

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

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

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
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	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨延钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岚璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOCs)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

厦门市冬春季灰霾期间大气 PM₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析

钱冉冉, 闫景明, 吴水平, 王新红*

(厦门大学环境科学与工程系, 环境科学研究中心, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005)

摘要: 采集了厦门市冬春季(2008-12-04 ~ 2009-03-20)湖里工业区和大嶝岛旅游区大气 PM₁₀ 样品, 用 GC-MS 定量了 PM₁₀ 负载的 19 种多环芳烃(PAHs), 并结合采样期间气象资料对灰霾期和非灰霾期多环芳烃的差异特征进行对比分析。结果表明, 冬春季采样期内, 厦门市大气 PM₁₀ 中 PAHs 的浓度变化范围为 12.93 ~ 79.27 ng·m⁻³, 平均 42.28 ng·m⁻³, 比 2004 年冬季增长近 3 倍。灰霾期间 PM₁₀ 中 PAHs 总的质量浓度明显高于非灰霾期, 并且灰霾期间低分子量组分菲、荧蒽和芘的质量分数显著下降, 高分子量组分苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧、苯并[a]芘、芘、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[ghi]芘和晕苯的质量分数相对升高。采用特征化合物比值、主成分分析与多元线性回归对来源与贡献率进行了分析和估算。灰霾期间识别出 3 类污染源: 机动车尾气排放 + 天然气燃烧、煤燃烧和焦炉排放, 其贡献率分别为 62.7%、28.1% 和 9.2%; 非灰霾期间同样识别出这 3 类污染源, 其贡献率分别为 48.6%、36.9% 和 14.5%。表明厦门市冬春季灰霾期间 PM₁₀ 中 PAHs 受本地源排放影响相对较多, 非灰霾期间受北方燃煤长距离传输影响更显著。

关键词: 厦门市; 多环芳烃; 灰霾; 气象条件; 主成分分析/多元线性回归分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-2939-07

Characteristics and Sources of PM₁₀-bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen

QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, WANG Xin-hong

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Center, Department of Environmental Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: PM₁₀ samples were collected at Huli (industrial zone) and Dadeng Island in Xiamen from December 2008 to March 2009. Nineteen polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during haze and non-haze periods were determined by GC/MS. Combined with the meteorological data, the differences of chemical composition and source of PAHs were compared. During sampling periods, the concentrations of PM₁₀-bound PAHs ranged from 12.93 to 79.27 ng·m⁻³ with the average of 42.28 ng·m⁻³, which were almost three times higher than those in the winter of 2004. PAHs concentrations were much higher during the haze periods than those in the non-haze periods. Meanwhile, during the haze periods the percentages of lower molecular weight PAHs such as Phe, Fluo and Pyr decreased significantly, on the contrary, individual components of BbF, BkF, BaP, Per, Icdp, BghiP and COR were more abundant. The main sources of PAHs were estimated by the Principal Component Analysis method and the contributions of various pollution sources to PAHs were calculated by the Multiple Linear Regression method. Results showed that the main pollutant sources of PM₁₀-bound PAHs in winter-spring of Xiamen during the haze period were vehicle emission plus natural gas, coal combustion and coke oven, their contribution rates were 62.7%, 28.1% and 9.2%, respectively. During non-haze periods, the main pollutant sources identified were the same and the contribution rates were 48.6%, 36.9% and 14.5%, respectively. In winter-spring of Xiamen, PM₁₀-bound PAHs were more influenced by local emission sources during the haze periods; coal combustion emissions in north China had a big contribution to PAHs during the non-haze periods.

Key words: Xiamen city; PAHs; haze; meteorological condition; principal component analysis and multiple linear regression

厦门位于福建省东南部, 濒临台湾海峡, 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, 历年来环境监测的大气污染物各项指标均高于国家大气质量一级标准, 但近年来随着经济的发展, 灰霾现象也日趋严重^[1], 已经成为当地新的灾害性天气。已有研究表明, 灰霾不仅对人类的身体健康、交通安全及农作物的生长发育有较大的影响, 而且还会影响人们的

心理健康, 使人产生压抑、悲观等不良情绪^[2~4]。

目前国内外对灰霾的研究较多, 主要集中在灰霾的天气特征、污染成因、影响等方面^[5~8], 而针对

收稿日期: 2011-11-25; 修订日期: 2011-12-16

基金项目: 环保公益项目(201009004); 厦门市科技计划项目(3502Z20093013)

作者简介: 钱冉冉(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: qrr@stu.xmu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xhwang@xmu.edu.cn

