

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM₁₀中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM_{2.5}中硫酸盐来源 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM_{2.5}和PM_{2.5-10}中水溶性无机离子特征 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含铈废水及对铈的回收 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe₂O₃表面HNO₃的光解 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜味降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 李静,李文英(1385)

Fe³⁺对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD₅/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼铈交互作用对水稻吸收积累铈和硼的影响 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

厦门春季 PM₁₀ 中 PAHs 成分谱特征及其与气象要素相关性分析

张健^{1,2}, 樊曙先^{1,3*}, 孙玉², 张悦², 魏锦成⁴

(1. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 4. 厦门市气象局, 厦门 361012)

摘要: 为了研究厦门春季市区与郊区 PM₁₀ 中 PAHs 的污染状况和分布特征, 利用 GC-MS 分析了 2013 年 4 月 11 ~ 21 日日间和夜间分别在厦门市、郊两地采集的气溶胶样品, 并得到了厦门市区和郊区 18 种 PAHs 的浓度, 研究得出厦门郊区 \sum PAHs 昼夜变化比市区小, 市区的白天是夜间的 1.83 倍, 并且 PAHs 的浓度仍然是低于国家的环境标准的. 在不同的时间和空间尺度下, \sum PAHs 均呈双峰型分布, 市区和郊区昼、夜的 PAHs 组分均以中低环 PAHs 为主, 高环 PAHs 随着粒径的增大而逐渐减小, 而低环 PAHs 所占比例逐渐增大, 市区的 PM₁₀ 中 2~4 环 PAHs 粒径的昼、夜分布有很大差异, 而 5~7 环差异不大. 并用 DR 方法分析了 PAHs 的来源, 得出厦门春季市区和郊区 PAHs 的主要贡献源为汽油、柴油的燃烧和冶炼厂的熔炉排放的废气. 在采样期间, 郊区 \sum PAHs 浓度与温度、风向呈负相关关系, 与能见度和风速呈正相关关系, 而市区的 \sum PAHs 浓度除白天与温度的相关性跟郊区相同外, 与其他气象要素的相关性和郊区基本相反.

关键词: 多环芳烃; 粒径分布; 诊断参数; 来源分析; 气象要素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1173-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.04.005

Analysis of Component Spectral Characteristics of PM₁₀-Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen

ZHANG Jian^{1,2}, FAN Shu-xian^{1,3*}, SUN Yu², ZHANG Yue², WEI Jin-cheng⁴

(1. Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Meteorology Bureau of Xiamen, Xiamen 361012, China)

Abstract: In order to study pollution status and distribution characteristics of PAHs in PM₁₀ during the spring in city and suburban Xiamen. A total of 18 PAHs were analyzed in the aerosol samples collected in daytime and nighttime during 11th to 21st of April, 2013 in city and suburban Xiamen. Results showed diurnal variation of \sum PAHs in suburban was weaker than that in city. In the city, the concentration of PAHs during daytimes was higher than that during nighttimes, close to 1.83 times, and it is still under the national environmental standards. In different times and space scales, PAHs were a bimodal distribution, the components of PAHs gave the priority to low and middle rings in urban and suburban during daytimes and nighttimes. PAHs with high molecular weight decreased gradually by the increase of particle size, and the proportion of low molecular weight PAHs increased gradually in the meantime. In the city, the change of size distribution among 2-4 rings PAHs in PM₁₀ during days and nights was bigger than these among 5-7 rings. The main sources of PAHs were estimated by DR, the main contributions included gasoline and diesel combustion, the smelting furnace exhaust emissions. During sampling periods, the relationship between the concentration of PAHs, temperature and WD is negative, PAHs had a positive correlation with the visibility and WS in suburban. And in urban, the relationship with temperature during the day was negative, and with an opposite correlation between other meteorological elements.

Key words: PAHs; size distribution; diagnostic ratios; source apportionment; meteorological element

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 由于其潜在的毒性, 对生物有致癌和致突变的影响而受到了广泛的关注, 颗粒物中的 PAHs 能通过呼吸作用而对人类产生很大的危害, 同时 PAHs 能与大气中的物种发生反应生成芳烃类衍生物, 如硝基 PAHs 和羟基 PAHs, 这些化合物对人体

危害更大^[1]. 由于工业活动, 城市人口和交通密度

收稿日期: 2014-07-30; 修订日期: 2014-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41275151, 71341029, 41375138); 厦门市科技计划项目 (3502Z20124012)

作者简介: 张健 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气成分及环境特征, E-mail: z20082301137@163.com

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

的快速增长,在城市附近环境中的 PAHs 主要来源于人类活动,而由自然活动(森林燃烧、火山喷发等)只占很少一部分^[2]. 大气中的 PAHs 大多吸附在粒径小于 10 μm 颗粒物上,高分子量 PAHs 更是如此^[3],因此,研究 PM_{10} 中 PAHs 的浓度,粒径分布和来源,对于能够有效控制由颗粒物中 PAHs 所造成的各种影响是十分重要的.

厦门作为沿海城市,位于福建省东南部,濒临台湾海峡,是全国首批实行对外开放的 5 个经济特区之一,作为海峡西岸经济区的重点城市,同时也是一个旅游城市. 为了能在经济发展的同时保证人们的生活和居住的环境,并为当地环保部门的决策等提供依据,所以研究 PM_{10} 中 PAHs 是十分必要的. 而近年来国内对于厦门的排放源及大气中 PAHs 的浓度与特征进行了相当多的研究^[4-6],但对于厦门单一季节颗粒物中 PAHs 的城、郊不同空间和昼、夜不同时间的粒径分布特征,及其来源分布和与气象要素的相关性分析还是比较少的,为此,本研究主要集中于厦门春季 PM_{10} 中 PAHs 的成分谱特征及其与气象要素相关性的分析.

