

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思	(1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全	(1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思	(1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武	(1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽	(1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干	(1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平	(1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇	(1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰	(1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军	(1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国	(1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆	(1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健	(1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美	(1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚	(1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红	(1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅	(1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平	(1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非	(1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞	(1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华	(1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉	(1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾	(1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅	(1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿	(1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏	(1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟	(1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙	(1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥	(1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛	(1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞	(1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影	(1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿	(1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助	(1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新	(1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东	(1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱	(1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维	(1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽	(1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢	(1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军	(1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎	(1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕	(1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳	(1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲	(1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生	(1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生	(1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新	(1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君	(1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水	(1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠	(1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新	(1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提	(1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅	(1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志	(1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增	(1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华	(1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞	(1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰	(1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来	(1636)
《环境科学》征订启事 (1283)	《环境科学》征稿简则 (1332)	信息 (1350, 1509, 1582, 1644)
编辑征稿通知 (1523)		

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究

易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要: 2010 年冬、夏两季, 利用大流量采样器和气相色谱-质谱联用仪 (GC-MSD), 分析了福州市大气中多环芳烃 (PAHs) 的浓度水平、分布特征及来源。结果表明, 福州城郊冬、夏两季大气 (颗粒相 + 气相) 中 $\sum$ PAHs 浓度范围分别为 115.45 ~ 187.76 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 45.55 ~ 59.20 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 整体而言, 气相显著高于颗粒相, 冬季高于夏季; 冬季城区高于郊区, 夏季城区则低于郊区, 但城郊区差异不显著; 气相中 PAHs 比例夏季高于冬季。整体而言, 气相中 PAHs 主要以 2~4 环化合物组成, 颗粒相中则以 4~6 环化合物为主。冬季气相中 PAHs 主要以 3 环化合物为主, 夏季主要以 3 环和 4 环化合物为主; 颗粒相中 PAHs 组成无明显季节特征。毒性当量因子法分析表明福州市空气质量状况总体良好。来源解析表明, 福州大气 PAHs 主要为燃烧源, 福州机动车燃料以柴油为主。

关键词: 多环芳烃; 大气; 冬夏; 城郊; 来源分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1252-06

Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou

YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, GUO Ping-ping, ZHENG Li-li

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Air samples from four sampling sites in urban and suburban in Fuzhou were collected by Hi-vol air samplers in winter and summer in 2010, and concentrations of PAHs were analyzed by GC-MSD. The total (particle and gas phase) PAHs concentrations in ambient air were in the range of 115.45-187.76 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ in winter and 45.55-59.20 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ in summer. PAHs in the gas phase were significantly higher than those in the particle phase, and PAHs in winter were higher than those in summer. No significantly difference was found between urban and suburban, with little higher PAHs in urban in winter and lower PAHs in summer. The ratios of PAHs in the gas phase to particle phase in summer were significantly higher than those in winter. The 2-4 rings PAHs were the dominant components in the gas phase while PAHs in the particle phase were dominated by 4-6 rings. The 3 rings PAHs were the dominant components in the gas phase in winter while 3 and 4 rings in summer. No significantly seasonal trends of PAHs components were found in the particle phase. The toxic equivalence factor (TEF) assessment showed that the pollution of PAHs in Fuzhou city was at a low level. Source analysis indicated that PAHs mainly came from combustion and diesel fuel was the predominant fuel in Fuzhou.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); atmosphere; winter and summer; urban and suburban; source analysis

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 具有致癌、致畸、致突变的“三致”效应, 是一类广泛存在于环境中的有毒有机污染物。PAHs 除少量来自于自然源生物质燃烧、地质尘埃和成岩作用外, 大气中绝大部分主要来源于工业污染源、交通污染源和民用污染源等人为源排放^[1]。

人体 PAHs 的暴露途径有多种, 而大气污染 (通过直接呼吸或间接摄取大气沉降污染的农作物中的 PAHs) 是人体暴露主要来源之一^[2]。国外学者在 20 世纪 80 年代初开始关注大气中的 PAHs, 并进行了较详细的研究^[3~5], 而国内以往的研究主要集中在北方的工业城市^[6,7], 以及以珠江三角洲为代表的南方城市^[8~10]。

