间的这二项浓度平均值比夜间略高. 南京是长三角地区人口密集城市, 显然冬季气溶胶中 $\sum 17\text{PAHs}$ 浓度的昼夜变化与人类活动主要集中在日间 (07:00 ~ 19:00) 相吻合. 虽然日间边界层高度可达到 1 ~ 2 km, 夜晚逆温层高度 100 ~ 500 m, 但是南京日间车流量约为夜间的 2 ~ 10 倍^[15~17], 致使污染物的排放速率大于其扩散和稀释速率, 使城市日间气溶胶粒子中 PAHs 总浓度水平高于夜间浓度水平.

主导风向对南京冬季市区郊区大气气溶胶的 PAHs 浓度分布产生了不同的影响. 本研究的郊区采样点, 在主导风向是东北风时处于工业区 (污染源) 下风方向, 盛行偏西风时则处于上风方向. 从表 1 可看出, 冬季日间与夜间郊区 PM_{10} 的 $\sum 17\text{PAHs}$ 浓度, 采样点处于工业区下风向时的浓度明显高于上风方向的浓度, 尤其是日间的浓度值 [(124.26 \pm 50.72) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$] 比市区的浓度值 [(108.87 \pm 57.04) $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$] 高约 14.14%; 而 $\text{PM}_{2.1}$ 中 $\sum 17\text{PAHs}$ 浓度值, 在日间与夜间几乎都没有受到风向变化的影响. 说明郊区采样点附件的工业区排放对大气粗粒子中 PAHs 浓度有重要贡献, 但对细粒子影响不大. 从表 1 还可看出, 南京冬季市区

PM₁₀的 \sum 17PAHs 浓度值, 日间受到主导风向影响较大(偏西风时比东北风时高达 46%), 夜间受到的影响几乎可以忽略; 而 PM_{2.1}的 \sum 17PAHs 浓度值, 日间、夜间都不同程度的受到主导风向影响, 但日间受到的影响更明显. 可以看出市区粗粒子主要受本地源的影响, 而细粒子则可能受到远距离输送影响比较大. 这可能由于 2009 年 1 月 4 ~ 10 日, 南京地区受前后连续二个强大的冷高压控制, 在东北主导风向下, 并伴有显著的下沉气流, 将中高层的洁净空气输送到近地层, 使近地层大气中气溶胶浓度降低^[18]. 而地面人类活动产生的扬尘等又都集中在粗模态^[19], 因而近地面大气中仅 PM_{2.1}中 PAHs 的浓度下降幅度较大.

表 2 列出了南京市与郊区 PM₁₀中多环芳烃单体日均浓度. 可知, 采样期间南京冬季市区和郊区 PM₁₀的 17 种 PAHs 中日平均浓度最高的单体依次为: Fla [(15.53 ± 5.76) ng·m⁻³]、BbF [(12.09 ± 4.41) ng·m⁻³]、Chr [(11.22 ± 4.10) ng·m⁻³]、Phe [(10.88 ± 4.09) ng·m⁻³]. 通常以苯并[a]芘 (BaP) 作为多环芳烃的代表, 以 PM₁₀中其浓度限值 10 ng·m⁻³ 作为空气污染标准^[20]. 在本观测实验取得的样品中, 市区和郊区分 PM₁₀中苯并[a]芘日均浓度分别为 (8.15 ± 3.46) ng·m⁻³ 和 (7.36 ± 2.72) ng·m⁻³, 均低于其空气污染限值.

表 2 南京市与郊区 PM₁₀中多环芳烃单体

日均浓度(平均值 ± 标准差)/ng·m⁻³

Table 2 Average daily concentrations of PAH in PM₁₀ at urban and suburban sites (ave. ± stdev.)/ng·m⁻³

PAH	郊区	市区
Nap	n. d. ¹⁾	n. d.
Acy	2.77 ± 1.00	2.67 ± 1.09
Ace	1.86 ± 0.67	1.67 ± 0.68
Flu	3.58 ± 1.27	3.59 ± 1.47
Phe	10.88 ± 4.09	10.72 ± 4.49
Ant	4.2 ± 1.49	4.38 ± 1.79
Fla	15.53 ± 5.76	15.7 ± 6.67
Pyr	9.8 ± 3.69	10.88 ± 4.6
BaA	6.29 ± 2.26	7.49 ± 3.11
Chr	11.22 ± 4.1	12.53 ± 5.33
BbF	12.09 ± 4.41	13.67 ± 5.86
BkF	7.73 ± 2.75	8.88 ± 3.72
BeP	8.6 ± 3.09	9.68 ± 4.08
BaP	7.36 ± 2.72	8.15 ± 3.45
InP	8.3 ± 2.96	9.66 ± 4.15
DaA	3.98 ± 1.39	4.58 ± 1.89
BghiP	8.31 ± 2.94	9.85 ± 4.19

