

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平

苏慧^{1,2}, 赵波², 张素坤^{2*}, 刘珊^{1*}, 任明忠², 李杰³, 石小霞²

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 3. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为了解广州市小学生多环芳烃内暴露水平, 于2014年9月15~20日在广州市居民区与工业区分别采集了78名、86名小学生的晨尿样品, 并利用快速液相色谱-三重四级杆串联质谱仪同时检测了样品中10种羟基多环芳烃(OH-PAHs)含量。结果表明, 居民区和工业区小学生尿液中 \sum OH-PAHs分别为0.83~80.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和1.06~72.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 几何平均值为6.18 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和6.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 居民区略低于工业区(无统计学意义, $P>0.05$)。比较两个区域OH-PAHs不同组分的暴露水平, 居民区小学生尿液中1-OHP的暴露水平明显高于工业区(具有统计学意义, $P<0.05$), 其他组分无显著差异, 与国内外已有研究相比, 本研究小学生尿液中OH-PAHs含量较高值得关注。其次, 居民区小学生体内OH-PAHs单体之间均显著相关($P<0.01$), 相关系数在0.511~0.928之间; 工业区小学生尿液1-OHP与2-OHN、1-OHP与1-OHN之间无显著相关性, 其他OH-PAHs单体之间均显著相关($P<0.01$), 相关系数在0.338~0.855之间。这一差异可能指示不同功能区小学生多环芳烃暴露源的差异性, 居民区相对单一, 而工业区因工业企业、物流交通的排放呈现多源性。

关键词: 广州市; 小学生; 多环芳烃; 羟基多环芳烃; 内暴露

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4567-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.032

Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou

SU Hui^{1,2}, ZHAO Bo², ZHANG Su-kun^{2*}, LIU Shan^{1*}, REN Ming-zhong², LI Jie³, SHI Xiao-xia²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the internal exposure levels of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in primary school students of Guangzhou, the research collected urine of 78 and 86 primary school students from two primary schools in the summer of 2014, one school located in the ordinary residential area and the other in the industrial area. The contents of 10 kinds of OH-PAHs were tested by the rapid liquid chromatography coupled to triple quadruple tandem mass spectrometry. The results showed that the concentrations of total OH-PAHs in primary school students in the residential zone ranged from 0.83 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ to 80.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, while those in industrial area ranged from 1.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ to 72.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. The geometric average concentrations were 6.18 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ and 6.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, respectively, and there was no statistical significance between them ($P>0.05$). Comparison of the exposure levels of different components of PAHs in the two areas found that all the OH-PAHs had no significant difference except for the levels of 1-OHP ($P<0.05$). We should also pay attention to the higher exposure levels of PAHs in both areas when compared with other researches. In addition, the OH-PAHs in primary school students in the ordinary residential area had a good correlation between 0.511 and 0.928 ($P<0.01$), whereas there was no correlation between 1-OHP and 2-OHN, 1-OHN in the primary school students in the industrial area and other OH-PAHs had relatively weak correlation ranging from 0.338 to 0.855 ($P<0.01$). This difference might indicate different pollution sources of PAHs in different functional areas, which was relatively single in the residential area, while the industrial area was polluted by multiple sources of industrial enterprises and logistics transportation emissions.

Key words: Guangzhou; primary school students; polycyclic aromatic hydrocarbons; hydroxyl-polycyclic aromatic hydrocarbons; internal exposure

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指两个或两个以上苯环或环戊二烯稠合而成的化合物^[1], 主要来源于各种矿物燃料及有机物的不完全燃烧, 并广泛存在于大气、水体、土壤等环境介质中。石油化工、钢铁制造、煤焦油炼制等工业过程是职业暴露污染源^[2-4]; 而燃煤排放、交通污染、个人习惯、膳食、吸烟暴露等被认为是非职业暴露的主要影响因素^[5-9]。PAHs 作为一种痕量的致

癌、致畸、致突变的“三致”物质, 无疑会对人类的身体健康带来一定的影响, 如 PAHs 的暴露可损害呼吸系统、新生儿神经系统、破坏淋巴细胞、降低 DNA

收稿日期: 2015-06-03; 修订日期: 2015-07-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409080-2)

作者简介: 苏慧(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为多环芳烃内暴露, E-mail: 1216973186@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangsukun@scies.org; 534148120@qq.com

