

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

**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

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 ..... 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 ..... 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 ..... 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 ..... 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 ..... 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 ..... 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 ..... 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 ..... 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 ..... 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 ..... 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 ..... 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 ..... 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数  $K_d$  (490) 估算及其遥感反演 ..... 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 ..... 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐祎凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 ..... 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 ..... 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 ..... 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 ..... 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 ..... 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 ..... 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 ..... 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 ..... 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 ..... 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 ..... 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

$\epsilon$ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 ..... 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 ..... 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 ..... 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄毓, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 ..... 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市  $PM_{10}$  自动监测网络优化研究 ..... 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 ..... 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

$Fe^{II}$  (EDTA) 络合协同 RDB 去除  $NO$  废气效能及过程分析 ..... 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 ..... 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 ..... 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 ..... 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统  $CH_4$  通量特征及影响因素研究 ..... 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 ..... 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 ..... 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 ..... 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 ..... 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 ..... 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 ..... 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 ..... 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 ..... 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 ..... 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 ..... 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 ..... 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 ..... 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 ..... 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 ..... 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 ..... 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

# 北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险

彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平\*

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 科教园区绿地土壤环境质量关系到在其中学习、工作和生活的学生和教职员工的身体健康. 本研究对多环芳烃(PAHs)在科教园区绿地土壤中的累积特征、主要来源、潜在健康风险及其与土壤有机质(SOM)的相关关系进行了分析. 共采集了北京市城区20所学校和研究机构中的绿地土壤, 使用自动索氏-固相萃取-GC/MS联用技术分析了16种PAHs在其中的残留水平. 结果表明16种PAHs总浓度范围为194~6 988  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为1 637  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 中、高环的PAHs(4~6环)占到了总PAHs浓度的85%. 源解析结果显示其主要来源是科教园区内部冬季供暖和食物供应过程中所燃烧的煤. 聚类分析显示NAP与其余15种PAHs组份在来源方式上存在明显的区别. 除NAP以外, 其余15种PAHs含量与土壤有机质之间没有相关关系, 推测这15种PAHs组份主要来源于近距离源的一次沉降. 北京市科教园区绿地土壤PAHs对生活在其周围的人群产生的终生致癌风险较小, 但其间接影响不容忽视.

**关键词:** PAHs; 城市土壤; 健康风险评价; 聚类分析; 土壤有机质; 学校

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0592-07

## Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing

PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, JIAO Wen-tao, CHEN Wei-ping

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Pollution of green space by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in education area may pose a potential impact on the faculty, students, and staffs. To study the characterization, influencing factors, sources and risks of soil PAHs in Beijing educational areas, the concentrations of 16 priority PAH identified by United States Environmental Protection Agency (USEPA) in green spaces of 20 schools and academies were determined. The total PAHs concentration ranged from 194  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  to 6 988  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with a mean of 1 637  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Middle and high molecular weight PAHs (4-6 rings) accounted for 85% of the total PAHs concentration. Coal combustion for winter heating and food supply were the main sources of PAHs in Beijing educational areas. Based on the Cluster analysis, the transportation and accumulation of NAP were distinguished from other 15 PAH congeners. No significant correlation between PAHs and soil organic matter (SOM) was found except for NAP, suggesting that most of the PAH congeners were derived from direct deposition of urban sources. The integrated lifetime cancer risks (ILCRs) associated with exposure to soil PAHs in Beijing educational areas were acceptable, but the indirect effects should not be ignored.

**Key words:** PAHs; urban soils; health risk assessment; cluster analysis; soil organic matter; university

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类由两个及以上苯环连在一起, 普遍存在于环境中的持久性有机有毒污染物. 主要来源于化石燃料、薪柴或森林等的不完全燃烧和石油类物质的自然挥发<sup>[1]</sup>. PAHs具有半挥发性可以通过大气运输进行长距离迁移. PAHs组份的三致(致癌、致畸、致基因突变)毒性<sup>[2]</sup>使其广受关注. 城市中密集的可燃烧能源消耗和“三废”排放过程及其它人类活动会释放大量的PAHs至城市环境中. PAHs的低水溶性、高脂溶性和难降解的特性使其易在土壤表层中累积<sup>[3~6]</sup>. 而土壤中的PAHs可以通过土壤扬尘的呼吸摄入、皮肤接触、误食土壤和食物链等方

式对人类健康造成威胁<sup>[7]</sup>. 因此, 土壤中PAHs的残留特征和源解析一直是国内外研究的热点<sup>[8~13]</sup>.