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 、 $0.43 \sim 0.65$ 、 $0.65 \sim 1.1$ 、 $1.1 \sim 2.1$ 、 $2.1 \sim 3.3$ 、 $3.3 \sim 4.7$ 、 $4.7 \sim 5.8$ 、 $5.8 \sim 9.0$ 、 $>9.0 \mu\text{m}$,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); 17 种 PAHs 混合标准样($2000 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 美国 SUPELCO 公司), Benzo(e) pyrene 标样($100 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, Dr. Ehrensofer 公司); 二氯甲烷(农残分析级,德 CNW 公司),实验所用其它试剂均为分析纯或优于分析纯; 采样所用滤膜为玻璃纤维滤膜($\Phi = 80 \text{ mm}$, 孔径 $= 0.22 \mu\text{m}$, 上海兴亚净化材料厂),采样前将滤膜置于马弗炉中 450°C 焙烧 4 h, 以消除可能的有机物,然后密封到铝箔中备用. 滤膜在采样前、后平衡称重,置于冰箱中(-20°C) 避光保存至分析.

1.2 PM_{10} 分级样品采集及 PAHs 分析方法

本研究设置 2 个采样点,采样点位置见图 1,一个位于厦门思明区厦门市气象局内,采样点位于市中心,周围属于居住和交通密集区,作为厦门市区的

采样点; 另一个位于厦门大嶝岛翔安区气象局气象楼,属于旅游区,采样点靠近海,周围交通污染源少,作为厦门市郊区的采样点. PM_{10} 分级样品的采集、样品与处理和 PAHs 的前处理、分析方法详见文献[7],本文不再赘述. 采样分为两个阶段,2013-04-11~2013-04-16 为郊区采样,2013-04-16~2013-04-21 为市区采样,每天分昼、夜间采集气溶胶 9 级粒径样品,采样时间为 08:00~19:00(昼),20:00~次日 07:00(夜),雨天不采集样品. 采集到的样品共计 162 套,其中市区和郊区各 81 套. 在采样的同时每小时都会记录温度、风速、风向等气象数据. 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.

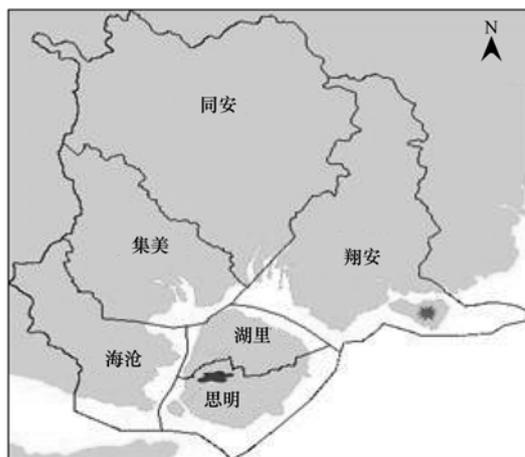


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of the studied area with sampling sites

1.3 气象资料处理

气象资料来源于厦门当地各个自动气象站,主要有采样期间内厦门市各个气象站点的能见度、气温、雨量、最大风的风速和风向,资料分为每小时提取. 能见度的分析采用厦门市 11 个站点的平均值,其他气象要素分析采用市区和郊区采样点附近的自动气象站数据.

1.4 目标化合物清单

目标物除了 17 种优控 PAHs: 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)、䓛(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)

还有晕苯 (COR, 7-rings), 一共 18 种 PAHs.

1.5 质量保证与质量控制

用方法空白、加标空白、基质加标、基质加标平行样和样品平行样等进行质量控制. 用指示物回收率来检测样品的制备和分离结果, 指示物的平均回收率为: 萘-D₈ 66.18%、二氢萘-D₁₀ 80.12%、菲-D₁₀ 85.11%、蒽-D₁₂ 101.11%、苝-D₁₂ 83.61%, 目标化合物的定量未经回收率指示物的校正. 方法检测限为 6.00 ng·m⁻³ (Ace) ~ 20.00 ng·m⁻³ (COR).

2 结果与讨论

2.1 PM₁₀ 中 PAHs 的浓度水平

在 2 个站点采集的 PM₁₀ 样品中检出了除二苯并 [a,h] 蒽之外的 17 种多环芳烃, 表 1 给出了采样期间的郊区白天 (SD) 和夜晚 (SN) 以及市区的白

天 (CD) 和夜晚 (CN) PAHs 的浓度范围和平均值. 从中可以看出, 郊区 ∑ PAHs 昼夜变化不大, 夜间略比白天低; 市区 ∑ PAHs 昼夜变化很大, 白天高出夜间 104.03 ng·m⁻³, 是夜间的 1.83 倍. 因功能区不同, PM₁₀ 中 PAHs 的浓度存在明显的差异, 以市区白天的浓度最高, 平均值达到 228.62 ng·m⁻³; 其次是城市夜晚和郊区白天, 平均值分别为 124.59 ng·m⁻³ 和 122.08 ng·m⁻³; 浓度最低为郊区夜晚, 平均值为 119.94 ng·m⁻³. 市区站点虽没有工业的直接排放, 但它靠近厦门最为繁忙的旅游区和东渡路主干道, 频繁来往的渡轮和机动车的尾气排放, 以及附近发达的饮食业, 也会造成 ∑ PAHs 浓度偏高. 而由于海陆风的影响, 造成了夜晚 PM₁₀ 中 ∑ PAHs 的浓度小于白天^[8].