福州市作为福建省的省会, 人口稠密, 工业企业众多, 交通发达, 燃料的不完全燃烧及机动车尾气的

大量排放可能造成福州市大气环境污染, 但该地区大气中 PAHs 的浓度及其分布特征鲜见报道。本研究分冬、夏两个季节, 对福州市城郊大气中 16 种优先控制的 PAHs 进行分析, 探讨其残留水平、分布特征以及可能来源, 以期对该市 PAHs 污染防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取福州仓山区福建师范大学 (26°02'21"N, 119°18'17"E) 国际学术交流中心楼顶和鼓楼区鼓屏

收稿日期: 2012-06-20; 修订日期: 2012-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971260, 41173090)

作者简介: 易志刚 (1973 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为有机污染物生物地化循环, E-mail: zgzyi@fjau.edu.cn

路的山海大厦楼顶(26°06'07"N, 119°17'28"E)2个城区样点, 以及福建农林大学博学楼楼顶(26°05'22"N, 119°13'50"E)和福建农林大学南区后山茶园(26°05'05"N, 119°14'07"E)2个郊区样点(图1). 分别在冬季(2010-01-16 ~ 2010-01-22)和夏季(2010-07-05 ~ 2010-07-08)采样, 每日采集一个样品. 采样仪器为大流量大气采样器(KC1000, 青岛崂山电子仪器有限公司), 大气颗粒相样品用石英纤维滤膜(8 × 10 inch, Whatman 公司)收集, 气相样品用聚氨酯泡沫(polyurethane foam, PUF)收集, 控制气体流速为 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. 滤膜采样前 450℃ 灼烧 4 h, 冷却平衡后称重密封备用, PUF 用二氯甲烷抽提 72 h 后真空干燥冷冻备用. 采样后滤膜恒温恒湿平衡称重, 密封冷冻保存待分析, PUF 样品冷冻保存待分析.

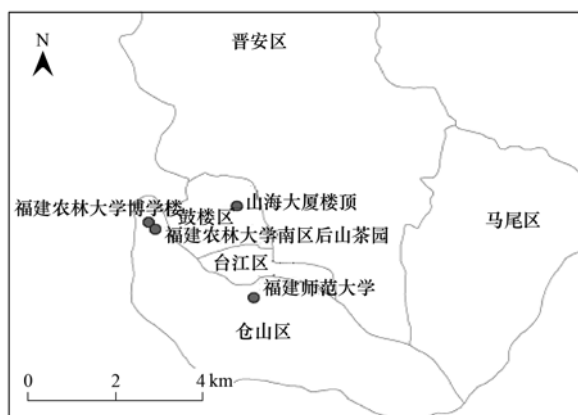


图1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

1.2 样品分析

滤膜用二氯甲烷超声萃取 3 次, 合并提取液, PUF 样品二氯甲烷抽提 72 h, 加入 200 ng 5 种氘代 PAHs(萘-d₈、苊-d₁₀、菲-d₁₀、蒽-d₁₂、芘-d₁₂)作回收率指示物. 提取液经硅胶-氧化铝-无水硫酸钠复合层析柱净化, 溶剂软换浓缩定容至 500 μL, 加 500 ng 六甲基苯(HMB)作内标进行 GC-MS 分析. PAHs 定性定量分析由 Agilent 6890-5973 完成. 色谱柱为 DB-5(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, J&W, Agilent). 色谱条件: 进样口和传输线均为恒温 285℃, 载气流量 $1.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 无分流进样 1 μL. 升温程序为初温 65℃, 保持 2 min, $10^\circ \text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 290℃, 保持 20 min. 质谱条件: 电压为 1706 eV, 离子源温度 230℃, 四级杆温度 150℃. 根据标准样品中化合物保留时间, 结合谱库检索进行定性. 五点(0.2、0.5、1、2 和 5 ng·μL⁻¹)校正曲线和内标法进行定

量. 分析 US EPA 优控的 16 种 PAHs, 即萘(Na)、苊(Acl)、二氢苊(Ace)、芴(Fl)、菲(Ph)、蒽(An)、荧蒽(Flu)、芘(Py)、苯并(a)蒽(BaA)、蒽(Chr)、苯并(b)荧蒽(BaF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、二苯并(a,h)蒽(DbahA)、苯并(ghi)芘(BghiP)、茚并(1,2,3-cd)芘(InPy). 所有化合物均购自 AccuStandard 公司.