灰霾期间多环芳烃(PAHs)的污染变化特征、来源的研究还较少,国内仅有广州在这方面开展了一些工作^[9,10]. 本实验室已对厦门市大气中 PAHs 的化学特征、健康风险评价等做了大量研究^[11~13],本研究拟通过对灰霾与非灰霾时期 PAHs 特征的对比分析,探讨厦门市冬春季灰霾期间大气 PM₁₀ 中 PAHs 的污染特征、污染来源和贡献率,以期对灰霾期间多环芳烃的控制、灰霾预警机制的建立及对人体健康风险评价提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

本研究设置 2 个采样点,一个位于厦门湖里区(工业区)的湖里实验小学楼顶(20 m),采样点周围属于居住和交通密集区;另一个位于厦门大嶝岛(旅游区)大嶝中学楼顶(20 m),采样点靠海,周围交通污染源少. 采样器均使用青岛崂山分析仪器厂的崂应 2031 智能型大流量 TSP-PM₁₀ 采样器,配备 PM₁₀ 切割头,采样流量为 1.05 m³·min⁻¹,每个样品采集 24 h,08:00 至次日 08:00. 石英滤膜(203 mm × 254 mm, Pallflex 2500 QAT-UP, Pall Life Science, USA)收集样品,使用前滤膜置于 600℃ 马弗炉中焙烧 8 h,密封到铝箔中备用. 滤膜在采样前和采样结束后平衡称重,置于冰箱中(−20℃)避光保存至分析. 采样时间为 2008-12-04 ~ 2009-03-20,共收集灰霾期样品 18 个,非灰霾期样品 10 个. 采样期间的瞬时气象数据资料来自 <http://www.underground.com/>,厦门高崎国际机场数据(机场距湖里区 5 km、距大嶝岛 15 km 左右).

1.2 样品前处理及仪器分析

将滤膜剪碎放入离心管中,在溶剂萃取前加入 5 种氘代 PAHs(萘-D8、苊-D10、菲-D10、蒽-D12、芘-D12)作为回收率指示物,接着用二氯甲烷分 3

次超声萃取 30 min. 萃取液浓缩后用硅胶层析柱(柱规格:45 cm × 1 cm)净化(10 g, 60 ~ 80 目, 450℃ 灼烧后 130℃ 活化 16 h 以上),依次用 25 mL 正己烷、50 mL 正己烷/二氯甲烷(6:4, 体积比)淋洗饱和烃和 PAHs 组分. 正己烷、二氯甲烷均为色谱纯. PAHs 洗脱液水浴旋转蒸发浓缩、柔和氮吹至 0.2 mL,保存至棕色样品中上机检测. PAHs 组分采用 GC-MS(Agilent GC6890/5973 MSD)分析测定,GC 条件:HP-5 MS 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm 毛细管色谱柱,载气为高纯 He,不分流进样,进样量 1 μL,初始柱温 60℃,以 5℃·min⁻¹ 速度升温至 300℃,保留 20 min 至样品完全流出. MSD 条件:EI 电离源 70 eV,质量范围 50 ~ 500 u,倍增器电压 1 288 V,离子源温度 250℃,选择离子检测(SIM)模式. 目标物除了 16 种 USEPA 优控 PAHs(Nap:萘、Ace:苊烯、Acen:苊、Flu:芴、Phe:菲、Ant:蒽、Fluo:荧蒽、Pyr:芘、BaA:苯并[a]蒽、Chr:蒽、BbF:苯并[b]荧蒽、BkF:苯并[k]荧蒽、BaP:苯并[a]芘、Icdp:茚并[1,2,3-cd]芘、BghiP:苯并[ghi]芘、DBA:二苯并[a,h]蒽),还有苯并[e]芘(BeP)、芘(Per)和晕苯(COR).

1.3 质量控制和质量保证

实验过程中所有操作都经过严格的质量控制. 采用现场空白和实验室空白来检测样品采集及分析过程中的人为干扰. 空白实验表明,实验过程中存在的微量污染,对结果的分析 and 定量研究不影响. 以马弗炉焙烧过的干净石英滤膜作基质加标实验,经过同样的分析步骤对实验回收率进行评价,结果表明,回收率在 77.9% ~ 104.7% 之间. 本实验方法检测限为 3.0 × 10⁻³ ~ 5.6 × 10⁻² ng·m⁻³,具体数据见表 1. 文中给出数据均经回收率和空白值校正. 由于萘的挥发性较高且实验中可能的污染较大,本文没有列出萘的研究结果.