北京作为一个拥有接近2 000万人口的国际化大都市, 每天消耗着数目巨大的煤和石油, 排放出大量的污染物, 由此产生的PAHs最终累积在城市土壤中<sup>[4]</sup>. 同时作为我国的文化中心, 北京市拥有数百所大学、中小学和研究机构, 其学生和教职员工人

收稿日期: 2011-04-04; 修订日期: 2011-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030744); “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAC28B01)

作者简介: 彭驰(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市环境地球化学过程, E-mail: cpeng@live.com

\* 通讯联系人, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

数已超过百万. 这些学校和研究所大多位于城市的核心地带, 独立于周围环境, 有着数十年甚至百年的历史, 并消耗着大量的可燃烧能源来维持学生和教职员工的日常生活和工作. 科教园区绿地是长期学习和工作在其中的学生和教职员休闲娱乐的场所, 因此累积在绿地土壤中的 PAHs 可能会对周围的人群的健康造成潜在威胁. 城市作为多环芳烃来源的集中区域, 一直受到关注. 但目前相关的研究多从城市的整体分析入手<sup>[1,14~16]</sup>, 针对城市中某一特定功能区, 特别是科教园区的研究还较少. 因此本研究集中分析和探讨了北京市科教园区绿地土壤中 PAHs 的累积特征和主要来源, 并评价了其潜在的健康风险, 相关结果将有助于北京市科教园区绿地环境管理和规划.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

在北京市 5 环内随机抽取了 13 所大学、4 个科研院所、2 所中学和 1 所小学, 设置并采集了 21 个表层土壤样品 (0 ~ 10 cm). 每一个土样均为采样点 100 m<sup>2</sup> 范围内 5 个表层土壤的均匀混合. 新鲜土样采用纸袋运送至实验室, 风干、过筛后装入棕色玻璃瓶并存放于 -25℃ 冰箱中待测.

### 1.2 样品分析

土壤 PAHs 分析采用自动索氏-固相萃取-GC/MS 联用技术. 精确称取 5 g 土壤样品并混合 5 g 无水硫酸钠后放入自动索氏提取器 (BUCHI B-811, Inc., 瑞士) 中, 连续提取 2 h. 提取溶剂为丙酮-二氯甲烷 (1:1) 混合溶液. 提取液经氮吹浓缩后, 过硅胶小柱 (supelco silica-gel column, inc., USA). 淋洗液为正己烷-二氯甲烷 (1:1) 混合溶液. 将净化后样品氮吹至近干, 更换溶剂为正己烷. 最后采用安捷伦 6890 气相色谱仪和 5975C 质谱检测器进行定量测定, 升温程序为: 50℃ 保持 1 min, 以 25 °C/min 升至 150℃ 保持 1 min, 以 4 °C/min 升至 300℃ 保持 4.5 min. 使用外标法定量测定了 16 种美国环保局 (USEPA) 优控 PAHs: 萘 (Naphthalene, NAP), 萘烯 (Acenaphthylene, ACPY), 萘 (Acenaphthene, ACP), 芴 (Fluorene, FL), 菲 (Phenanthrene, PHE), 蒽 (Anthracene, ANT), 荧蒽 (Fluoranthene, FLT), 芘 (Pyrene, PYR), 䓛 (Chrysene, CHR), 苯并(a)蒽 [Benzo (a) anthracene, BaA], 苯并(k)荧蒽 [Benzo (k) fluoranthene, BkF], 苯并(b)荧蒽 [Benzo (b) fluoranthene, BbF], 苯并(a)芘 [Benzo (a) pyrene,

BaP], 二苯并(a,h)蒽 [Dibenzo (a,h) anthracene, DBA], 茚并(1,2,3-cd)芘 [Indeno (1,2,3-cd) pyrene, IND], 苯并(g,h,i)芘 [Benzo (g,h,i) perylene, BghiP]. 基质加标回收率除 NAP 为 64% 以外, 其余 15 种 PAHs 单体在 86% ~ 119% 之间. 质量控制措施包括每批样品 (10 样品) 测定 1 个空白样和 1 个重复样, 并每天重新校准标准曲线. 更详细的分析方法请参见文献 [17].

土壤有机质含量 (soil organic matter, SOM) 通过土壤总有机碳乘以转换系数 1.724 获得<sup>[18]</sup>. 土壤总有机碳测定过程如下: 先将待测土样用 10% HCL 浸泡过夜, 然后冷冻干燥, 最后使用元素分析仪测定 (Elementar, 德国)<sup>[19,20]</sup>.

### 1.3 数据分析

数据的统计分析使用软件 SPSS 18.0 实现. 聚类分析时, 先将数据进行标准化处理 (Z score 方法), 然后通过 SPSS 分层聚类的 R 型聚类方法实现. 相关性分析使用未经变换的数据通过 SPSS 中 Person 回归分析功能实现.