表 1 厦门春季 PM₁₀ 中 PAHs 的浓度分布/ng·m⁻³

Table 1 Distribution of concentrations of PAHs in PM₁₀ during spring in Xiamen/ng·m⁻³

PAHs	SD		SN		CD		CN	
	平均值	浓度范围	平均值	浓度范围	平均值	浓度范围	平均值	浓度范围
Nap	5.21	4.33 ~ 5.70	4.98	3.66 ~ 8.75	14.11	12.30 ~ 17.63	7.47	4.31 ~ 10.16
Ace	3.21	2.80 ~ 3.47	3.88	2.87 ~ 6.89	4.83	4.28 ~ 5.77	3.51	1.66 ~ 4.83
Acy	NA	NA	0.50	0.40 ~ 0.66	1.00	0.85 ~ 1.12	0.25	0.10 ~ 0.41
Flu	11.66	10.41 ~ 13.04	11.92	9.00 ~ 19.89	24.46	20.44 ~ 30.20	14.70	6.76 ~ 21.83
Phe	67.92	61.38 ~ 77.22	50.80	39.55 ~ 79.51	116.36	91.67 ~ 150.82	64.32	26.92 ~ 98.45
Ant	9.18	8.10 ~ 10.24	11.34	8.83 ~ 17.61	29.01	22.01 ~ 38.18	15.37	5.91 ~ 24.19
Fla	13.59	12.16 ~ 15.49	9.03	6.93 ~ 14.75	20.16	14.86 ~ 27.19	7.99	3.28 ~ 12.02
Pyr	6.38	5.74 ~ 7.20	5.48	4.12 ~ 9.30	13.04	9.56 ~ 17.09	4.74	2.09 ~ 6.85
BaA	0.17	0.14 ~ 0.20	0.59	0.42 ~ 1.11	0.23	0.12 ~ 0.32	0.13	0.03 ~ 0.25
Chr	0.53	0.42 ~ 0.63	2.03	1.50 ~ 3.53	0.68	0.37 ~ 0.97	0.63	0.27 ~ 0.95
BbF	0.83	0.74 ~ 0.95	4.82	3.55 ~ 8.45	0.91	0.49 ~ 1.29	1.30	0.77 ~ 1.84
BkF	0.21	0.17 ~ 0.25	1.56	1.11 ~ 2.92	0.30	0.16 ~ 0.43	0.38	0.15 ~ 0.61
BeP	0.34	0.27 ~ 0.40	3.06	2.22 ~ 5.59	0.72	0.39 ~ 1.02	0.61	0.26 ~ 0.92
BaP	0.86	0.73 ~ 1.02	1.08	0.82 ~ 1.76	0.46	0.25 ~ 0.65	1.22	0.87 ~ 1.75
DahA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
IcdP	0.80	0.64 ~ 0.89	3.46	2.47 ~ 6.59	0.86	0.47 ~ 1.22	0.33	0.19 ~ 0.45
BghiP	0.76	0.61 ~ 0.84	3.50	2.49 ~ 6.64	0.85	0.46 ~ 1.20	0.98	0.41 ~ 1.49
COR	0.44	0.35 ~ 0.52	1.92	1.29 ~ 3.97	0.64	0.34 ~ 0.90	0.67	0.26 ~ 1.06
∑ PAHs	122.08	108.97 ~ 138.05	119.94	91.24 ~ 197.91	228.62	179.01 ~ 295.99	124.59	54.24 ~ 188.06

钱冉冉等^[9]在 2008-2009 年对厦门春季灰霾期间的 18 种 PAHs 研究表明, 2009 年春季郊区 PAHs 浓度为 36.76 ng·m⁻³, 市区的浓度为 44.69 ng·m⁻³, 虽然在本次观测期间厦门地区 PM₁₀ 中 PAHs 浓度较高, 但以苯并 [a] 芘 (BaP) 作为多环芳烃的代表, 以 PM₁₀ 中其浓度限值 2.5 ng·m⁻³ 作为空气污染标准^[10]. 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 1.94 ng·m⁻³ 和 1.68 ng·m⁻³, 均低于其空气污

染限.

2.2 市区和郊区 PM₁₀ 中 PAHs 粒径分布的昼夜特征

图 2 为两个采样点 PM₁₀ 中 ∑ 18PAHs 昼、夜粒径分布的特征. 从中可见, 在不同的时间和空间尺度下, ∑ 18PAHs 均呈双峰型分布, 南京市^[11]、泰国的南邦府^[12]和越南的胡志明市^[13]也曾得到过类似的结论. 其中郊区白天双峰位于 1.1 ~ 2.1 μm 和 4.7 ~ 5.6 μm 处, 夜间双峰位于 0.43 ~ 0.65 μm 和 3.3 ~ 4.7 μm 处; 市区白天双峰位于 < 0.43 μm

和 2.1 ~ 3.3 μm 处,夜间双峰位于 0.43 ~ 0.65 μm 和 5.6 ~ 9.0 μm 处. 除了郊区白天, ∑18PAHs 的积聚模态的峰位位置偏向于小颗粒,由于大嶝岛上存在着13 300亩的盐田,郊区白天的积聚模态峰位偏向大粒径,很可能受到巨盐核浓度的影响,沈志来等^[14]研究表明巨盐核浓度呈指数递减,绝大部分为 2 μm,占 93.7%,白天活跃的制盐活动和高温造成巨盐核浓度升高,从而影响 PAHs 的粒径分布;而除了市区夜晚,粗模态的峰位大多偏向于小颗粒,其原因可能是由于,市区夜晚容易形成逆温层结,并且陆地背景风和夜晚海风相反时,则污染物的扩散减弱,颗粒物陈化时间较长,细小粒子容易相互碰撞粘结成较大粒径的粒子^[15].