表 1 PAHs 的回收率和检测限

Table 1 Recovery ratios and method detection limits of 19 PAHs

化合物	回收率/%	检测限/ng·m ⁻³	化合物	回收率/%	检测限/ng·m ⁻³
Nap	104.10	0.009	BbF	96.30	0.027
Ace	84.70	0.004	BkF	93.90	0.013
Acen	93.90	0.012	BeP	82.50	0.022
Flu	99.10	0.009	BaP	77.90	0.020
Phe	104.70	0.006	Per	86.40	0.018
Ant	93.30	0.003	Icdp	84.20	0.056
Fluo	102.40	0.008	BghiP	91.50	0.043
Pyr	101.90	0.008	DBA	93.60	0.041
BaA	93.40	0.014	COR	89.60	0.035
Chr	102.20	0.010			

2 结果与讨论

2.1 灰霾和非灰霾时期的气象条件差异

厦门市位于福建省东南部,濒临台湾海峡,地处亚热带,年平均气温为 21℃. 冬季平均温度 0℃ 以上,无霜,有东北季风,冷而不寒. 本研究定义,排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象造成的视程障碍,凡是能见度 < 10 km、相对湿度 < 95% 的记为灰霾^[14]. 表 2 为采样期间的气象条件,灰霾期间能见度和风速显著低于非灰霾时期,几乎只有非灰霾时期的 1/2 ~ 1/3,灰霾期间湿度和温度很明显高于非灰霾时期. 灰霾采样时期平均 PM₁₀ 浓度远高于非灰霾时期,是非灰霾时期的

1.6 倍. 根据厦门市空气质量日报,本研究灰霾期间平均空气污染指数 (air pollution index, API) 为 71,明显高于非灰霾时期,显示出灰霾时期较差的空气质量状况.

本研究采样时间为 2008-12-04 ~ 2009-03-20,其中 1 月 8 ~ 10 日、1 月 14 日和 2 月 28 日为非灰霾天气,其他时间为灰霾天气. 图 1 为采样期间能见度、相对湿度和风速的瞬时值. 从中可以看出:能见度和风速存在一定的正相关性,灰霾期风速较低,不利于大气颗粒物的扩散;能见度和相对湿度则存在显著的负相关性,灰霾期平均湿度较高,细颗粒物吸湿凝结增强光散射,降低能见度且高湿度不利于颗粒物扩散.

表 2 厦门市采样期间的气象条件

Table 2 Meteorological conditions during sampling periods in Xiamen						
采样时间	能见度/km	相对湿度/%	风速/km·h ⁻¹	温度/℃	PM ₁₀ /μg·m ⁻³	API
灰霾	6.5	72.8	13.9	18.0	139.0	71
非灰霾	15.6	45.8	23.5	11.7	88.3	52