1.3 质量控制与质量保证(QA/QC)

分析过程采用 USEPA QA/QC 控制样监控^[11]: 方法空白、基质加标、基质加标平行样、样品平行样, 并用回收率指示物监测分析流程. 氘代回收率指示物除 Na-d₈ 较低外($38\% \pm 11\%$), 其余氘代多环芳烃回收率为 78% ~ 92%. 基质加标回收率为 64% ~ 102%, 基质加标平行和样品平行的 RSD 为 5% ~ 8%. 方法空白未检出目标化合物, 实际样品不扣除空白; 所有结果均经回收率校正.

2 结果与分析

2.1 PAHs 的浓度水平

福州城郊冬季大气(颗粒相 + 气相)中 $\sum$ PAHs 浓度范围为 115.45 ~ 187.76 ng·m⁻³, 与同季节其他地区相比, 与深圳南头半岛大气中浓度相当($116 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 18.7 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[9], 明显高于厦门大气中浓度($35.95 \sim 62.85 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[12]; 夏季大气(颗粒相 + 气相)中 $\sum$ PAHs 浓度范围为 45.55 ~ 59.20 ng·m⁻³, 平均值为 $53.49 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 6.12 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于夏季哈尔滨($8.1 \sim 37.2 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[6]和鼎湖山自然保护区大气中浓度(平均值 $2.03 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 0.32 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[13]. 由图 2 可见, 气相中 PAHs 的含量显著高于颗粒相, 气相中 PAHs 占总 PAHs 浓度(气相 + 颗粒相)85.5% 左右.

由图 2 可见, 福州城区大气(颗粒相 + 气相)中 $\sum$ PAHs 含量范围为 48.75 ~ 162.30 ng·m⁻³, 比塘

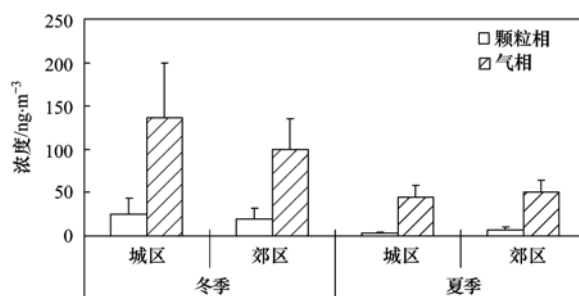


图2 福州城郊大气 PAHs 浓度

Fig. 2 Concentrations of PAHs in Fuzhou urban and suburban atmosphere

厦($550 \sim 4170 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)的污染程度轻^[14],与英国城区 London 和 Manchester($51 \sim 151 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)的污染程度相当^[15];福州郊区大气中 $\sum \text{PAHs}$ 含量范围为 $58.23 \sim 119.85 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,比同属美国郊区的 Eagle Harbor($2.78 \sim 3.36 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)污染程度重^[16].

2.2 PAHs 季节变化与城郊差异

由图 2 可见,福州城郊冬季气相及颗粒相中 PAHs 浓度都明显高于夏季.一方面,夏季温度较高,属于半挥发性化合物的 PAHs 具有较好的扩散条件;冬季气温较低,降低了机动车燃料和居民烹调所用煤气的燃烧效率,这样既加大了污染物的排放量,又势必导致消费更多的燃料^[17].另一方面,福州处于亚热带季风气候带,夏季盛行来自海上的东南季风,而冬季盛行来自内陆的偏北风,故污染物在冬季通过季风从外界传输进入福州的可能性大于夏季.有研究报道夏季大气中气态 PAHs 比例高于冬季^[18,19],本研究中夏季气相中 PAHs 浓度占总浓度的 89.47%,冬季气相中 PAHs 含量占总量的 83.94%,与报道相符,这是由于夏季温度较高,颗粒相中的 PAHs 易挥发进入气相中^[20],且福州夏季降水较多,雨水的冲刷降低了大气颗粒物上 PAHs 的吸附量.