1) n. d. : 未检出

2.2 粒径分布

图 2 为日间和夜间南京市区和郊区 PM₁₀中 \sum 17PAHs 粒径分布. 从中可以看出, 采样期间 \sum 17PAHs 均呈双峰型分布, 分别出现在 0.65 ~ 1.1 μm 和 4.7 ~ 5.8 μm 处, 这与 Hien 等^[21]的结果一致. 且市区日间和夜间在 0.65 ~ 1.1 μm 和 4.7 ~ 5.8 μm 处的粒径峰均高于郊区, 表明市区气溶胶单位粒径段 PAHs 的含量比郊区高. 研究发现, PM_{2.1}中 \sum 17PAHs 浓度与 PM₁₀中 \sum 17PAHs 浓度的比值为 0.66 ~ 0.67, PM_{1.1}中大约含有 PM₁₀中 \sum 17PAHs 浓度的 46%, 结果与周家斌等^[1]和顾凯华等^[11]的结果基本一致; PAHs 仍然主要分布在细粒子中.

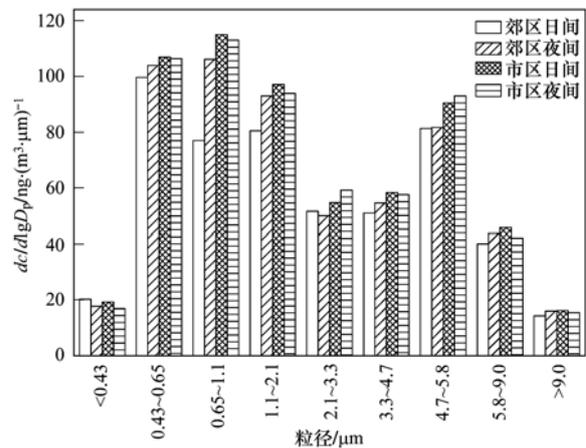


图 2 日间和夜间 2 个采样点多环芳烃总量的粒径分布

Fig. 2 Size distributions of total-PAHs in daytime and nighttime at the two sites

当粒径 < 1.1 μm 时, 郊区日间 PAH 的累积百分比高于郊区夜间、市区日间和夜间等 3 种情况. 这是由于郊区日间采样点大都处在工业排放源的下风向. 废气排放时产生的气态的 PAHs 绝大多数会凝结在超细粒子上, 其中大量的半挥发性 PAHs 未充分挥发, 导致 $D_p < 0.43$ μm 段细气溶胶获得较大的 PAH 累积分数^[22,23]. 表明相对于其它因素, 源排放和风向对气溶胶中 PAHs 的粒径分布有重要影响. 这也可以从图 3 得到证明.

从图 3 中还可以看出, 在 $D_p > 1.1$ μm 时, 上风向 PAH 累积分数均高于下风向; 上风向时, 夜间 PAH 累积分数明显高于日间, 可能由于夜间阳光辐射减少, 使大气气溶胶中 PAHs 免受光解而增加.

2.3 单个 PAH 的粒径分布

PAHs 单体的性质也是决定其粒径分布的主要

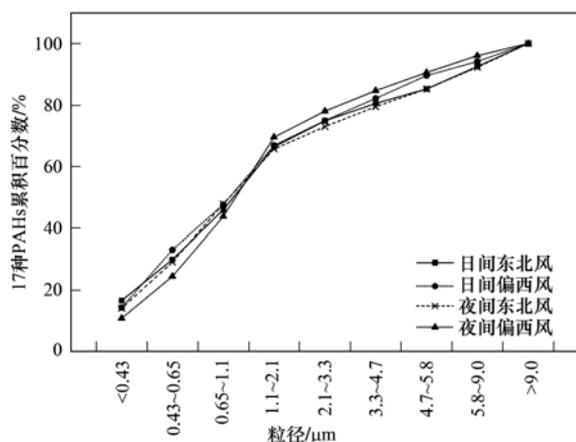


图3 郊区多环芳烃累积百分数的粒径分布

Fig. 3 Size distribution of cumulative percentage for total-PAHs at the suburban site