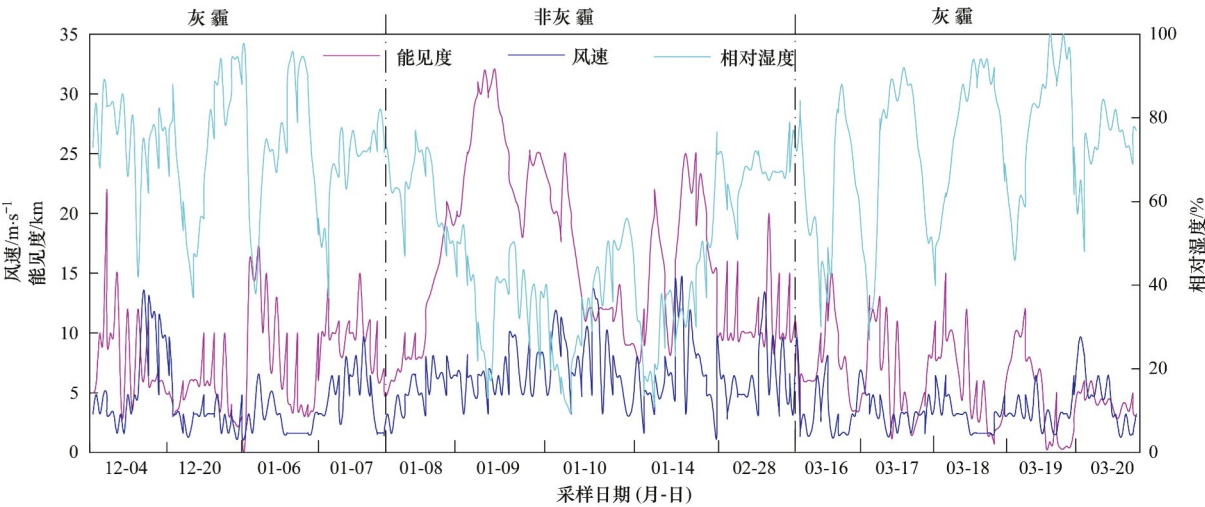


图 1 采样期间能见度、相对湿度和风速

Fig. 1 Visibility, relative humidity and wind speed during sampling periods

2.2 灰霾和非灰霾期间 PAHs 的含量和组成分布特征

2 个采样点采样期间大气 PM₁₀ 中多环芳烃的含量见表 3. 扣除挥发性较高的 NaP 后,湖里工业区和大嶝旅游区冬春季灰霾期间大气 PM₁₀ 中 18 种 PAHs 的含量分别为 48.87 ng·m⁻³ (28.13 ~ 79.27 ng·m⁻³) 和 45.70 ng·m⁻³ (20.09 ~ 76.44 ng·m⁻³), 远高于文献[6]灰霾期 PM₁₀ 中 PAHs 的含量 0.5 ~ 29.8 ng·m⁻³, 低于广州冬季老城区灰霾期 (平均 87.1 ng·m⁻³, PM₁₀ 中 14 种 PAHs); 非灰霾期 2 个采样点的含量分别为 39.51 ng·m⁻³ (12.93 ~ 67.97

ng·m⁻³) 和 27.82 ng·m⁻³ (19.35 ~ 43.83 ng·m⁻³), 高于广州冬季老城区非灰霾期 (平均 24.3 ng·m⁻³)^[9]. 由此可见,厦门市冬春季非灰霾期 PAHs 的污染仍处于较高水平. 灰霾期 PAHs 的污染水平大约是非灰霾期的 1.4 ~ 1.6 倍.

叶翠杏等^[15]的研究表明,2004 年冬季湖里区 15 种 PAHs 的含量 (15.86 ± 4.99) ng·m⁻³, 与此相比,4 a 间厦门湖里区冬季 (同样的 15 种 PAHs) 多环烃的含量增长 2.54 倍左右. 大嶝岛旅游区无工业,有东南沿海最纯净海域,水质、空气质量符合国家环境一级标准,号称“天然氧吧”,但是 PAHs 含量

表 3 不同采样点 PM₁₀ 中多环芳烃的浓度分布/ng·m⁻³Table 3 Average concentrations of PAHs in PM₁₀ samples collected from two sites/ng·m⁻³

PAHs	湖里灰霾		湖里非灰霾		大嶝灰霾		大嶝非灰霾	
	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
Ace	0.11	0.05~0.20	0.09	0.04~0.18	0.09	0.04~0.15	0.07	0.03~0.11
Acen	0.02	0.01~0.03	0.02	0~0.05	0.03	0~0.09	0.02	0.01~0.04
Flu	0.12	0.06~0.20	0.12	0.04~0.22	0.12	0.04~0.33	0.08	0.04~0.13
Phe	1.50	0.53~2.46	2.43	0.47~5.51	1.15	0.53~1.79	2.31	0.78~3.85
Ant	0.14	0.08~0.25	0.19	0.06~0.36	0.12	0.04~0.18	0.16	0.08~0.26
Fluo	3.05	0.66~5.84	4.37	0.89~6.73	2.84	1.45~4.26	3.75	1.83~6.25
Pyr	2.97	0.78~5.12	3.86	0.92~7.79	2.82	1.46~3.9	2.96	1.80~4.75
BaA	2.54	1.63~4.49	2.09	0.59~3.35	2.63	0.89~5.07	1.18	0.89~1.90
Chr	5.44	2.73~8.27	4.74	1.43~8.30	5.31	2.42~7.56	3.24	2.21~5.26
BbF	5.61	3.22~9.84	4.01	1.50~6.15	5.21	2.52~9.00	2.93	2.34~4.41
BkF	5.95	3.85~10.26	3.93	1.44~6.16	5.22	2.29~8.57	2.62	0.3~4.46
BeP	4.77	3.24~8.03	3.50	1.19~5.46	4.45	1.97~7.71	2.69	1.96~3.48
BaP	4.55	2.75~8.53	2.90	0.73~4.72	4.16	1.04~8.93	1.80	1.04~2.98
Per	1.49	1.02~2.73	0.87	0.35~1.39	2.15	0.47~5.41	0.56	0.44~0.91
Icdp	4.81	2.93~9.23	3.02	0.87~4.76	4.41	1.58~9.82	1.98	1.51~2.87
BghiP	4.47	2.75~8.65	2.54	0.75~3.73	3.89	1.27~8.60	1.59	1.34~2.29
DBA	0.49	0.34~0.91	0.32	0.08~0.53	0.51	0.14~1.31	0.21	0.15~0.32
COR	1.23	0.56~2.00	0.50	0.18~0.86	0.98	0.21~1.93	0.29	0.21~0.42
∑ PAHs	48.87	28.13~79.27	39.51	12.93~67.97	45.70	20.09~76.44	27.82	19.35~43.83