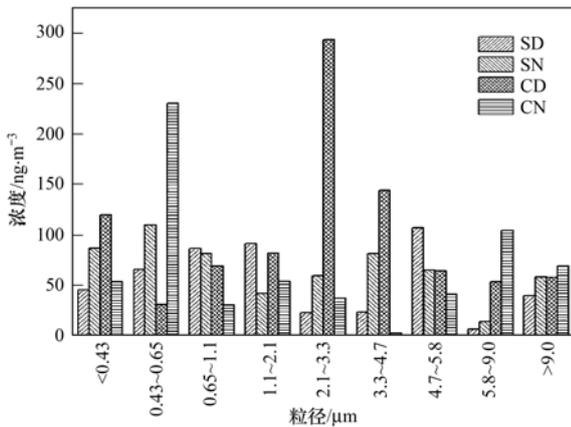


图2 两个采样点 PM₁₀ 中 ∑18PAHs 昼、夜粒径分布

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

2.3 市区和郊区 PM₁₀ 中 PAHs 粒径分布的组成特征

2.3.1 不同环数 PAHs 的浓度特征

表 2 给出了市区和郊区 PM₁₀ 中不同环数 PAHs

浓度. 从中可知,市区和郊区昼、夜的 PAHs 组分均以 2~4 环 PAHs 为主,2~4 环组分浓度总和均达到 ∑18PAHs 浓度的 83.8% 以上,这说明厦门地区主要是以低分子量(2~3 环)和中分子量(4 环)的 PAHs 为主,这与叶翠杏等^[16]的研究相同.

表 2 不同环数 PAHs 浓度/ng·m⁻³

PAHs	郊区		城市	
	白天	夜晚	白天	夜晚
2 环	20.07	21.27	44.40	25.93
3 环	77.10	62.13	145.37	79.69
4 环	20.67	17.13	34.11	13.48
5 环	2.23	10.51	2.39	3.51
6 环	1.56	6.97	1.71	1.31
7 环	0.44	1.92	0.64	0.67
∑18PAHs	122.08	119.93	228.62	124.59

相对分子质量的不同,PAHs 分布也会有所不同. 由图 3 可见,随着粒径增大,高环(5~7 环) PAHs 在所在粒径段的比例逐渐减小,郊区高环 PAHs 在 2.1 ~ 3.3 μm 粒径段之后,所占比例基本为 0%,而低环 PAHs 所占比例逐渐增大,市区的不同环数 PAHs 比例分布情况在 1.1 ~ 2.1 μm 粒径段之后同样如此,这与顾凯华等^[17]和汤莉莉等^[18]的研究相同. 这可能是不同粒径的气溶胶粒子的来源是不同的,粒径在 2 μm 以上的粗粒子一般多来自局地自然源,而 2 μm 以下的细粒子,常与燃烧等人为污染排放有关,由于高环 PAHs 性质稳定,且易附着在细粒子上做长距离迁移,而厦门粗粒子上 PAHs 主要是局地源,主要贡献来自小分子量的 PAHs,粗粒子中 4 环以上 PAHs 含量较低^[18].

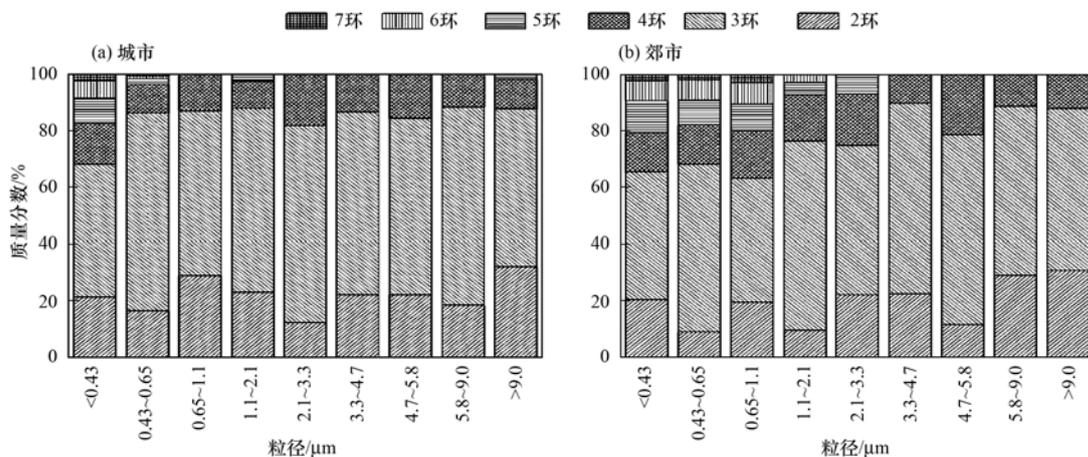


图3 城市和郊区不同环数的 PAHs 在不同粒径颗粒物上的质量分布

Fig. 3 Mass distribution of 2-7 rings PAHs at urban and suburban sites

2.3.2 白天 PM₁₀ 中不同环数 PAHs 粒径分布

白天市区和郊区气溶胶中不同环数 PAHs 的粒径分布如图 4, 其中误差棒显示的是一个标准偏差. 从中可知, 白天两个采样点 2~4 环的 PAHs 基本呈 3 峰及 3 峰以上的多峰分布, 积聚模态的峰位主要位于 $<0.43 \mu\text{m}$ 和 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$, 粗模态的峰位主要位于 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 和 $<9.0 \mu\text{m}$; 而 5~7 环 PAHs 基本呈单峰分布, 这与段菁春等^[19]对

广州秋季 PAHs 的研究成果相同, 但厦门郊区白天的峰位置在 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$, 市区白天的峰位于 $<0.43 \mu\text{m}$. PAHs 主要来自于煤、石油和垃圾焚烧, 并且粗颗粒物沉降速度较快, 积聚态颗粒物粒径较小, 难沉降, 宜于远距离传输, 而厦门属于轻污染地区, 并且粗粒子主要以局地源为主, 细颗粒物上的高分子量的 PAHs 可能是由污染较重的地区远距离传输而来.