修复能力等^[10~13],因此了解个体 PAHs 内暴露水平有利于评价区域 PAHs 暴露的健康风险。

近年来,针对儿童这一敏感人群的 PAHs 内暴露水平研究越来越多,多数报道仅采用 1-OHP 作为生物标志物来评价区域内个体的羟基多环芳烃(hydroxyl-polycyclic aromatic hydrocarbons, OH-PAHs)暴露水平,例如乌克兰学者 Mucha 等^[14]、丹麦学者 Hansen 等^[15]。但岳强等^[16]、Zhang 等^[17]学者表示只有当 PAHs 污染相对较高时,才可以用 1-OHP 作为生物标志物,否则很难全面地反映有机体对环境污染物的实际负荷水平。也有学者采用多种 OH-PAHs 的联合监测来反映环境和人为活动中 PAHs 的实际暴露水平^[18,19]。

石同幸等^[20]、段菁春等^[21]、毕新慧等^[22]研究表明广州市大气环境中 PAHs 污染水平相对较高,尤其是冬季灰霾天气及有明显污染源(如餐饮等)时,大气中 PAHs 对人体健康的危害应引起高度重视。就此本研究选取了广州市居民区及工业区的两所小学为暴露人群监测点,进行尿液采集,并利用快速液相色谱-三重四级杆串联质谱仪同时检测了 10 种 OH-PAHs 浓度,以期为评价广州市部分小学生 PAHs 的内暴露水平提供数据。其中,居民区位于广州市南部大学城内,无明显污染物排放源,机动车尾气可能是潜在的影响因素,而工业区位于广州东部,除了受石化污染的影响外,周边物流公司频繁的重型汽车也可能是一个重要的影响因素。两个区域均处于珠三角城市群,相距约 15 km,且居民区不在工业区的主导风向上。

1 材料与方 法

1.1 生物样品采集

本研究于 2014 年 9 月 15~20 日同时采集了广州市居民区及工业区两所小学四年级学生的晨尿,将达到指定量的生物样品带回实验室,于 -80℃ 超低温冰箱中冷冻保存,直至样品分析。居民区小学生 78 名,平均年龄为 7.88±0.82 岁,工业区小学生 86 名,平均年龄 8.12±0.89 岁。问卷调查表明,两个区域小学生性别、年龄、家庭经济水平等无显著差异。

1.2 实验材料及方法

1.2.1 实验材料

仪器:12 位固相萃取装置(Supelco)、氮吹仪(EYELA MG-2200)、快速液相色谱-三重四级杆串联质谱仪(Agilent 1260/ABSIEX 4000Q)、高效液相色谱仪(DGU-20As)、涡旋仪、恒温振荡器及离心

机等。

试剂:甲醇(购自 Budick&Jackson)、醋酸及盐酸(购自广州化学试剂厂)等。

标准品:包括 10 种 OH-PAHs 标准品(1-OHN、2-OHN、2-OHF、3-OHF、1-OHPhe、2-OHPhe、3-OHPhe、4-OHPhe、9-OHPhe、1-OHP)和 2 种同位素标记的 OH-PAHs(氘代 3-羟基菲、¹³C-1-羟基芘),均购自美国 MRI。