终生致癌风险 (incremental lifetime cancer risk, ILCR) 计算通过文献 [4] 中的拟合公式计算:

$$\sum \text{ILCRs (Normal)} = \sum \text{PAHs} \times (6.94 \times 10^{-10}) - 3.42 \times 10^{-8} \quad (1)$$

$$\sum \text{ILCRs (Extreme)} = \sum \text{PAHs} \times (9.75 \times 10^{-9}) - 4.81 \times 10^{-7} \quad (2)$$

式(1)中  $\sum \text{ILCRs (Normal)}$  代表在平均暴露频率下, 通过吸入土壤尘、皮肤接触和误食土壤 3 种暴露途径可能产生的总风险大小.  $\sum \text{ILCRs (Extreme)}$  是指在极端暴露频率下可能产生的总终生致癌风险.  $\sum \text{PAHs}$  为 16 种 PAHs 的总浓度 ( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 北京市科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征

北京市科教园区 21 个采样点 PAHs 分析结果如表 1 所示. 16 种 PAHs 的总浓度 ( $\sum \text{PAHs}$ ) 平均值为 1 637  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 标准差为 1 596  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 不同环数的 PAHs 平均含量顺序为: 4 环 (FLT、PYR、BaA 和 CHR) > 5 环 (BbF、BkF、BaP 和 DBA) > 6 环 (IND 和 BghiP) > 3 环 (PHE、ANT、FL、ACP 和 ACPY) > 2

环(NAP),其中4环和5环的PAHs含量最多,共占到总量的70%,与北京市大气颗粒物中PAHs含量组成一致<sup>[21,22]</sup>.7种致癌PAH(BaA、BaP、BbF、BkF、CHR、IND和DBA)平均值为 $888 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[14]</sup>.总体上21个采样点 $\sum$ PAHs呈现对数正态分布(Skewness=0.01, Kurtosis=-0.74).不同采样点之间的PAHs浓度相差很大, $\sum$ PAHs最高的采样点为 $6988 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,比 $\sum$ PAHs最小的采样点( $194 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )高出36倍.这说明这些采样点土壤受到十分强烈的人为干扰,同时体现出城市环境复杂多变的特点.其中超过文献[16]在1996年提出的土壤PAHs严重污染标准( $>1000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的采样点

多达12个,即有60%的科教园区绿地可能受到PAHs的严重污染,对长期生活在科教园区中的学生和教职工健康形成潜在威胁.这样高浓度的土壤PAHs残留一方面是由于此次采样集中在北京市5环线内,位于人口密集的城市核心区域,繁重的交通和居民活动带来较高的PAHs输入.另一方面学校作为一个独立的单位需要支持大量的学生和教职工在其中生活,需要消耗大量的能量(煤和油)来进行冬季供暖和食物供应,而化石燃料燃烧过程正是PAHs产生的过程.最后由于北京市科教园区中各个大学、科研院所和中小学的历史悠久,多数学校历史超过50 a.而学校环境较为稳定,土壤中高浓度的PAHs可能经由数十年甚至上百年缓慢累积而来.

表1 北京科教园区土壤中多环芳烃残留浓度<sup>1)</sup>/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 PAH concentrations in soils of educational area in Beijing/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

编号	2环	3环	4环	5环	6环	$\sum 7 \text{ Car-PAHs}^{2)}$	$\sum \text{PAHs}$	SOM/%
大学(1)	25	709	2799	2172	1283	3928	6988	2.38
大学(1)-2	14	94	209	152	70	270	539	1.63
大学(2)	16	491	1411	1001	528	1799	3446	3.24
大学(3)	20	415	1246	1009	563	1813	3253	2.02
大学(4)	66	401	1136	770	347	1394	2720	2.42
大学(5)	48	239	883	957	590	1679	2717	3.24
大学(6)	11	190	1040	768	342	1379	2351	1.88
大学(7)	12	146	459	346	192	620	1155	1.98
大学(8)	39	336	338	224	110	402	1047	3.00
大学(9)	19	128	272	208	105	374	731	2.21
大学(10)	16	82	231	174	73	307	576	2.15
大学(11)	28	107	194	132	58	237	519	2.02
大学(12)	15	73	190	150	71	262	499	1.27
大学(13)	13	85	189	125	56	224	468	2.50
研究所(1)	28	156	820	699	289	1263	1991	3.52
研究所(2)	110	264	601	384	185	706	1543	3.88
研究所(3)	24	156	468	337	161	604	1145	3.06
研究所(4)	11	44	59	53	28	92	194	1.74
小学(1)	62	276	695	524	280	947	1839	4.86
中学(1)	13	66	141	126	69	224	415	1.11
中学(2)	14	44	72	70	38	122	239	1.11
最大值	110	709	2799	2172	1283	3928	6988	4.86
最小值	11	44	59	53	28	92	194	1.11
平均值	29	214	641	494	259	888	1637	2.44
S. D.	25	173	643	504	294	909	1596	0.95