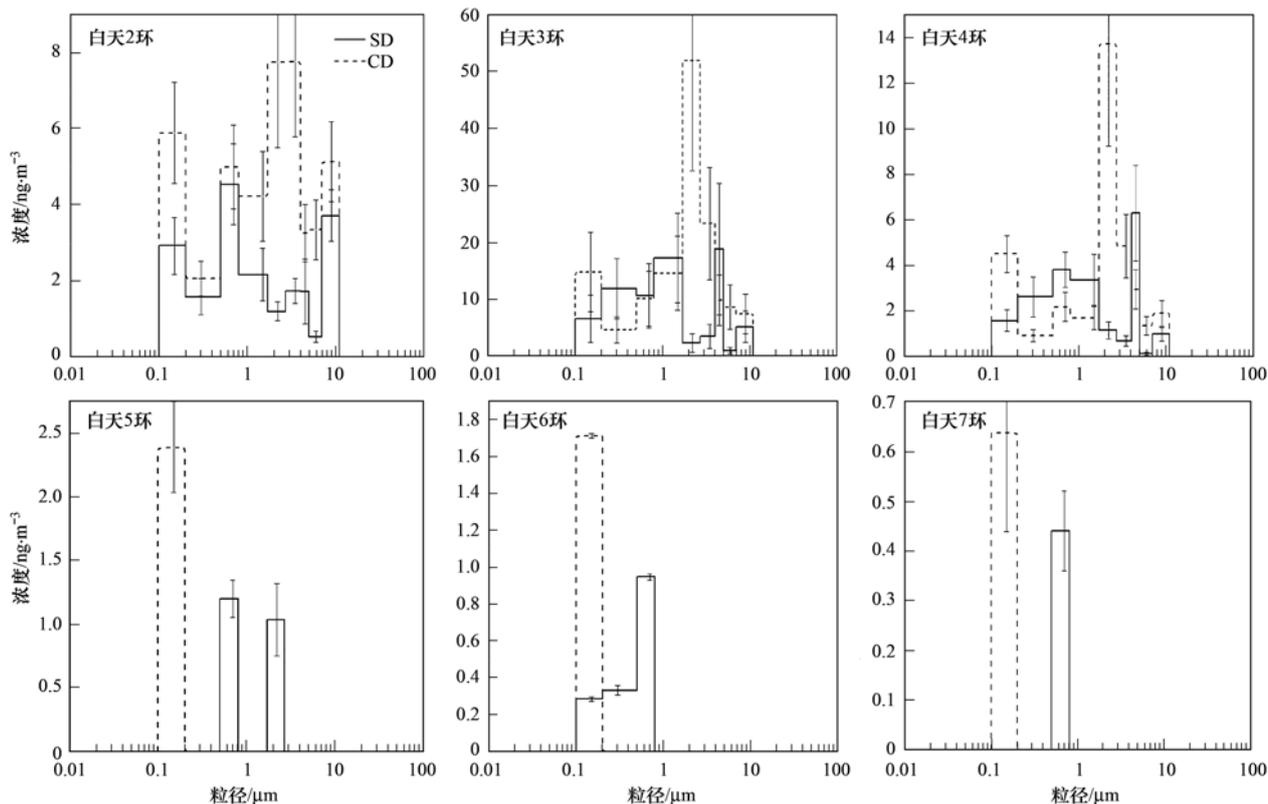


图 4 白天 2 个采样点不同环数 PAHs 的粒径分布

Fig. 4 Size distributions of different rings PAHs in the daytime at the two sites

2.3.3 夜晚 PM₁₀ 中不同环数 PAHs 粒径分布

夜晚郊区和市区 PM₁₀ 中不同环数 PAHs 粒径分布如图 5. 从中可知, 郊区夜间 2 环 PAHs 呈 4 峰型分布, 积聚模态峰分别位于 $<0.43 \mu\text{m}$ 和 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$, 粗模态的峰位于 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 和 $>9.0 \mu\text{m}$; 3~4 环 PAHs 在积聚模态呈单峰分布, 峰位于 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$, 3 环在粗模态呈双峰分布, 分别位于 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 和 $>9.0 \mu\text{m}$, 4 环在粗模态呈 3 峰分布, 分别位于 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 、 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 和 $>9.0 \mu\text{m}$; 市区夜间 2~4 环 PAHs 在积聚模态呈双峰分布, 峰的位置分别在 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 和 $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$, 在粗模态呈单峰分布, 2 环峰位于 $>9.0 \mu\text{m}$, 3 环和 4 环的峰都位于 $5.8 \sim 9.0 \mu\text{m}$. 郊区和市区夜间 5~7 环 PAHs 的峰位大多处于积聚模态,

峰位于 $<0.65 \mu\text{m}$. 这与 Duan 等^[20]在北京的研究成果相同, 这可能是由于低温影响了 PAHs 从积聚模态向粗模态的再分布所造成^[21].

以上结果显示, 市区的 PM₁₀ 中 2~4 环 PAHs 粒径的昼、夜分布有很大差异, 市区积聚模态和粗模态的 PAHs 白天峰位偏向于小粒径段, 市区夜间积聚模态和粗模态的峰位则都偏向于大粒径段, 而郊区 2~4 环 PAHs 的昼、夜分布特征却相似: 积聚模态和粗模态峰位都偏向于大颗粒物; 市区和郊区 5~7 环 PAHs 粒径的昼、夜分布差异不大: 呈单峰分布, 并且都位于积聚模态.