其他耗材:聚乙烯塑料管、特氟龙离心管、C18 固相萃取柱(Sep-Pak, Waters)、针头过滤器及 0.2 μm 尼龙滤头等。

1.2.2 实验方法

(1)样品的前处理

取 2.0 mL 解冻后的尿液于特氟龙离心管中,加入盐酸(0.2 mol·L⁻¹)调整 pH 为 5.0 后,依次加入 10.0 μL β-葡糖苷酸-芳基硫酸酯酶、3.0 mL 醋酸铵缓冲溶液(0.1 mol·L⁻¹)、10.0 μL 回收率指示物氘代 3-羟基菲,样品经涡旋仪充分混合后,恒温振荡(37.5℃、170 r·min⁻¹)12 h 以上,并以 3 000 r·min⁻¹的速度离心 10 min;离心结束后用 C18 固相萃取柱净化,C18 小柱先用 5.0 mL 甲醇和 10.0 mL 去离子水活化,然后上样,随后用 4.0 mL 去离子水、4.0 mL 甲醇溶液(30%)淋洗固相萃取柱,并弃掉淋洗液,淋洗液流干后,固相萃取装置持续保持真空状态约 1 min 后,用 8.0 mL 甲醇洗脱柱子,并收集淋洗液,整个萃取过程中,流速保持在 1.0 mL·min⁻¹左右;净化后的样品在柔和的氮气下氮吹浓缩至 200.0 μL 左右,用 0.2 μm 的针头过滤器过滤,最后,添加 10.0 μL ¹³C-1-羟基芘作为内标,保存在带有尖底的进样瓶中,并利用快速液相色谱-三重四级杆串联质谱仪检测;利用高效液相色谱仪测定肌酐,以校准尿液中 OH-PAHs 浓度。本研究中涉及到的 OH-PAHs 浓度均以肌酐校正值表示(单位:μmol·mol⁻¹,肌酐校准)。

(2)仪器测定的条件和过程

快速液相色谱条件设定:以甲醇和水做流动相,反相 C18 色谱柱分析(ZORBAXSB-C18),柱温设置为 30℃,梯度洗脱条件为:流动相中甲醇的浓度在 25 min 内从 55% 上升到 81.8%,流速为 0.25 mL·min⁻¹。

串联质谱条件设定:离子源为电喷雾电离源,负离子模式检测,扫描方式为 MRM 监测,电喷雾电压为 -3 000 V,温度为 360℃。MRM 模式下的离子对和碰撞能量选择见表 1。

表 1 羟基多环芳烃检测的质谱条件

Table 1 MS condition for the detection of hydroxy-PAHs

OH-PAHs	MS1	MS2	DP	EP	CE	CXP
2-OHN	142.9	114.9	-75	-10	-36	-3
1-OHN	142.8	114.7	-80	-10	-34	-5
2-OHF	180.9	152.9	-95	-10	-30	-7
1-OHPhe	192.9	164.9	-100	-10	-42	-7
2-OHPhe	192.9	164.9	-110	-10	-40	-7
3-OHPhe	192.9	164.8	-100	-10	-32	-7
4-OHPhe	192.9	164.8	-95	-10	-42	-7
1-OHP	216.9	188.8	-110	-10	-44	-9

1.3 质量控制与质量保证

羟基多环芳烃的仪器检出限为 3.2 ~ 15 ng·L⁻¹, 方法检出限为 10 ~ 50 ng·L⁻¹. 实验过程中, 所有样品均采用 10% 的实验室空白、10% 的空白加标以及 10% 的随机平行样品的实验室质控措施. 结果显示, 实验室空白中未检出羟基化合物, 空白样品的加标回收率在 85.2% ~ 99.8% 之间, 平行样品的相对标准偏差在 3.31% ~ 9.56% 之间, 均满足实验室检测要求.

2 结果与讨论

2.1 尿液中 OH-PAHs 暴露水平

广州市居民区及工业区受试样品中均检测出 10 种 OH-PAHs, 分别为: 2-羟基萘(2-OHN)、1-羟基萘(1-OHN)、2-羟基茚(2-OHF)、3-羟基茚(3-OHF)、2-羟基菲(2-OHPhe)、3-羟基菲(3-OHPhe)、1-羟基菲(1-OHPhe)、9-羟基菲(9-OHPhe)、4-羟基菲(4-OHPhe) 和 1-羟基芘(1-OHP), 检测结果见表 2.

表 2 小学生尿液中羟基多环芳烃的含量(肌酐校正)/μmol·mol⁻¹Table 2 Concentrations of hydroxyl-PAHs in the urine of primary school students (creatinine corrected)/μmol·mol⁻¹