1)2环PAH:NAP;3环PAHs:ACPY、ACP、FL、PHE和ANT;4环PAHs:FLT、PYR、BaA和CHR;5环PAHs:BbF、BkF、BaP和DBA;6环PAHs:IND和BghiP,下同;2) $\sum 7 \text{ Car-PAHs}$ 包括BaA、BaP、BbF、BkF、CHR、IND和DBA,统称为致癌性PAHs

虽然超过一半的科教园区土壤存在高PAHs残留,但还存在着9个土壤样品中 $\sum$ PAHs浓度在 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下.这9个浓度相对较低的采样点存在共性,即都来自于经常维护的或新建不久的草坪土壤.草坪的日常维护和更换是城市土壤扰动的重要方式.草本植物多少会从表层土壤中吸收污染

物,并经定期的草坪修剪转移出去.同时北京草坪一般在郊区的农业区种植,而研究表明北京农业区土壤中PAHs含量较城市土壤低很多<sup>[23,24]</sup>.因此草坪的更换也会降低表层土壤中PAHs的含量.

不同于地表介质较为均一的非城市土壤,城市小尺度上剧烈的空间变异,往往使得土壤中PAHs

含量变异较大,小尺度的空间范围内 PAHs 浓度可能差距数十倍.如学校(1)为国内某建校历史达百年的著名大学,该校的 2 个采样点一个位于数十年历史的教学楼附近绿地中,由于长期的累积,PAHs 浓度高达  $6\,988\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .另一个位于该校在 2002 年新建成的学生公寓绿地中,建设过程会导致表土的更换或覆盖,其 PAHs 浓度仅有  $539\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .人为建设过程的不同步导致了同一所大学中 2 个区域的土壤 PAHs 浓度相差高达 13 倍.

城市土壤的高扰动和高变异性的特点也使得许多北京土壤 PAHs 研究结果不尽相同.如 Tang 等<sup>[25]</sup> 2005 年报道了北京市 31 个土壤样品中 PAHs 的总浓度平均值达  $3\,917\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远远高于本研究结果.但 Li 等<sup>[14]</sup> 2006 年报道的北京市 30 个土壤样品中的 PAHs 总浓度平均值为  $1\,637\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与本研究结果一致. Liu 等<sup>[26]</sup> 2010 年研究了 127 个分别来自于北京市 8 种土地利用类型的土壤样品中的 PAHs,平均浓度为  $1\,082\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,较本研究结果稍低.但其中教学用地的 9 个采样点 PAHs 平均浓度为  $1\,661\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与本研究结果接近.同时该研究发现教学用地 PAHs 浓度普遍较其它土地利用类型土壤 PAHs 浓度高.有研究表明教学用地中的汞浓度和有机氯浓度较其它利用类型也偏高<sup>[27,28]</sup>.这些土壤污染物在科教园区表层土壤中累积应引起环境学者和管理人员的注意,并对其风险开展进一步的研究.

## 2.2 分子组成及其来源分析

图 1 所示为 16 种 PAHs 组份对于总浓度的贡献率.从中可以看出 16 种 PAHs 的贡献率被明显分为两类,其中有 6 种 PAHs 组份贡献率在 2% 以下,分别是 DBA (1.80%)、NAP (1.76%)、ANT (1.72%) 和 FL (1.03%).而其余 10 种 PAHs 组份贡献率在 6.93% ~ 12.97% 之间.其中最高的为 FLT (12.97%),其次是 BbF (10.50%) 和 PYR (10.19%).除了 PHE (8.95%) 以外的 9 种高浓度 PAH 组份包括: FLT、PYR、BaA、CHR、BbF、BkF、BaP、IND 和 BghiP 都为 4 环以上,均被称为燃烧源 PAHs<sup>[29]</sup>.低环 PAHs (2 ~ 3 环组份,包括 NAP、ACPY、ACP、FL、PHE 和 ANT) 仅占到总 PAHs 质量的 15%.其余 10 种中、高环 PAHs (4 ~ 6 环组份) 占到了 PAHs 总质量的 85%.一般来说,低环 PAHs 比高环 PAHs 具有更强的迁移能力,高环 PAHs 较易沉降于污染源附近<sup>[30,31]</sup>.此外燃烧过程主要产生高环的 PAHs<sup>[19,32]</sup>.对比发现本研究土壤中高环 PAHs 的贡献率明显高于文献报道的北京市郊区土

壤<sup>[23,24]</sup>.这说明本研究点位更靠近污染源,且主要为燃烧源.