与湖里工业区几近相当。这是由于在盛行东北季风的冬春季,可能受到临近上风向石化业发达的泉州、厦门岛外地区排放源的影响。

厦门市冬春季灰霾和非灰霾期间 PAHs 的分布也存在差异,且 2 个采样点的差异特征基本相同,故合并两点灰霾和非灰霾数据作图。如图 2 所示,灰霾期间 Phe、Fluo 和 Pyr 这 3 种组分的百分含量明显降低,而组分 BbF、BkF、BaP、Per、Icdp、BghiP 和 COR 的含量相对升高。据统计,可吸入颗粒物 PAHs 中 2~3 环轻组分的百分含量为 9.9%,远低于非灰霾时的 19.9%,5~6 环重组分灰霾期 44.5% 高于非灰霾期的 33.9%,4 环组分百分含量基本相当。灰霾期有着不同于非灰霾期的气粒分配特征,其主要原因可能跟气象条件有着紧密的联系。灰霾期间温度稍高于非灰霾期,轻组分 PAHs 化合物受温度影响大,随着温度的升高这些轻组分的 PAHs 更易挥发到大气中,以气态形式存在,这是造成灰霾与非灰霾大气 PM₁₀ 中 PAHs 成分谱差别的一个原因。段菁春等^[9]对广州冬季灰霾的研究中也得出类似的结论。但是由温度造成的这种影响对每种 PAHs 组分也不一致,其具体影响机制还有待进一步研究。

由于 BaP 易于光降解、氧化,BaP/BeP 的比值可用来指示 PAHs 在大气中的滞留时间,比值越大表示 PAHs 在环境中存在的时间越长。本研究灰霾

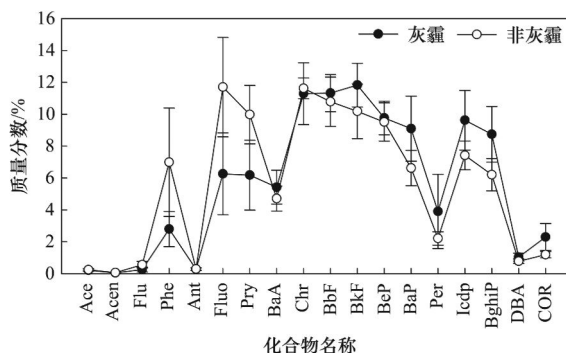
图 2 灰霾和非灰霾期 PM₁₀ 中 PAHs 的分布特征

Fig. 2 Contributions of individual compounds to the sum of all investigated PAHs at Xiamen

和非灰霾期间 BeP/BaP 比值分别为 1.10 ± 0.16 和 1.47 ± 0.24 。厦门冬春季盛行东北季风,非灰霾期间受较大东北风的冲刷,本地新鲜排放源相对减少,外来源(北方长距离传输)增大。灰霾期间受静风条件影响颗粒物来自本地新鲜排放的比重较大,另一方面灰霾期间光照相对减弱,BaP 的光降解、氧化量减少。同时,BaP 被认为是 PAHs 中毒性最大的一种强烈致癌物,常被做为健康风险评价的代表性化合物。厦门市冬春季 PM₁₀ 中非灰霾期间 BaP 浓度为 $2.35 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,低于国内冬季北京(郊区: $11.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,城乡结合部: $14.3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[16]、上海($32.98 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[17]、广州($7.86 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[18]等特大城市,但明显高于冬季欧美发达国家,如洛杉矶

(1.3 ng·m⁻³)^[19]、伯明翰(0.8 ng·m⁻³)^[20]、芝加哥(1.4 ng·m⁻³)^[21]等,说明厦门市冬春季 BaP 污染较重. 灰霾期间 BaP 平均浓度为 4.37 ng·m⁻³,是非灰霾期间浓度的 1.9 倍,厦门市冬春季灰霾对人体健康的威胁比较严重.

2.3 灰霾和非灰霾期间 PAHs 的来源解析

环境中的 PAHs 主要来源于人类活动中的有机物的不完全燃烧,如化石燃料的燃烧、垃圾焚烧等,以及火山喷发、森林火灾等自然活动. 不同污染源产生的 PAHs 具有不同的谱分布特征,因此可利用这种差异判断来源. 特征化合物含量比值法是最常用的一种辨别大气中 PAHs 污染源的定性方法. 研究表明,当 Fluo/(Fluo + Pyr) 的比值 > 0.5 时,PAHs 来源为煤或者生物质的燃烧,比值 < 0.4 时,说明 PAHs 来源于石油的燃烧,比值介于 0.4 和 0.5 之间时则表明来自于液化化石燃料的燃烧;当 Icdp/(Icdp + BghiP) 的比值 > 0.5 时,也表明 PAHs 来源为煤或生物质的燃烧^[22]. 如表 4 所示,本研究的 2 种特征比值均在 0.5 左右. 灰霾期间两比值的平均值均稍低于非灰霾天气,但在统计学意义上比值差别不大,均指示相同或相似的来源,说明无论是灰霾天气还是非灰霾天气,厦门市冬春季机动车尾气、煤/生物质燃烧等的排放对大气 PM₁₀ 中多环芳烃的贡献较大.