PAHs 为半挥发性有机物,在空气中的存在形态主要与其自身理化性质和环境温度等因素有关,随着化合物分子量的增大,其挥发性逐渐降低,其在大气中主要存在形态也逐渐由气态转变为颗粒态,故不同 PAHs 在气相与颗粒相中所占的比例也各有差异^[21].如图 3 和图 4 所示,气相中 PAHs 主要由分子量低、易挥发的 2~4 环的化合物组成,冬季含量最多的为 Ph,Fl 次之,Flu、An、Py 含量也相对较高,夏季含量最多的为 Ph,Flu 和 Py 其次;而颗粒相中则以分子量大、不易挥发的 4~6 环的化合物为主,含量最多的为 BbF,其次为 BghiP 和 InPy.在各种 PAHs 中,4 环化合物为过渡带,其在两相中所占的比例都不可忽视,这与北京、广州地区的研究结果基本一致^[17,22,23].冬季气相中 PAHs 主要以 3 环化合物为主,夏季主要以 3 环和 4 环化合物为主;颗粒相中 PAHs 组成没有明显的季节特征.

福州冬季城区 PAHs 浓度高于郊区,夏季城区略低于郊区,但无显著差异.本研究结果与有关研究报道城区显著高于郊区的结果有一定差异,主要与气候和样地位置有关.福州处于亚热带季风气候带,冬季盛行偏北风而夏季盛行东南风,本研究郊区

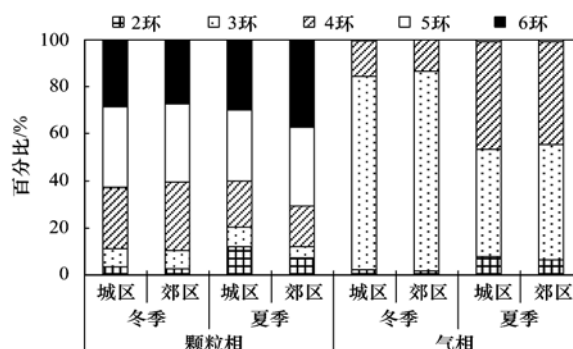


图3 气相和颗粒相中不同环数 PAHs 所占比例

Fig. 3 Percentages of PAHs with different rings in the gas and particulate

位于城区的西北方向,冬季在西北季风的作用下,郊区样点影响相对较大,而夏季在东南季风的影响下,城区样点影响相对较大.城郊大气中 PAHs 在组成上也无显著差异.

2.3 PAHs 毒性评价

PAHs 具有致癌性,其中 BaP 具有强致癌性、强致畸活性.世界卫生组织(WHO)和我国规定的 BaP 浓度限值分别为 $1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $10 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[10].由于各种 PAHs 的毒性不同,因此可用毒性等效因子(toxic equivalency factors, TEFs)与 16 种 PAHs 单体的质量浓度的乘积计算得到以 BaP 为参照对象的毒性当量浓度 BaP_{eq},从而得出总毒性当量浓度 $\sum \text{BaP}_{\text{eq}}$ ^[10,22].计算结果(见表 1)显示,冬季和夏季的 $\sum \text{BaP}_{\text{eq}}$ 分别为 $3.41 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.85 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,低于我国对 BaP 的规定值,但冬季该值高于 WHO 对 BaP 的规定值,说明福州空气质量状况总体良好.