不同类型的源产生的 PAHs 组份比例不同,因此可以假设物理化学性质相近的 2 种 PAHs 组份从源到汇的迁移过程中损耗率相同,然后利用其在土壤中的组份浓度比值来推断来源<sup>[1]</sup>.表 2 列出了一些常见的 PAHs 组份比例阈值与其主要的来源类型,表 3 则列出了本研究土壤样品中 PAHs 的组份比值结果.其中  $\text{ANT}/(\text{ANT} + \text{PHE})$ ,  $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{CHR})$  和  $\text{Comb-PAHs}/\sum \text{PAHs}$  平均值分别是 0.16、0.41 和 0.80,都高于表 2 中对应的燃烧源比例阈值 0.1、0.35 和 0.7.而另外的 3 个指标:  $\text{FLT}/(\text{FLT} + \text{PYR})$ 、 $\text{BaP}/\text{BghiP}$  和  $\text{IND}/(\text{IND} + \text{BghiP})$  平均值为 0.56、1.01 和 0.50,高于或等于植物、木材或煤燃烧源比例阈值.同时这些指标的标准差都较小,说明各个采样点之间 PAHs 源类型区别不大.综上所述可知北京市科教园区土壤中 PAHs 主要来源为木材或煤燃烧,区别于北京市 PAHs 的主要来源:汽车尾气排放、工业排放和煤燃烧<sup>[14,25,26]</sup>.有研究显示,交通排放会显著增加公路两边 10 m 内土壤中的多环芳烃含量,而在该距离外土壤中多环芳烃含量随距离增加的变化较小<sup>[12]</sup>.学校内部车辆较少,并通过围墙和绿化带与学校外围公路隔离开来,所以较少受到交通排放的直接影响.同时科教园区一般远离北京市南城的工业区,且位于城市的上风向,也较少受到工业排放的直接影响.因此,科教园区内部冬季供暖和食物供应活动中所消耗的大量煤则成为了科教园区土壤中 PAHs 的主要来源.

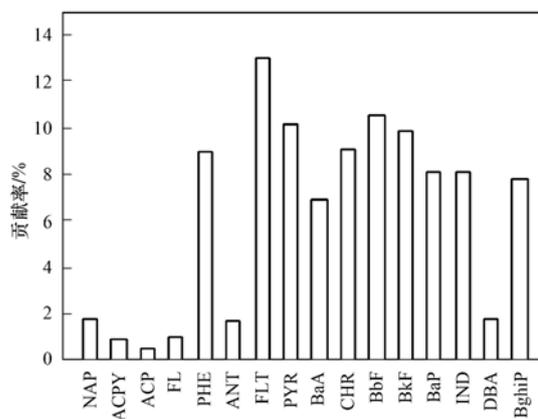


图 1 北京市科教园区土壤中 16 种多环芳烃组份贡献率

Fig. 1 Profile of 16 PAHs in soils of educational areas in Beijing

## 2.3 聚类分析

通过聚类分析可以将统计上类似的变量和彼此

表 2 多环芳烃组份比值与其来源的相互关系<sup>[14,29]</sup>

项目	比值	主要来源
ANT/(ANT + PHE)	<0.1	非燃烧过程 <sup>1)</sup>
	>0.1	燃烧过程
FLT/(FLT + PYR)	<0.4	非燃烧过程
	0.4~0.5	液体化石燃料燃烧
BaA/(BaA + CHR)	>0.5	植物、木材或煤燃烧
	<0.2	非燃烧过程
BaP/BghiP	>0.35	燃烧过程
	<0.6	非燃烧过程
IND/(IND + BghiP)	0.6~0.9	交通排放
	>0.9	煤燃烧
Comb-PAHs/∑PAHs <sup>2)</sup>	<0.2	非燃烧过程
	0.2~0.5	液体化石燃料燃烧
	>0.5	植物、木材或煤燃烧
	<0.3	非燃烧过程
	>0.7	燃烧过程

1) 石油类产品直接进入环境; 2) Comb-PAHs: FLT、PYR、BaA、CHR、BbF、BkF、BaP、IND 和 BghiP, 下同

表 3 北京市科教园区土壤中多环芳烃组份比值结果

项目	最小值	最大值	平均值	Std. Deviation
ANT/(ANT + PHE)	0.11	0.22	0.16	0.03
FLT/(FLT + PYR)	0.53	0.60	0.56	0.01
BaA/(BaA + CHR)	0.31	0.47	0.41	0.04
BaP/BghiP	0.68	1.24	1.01	0.13
IND/(IND + BghiP)	0.46	0.57	0.50	0.03
Comb-PAHs/∑PAHs	0.63	0.90	0.80	0.07