表 4 不同采样时期 PAHs 的特征比值				
Table 4 Diagnostic ratios of PAHs during two sampling periods				
特征比值	灰霾		非灰霾	
	范围	均值	范围	均值
Fluo/(Fluo + Pyr)	0.45 ~ 0.54	0.49	0.48 ~ 0.58	0.53
Icdp/(Icdp + BghiP)	0.50 ~ 0.56	0.53	0.52 ~ 0.57	0.54

在确定 PAHs 的来源时,除最常用的特征比值法外,主成分分析和多元线性回归法(principal component analysis and multiple linear regression, PCA/MLR)也在大气污染解析上得到广泛应用^[23,24]. 与比值法相比,它更能从 PAHs 所有组分总体上把握,可以较为准确地给出不同来源的相对贡献率,进而对控制污染提供参考.

本研究利用统计软件 SPSS 对 18 种 PAHs 的浓度数据采用主成分提取法提取因子并结合方差极大旋转进行主成分分析,提取特征值 > 0.8 的因子,包含了原始数据信息的 87% 以上,因此用 PCA 法来分析厦门市冬春季颗粒物中 PAHs 的来源是可行的. 表 5 中同时列出了 18 种 PAHs 的因子载荷结果.

灰霾期间,第一个因子中主要负荷以高环 PAHs (相对分子质量 ≥ 228) 为主,包括 BbF、BkF、BeP、BaP、Icdp、BghiP、DBA、COR 等. 高环 PAHs 大多来自汽车尾气排放,BbF、BkF 来源于柴油不完全燃

表 5 方差极大旋转后的主因子载荷

Table 5 Rotated component matrix						
PAHs	灰霾			非灰霾		
	主因子 1	主因子 2	主因子 3	主因子 1	主因子 2	主因子 3
Ace	0.233	0.799	0.297	0.498	0.701	0.471
Acen	-0.212	0.365	0.880	0.180	0.311	0.923
Flu	-0.062	0.638	0.739	0.670	0.603	0.385
Phe	0.043	0.971	0.168	0.240	0.897	0.327
Ant	0.355	0.797	0.156	0.505	0.841	-0.039
Fluo	-0.001	0.948	0.053	0.454	0.831	0.300
Pyr	0.035	0.945	0.117	0.536	0.778	0.296
BaA	0.903	0.133	0.099	0.915	0.372	0.141
Chr	0.663	0.529	0.210	0.808	0.559	0.185
BbF	0.921	0.235	0.137	0.877	0.444	0.154
BkF	0.923	0.198	0.173	0.907	0.391	0.130
BeP	0.969	0.158	0.069	0.828	0.467	0.263
BaP	0.964	-0.046	0.039	0.879	0.432	0.186
Per	0.267	0.032	0.931	0.953	0.243	0.104
Icdp	0.948	0.073	-0.110	0.899	0.393	0.189
BghiP	0.947	0.062	-0.095	0.922	0.308	0.231
DBA	0.922	-0.033	-0.101	0.924	0.317	0.163
COR	0.558	0.510	-0.153	0.810	0.475	0.271
解释方差/%	50.7	27.6	9.6	85.4	8.9	3.8
累积方差/%	50.7	78.3	87.9	85.4	94.3	98.1
来源	机动车尾气 + 天然气	煤	焦炉	机动车尾气 + 天然气	煤	焦炉

烧排放,汽油不完全燃烧排放中 BghiP、COR 所占比重很大,也有学者认为 BaP、Icdp、BghiP 也可以作为汽油车排放的标志物^[25~28]. 同时 BaA、Chr 的载荷也很高,是天然气燃烧的主要指示物^[20]. 因此,因子 1 指示了机动车尾气来源 + 天然气来源,解释了 50.7% 的总方差. 因子 2 解释了 27.6% 的总方差,其中负荷高的优势组分 Phe、Ant、Fluo、Pyr 是煤燃烧的主要指示物^[29,30],指示了煤燃烧排放源. 厦门无严冬,不存在燃煤取暖. 厦门嵩屿电厂和临近西南方向的漳州后石 2 个大型火力发电厂,应对厦门煤燃烧源的 PAHs 有很大贡献. 因子 3 载荷较高的 Acen、Flu 是焦炉的主要指纹物质,指示了焦炉排放源^[31,32]. 该因子解释了 9.6% 的总方差. 根据研究区污染源调查的结果分析,研究区内无炼焦业存在,因此,因子载荷分析出来的焦炉源推测应为外地迁移而来. 在盛行东北季风的冬春季,临近上风向的泉州泉港地区,大批集中的石化企业,像福建炼油化工有限公司等的焦炉设备应是其主要排放源. 因子 3 中 Per 的载荷也较高,其表达的信息有待进一步研究.