2.4 PAHs 的来源解析

大气环境中若干 PAHs 化合物的比值可用来辨识 PAHs 的主要源类型. $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe}) < 0.1$ 被认为是化石燃料燃烧为主要污染源(石油源),而 > 0.1 主要污染源则为生物质燃烧源^[24],本研究中除冬季郊区 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值高于 0.1,其余比值均接近 0.1(表 2),说明福州冬季郊区以生物质燃烧,夏季和城区冬季均为混合燃烧. $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr}) < 0.2$ 被认为是石油源, > 0.35 为燃烧源, $0.2 \sim 0.35$ 之间为两者的混合来源^[25].由表 2 可见,而 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 比值在冬季大于 0.35,尤其是郊区冬季,说明郊区冬季以燃烧源为主.夏季介于 $0.2 \sim 0.35$ 之间,冬季和夏季之间差异显著(表 2),说明福州大气 PAHs 冬季是燃烧源,夏季是石油与燃

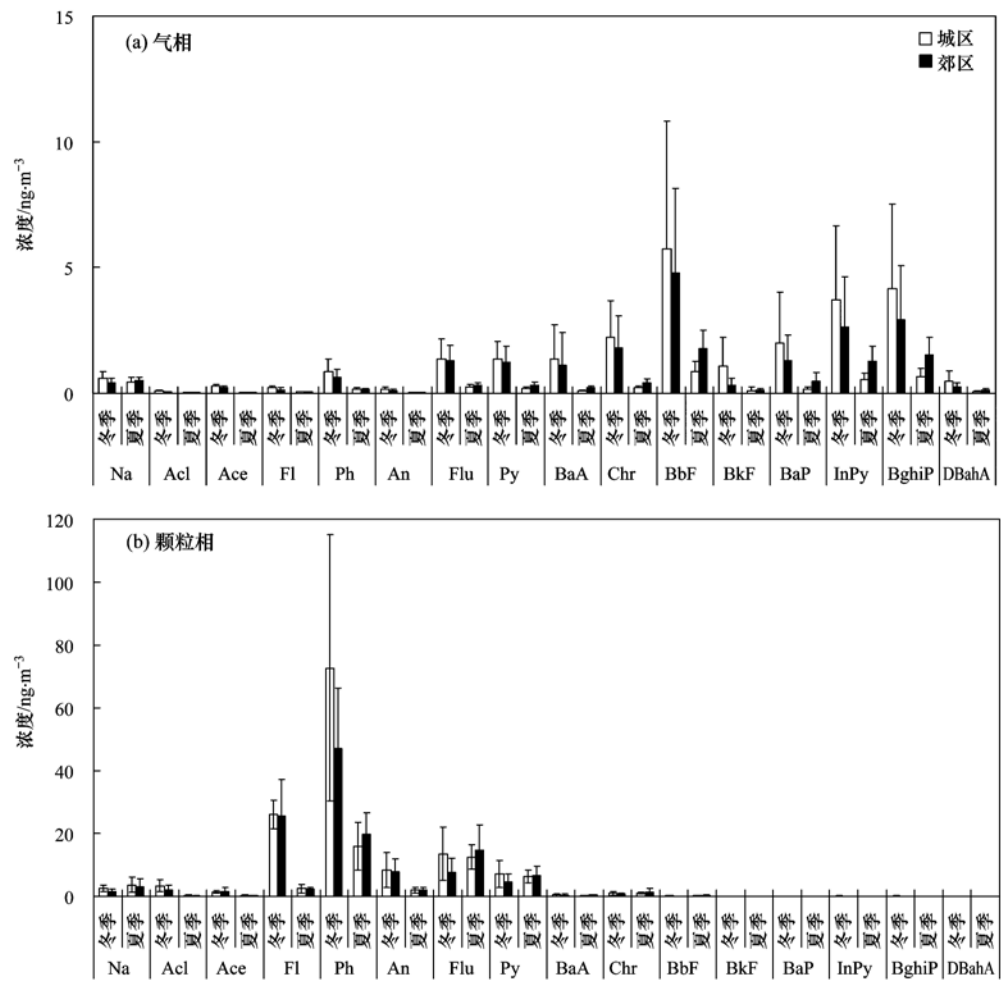


图 4 大气气相和颗粒相中 16 种 PAHs 浓度

Fig. 4 Concentrations of 16 types of PAHs in the gas and particle phase

表 1 16 种 PAHs 毒性当量浓度计算结果/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 BaPeq of 16 types of PAHs/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