OH-PAHs	居民区(n=78)				工业区(n=84)				差异性检验 (K-W 检验)
	中位数	几何平均值	算术平均值±标准偏差	数值范围	中位数	几何平均值	算术平均值±标准偏差	数值范围	
2-OHN	2.39	2.37	3.43 ± 3.79	0.40 ~ 24.37	2.35	2.65	4.18 ± 5.02	0.32 ~ 29.06	0.488
1-OHN	1.61	1.57	2.96 ± 6.25	0.19 ~ 51.56	1.31	1.58	3.01 ± 4.70	0.20 ~ 34.49	0.755
2-&3-OHF ¹⁾	0.60	0.60	0.82 ± 0.70	0.09 ~ 3.37	0.60	0.62	0.91 ± 0.91	0.10 ~ 5.13	0.799
2-OHPhe	0.13	0.13	0.19 ± 0.22	0.02 ~ 1.50	0.11	0.12	0.15 ± 0.13	0.03 ~ 0.80	0.280
3-OHPhe	0.30	0.29	0.39 ± 0.32	0.04 ~ 1.50	0.23	0.24	0.31 ± 0.23	0.05 ~ 1.18	0.155
1-&9-OHPhe ¹⁾	0.45	0.46	0.71 ± 0.87	0.03 ~ 6.51	0.39	0.38	0.49 ± 0.39	0.10 ~ 2.48	0.096
4-OHPhe	0.08	0.07	0.11 ± 0.10	0.002 ~ 0.52	0.06	0.06	0.08 ± 0.07	< LOD ~ 0.48	0.061
1-OHP ^{*2)}	0.20	0.20	0.31 ± 0.34	0.005 ~ 0.52	0.12	0.11	0.20 ± 0.24	0.002 ~ 1.57	0.001
∑ OH-PAHs	6.85	6.18	8.91 ± 10.57	0.83 ~ 80.63	6.27	6.47	9.33 ± 10.27	1.06 ~ 72.47	0.224

1) 由于 2-OHF 和 3-OHF、1-OHPhe 和 9-OHPhe 无法通过液相色谱柱分离, 因此用 2-&3-OHF 和 1-&9-OHPhe 来表示; 2) * 表示二者的差别具有统计学意义, $P < 0.05$

由表 2 可以看出, 居民区和工业区小学生尿液中 ∑ OH-PAHs 分别为 0.83 ~ 80.63 μmol·mol⁻¹ 和 1.06 ~ 72.47 μmol·mol⁻¹, 几何均值为 6.18 μmol·mol⁻¹ 和 6.47 μmol·mol⁻¹, 居民区略低于工业区(无统计学意义, $P > 0.05$). 两个区域检出含量最高的均为 2-OHN, 几何均值为 2.37 μmol·mol⁻¹ 和 2.65 μmol·mol⁻¹, 最低的为 4-OHPhe, 几何均值为 0.07 μmol·mol⁻¹ 和 0.06 μmol·mol⁻¹.

其次, 居民区 2-OHN、1-OHN、2-&3-OHF 的暴露水平低于工业区, 2-OHPhe、3-OHPhe、1-&9-OHPhe、4-OHPhe 和 1-OHP 的暴露水平高于

工业区, 除 1-OHP 之间的差异性具有统计学意义外($P < 0.05$), 其他组分之间均无显著性差异. Cocco 等^[7]、钟俊俊等^[8] 研究发现志愿者摄食烧烤等食品后, 尿液中 1-OHP 含量会明显升高; 捷克学者 Fiala 等^[23]、加拿大学者 Vyskocil 等^[24] 研究表明, 即使暴露在高浓度的 PAHs 空气污染中, 食物也是主要的芘污染来源. 因此, 该研究中居民区相对较高的 1-OHP 暴露水平可能与学生的饮食暴露差异有关.

近年来, 美国、德国、泰国、中国等相继报道了学生尿液中 OH-PAHs 的暴露水平, 如表 3 所示. 可

以看出,广州市居民区和工业区小学生尿液中 2-OHN、2-&3-OHF、2-OHPhe、3-OHPhe、1-&9-OHPhe、4-OHPhe 的暴露水平基本上均高于美国疾控中心第四次人体暴露调查报告、美国普通儿童、泰国交通污染地区儿童的暴露水平,是其 1.02 ~ 3.62 倍,但明显低于南方某中学、南方某幼儿园、

广州钢铁焦化厂附近学生的暴露水平;1-OHN 则明显低于美国、德国、泰国以及国内一些研究成果中的报道;居民区 1-OHP 的暴露水平明显高于第四次美疾控、美国、德国、泰国等地区的研究结果,而工业区 1-OHP 的暴露水平相对较低,与第四次美疾控的暴露水平相当。

表 3 小学生尿液中羟基多环芳烃的浓度与国内外其他研究成果的比较¹⁾(肌酐校准)/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$