非灰霾期间一共获取 3 个主因子,与灰霾期间的 PAHs 解释来源相似:因子 1 代表了机动车尾气 + 天然气来源,解释了 85.4% 的总方差;因子 2 代表燃煤排放源;因子 3 代表焦炉源. 但是,非灰霾期间提取的 3 个因子累积方差高达 98.1%,代表 3 种来源共包含了原始数据 98.1% 以上的信息,明显高

于灰霾时期 3 个因子的累积方差 87.9%. 由此推断,厦门市冬春季非灰霾期间大气 PM₁₀ 中 PAHs 的主导来源相对简单一致,灰霾期间 PM₁₀ 中 PAHs 的来源可能比非灰霾期要更为复杂或者更难通过主成分分析来识别.

以标准化主因子得分变量为解释变量,标准化的 18 种 PAHs 总量为被解释变量,利用 SPSS 进行多元线性回归分析. 采用逐步回归的方法,设定进入方程的变量的显著水平为 0.05,从方程中剔除变量的显著水平为 0.10,由此获得方程的标准化回归系数可以反映各主成分因子,即各主要源的相对贡献. 灰霾和非灰霾期间获得的标准回归方程为表 6 所示. 数据拟合结果显示,模型与数据的拟合程度较好(灰霾: $R^2 = 0.993$,非灰霾: $R^2 = 0.998$),且回归系数的显著性水平均小于 0.05,认为变量对因变量均有显著影响,回归方程有效. 由此得到厦门市冬春季灰霾期间大气 PM₁₀ 中,机动车尾气 + 天然气、煤和焦炉的贡献率分别为 62.7%、28.1% 和 9.2%. 非灰霾期间识别出的同样 3 个来源的贡献依次分别为 48.6%、36.9% 和 14.5%. 二者相比较,灰霾期间机动车尾气 + 天然气来源对 PAHs 的贡献较大,非灰霾期间煤燃烧和焦炉源的贡献更明显. 此结果也从一方面印证了厦门市冬春季灰霾期间大气 PM₁₀ 中 PAHs 受本地排放源的影响较大,非灰霾期间 PM₁₀ 中 PAHs 受东北季风所携带北方燃煤排放的影响更显著.

表 6 厦门市冬春季大气 PM₁₀ 中 PAHs 的主要污染源和贡献率

Table 6 Sources and contribution rates of PM₁₀-bound PAHs in winter-spring of Xiamen

采样时间	标准化回归方程	R^2	贡献率/%	参数检验相伴概率	方程检验相伴概率
灰霾	$\rho_{\sum \text{PAHs}} = 0.902 \times f_1 (\text{机动车尾气} + \text{天然气}) + 0.404 \times f_2 (\text{煤}) + 0.132 \times f_3 (\text{焦炉})$	0.993	$f_1: 62.7$	0.000	0.000
			$f_2: 28.1$	0.000	
			$f_3: 9.2$	0.000	
非灰霾	$\rho_{\sum \text{PAHs}} = 0.774 \times f_1 (\text{机动车尾气} + \text{天然气}) + 0.588 \times f_2 (\text{煤}) + 0.231 \times f_3 (\text{焦炉})$	0.998	$f_1: 48.6$	0.000	0.000
			$f_2: 36.9$	0.000	
			$f_3: 14.5$	0.000	

3 结论

(1) 采样期内,厦门市冬春季灰霾时期平均 PM₁₀ 浓度远高于非灰霾时期,是非灰霾时期的 1.6 倍. 灰霾期间平均空气污染指数 API 明显高于非灰霾时期,显示出灰霾时期较差的空气质量状况.

(2) 厦门市冬春季采样期内,大气 PM₁₀ 中 PAHs 的浓度变化范围为 12.93 ~ 79.27 ng·m⁻³,与 2004 年厦门市冬季 PM₁₀ 中含量相比,4 a 间多环烃的含量增长 2.54 倍左右. 灰霾期间 PAHs 浓度高于非灰

霾期,大约是灰霾期的 1.4 倍. 灰霾期间 BaP 平均浓度为 4.37 ng·m⁻³,几乎是非灰霾期间浓度的 2 倍,冬春季灰霾对人体健康的威胁比较严重.

(3) 灰霾期间 phe、Fluo、Pyr 这 3 种组分的百分含量明显降低,而组分 BbF、BkF、BaP、Per、Icdp、BghiP 和 COR 的含量相对升高. 可能由于受气象条件的影响,灰霾期有着不同于非灰霾期的气粒分配特征.