2.4 诊断比值法 (DR) 确定 PAHs 来源

诊断比值法是一种用来初步确定 PAHs 来源的有效方法, 因为可以用不同种类 PAHs 的特征比值

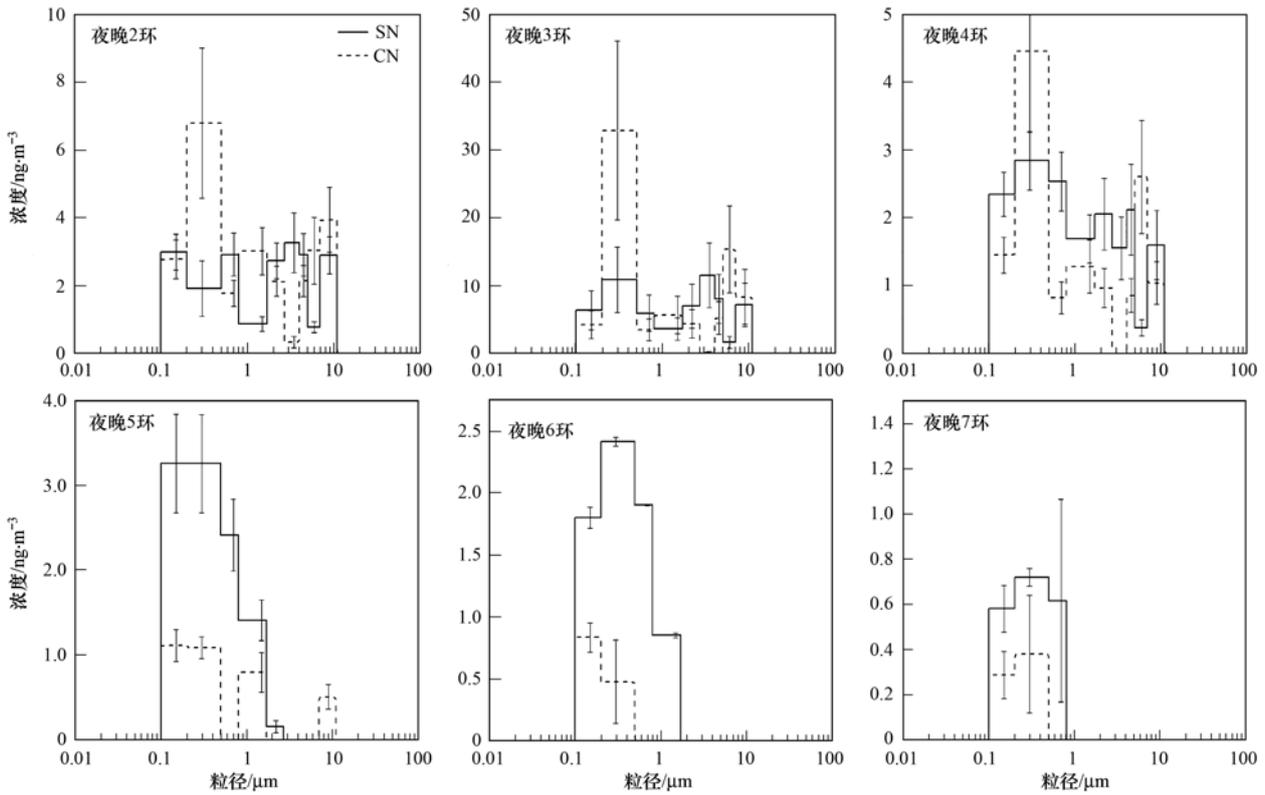


图 5 夜晚 2 个采样点不同环数 PAHs 的粒径分布

Fig. 5 Size distributions of different rings PAHs in the nighttime at the two sites

来确定具体源的特点,但在使用这种方法时必须谨慎,因为有一些PAHs在不同的环境中会发生不同的反应,例如苯并[a]芘(BaP)的光解等。

表 3 给出了不同 PAHs 源的诊断比值特征. 观测期间厦门市区和郊区昼、夜不同种类 PAHs 的比值特征在表 4 中给出. 在本研究中,郊区和市区昼、夜的 BaA/BaP 比值虽然大小变化相反,但变化范围相同,基本可以确定春季 PAHs 的来源受到汽油燃

烧的影响,这与 Hong 等^[2]在 2004 ~ 2005 年对厦门市 PAHs 源的研究结论相同. 白天 BaA/Chr 的比值(0.32 ~ 0.34)正好位于柴油燃烧源特征比值范围(0.2 ~ 0.4)和汽油燃烧源特征比值范围(0.3 ~ 1.2)之间,说明厦门春季白天 PAHs 同时受到柴油燃烧源和汽油燃烧源的影响,而夜晚的比值(0.21 ~ 0.29)则主要位于柴油燃烧源特征比值范围,说明厦门夜晚 PAHs 主要受到柴油燃烧源的影响。

表 3 诊断比值确定的 PAHs 来源

Table 3 Diagnostic ratios of PAHs attributed to specific sources

类型	BaA/BaP	BaA/Chr	Pyr/BaP	BaP/BghiP	Flu/(Flu + Pyr)	BbF/BkF
柴油燃烧	1 ^[22]	0.2 ~ 0.4 ^[23]	~ 10 ^[25]	0.3 ~ 0.4 ^[26]	> 0.5 ^[29]	> 0.5 ^[31]
汽油燃烧	0.5 ^[22]	0.3 ~ 1.2 ^[23]	~ 1 ^[25]	0.5 ~ 0.6 ^[27]	< 0.5 ^[29]	1.1 ~ 1.5 ^[32]
冶炼		1.0 ~ 1.2 ^[24]		0.9 ~ 6.6 ^[28]	0.57 ^[30]	3.5 ~ 3.9 ^[33]
煤炭		0.5 ~ 0.7 ^[24]				2.5 ~ 2.9 ^[33]

观测期间 Pyr/BaP 的比值除了市区白天出现高值之外,其他比值(3.87 ~ 7.45)基本位于柴油燃烧源的特征比值范围之内,而市区白天的比值出现高值可能是因为原油成分的变化而导致的大气中 BaP 浓度的变化所造成^[34]. 郊区白天和市区夜晚 BaP/BghiP 的比值(1.12 ~ 1.25)位于冶炼厂排放源的特征比值范围内(0.9 ~ 6.6),说明这两个时段内

PAHs 的来源受到冶炼厂排放的影响,郊区夜晚(0.31)和城市白天的比值(0.54)说明这两个时段内 PAHs 分别来源于柴油燃烧排放和汽油燃烧排放. Flu/(Flu + Pyr) 的比值范围(0.65 ~ 0.76)都具有柴油燃烧源的特征比值(> 0.5).