Table 3 Comparison of the concentrations of hydroxyl-PAHs in this study and other studies(creatinine corrected)/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$

地区	2-OHN	1-OHN	2-&3-OHF	2-OHPhe	3-OHPhe	1-&9-OHPhe	4-OHPhe	1-OHP	文献
第四次美疾控	2.24 1.89 ~ 2.65	1.63 1.43 ~ 1.86	0.34 0.10 ~ 0.25	0.05 0.04 ~ 0.05	0.12 0.11 ~ 0.14	0.15 0.13 ~ 0.16	0.03 0.02 ~ 0.03	0.12 0.10 ~ 0.14	[25]
美国普通儿童	1.89 1.74 ~ 2.07	1.60 1.32 ~ 1.93	0.39 0.10 ~ 0.32	0.05 0.04 ~ 0.05	0.12 0.10 ~ 0.14	0.16 0.02 ~ 0.15	0.04 0.03 ~ 0.06	0.07 0.06 ~ 0.08	[26]
德国普通儿童	— —	— —	— —	0.23 < LOD ~ 1.46	0.37 0.04 ~ 1.27	0.40 < LOD ~ 2.84	0.05 < LOD ~ 0.42	0.14 < LOD ~ 0.83	[27]
南方某中学	4.27 0.58 ~ 14.95	— —	1.74 0.68 ~ 6.17	0.25 0.09 ~ 0.69	— —	0.72 0.19 ~ 4.94	0.02 < LOD ~ 0.13	0.22 0.06 ~ 0.58	[28]
南方某幼儿园	10.21 2.33 ~ 50.4	— —	4.74 1.01 ~ 29.26	0.13 < LOD ~ 0.62	— —	1.51 < LOD ~ 5.19	0.05 < LOD ~ 1.12	0.45 0.10 ~ 1.64	[29,30]
广州钢铁焦化厂	6.72 1.59 ~ 30.07	— —	4.70 1.07 ~ 55.86	0.10 0.03 ~ 1.00	— —	1.05 0.45 ~ 8.98	0.03 < LOD ~ 0.34	0.50 0.17 ~ 11.93	[31]
泰国交通污染	2.74 0.69 ~ 7.59	4.67 2.53 ~ 7.28	0.37 0.13 ~ 0.87	0.11 0.04 ~ 0.14	0.11 0.04 ~ 0.21	0.13 0.02 ~ 0.29	0.03 0.01 ~ 0.09	0.18 0.10 ~ 0.50	[32]
广州市居民区	2.37 0.40 ~ 24.37	1.57 0.19 ~ 51.56	0.60 0.09 ~ 3.37	0.13 0.02 ~ 1.50	0.29 0.04 ~ 1.50	0.47 0.03 ~ 6.51	0.07 0.002 ~ 0.52	0.20 0.005 ~ 0.52	本研究
广州市工业区	2.65 0.32 ~ 29.06	1.58 0.20 ~ 34.49	0.62 0.10 ~ 5.13	0.12 0.03 ~ 0.80	0.24 0.05 ~ 1.18	0.38 0.10 ~ 2.48	0.06 < LOD ~ 0.48	0.11 0.002 ~ 1.57	本研究

1) “—”表示文章中没有相关数据

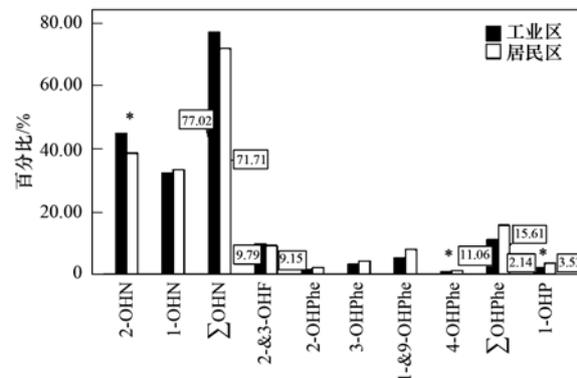
可见,两区域中低环 PAHs 如萘、芴、菲的内暴露水平均有着相同的变化趋势,这是因为萘、芴、菲主要分布在大气气相中,所以,其内暴露水平也会受到环境空气中萘、芴、菲的影响,而多环芘则主要吸附在颗粒相中,在食物中的相对含量较高,因此,对于芘来说,饮食暴露是一个主要的影响因素。总的来说,与国内其他研究结果相比,广州市小学生体内多环芳烃的内暴露水平相对较低,但相比国外的一些研究,广州市小学生体内多环芳烃污染还需引起注意。