独立的变量进行分类. 对 16 种 PAHs 组份进行聚类分析, 则可以看出不同组份 PAHs 之间的共性和特异性, 其结果如图 2. 从中可以看出 16 种 PAHs 被分为了两大类, 2 环的 NAP 被区别于其余 15 种 PAHs. NAP 有着远高于其余 15 种 PAHs 的挥发和迁移能力, 从结果可以推测科教园区 NAP 的累积过程和来源方式可能有别于其余 15 种 PAHs. 进一步观察发现 3 环的 5 种 PAHs 被分成了 3 个小类, 在聚类图中位置比高环 PAHs 更为接近 NAP. 10 种中、高环 PAHs 同时被分到了最后一个小类中. 这是因为 3 环 PAHs 的挥发和迁移能力要大于高环 PAHs. 因此科教园区绿地土壤中的 NAP 可能不是来源于附近煤燃烧, 而更倾向于较远距离的大气迁移来源, 或二次沉降即土壤挥发-再沉降过程. 但 NAP 对 ∑PAHs 的贡献率仅为 1.76%, 这说明绝大部分 PAHs 是通过从源到汇的近距离一次沉降进入土壤中的.

#### 2.4 多环芳烃与有机质的相关性分析

PAHs 是一类脂溶性很高的化合物, 因此很容

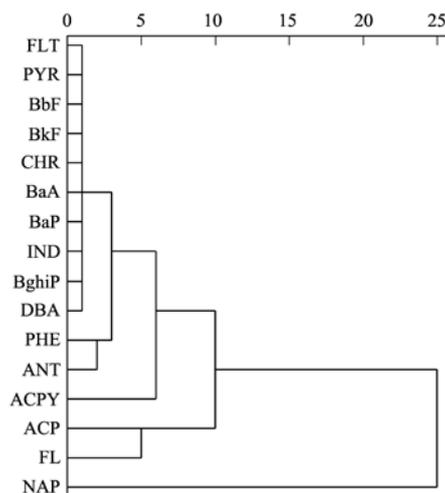


图 2 北京市科教园区土壤多环芳烃聚类分析结果

Fig. 2 Dendrogram of PAHs in soils of educational areas in Beijing using the cluster analysis

易被 SOM 吸附<sup>[15]</sup>. 研究表明土壤 SOM 的含量和 PAHs 各个组份含量或总含量之间有显著正相关关系<sup>[1,24,33~35]</sup>, 但另外一些研究中 SOM 和高环 PAHs 之间不存在强相关关系<sup>[7,29,36]</sup>. 这是由于只有当土壤中 PAHs 浓度受到土壤-空气界面交换过程影响时, SOM 才起到显著作用<sup>[7,37]</sup>. 低环 PAHs 比高环 PAHs 更容易达到土壤-空气界面交换平衡, 因此低环 PAHs 更易受到 SOM 的影响<sup>[29,38]</sup>. 另外距离污染源越近, 土壤 PAHs 浓度主要来源于一次沉降过程. 反之, 与污染源越远, 土壤 PAHs 可能来源于土壤污染物的再释放过程. 因此距离污染源越近, SOM 对 PAHs 累积的影响就越小<sup>[31,39]</sup>. 与 SOM 之间的关系性分析结果发现只有 2 环的 NAP 与 SOM 显著相关 (见表 4). 从相关性分析的结果可知, NAP 在北京市教学用地的累积受到土壤-空间界面的交换过程控制. 而其余 15 种 PAHs 组份则主要受到近距离的一次沉降所影响.

表 4 北京市科教园区土壤多环芳烃与土壤有机质相关性分析结果<sup>1)</sup>

Table 4 Correlations between soil PAHs and SOM in educational areas of Beijing

项目	2 环	3 环	4 环	5 环	6 环	∑PAHs
SOM	0.663 **	0.383	0.272	0.269	0.241	0.291

1) \*\* 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

#### 2.5 致癌风险评价

终生致癌风险评价结果如表 5 所示, 在平均暴露频率下, ∑ILCRs 最大值和平均值均在  $10^{-6}$  数

量级. 在极端暴露频率下,  $\sum$  ILCRs 最大值和平均值都在  $10^{-5}$  数量级. 通常致癌风险低于  $10^{-6}$  可以认为没有风险, 而致癌风险在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  之间则可以认为是低风险<sup>[40]</sup>. 因此从表 5 的结果可以看出北京科教园区绿地土壤 PAHs 对常年生活在其周围的人群存在低致癌风险. 虽然由土壤 PAHs 直接产生的致癌风险不大; 但土壤是环境中 PAHs 的汇, 高浓度的土壤 PAHs 往往意味着周围较高浓度的大气 PAHs 输入. 而大气 PAHs 对人体的致癌风险是土壤 PAHs 的百倍以上<sup>[41]</sup>. 因此北京市科教园区土壤 PAHs 高残留带来的间接健康风险不容忽视.