因素. 本研究以萘烯、芴、葱、苝、苯并[*a*]葱、苯并[*a*]苝、二苯并[*a,n*]葱、苯并[*ghi*]苝分别作为2~6个稠并苯环的PAHs代表,对比17种PAHs,给出了不同环数多环芳烃的粒径分布.从图4可看出,所有PAHs的粒径分布均呈双峰分布,2个峰分别位于0.45~1.1 μm (细模态)和4.7~5.8 μm (粗模态).对2~3环来说,郊区含量高于市区;而4~6环部分市区含量高于郊区.这可能由两地不同的排放源和低分子PAHs和高分子PAHs不同性质造成的.

2~3环:PAHs的粒径分布与PAHs总量和4~6环PAHs的粒径分布不同,粗模态的粒径峰明显高于细模态的粒径峰.但是由于2~3环PAHs在

PAHs总量中占有较小的比例(见表2),因而并不影响PAHs总量的粒径分布特征.2~3环PAHs的2个峰随着PAHs分子量的增加,其峰高逐渐增加;Allen等^[24]发现污染源排放时凝结于细粒子上的蒸气压较高、分子量较小的半挥发性PAHs绝大多数会挥发,再凝结到粗模态粒子上.且在 $D_p < 1.1\ \mu\text{m}$ 处细模态峰较粗模态峰增加明显.

4~6环:除二苯并[*a,h*]葱外,PAHs细模态峰均高于粗模态峰.4~6环PAHs的粗模态粒径峰与2~3环PAHs粗模态粒径峰有着不同的形成原因.研究发现,2~3环PAHs蒸气压较低,挥发性较强;4~6环PAHs蒸气压较低,为非挥发性的^[24],因此,粗粒子中4~6环PAHs不会从细粒子上挥发再凝结到粗粒子上.

研究表明,细粒子和粗粒子之间很少相互作用,可以认为是相互独立的.与细粒子的增长过程不同,粗粒子主要来源于机械过程所造成的扬尘等一次气溶胶粒子^[19],据此可以推测5~6环粗模态粒子主要来自地面降尘的再扬起.而从地面降尘与大气气溶胶中PAHs的相同的来源求得,地面降尘主要由细粒子形成^[25,26].所以,粗粒子中的4~6环PAHs经历了由沉降到再扬尘的过程.

粗模态的峰与其它结果相比均较高,可能与此部分较高的有机碳和元素碳含量有关.南京市PM₁₀的主要成分是烟尘集合体,主要产生于汽车尾气,PM_{2.5}中主要为煤烟尘,而北郊主要成分是燃煤