2.2 OH-PAHs 组成特征

如图 1 所示,居民区小学生尿液中 \sum OHN、 \sum OHPhe、 \sum OHF、 \sum OHP 所占比例分别为: 71.71%、15.61%、9.15%、3.53%,工业区小学生尿液中 \sum OHN、 \sum OHPhe、 \sum OHF、 \sum OHP 所占比例分别为: 77.02%、11.06%、9.79%、2.14%,可见,居民区和工业区小学生尿液中 OH-PAHs 均以二、三低环数的羟基萘、羟基菲、羟基芴为主,这与赵波等^[33]对石化企业普通人群尿液中

OH-PAHs 的组成特征类似,且均表现出 \sum OHN > \sum OHPhe > \sum OHF > \sum OHP 的规律。

其次,采用 SPSS 21.0 中的 K-W 检验对居民区和工业区小学生尿液中各 OH-PAHs 单体之间的组成特征进行差异性分析,结果显示,研究区域小学生



* 表示二者的差异性具有统计学意义, $P < 0.05$

图 1 小学生尿液中羟基多环芳烃的组成特征

Fig. 1 Composition of hydroxyl-PAHs in the urine of primary school students

尿液中 2-OHN、4-OHPhe 及 1-OHP 之间的差别具有统计学意义 ($P < 0.05$), 其他组分无显著差异。

2.3 尿液中 OH-PAHs 浓度的相关性分析

样品中 OH-PAHs 不同组成之间的相关性可以

指示其来源, 由于样本中 OH-PAHs 的平均浓度均不符合正态分布, 故采用 SPSS 21.0 中的 Spearman 函数进行双尾检测来分析小学生尿液中 OH-PAHs 之间的相关性, 结果见表 4、表 5。

表 4 居民区小学生体内羟基多环芳烃的相关性¹⁾ ($n = 78$)

Table 4 Correlation among hydroxyl-PAHs in the urine of primary school students in the residential zone ($n = 78$)

	2-OHN	1-OHN	2-&3-OHF	2-OHPhe	3-OHPhe	1-&9-OHPhe	4-OHPhe	1-OHP
2-OHN	1	0.879 **	0.633 **	0.605 **	0.632 **	0.630 **	0.600 **	0.576 **
1-OHN		1	0.519 **	0.527 **	0.582 **	0.593 **	0.566 **	0.511 **
2-&3-OHF			1	0.775 **	0.802 **	0.755 **	0.651 **	0.726 **
2-OHPhe				1	0.928 **	0.866 **	0.859 **	0.780 **
3-OHPhe					1	0.878 **	0.831 **	0.830 **
1-&9-OHPhe						1	0.816 **	0.842 **
4-OHPhe							1	0.737 **
1-OHP								1

1) ** 表示相关性在 0.01 显著, 下同

表 5 工业区小学生体内羟基多环芳烃的相关性 ($n = 84$)

Table 5 Correlation among hydroxyl-PAHs in the urine of primary school students in the industrial zone ($n = 84$)

	2-OHN	1-OHN	2-&3-OHF	2-OHPhe	3-OHPhe	1-&9-OHPhe	4-OHPhe	1-OHP
2-OHN	1	0.839 **	0.467 **	0.466 **	0.428 **	0.376 **	0.552 **	0.201
1-OHN		1	0.447 **	0.353 **	0.338 **	0.357 **	0.442 **	0.164
2-&3-OHF			1	0.658 **	0.707 **	0.678 **	0.577 **	0.517 **
2-OHPhe				1	0.855 **	0.794 **	0.616 **	0.622 **
3-OHPhe					1	0.846 **	0.663 **	0.755 **
1-&9-OHPhe						1	0.550 **	0.724 **
4-OHPhe							1	0.404 **
1-OHP								1