表 5 北京市科教园区绿地土壤多环芳烃终生致癌风险评价结果

Table 5 Total ILCRs in soils of Beijing's educational areas under normal and extreme conditions

$\sum$ ILCRs	平均暴露频率	极端暴露频率
最大值	$4.82 \times 10^{-6}$	$6.77 \times 10^{-5}$
最小值	$1.01 \times 10^{-7}$	$1.41 \times 10^{-6}$
平均值	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.55 \times 10^{-5}$
Std. Deviation	$1.07 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$

### 3 结论

对北京市科教园区绿地土壤多环芳烃的研究表明: 北京市科教园区绿地土壤中 PAHs 残留浓度很高, 其中超过半数的采样点土壤  $\sum$  PAHs 浓度在  $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上. PAHs 在科教园区土壤中的累积主要受到时间和人为土壤扰动的影响. 其主要来源是科教园区内部冬季供暖和食物供应过程中所大量消耗的煤. NAP 作为迁移性最强的一种 PAHs 组份, 其累积受到土壤-空间界面的交换过程主导. 其余 15 种 PAHs 组份主要来源于近距离源的一次沉降. 健康风险评估表明科教园区土壤 PAHs 的终生致癌风险即使在极端暴露条件下也处于低风险水平.

#### 参考文献:

[ 1 ] 彭驰, 王美娥, 廖晓兰. 城市土壤中多环芳烃分布和风险评价研究进展 [J]. 应用生态学报, 2010, **21**(2): 514-522.

[ 2 ] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources [J]. Science of the Total Environment, 2006, **366**(1): 112-123.

[ 3 ] Sun J H, Wang G L, Chai Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan Reach of the Yellow River, Middle China [J]. Ecotoxicology and Environmental

Safety, 2009, **72**(5): 1614-1624.

[ 4 ] Peng C, Chen W P, Liao X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: Status, sources, distribution and potential risk [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(3): 802-808.

[ 5 ] Cai Q Y, Mo C H, Li Y H, *et al.* Occurrence and assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from vegetable fields of the Pearl River Delta, South China [J]. Chemosphere, 2007, **68**(1): 159-168.

[ 6 ] Wong F, Harner T, Liu Q T, *et al.* Using experimental and forest soils to investigate the uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) along an urban-rural gradient [J]. Environmental Pollution, 2004, **129**(3): 387-398.

[ 7 ] Jiang Y F, Wang X T, Wang F, *et al.* Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2009, **75**(8): 1112-1118.

[ 8 ] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中多环芳烃的含量分布特征及其污染来源 [J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2350-2354.

[ 9 ] 孙娜, 陆晨刚, 高翔, 等. 青藏高原东部土壤中多环芳烃的污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 664-668.

[ 10 ] 段永红, 陶澍, 王学军, 等. 天津表层土壤中多环芳烃的主要来源 [J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 524-527.

[ 11 ] Li C L, Fu J M, Sheng G Y, *et al.* Vertical distribution of PAHs in the indoor and outdoor PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou, China [J]. Building and Environment, 2005, **40**(3): 329-341.

[ 12 ] Chu S G, Liu H, Ma L L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil adjacent to highways in Beijing, People's Republic of China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, **70**(5): 972-977.

[ 13 ] Maisto G, De Nicola F, Iovieno P, *et al.* PAHs and trace elements in volcanic urban and natural soils [J]. Geoderma, 2006, **136**(1-2): 20-27.

[ 14 ] Li X H, Ma L L, Liu X F, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon in urban soil from Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(5): 944-950.

[ 15 ] Yu X Z, Gao Y, Wu S C, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at Guiyu area of China, affected by recycling of electronic waste using primitive technologies [J]. Chemosphere, 2006, **65**(9): 1500-1509.

[ 16 ] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland; preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination [J]. Applied Geochemistry, 1996, **11**(1-2): 121-127.

[ 17 ] 彭驰, 廖晓兰, 王美娥. 自动索氏-固相萃取-GC/MS 测定土壤中多环芳烃方法的建立 [J]. 湖南农业科学, 2009, (6): 57-60.

[ 18 ] do Nascimento N R, Nicola S M C, Rezende M O O, *et al.* Pollution by hexachlorobenzene and pentachlorophenol in the coastal plain of São Paulo state, Brazil [J]. Geoderma, 2004,