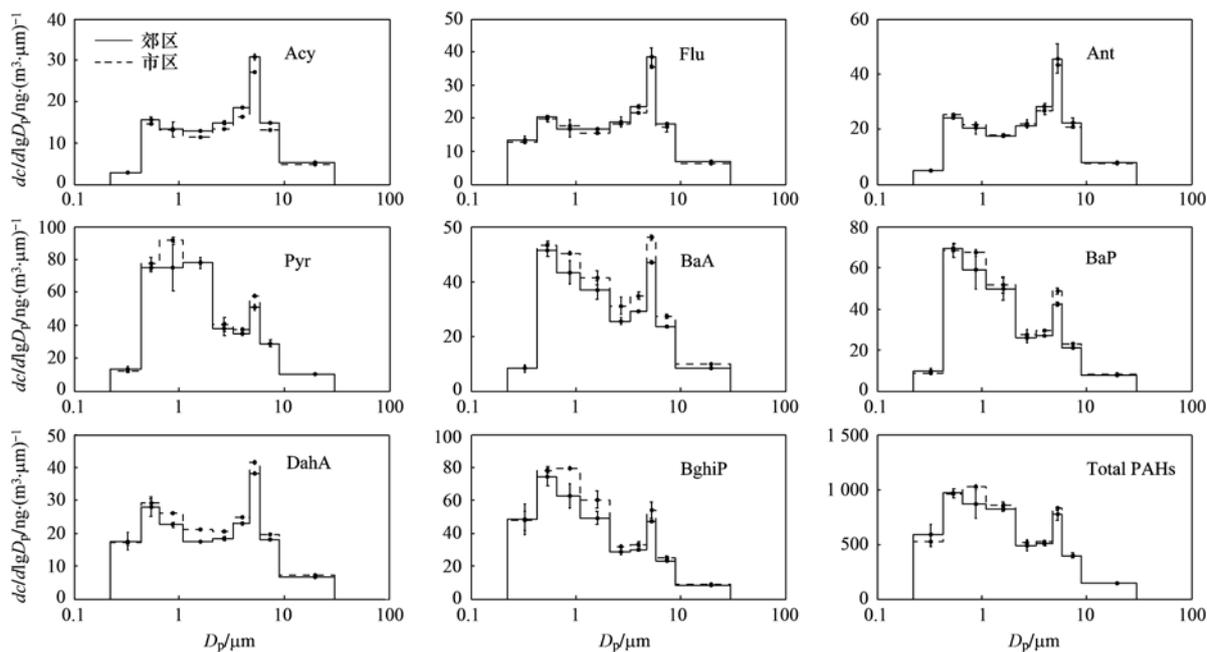


图4 不同环数多环芳烃的粒径分布

Fig. 4 Size distributions of representative PAHs with different ring numbers

飞灰和烟尘集合体,矿物颗粒不多,主要为重工企业排放^[27].南京地区气溶胶成分中,江北工业区气溶胶中 OC 和 EC 的质量分数高达约 14%,高于南京市区的平均值(10%),其中大约总碳的 20% 分布于粗模态部分,粗模态气溶胶颗粒就获得了足够大的有机表面积^[28,29].这样粗模态的 PAHs 就不易受光解而消失.

工业区以煤和天然气为主要燃料,产生的低分子 PAHs 也较其它燃料多;而市区主要为汽车尾气污染,且多为汽油发动机,所以产生的高分子 PAHs 较多.因此,形成了不同 PAHs 在市区与郊区含量不同的结果.

Khalili 等^[30]发现 DahA 主要来源于柴油机车尾气,特别是交通拥堵时,浓度很高;DahA 主要产自以煤为燃料的炼焦厂、炼铁厂和火电厂,由于煤燃烧会产生直径很大的粒子,使粗模态产生较大的 DahA 峰.

2.4 PAHs 来源特征

虽然很多学者用这些特征比值来区分各地的排放源差别,但是,很多排放源成分复杂且成分谱也会发生变化,源与源之间并没有确定的界线,因此在使用此方法时必须谨慎^[31].由表 3 可以看出,PM_{2.1}与 PM_{2.1-10}的诊断参数有较大差别,有必要对两部分的特征比值分别讨论.

表 3 细模态和粗模态多环芳烃的诊断参数¹⁾

Table 3 Molecular diagnostic ratios of PAHs with fine and coarse particles

项目	PM _{2.1}		PM _{2.1-10}	
	市区	郊区	市区	郊区
BbF/BkF	1.81	1.78	1.08	1.10
BaP/BeP	0.87	0.86	0.83	0.81
BaP/BghiP	0.88	0.80	0.90	0.90
Ant/(Ant + Phe)	0.23	0.24	0.34	0.37
Fla/(Fla + Pyr)	0.60	0.58	0.63	0.60
BaA/(BaA + Chr)	0.32	0.34	0.44	0.45
IP/(IP + BghiP)	0.51	0.51	0.47	0.46
BFs/BghiP	2.46	2.27	2.22	2.33
C _{PAHs} /∑PAHs	0.82	0.83	0.69	0.72

1) C_{PAHs}表示 Carcinogenic PAHs

由表 3 中数据可以计算得出,市区与郊区的诊断比例,在 PM_{2.1}与 PM_{2.1-10}两粒径段均无显著差别(*T*-test, PM_{2.1}: *P* = 0.179, *n* = 8; PM_{2.1-10}: *P* = 0.133, *n* = 8).这表明,虽然市区与郊区主要排放源种类不同,但是市区与郊区工业区大气气溶胶中 PAHs 却有相似的浓度廓线.说明市区混入了郊区排放的 PAHs,郊区也混合了部分市区排放的 PAHs.

这可以从 PAHs 成分谱的特征比值得到证明.