PAHs	TEFs ^[28]	质量浓度 (PUF + TSP)		BaPeq	
		冬季	夏季	冬季	夏季
萘 (Na)	0.001	2.47	3.78	2.47×10^{-3}	3.78×10^{-3}
苊烯 (Acl)	0.001	2.74	0.21	2.74×10^{-3}	2.09×10^{-4}
苊 (Ace)	0.001	1.74	0.28	1.74×10^{-3}	2.81×10^{-4}
芴 (Fl)	0.001	26.01	2.39	2.60×10^{-2}	2.39×10^{-3}
菲 (Ph)	0.001	60.63	18.03	6.06×10^{-2}	1.80×10^{-2}
蒽 (An)	0.01	8.24	2.00	8.24×10^{-2}	2.00×10^{-2}
荧蒽 (Flu)	0.001	11.85	13.92	1.19×10^{-2}	1.39×10^{-2}
䓛 (Py)	0.001	7.13	6.75	7.13×10^{-3}	6.75×10^{-3}
苯并 (a) 蒽 (BaA)	0.1	1.58	0.47	1.58×10^{-1}	4.67×10^{-2}
䓑 (Chr)	0.01	2.83	1.46	2.83×10^{-2}	1.46×10^{-2}
苯并 (b) 荧蒽 (BbF)	0.1	5.38	1.59	5.38×10^{-1}	1.59×10^{-1}
苯并 (k) 荧蒽 (BkF)	0.1	0.72	0.12	7.17×10^{-2}	1.19×10^{-2}
苯并 (a) 䓛 (BaP)	1	1.69	0.36	1.69×10^0	3.60×10^{-1}
茚并 (1,2,3-cd) 䓛 (InPy)	0.1	3.23	0.92	3.23×10^{-1}	9.20×10^{-2}
苯并 (g,h,i) 䓑 (BghiP)	0.01	3.60	1.12	3.60×10^{-2}	1.12×10^{-2}
二苯并 (a,h) 蒽 (DBahA)	1	0.37	0.09	3.67×10^{-1}	9.33×10^{-2}
$\sum$ 16PAHs	—	140.19	53.49	3.41	0.85

表 2 PAHs 的特征化合物比值
Table 2 Diagnostic ratios of PAHs

采样区	季节	An/(An + Ph)	BaA/(BaA + Chr)	Flu/(Flu + Py)	InPy/(InPy + BghiP)
城区	冬季	0.104	0.355	0.640	0.471
	夏季	0.107	0.217	0.658	0.443
郊区	冬季	0.143	0.364	0.599	0.475
	夏季	0.094	0.259	0.687	0.455

烧混合来源. 结合 Ant/(Ant + Phe) 比值,表明福州郊区冬季以生物质燃烧为主.

Flu/(Flu + Py) 的比值 < 0.4 为石油源,0.4 ~ 0.5 为油类燃烧和交通污染(主要指机动车尾气), >0.5 为煤/生物质燃烧来源^[25]. 由表 2 可见,本研究中 Flu/(Flu + Py) 比值均大于 0.5,说明福州煤炭、生物质的燃烧是大气 PAHs 的主要来源,与上述 Ant/(Ant + Phe) 及 BaA/(BaA + Chr) 比值得到的结果基本一致.

InPy/(InPy + BghiP) 的比值可用来判断交通来源的类型,汽油车尾气中该比值为 0.09 ~ 0.22,柴油车尾气中则为 0.35 ± 0.10^[25]. 由表 2 可见,本研究中 InPy/(InPy + BghiP) 比值均为 0.45 左右,说明福州机动车燃料以柴油为主.

3 结论

(1)福州大气 PAHs 主要集中在气相中,冬季浓度显著高于夏季,城区与郊区无显著差异.

(2)大气 PAHs 组成城区与郊区无显著差异,颗粒相中 PAHs 以 4 ~ 6 环化合物为主,气相中 PAHs 主要以 2 ~ 4 环化合物为主; PAHs 组成气相中冬季 3 环化合物为主,夏季 3 环和 4 环化合物为主,颗粒相中 PAHs 组成物无明显季节特征变化.