BbF 和 BkF 都是分子量高的 PAHs,它们不像那些低分子量的 PAHs 一样,容易随着环境条件的变化

而变化,它们的比值显示,郊区和市区昼、夜 PAHs 的来源受到了柴油燃烧和冶炼厂排放的影响。

表 4 市区和郊区 PAHs 的诊断参数

Table 4 Molecular diagnostic ratios of PAHs at urban and suburban sites

项目	郊区		市区	
	白天	夜晚	白天	夜晚
BaA/BaP	0.20	0.55	0.50	0.11
BaA/Chr	0.32	0.29	0.34	0.21
Pyr/BaP	7.45	5.09	28.58	3.87
BaP/BghiP	1.12	0.31	0.54	1.25
Flu/(Flu + Pyr)	0.65	0.68	0.65	0.76
BbF/BkF	3.90	3.10	2.98	3.40

由此可见,厦门春季市区和郊区 PAHs 的主要贡献源为汽油和柴油的燃烧,只有小部分比值显示有市区和郊区都受到冶炼厂排放的影响,说明厦门地区虽然存在一些重污染的冶炼炉,并对市区和郊

区的环境有影响,但影响不大。

2.5 PAHs 与气象要素相关性分析

表 5 表示的是 \sum PAHs 与气象要素例如温度 (T)、能见度 (VB) 和风向 (WD)、风速 (WS) 的相关性。如果假设 PAHs 来源是局地源,环境浓度与风速之间是负相关时,则表示悬浮粒子在风速小的时候累积,在风速大的时候减少。在厦门春季采样期间,郊区昼、夜的 \sum PAHs 浓度与风速呈现正相关关系,而市区则相反,呈现负相关关系,在采样期间,郊区和市区的风速都很小(平均风速为 $1.34 \sim 3.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),其中风速与市区夜晚的相关性最小;而能见度与 \sum PAHs 浓度的相关性则与风速一致,在郊区呈现正相关,而在市区呈现负相关,其中市区的相关性要强于郊区;除了市区夜晚,其他采样时段内, \sum PAHs 浓度与温度都呈现一种负相关性,其中市区夜晚相关系数最小。

表 5 \sum PAHs 浓度与气象要素的皮尔森相关性

Table 5 Pearson correlation coefficients between \sum PAHs concentrations and meteorological factors

位置	时间	T	VB	WS	WD
郊区	白天	-0.795	0.590	0.789	-0.794
	夜晚	-0.715	0.538	0.653	-0.266
市区	白天	-0.509	-0.832	-0.709	0.688
	夜晚	0.199	-0.815	-0.387	0.790

从图 6 中可以看出,在厦门春季采样期间,郊区风速小的时候,一般吹西南风,风从海面吹向岛内,带来清洁的气团,而风速大的时候一般吹东北风,风从大陆风向吹向岛内,带来大陆的污染气团,所以在郊区 \sum PAHs 浓度与风速呈正相关关系,与风向呈

负相关关系;而市区的情况则与郊区相反, \sum PAHs 浓度与风速呈负相关关系,与风向呈正相关关系,这与表 5 所显示的皮尔森相关分析结果相符。

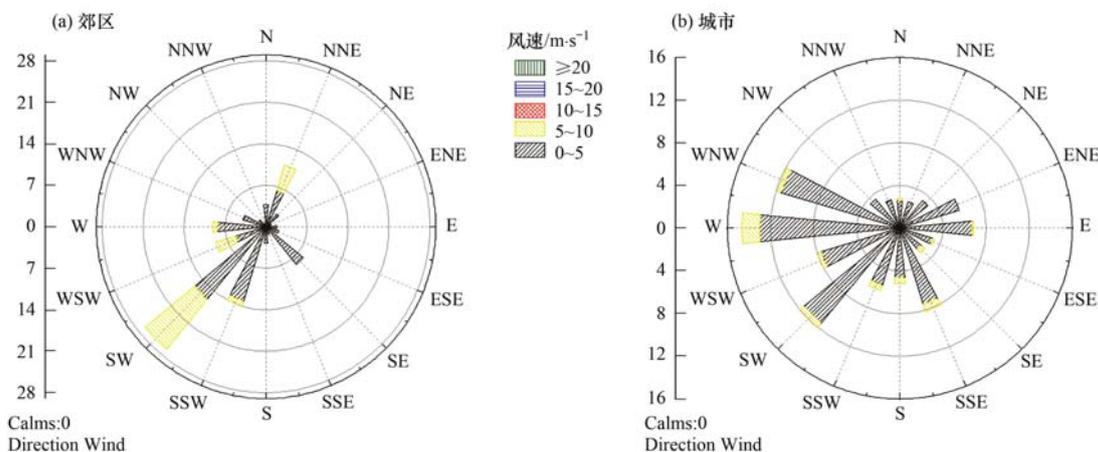


图 6 采样期间内郊区和城市的风向玫瑰图

Fig. 6 Variation of wind direction frequency during sampling time at urban and suburban sites

3 结论

(1) 研究发现厦门郊区 \sum PAHs 昼夜变化不大, 夜间略比白天低; 市区 \sum PAHs 昼夜变化很大, 是夜间的 1.83 倍; 在不同的时间和空间尺度下, \sum PAHs 均呈双峰型分布, 积聚模态和粗模态的峰大多偏向于小粒径段。