表 3 中 PM_{2.1}中 BbF/BkF 的比值(1.78 ~ 1.81)位于于汽车尾气(1.26 ± 0.19)和冶炼厂(2.69 ± 0.20)的特征值之间,受两者共同影响^[32];而粗模态部分(1.08 ~ 1.10)接近生物质燃烧的特征值(0.92 ± 0.16).BaP/BeP 的 PM_{2.1}部分(0.86, 0.87)正好与汽车尾气的特征值吻合,粗模态(0.81, 0.83)与冶炼厂特征值(0.81 ± 0.04)一致^[32],表明冶炼厂 PAHs 的排放对市区气溶胶中 PAHs 有相当大的贡献.

同样,在区别煤燃烧和汽车尾气时,BFs/BghiP 和 C_{PAHs}/∑PAHs 的特征值非常明显;前者范围为 0.66 ~ 1.96(0.78 ± 0.16)时为煤燃烧的特征值,而后者煤燃烧的比值为(2.6 ~ 14),远高于汽车尾气的特征值(0.21 ~ 0.28)^[8].因此对 BFs/BghiP 和 C_{PAHs}/∑PAHs 来说,煤燃烧为主要贡献来源.

An/(An + Phe)在粗模态的比值(0.34, 0.37)明显为烟煤燃烧的特征(0.31 ~ 0.36)^[33],但细粒子部分(0.23, 0.24)则较难界定为木质燃烧(0.14 ~ 0.29)或者汽车排放的结果^[31, 34].

PM₁₀中 Fla/(Fla + Pyr)的结果(0.58 ~ 0.63)均为褐煤燃烧的特征值(0.72, 0.59 ~ 0.85)^[33].而 IP/(IP + BghiP)的值(0.40, 0.46, 0.51)除具有煤和石油的燃烧特征值(0.46 ~ 0.48)外,还有石油气(0.48 ~ 0.57)的特征.而 BaP/BghiP(0.80, 0.88, 0.90)明显具有石油提炼厂的特征(0.65 ~ 1.7)^[34].

由此可见,市区主要污染源为汽车尾气和家庭天然气燃烧,但是部分特征值却表现出郊区工业区应有的比例特征,表明市区受郊区影响程度很大;对郊区来说,结果相同.可能由于市区和郊区距离较小,大气的输送和混合作用使两地污染物混合.然而,本地源和传输作用分别对研究目标地区 PAH 浓度的定量贡献仍是一个亟待研究的问题.

3 结论

(1)研究发现市区多环芳烃浓度高于郊区.市区和郊区昼夜 PAH 浓度变化趋势不同;市区日间 PAH 浓度高于夜间,日间为(135.96 ± 53.40) ng·m⁻³,夜间为(132.24 ± 62.07) ng·m⁻³;郊区则相反,日间为(117.55 ± 45.54) ng·m⁻³,夜间为(127.99 ± 45.07) ng·m⁻³.这种区别可能归因于市区以“潮汐式”交通排放源和昼夜变化的生活排放源为主,而郊区则以稳定的工业源为主.

(2)南京市区和郊区气溶胶中 PAHs 呈双峰型分布,分别出现在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 处,其中约 66% 的 PAHs 分布在 $\text{PM}_{2.5}$ 中;而 PAHs 的单体由于本身的性质不同,有着不同的粒径分布特征.对 2~3 环 PAHs 来说,细模态的峰低于粗模态的峰,且郊区含量高于市区;而 4~6 环 PAHs 的细模态的峰均高于粗模态的峰,市区含量高于郊区.气溶胶粗模态中较高的碳含量可能造成了此粒径段较高的 PAH 含量.

(3)由于大气的输送和混合作用,使市区和郊区大气气溶胶中 PAHs 形成相似的浓度廓线($P = 0.179, n = 8, \text{PM}_{2.5}$; $P = 0.133, n = 8, \text{PM}_{2.5-10}$, T -test),表明市区和郊区排放的污染物相互影响很大.

致谢:感谢气象出版社编辑黄红丽对本文提出宝贵的修改意见.

参考文献:

- [1] 周家斌,王铁冠,黄云碧,等.不同粒径大气颗粒物中多环芳烃的含量及分布特征[J].环境科学,2005,26(2):40-44.
- [2] Bi X H, Sheng G Y, Peng P A, *et al.* Distribution of particulate and vapor-phase n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere of Guangzhou, China [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(2): 289-298.
- [3] Gu Z P, Feng J L, Han W L, *et al.* Diurnal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(3): 389-396.
- [4] Dunbar J C, Lin C I, Vergucht I, *et al.* Estimating the contributions of mobile sources of PAH to urban air using real-time PAH monitoring [J]. Science of the Total Environment, 2001, 279(1-3): 1-19.
- [5] Guzmán-Torres D, Eiguren-Fernández A, Cicero-Fernández P, *et al.* Effects of meteorology on diurnal and nocturnal levels of priority polycyclic aromatic hydrocarbons and elemental and organic carbon in PM_{10} at a source and a receptor area in Mexico City [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(17): 2693-2699.
- [6] 谭吉华,毕新慧,段菁春,等.广州市大气可吸入颗粒物(PM_{10})中多环芳烃的季节变化[J].环境科学学报,2005,25(7):855-862.
- [7] Duan J C, Bi X H, Tan J H, *et al.* The differences of the size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) between urban and rural sites of Guangzhou, China [J]. Atmospheric Research, 2005, 78(3-4): 190-203.
- [8] Evangelopoulos V, Albanis T A, Kodona E, *et al.* Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons near power plants as determined by large volume injection-GC/MS [J]. Chemosphere, 2010, 80(3): 235-240.
- [9] 樊曙先,黄红丽,樊韬,等.南京北郊雾天 PM_{10} 中多环芳烃粒径分布特征[J].环境科学,2009,30(9):2707-2714.
- [10] 樊曙先,黄红丽,顾凯华,等.雾过程对大气气溶胶 PM_{10} 中多环芳烃粒径分布的影响[J].高等学校化学学报,2010,31(12):2375-2382.
- [11] 顾凯华,樊曙先,黄红丽,等.南京冬季雾天颗粒物中 PAHs 分布与气象条件的关系[J].中国环境科学,2011,31(8):1233-1240.
- [12] 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.
- [13] 银燕,童尧青,魏玉香,等.南京市大气细颗粒物化学成分分析[J].大气科学学报,2009,32(6):723-733.
- [14] HJ 2.2-2008,环境影响评价技术导则-大气环境[S].
- [15] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2005.239-285.
- [16] 张子燕,李修刚,张伟.南京市街道峡谷机动车尾气污染特点和环境容量分析[J].环境监测管理与技术,2002,14(5):11-13.
- [17] 喻义勇,陈建江.南京市快速道路交通噪声污染调查[J].环境监测管理与技术,2007,19(1):22-24.
- [18] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,2007.108-319.
- [19] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学[M].北京:高等教育出版社,2006.268-364.
- [20] GB 3095-1996,环境空气质量标准[S].
- [21] Hien T T, Thanh L T, Kameda T, *et al.* Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons with particle size in urban aerosols at the roadside in Ho Chi Minh City, Vietnam [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(8): 1575-1586.
- [22] Zielinska B, Sagebiel J, Arnott W P, *et al.* Phase and size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in diesel and gasoline vehicle emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(9): 2557-2567.
- [23] Yang H H, Chien S M, Chao M R, *et al.* Particle size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in motorcycle exhaust emissions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 125(1-3): 154-159.
- [24] Allen J O, Dookeran N M, Smith K A, *et al.* Measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with size-segregated atmospheric aerosols in Massachusetts [J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30(3): 1023-1031.
- [25] Vong R J, Vong I J, Vickers D, *et al.* Size-dependent aerosol deposition velocities during BEARPEX'07 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(12): 5749-5758.
- [26] McCreedy D I. Wind tunnel modeling of small particle deposition [J]. Aerosol Science and Technology, 1986, 5(3): 301-312.
- [27] 刘义,钟秦,胡伟,等.南京市 PM_{10} 时空变化特征及微观形貌分析[J].环境科学与技术,2008,31(10):82-84.
- [28] Wang G H, Wang H, Yu Y J, *et al.* Chemical characterization of water-soluble components of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(21): 2893-2902.

- [29] 邵龙义, 杨书申, 时宗波, 等. 城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [30] Khalili N R, Scheff P A, Holsen T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions[J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(4): 533-542.
- [31] Galarneau E. Source specificity and atmospheric processing of airborne PAHs: implications for source apportionment [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(35): 8139-8149.
- [32] Dickhut R M, Canuel E A, Gustafson K E, *et al.* Automotive sources of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons associated with particulate matter in the Chesapeake Bay Region [J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(21): 4635-4640.
- [33] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. Organic Geochemistry, 2002, **33**(4): 489-515.
- [34] Simcik M F, Eisenreich S J, Lioy P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(30): 5071-5079.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jiashan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH ₄ ⁺ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH ₄ , N ₂ O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH ₄ and N ₂ O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行