(4) 厦门市冬春季灰霾期间 PM₁₀ 中 PAHs 的主要来源为机动车尾气 + 天然气燃烧、煤燃烧、焦炉

排放, 三者的贡献率分别为 62.7%、28.1% 和 9.2%。非灰霾期间识别出的 3 个主要来源与灰霾期相同, 但是贡献率有明显差别, 分别为 48.6%、36.9% 和 14.5%。非灰霾期间, 大气 PM₁₀ 中 PAHs 受到东北季风所携带北方燃煤排放的显著影响。

参考文献:

- [1] 范新强, 孙照渤. 1953-2008 年厦门地区的灰霾天气特征[J]. 大气科学学报, 2009, **32**(5): 604-609.
- [2] 肖红, 肖荣欣, 夏文前, 等. 动态调控污染源排放总量是减小灰霾天气危害的有效途径[J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(1): 58-60.
- [3] Ruzer L S, Harley N H. Aerosols handbook: measurement, dosimetry, and health effects [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [4] Raloff J. Sooty air cuts China's crop yields[J]. Science News, 1999, **156**(23): 356.
- [5] Okuda T, Kumata H, Zakaria M P, *et al.* Source identification of Malaysian atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons nearby forest fires using molecular and isotopic compositions [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(4): 611-618.
- [6] Muraliedharan T R, Radojevic M, Waugh A, *et al.* Chemical characterisation of the haze in Brunei Darussalam during the 1998 episode[J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(17): 2725-2731.
- [7] 吴兑. 灰霾天气的形成与演化[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(3): 157-161.
- [8] 侯美伶, 王杨君. 灰霾的成因、污染特征及健康危害[J]. 广东化工, 2011, **38**(6): 134-135.
- [9] 段菁春, 谭吉华, 盛国英, 等. 广州灰霾期间颗粒态 PAHs 的污染特征及来源[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1574-1579.
- [10] 段菁春, 毕新慧, 谭吉华, 等. 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(1): 6-10.
- [11] 叶翠杏, 王新红, 印红玲, 等. 厦门市大气 PM_{2.5} 中多环芳烃的昼夜变化特征[J]. 环境化学, 2006, **25**(3): 356-359.
- [12] 印红玲, 洪华生, 叶翠杏, 等. 厦门市大气 PM₁₀ 中 PAHs 的健康风险评估——BEQ 评估[J]. 环境化学, 2006, **25**(3): 360-362.
- [13] Wang X H, Ye C X, Yin H L, *et al.* Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons bound to PM₁₀/PM_{2.5} in Xiamen, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2007, **7**(2): 260-276.
- [14] QX/T 113-2010, 霾的观测和预报等级[S].
- [15] 叶翠杏, 王新红, 印红玲, 等. 厦门市不同功能区冬季 PM₁₀ 中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(9): 1532-1538.
- [16] 周家斌, 王铁冠, 黄云碧, 等. 北京部分地区大气 PM₁₀ 中多环芳烃的季节性变化[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(1): 115-119.
- [17] 郭红连, 陆晨刚, 余琦, 等. 上海大气可吸入颗粒物中多环芳烃 (PAHs) 的污染特征研究[J]. 复旦学报 (自然科学版), 2004, **43**(6): 1107-1112.
- [18] 谭吉华, 毕新慧, 段菁春, 等. 广州市大气可吸入颗粒物 (PM₁₀) 中多环芳烃的季节变化[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(7): 855-862.
- [19] Gordon R J. Distribution of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons throughout Los Angeles[J]. Environmental Science and Technology, 1976, **10**(4): 370-373.
- [20] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K. [J]. Environmental Science and Technology, 1996, **30**(3): 825-832.
- [21] Vardar N, Tasdemir Y, Odabasi M, *et al.* Characterization of atmospheric concentrations and partitioning of PAHs in the Chicago atmosphere [J]. Science of the Total Environment, 2004, **327**(1-3): 163-174.
- [22] 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.
- [23] 李文慧, 张承中, 马万里, 等. 西安采暖季大气中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1432-1437.
- [24] 刘国卿, 张干, 刘德全, 等. 深圳南头半岛冬季大气中 PAHs 的分布特征与来源[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(7): 588-592.
- [25] Masclet P, Mouvier G, Nikolaou K. Relative decay index and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Atmospheric Environment, 1986, **20**(3): 439-446.
- [26] Ravindra K, Sokhi R, Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(13): 2895-2921.
- [27] Miguel A H, Kirchstetter T W, Harley R A, *et al.* On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel vehicles [J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(4): 450-455.
- [28] Guo H, Lee S C, Ho K F, *et al.* Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(38): 5307-5317.
- [29] 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.
- [30] Mastral A M, Callén M, Murillo R. Assessment of PAH emissions as a function of coal combustion variables[J]. Fuel, 1996, **75**(13): 1533-1536.
- [31] 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.
- [32] 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

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 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