(2) 市区和郊区昼、夜的 PAHs 组分均以中低环数 PAHs 为主; 高环数 PAHs 随着粒径的增大而逐渐减小, 而低环数 PAHs 所占比例逐渐增大, 这可能是由于高环数 PAHs 性质稳定, 容易随着细粒子迁移, 而粗粒子主要来自局地源, 受本地植物排放的低环数 PAHs 影响大。市区的 PM_{10} 中 2~4 环 PAHs 粒径的昼、夜分布有很大差异, 而 5~7 环差异不大。

(3) 厦门春季市区和郊区 PAHs 的主要贡献源为汽油、柴油的燃烧和冶炼厂的熔炉排放的废气。

(4) 在采样期间, 郊区 \sum PAHs 浓度与温度、风向呈负相关关系, 与能见度和风速呈正相关关系, 而市区的 \sum PAHs 浓度除白天与温度的相关性跟郊区相同外, 与其他气象要素相关性和郊区基本相反。

参考文献:

- [1] Grote M, Schtüttermann G, Altenburger R. Modeling photoinduced algal toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39** (11): 4141-4149.
- [2] Hong H S, Yin H L, Wang X H, *et al.* Seasonal variation of PM_{10} -bound PAHs in the atmosphere of Xiamen, China [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **85** (3-4): 429-441.
- [3] Cancio J A L, Castellano A V, Martin S S, *et al.* Size distributions of PAHs in ambient air particles of two areas of Las Palmas de Gran Canaria [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **154** (1-4): 127-138.
- [4] Wu S P, Wang X H, Yan J M, *et al.* Diurnal variations of particle-bound PAHs at a traffic site in Xiamen, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, **10** (5): 497-506.
- [5] Cai C, Zhang Y C, Reid B J, *et al.* Carcinogenic potential of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen metropolis, China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14** (12): 311-13117.
- [6] 刘碧莲, 吴水平, 杨冰玉, 等. 大气中多环芳烃气/粒分配的不确定性分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32** (9): 2794-2799.
- [7] 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.
- [8] 陈训来, 冯业荣, 范绍佳, 等. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响 [J]. *大气科学*, 2008, **32** (3): 530-542.
- [9] 钱冉冉, 闫景明, 吴水平, 等. 厦门市冬春季灰霾期间大气 PM_{10} 中多环芳烃的污染特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2012, **33** (9): 2939-2945.
- [10] GB 3095-2012, 环境空气质量标准 [S].
- [11] 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2012, **33** (7): 2172-2179.
- [12] Phoonthiwut S, Junyapoon S. Size distribution of atmospheric particulates and particulate-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and characteristics of PAHs during haze period in Lampang Province, Northern Thailand [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2013, **6** (2): 397-405.
- [13] 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.
- [14] 沈志来, 黄美元, 吴玉霞. 西太平洋热带海域海盐粒子的观测和结果 [J]. *大气科学*, 1989, **13** (1): 87-91.
- [15] 谢鸣捷, 王格慧, 胡淑圆, 等. 南京夏秋季大气颗粒物和 PAHs 组成的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2008, **28** (10): 867-871.
- [16] 叶翠杏, 王新红, 印红玲, 等. 厦门市不同功能区冬季 PM_{10} 中多环芳烃的污染特征 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26** (9): 1532-1538.
- [17] 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.
- [18] 汤莉莉, 牛生杰, 樊曙先, 等. 瓦里关及西宁 PM_{10} 和多环芳烃谱分布的观测研究 [J]. *高原气象*, 2010, **29** (1): 236-243.
- [19] 段青春, 毕新慧, 谭吉华, 等. 广州秋季不同功能区大气颗粒物中 PAHs 粒径分布 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (4): 624-630.
- [20] Duan J C, Bi X H, Wang S L, *et al.* Roadside, Urban, and Rural comparison of size distribution characteristics of PAHs and carbonaceous components of Beijing, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2012, **69** (4): 337-349.
- [21] Duan J C, Bi X H, Tan J H, *et al.* Seasonal variation on size distribution and concentration of PAHs in Guangzhou city, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **67** (3): 614-622.
- [22] Li C K, Kamens R M. The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, **27** (4): 523-532.
- [23] Simcik M F, Eisenreich S J, Liroy P J, *et al.* 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.
- [24] Gschwend P M, Hites R A. Fluxes of polycyclic aromatic

- hydrocarbons to marine and lacustrine sediments in the northeastern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, **45**(12): 2359-2367.
- [25] Oda J, Nomura S, Yasuhara A, *et al.* Mobile sources of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in a roadway tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(28): 4819-4827.
- [26] Bourotte C, Fortic M C, Taniguchi S, M C *et al.* A wintertime study of PAHs in fine and coarse aerosols in São Paulo city, Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3799-3811.
- [27] Ravindra R, Sokhi R, Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(13): 2895-2921.
- [28] Akyüz M, Çabuk H. Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak, Turkey [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **405**(1-3): 62-70.
- [29] Ravindra K, Bencs L, Wauters E, *et al.* Seasonal and site-specific variation in vapour and aerosol phase PAHs over Flanders (Belgium) and their relation with anthropogenic activities [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(4): 771-785.
- [30] Galarneau E. Source specificity and atmospheric processing of airborne PAHs: implications for source apportionment [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(35): 8139-8149.
- [31] Park S S, Kim Y J, Kang C H. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Seoul, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(17): 2917-2924.
- [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] Masclet P, Bresson M A, Mouvier G. Polycyclic aromatic hydrocarbons emitted by power stations, and influence of combustion conditions [J]. *Fuel*, 1987, **66**(4): 556-562.
- [34] Zhang X L, Tao S, Liu W X, *et al.* Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons based on species ratios: a multimedia approach [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(23): 9109-9114.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行