- 121(3-4): 221-232.
- [19] Chen L G, Ran Y, Xing B S, *et al.* Contents and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in vegetable soils of Guangzhou, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(7): 879-890.
- [20] Sprovieri M, Feo M L, Prevedello L, *et al.* Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour (southern Italy) [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(5): 998-1009.
- [21] 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.
- [22] 段凤魁, 贺克斌, 马永亮. 北京 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征及来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(7): 1363-1371.
- [23] Ma L L, Chu S G, Wang X T, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils from outskirts of Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(10): 1355-1363.
- [24] Jiao W T, Lu Y L, Wang T Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils around Guanting Reservoir, Beijing, China [J]. *Chemistry and Ecology*, 2009, **25**(1): 39-48.
- [25] Tang L, Tang X Y, Zhu Y G, *et al.* Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils in Beijing, China [J]. *Environment International*, 2005, **31**(6): 822-828.
- [26] Liu S D, Xia X H, Yang L Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of different land uses in Beijing, China: Distribution, sources and their correlation with the city's urbanization history [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1-3): 1085-1092.
- [27] Chen X, Xia X H, Wu S, *et al.* Mercury in urban soils with various types of land use in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(1): 48-54.
- [28] Yang L Y, Xia X H, Liu S D, *et al.* Distribution and sources of DDTs in urban soils with six types of land use in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **174**(1-3): 100-107.
- [29] Bucheli T D, Blum F, Desaulles A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland [J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(11): 1061-1076.
- [30] Wang Z, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban to rural soils: A case study in Dalian, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(5): 965-971.
- [31] Nam J J, Thomas G O, Jaward F M, *et al.* PAHs in background soils from Western Europe: Influence of atmospheric deposition and soil organic matter [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(9): 1596-1602.
- [32] Aichner B, Glaser B, Zech W. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in urban soils from Kathmandu, Nepal [J]. *Organic Geochemistry*, 2007, **38**(4): 700-715.
- [33] Wang W T, Massey Simonich S L, Xue M, *et al.* Concentrations, sources and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Beijing, Tianjin and surrounding areas, North China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1245-1251.
- [34] Yin C Q, Jiang X, Yang X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils in the vicinity of Nanjing, China [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(3): 389-394.
- [35] 焦文涛, 吕永龙, 王铁宇, 等. 化工区土壤中多环芳烃的污染特征及其来源分析 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1166-1172.
- [36] Heywood E, Wright J, Wienburg C L, *et al.* Factors Influencing the national distribution of polycyclic aromatic Hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in British soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(24): 7629-7635.
- [37] Agarwal T. Concentration level, pattern and toxic potential of PAHs in traffic soil of Delhi, India [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **171**(1-3): 894-900.
- [38] He F P, Zhang Z H, Wan Y Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Beijing and Tianjin region: vertical distribution, correlation with TOC and transport mechanism [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(5): 675-685.
- [39] Hassanin A, Breivik K, Meijer S N, *et al.* PBDEs in European background soils: Levels and factors controlling their distribution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(3): 738-745.
- [40] Liao C M, Chiang K C. Probabilistic risk assessment for personal exposure to carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in Taiwanese temples [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(9): 1610-1619.
- [41] Yu Y J, Guo H C, Liu Y, *et al.* Mixed uncertainty analysis of polycyclic aromatic hydrocarbon inhalation and risk assessment in ambient air of Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(4): 505-512.

## CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk .....	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> ( 337 )
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk .....	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> ( 342 )
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health .....	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> ( 346 )
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed .....	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 352 )
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin .....	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> ( 359 )
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta .....	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> ( 370 )
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids .....	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> ( 379 )
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period .....	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> ( 385 )
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China .....	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> ( 393 )
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze .....	ZHANG Wen-bin, YU Hui ( 399 )
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution .....	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> ( 407 )
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake .....	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> ( 412 )
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model .....	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> ( 421 )
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm .....	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> ( 429 )
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 436 )
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species .....	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 442 )
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae .....	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo ( 448 )
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals .....	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> ( 454 )
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic .....	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> ( 459 )
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron .....	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi ( 469 )
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution .....	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai ( 476 )
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution .....	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> ( 481 )
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation .....	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming ( 488 )
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i> .....	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> ( 495 )
Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of $\epsilon$ -Poly-L-lysine Fermentation .....	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> ( 499 )
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge .....	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> ( 505 )
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge .....	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> ( 511 )
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China .....	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> ( 518 )
Optimization of PM <sub>10</sub> Monitoring Network in Beijing .....	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong ( 525 )
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon .....	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi ( 532 )
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe <sup>II</sup> (EDTA) .....	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> ( 539 )
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China .....	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> ( 545 )
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley .....	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> ( 551 )
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It .....	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> ( 558 )
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn .....	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> ( 565 )
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China .....	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> ( 574 )
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area .....	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> ( 580 )
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area .....	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> ( 587 )
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing .....	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 592 )
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai .....	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> ( 599 )
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China .....	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> ( 606 )
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir .....	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> ( 612 )
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment .....	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> ( 618 )
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir .....	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> ( 625 )
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil .....	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> ( 633 )
Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe .....	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> ( 640 )
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid .....	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> ( 647 )
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography .....	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i> ( 652 )
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells .....	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> ( 658 )
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry .....	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> ( 665 )

# 《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2月15日 33卷 第2期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 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@reeces. 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@reeces. 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