(3)福州大气总毒性当量浓度低于我国对 BaP 的规定值,表明福州空气质量状况总体良好.

(4)来源解析表明,福州大气 PAHs 主要为燃烧源,机动车燃料以柴油为主.

参考文献:

[1] 朱利中,王静,杜烨,等. 汽车尾气中多环芳烃(PAHs)成分谱图研究[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 26-29.

[2] Smith D J T, Edelhauser E C, Harrison R M. Polynuclear aromatic hydrocarbon concentrations in road dust and soil samples collected in the United Kingdom and Pakistan[J]. Environmental Technology, 1995, **16**(1): 45-53.

[3] Panther B C, Hooper M A, Tapper N J. A comparison of air particulate matter and associated polycyclic aromatic hydrocarbons in some tropical and temperate urban environments [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(24-25): 4087-4099.

[4] Finizio A, Mackay D, Bidleman T, *et al.* Octanol-air partition

coefficient as a predictor of partitioning of semi-volatile organic chemicals to aerosols[J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(15): 2289-2296.

[5] 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 & Technology, 1996, **30**(3): 825-832.

[6] 马万里,李一凡,孙德智,等. 哈尔滨市大气中多环芳烃的初步研究[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(2): 145-149.

[7] 张迪瀚,马永亮,贺克斌,等. 北京市大气颗粒物中多环芳烃(PAHs)污染特征[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1269-1275.

[8] 祁士华,王新明,傅家谟,等. 珠江三角洲经济区主要城市不同功能区大气气溶胶中优控多环芳烃污染评价[J]. 地球化学, 2000, **29**(4): 337-342.

[9] 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.

[10] 李志刚,周志华,李少艾,等. 深圳市大气中多环芳烃的污染特征与来源识别[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(9): 1409-1415.

[11] 林峥,麦碧娴,张干,等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. 环境化学, 1999, **18**(2): 115-121.

[12] Zhao J P, Zhang F W, Chen J S, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons and gas/particle partitioning in a coastal city, Xiamen, Southeast China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(7): 1014-1022.

[13] 祁士华,盛国英,傅家谟,等. 鼎湖山自然保护区大气气溶胶中的 PAHs[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, **26**(1): 83-87.

[14] Lin D H, Zhu L Z, Wang J. Environmental impact of PAHs on the metal-smelting area of Tangxia, China [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2004, **13**(5): 447-453.

[15] Coleman P J, Lee R G M, Alcock R E, *et al.* Observations on PAH, PCB, and PCDD/F trends in U. K. urban air, 1991-1995[J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(7): 2120-2124.

[16] Buehler S S, Basu I, Hites R A. A comparison of PAH, PCB, and pesticide concentrations in air at two rural sites on Lake Superior[J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(12): 2417-2422.

[17] 李军,张干,祁士华. 广州市大气中多环芳烃分布特征、季节变化及其影响因素[J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 7-13.

- [18] Gustafson K E, Dickhut R M. Particle/gas concentrations and distributions of PAHs in the atmosphere of southern Chesapeake Bay[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(1): 140-147.
- [19] 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]. *Atmosphere Environment*, 2003, **37**(2): 289-298.
- [20] Wania F, Haugen J E, Lei Y D, *et al.* Temperature dependence of atmospheric concentrations of semivolatile organic compounds [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(8): 1013-1021.
- [21] 成海容, 张干, 刘向, 等. 青海瓦里关大气中多环芳烃的研究[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(6): 646-649.
- [22] 张树才, 张巍, 王开颜, 等. 北京东南郊大气中多环芳烃的相分配及其致癌毒性表征[J]. *生态环境*, 2006, **15**(6): 1165-1169.
- [23] 毕新慧, 盛国英, 谭吉华, 等. 多环芳烃(PAHs)在大气中的相分布[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(1): 101-106.
- [24] Budzinski H, Jones I, Bellocq J, *et al.* Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary[J]. *Marine Chemistry*, 1997, **58**(1-2): 85-97.
- [25] 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.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行