由表 4、表 5 可以看出, 居民区小学生体内 OH-PAHs 之间均存在显著相关性 ($P < 0.01$), 相关系数在 0.511 ~ 0.928 之间。这或许是因为居民区环境空气中 PAHs 仅来源于交通污染的影响, 其暴露来源的单一性使得小学生体内 OH-PAHs 之间有着良好的相关性。与居民区不同的是, 工业区小学生尿液中除 1-OHP 与 2-OHN、1-OHN 之间无显著相关性外, 其他 OH-PAHs 单体之间均显著相关 ($P < 0.01$), 相关系数在 0.338 ~ 0.855 之间。这可能是工业区环境空气中 PAHs 受石化工业排放及物流交通共同影响的结果。

居民区与工业区 OH-PAHs 之间的相关性存在着一定的差异。由于两区域小学生在学习习惯及家庭经济水平等方面不存在明显的差异, 因此, 空气呼吸暴露差异以及由于大气颗粒物扩散、沉降引起的其他暴露途径差异可能是导致两个区域小学生 OH-PAHs 暴露特点不同的主要原因。这也表明, 对尿液中多种 OH-PAHs 的同时检测较仅检测单个的 OH-PAH 能更准确地评估个体的实际暴露水平。

3 结论

(1) 广州市居民区和工业区小学生体内 \sum OH-PAHs 分别为 $6.18 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $6.47 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 居民区略低于工业区 (无统计学意义, $P > 0.05$); 就 OH-PAHs 单体而言, 居民区 2-OHN、1-OHN、2-&3-OHF 的暴露水平低于工业区, 2-OHPhe、3-OHPhe、1-&9-OHPhe、4-OHPhe 和 1-OHP 的暴露水平高于工业区, 除 1-OHP 之间的差异性具有统计学意义外 ($P < 0.05$), 其他组分之间无显著性差异。与国内外其他研究成果相比, 广州市小学生体内多环芳烃污染还需引起重视。

(2) 广州市居民区和工业区小学生体内 OH-PAHs 均以二、三环的羟基萘、羟基菲、羟基芴为主, 且均表现出 \sum OHN $>$ \sum OHPhe $>$ \sum OHF $>$ \sum OHP 的规律。

(3) 广州市居民区及工业区小学生体内 OH-PAHs 单体之间相关性的差异说明采用多种 OH-

PAHs 作为生物标志物来表征个体的实际暴露水平更可靠。

参考文献:

- [1] 段小丽,陶澍,徐东群,等.多环芳烃污染的人体暴露和健康风险评价方法[M].北京:中国环境科学出版社,2011. 1-1.
- [2] Yang C Y, Chang C C, Chuang H Y, *et al.* Increased risk of preterm delivery among people living near the three oil refineries in Taiwan[J]. *Environment International*, 2004, **30**(3): 337-342.
- [3] Wilhelm M, Eberwein G, Hölzer J, *et al.* Influence of industrial sources on children's health-hot spot studies in North Rhine Westphalia, Germany[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2007, **210**(5): 591-599.
- [4] 王贝贝,段小丽,刘平,等.太原市焦炉工人尿中多种羟基多环芳烃浓度水平[J].*中国环境科学*,2012,**32**(6): 1118-1122.
- [5] Siwińska E, Mielżyńska D, Bubak A, *et al.* The effect of coal stoves and environmental tobacco smoke on the level of urinary 1-hydroxypyrene[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 1999, **445**(2): 147-153.
- [6] Tuntawiroon J, Mahidol C, Navasumrit P, *et al.* Increased health risk in Bangkok children exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons from traffic-related sources [J]. *Carcinogenesis*, 2006, **28**(4): 816-822.
- [7] Cocco P, Moore P S, Ennas M G, *et al.* Effect of urban traffic, individual habits, and genetic polymorphisms on background urinary 1-hydroxypyrene excretion[J]. *Annals of Epidemiology*, 2007, **17**(1): 1-8.
- [8] 钟俊俊,苏玉红,丁俊男,等.摄食烤羊肉的多环芳烃暴露[J].*生态毒理学报*,2011,**6**(5): 491-498.
- [9] Aquilina N J, Delgado-Saborit J M, Meddings C, *et al.* Environmental and biological monitoring of exposures to PAHs and ETS in the general population [J]. *Environment International*, 2010, **36**(7): 763-771.
- [10] Epton M J, Dawson R D, Brooks W M, *et al.* The effect of ambient air pollution on respiratory health of school children: a panel study[J]. *Environmental Health*, 2008, **7**: 16.
- [11] 李晓华,张玢玢,杨生汝,等.太原市某医院孕妇尿中1-羟基芘水平与新生儿神经行为评分的关系[J].*环境与职业医学*,2011,**28**(4): 224-228.
- [12] Sánchez-Guerra M, Pelallo-Martínez N, Díaz-Barriga F, *et al.* Environmental polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) exposure and DNA damage in Mexican children[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2012, **742**(1-2): 66-71.
- [13] Huang H B, Lai C H, Chen G W, *et al.* Traffic-related air pollution and DNA damage: a longitudinal study in Taiwanese traffic conductors[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(5): e37412.
- [14] Mucha A P, Hryhorczuk D, Serdyuk A, *et al.* Urinary 1-hydroxypyrene as a biomarker of PAH exposure in 3-year-old Ukrainian children [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, **114**(4) 603-609.
- [15] Hansen Å M, Raaschou-Nielsen O, Knudsen L E. Urinary 1-hydroxypyrene in children living in city and rural residences in Denmark[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **347**(1-3): 98-105.
- [16] 岳强,范瑞芳,于志强,等.焦化工人尿中多种多环芳烃单羟基代谢物的调查[J].*环境与健康杂志*,2010,**27**(8): 686-689.
- [17] Zhang W J, Xu D Q, Zhuang G S, *et al.* A pilot study on using urinary 1-hydroxypyrene biomarker for exposure to PAHs in Beijing[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **131**(1-3): 387-394.
- [18] Chetiyankomkul T, Toriba A, Kameda T, *et al.* Simultaneous determination of urinary hydroxylated metabolites of naphthalene, fluorene, phenanthrene, fluoranthene and pyrene as multiple biomarkers of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2006, **386**(3): 712-718.
- [19] 王贝贝,段小丽,黄楠,等.太原市城市和农村居民尿液中羟基多环芳烃的浓度比较[J].*环境科学学报*,2011,**31**(11): 2538-2544.
- [20] 石同幸,杨轶骥,蒋琴琴,等.广州市部分公共场所室内空气中PM_{2.5}成份及健康危害分析[J].*实用预防医学*,2014,**21**(12): 1412-1415.
- [21] 段青春,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.
- [22] 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.
- [23] Fiala Z, Vyskocil A, Krajak V, *et al.* Environmental exposure of small children to polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2001, **74**(6): 411-420.
- [24] Vyskocil A, Fiala Z, Chénier V, *et al.* Assessment of multipathway exposure of small children to PAH [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2000, **8**(2): 111-118.
- [25] U. S. Centers for Disease Control and Prevention (U. S. CDC). Fourth national report on human exposure to environmental chemicals [EB/OL]. <http://www.cdc.gov/exposurereport/index.html>, 2009.
- [26] Li Z, Sandau C D, Romanoff L C, *et al.* Concentration and profile of 22 urinary polycyclic aromatic hydrocarbon metabolites in the US population[J]. *Environmental Research*, 2008, **107**(3): 320-331.
- [27] Heudorf U, Angerer J. Internal exposure to PAHs of children and adults living in homes with parquet flooring containing high levels of PAHs in the parquet glue [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2001, **74**(2): 91-101.
- [28] 岳强,王德超,于志强,等.我国南方某市部分中学生多环芳烃内暴露水平研究[J].*环境与健康杂志*,2009,**26**(5): 385-387.

- [29] 岳强, 范瑞芳, 于志强, 等. 我国南方某幼儿园儿童茶内暴露水平研究[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(7): 608-610.
- [30] 岳强. 南方某幼儿园儿童尿液中菲单羟基代谢物浓度分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 98-101.
- [31] 岳强. 广东某市部分中学生尿液中多种多环芳烃单羟基代谢物暴露水平分析[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(8): 47-50.
- [32] Ruchirawat M, Settachan D, Navasumrit P, *et al.* Assessment of potential cancer risk in children exposed to urban air pollution in Bangkok, Thailand [J]. *Toxicology Letters*, 2007, 168(3): 200-209.
- [33] 赵波, 任明忠, 张素坤, 等. 南方某居民社区人群多环芳烃内暴露与环境空气污染的关系[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 215-219.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2015年10月21日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续14次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人