

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩虹, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517)      《环境科学》征稿简则 (3561)      信息 (3289, 3321, 3422)

# 北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价

董捷<sup>1</sup>, 黄莹<sup>2\*</sup>, 李永霞<sup>2</sup>, 张厚勇<sup>1</sup>, 高甫威<sup>2</sup>

(1. 济南市环境监测中心站, 济南 250014; 2. 山东省环境保护科学研究设计院生态与土壤修复研究所, 济南 250013)

**摘要:** 采集我国北方某大型钢铁企业 22 个表层土壤(0~20 cm)样品,采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析了土壤中 16 种优控多环芳烃(PAHs)的含量. 结果表明,土壤中  $\sum 16\text{PAHs}$  含量范围为 22.0~20 062.0  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且以中高环(4、5 环)为主,单体以 Flu、Pyr 的含量最高. 与同类相关研究比较,该钢铁厂表层土壤中 PAHs 污染处于中等水平,中、重度污染采样点主要位于焦化厂、球团厂等典型区域. 20 个采样点 PAHs 单体均超过荷兰土壤质量标准中 10 种 PAHs 的目标值,而与北京工业场地土壤筛选值相比,仅部分采样点 BaA、BaP 超标. 源解析结果表明,表层土壤中 PAHs 主要来源于以煤为主的化石燃料的燃烧,石油类燃烧和泄漏的贡献较少. 健康风险评价结果表明,BaP、BaA、DBA、BbF、InP 在居住用地条件下的致癌风险超过了  $1 \times 10^{-6}$ ,BaP、BaA、DBA 在工业用地条件下的致癌风险超过了  $1 \times 10^{-6}$ ,BaP 的致癌风险最大,该钢铁厂表层土壤中 PAHs 已对人群健康产生危害,需实施土壤修复工程.

**关键词:** 多环芳烃; 大型钢铁企业; 表层土壤; 污染特征; 来源; 健康风险评价

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3540-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.036

## Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China

DONG Jie<sup>1</sup>, HUANG Ying<sup>2\*</sup>, LI Yong-xia<sup>2</sup>, ZHANG Hou-yong<sup>1</sup>, GAO Fu-wei<sup>2</sup>

(1. Ji'nan Environmental Monitoring Center Station, Ji'nan 250014, China; 2. Ecology & Soil Remediation Institute, Shandong Academy of Environmental Sciences, Ji'nan 250013, China)

**Abstract:** 16 priority control polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed by GC-MS in 22 surface soil (0-20 cm) samples collected from a large steel enterprise in the north of China. The concentrations of  $\sum 16\text{PAHs}$  ranged from 22.0  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  to 20 062.0  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 4 to 5 aromatic rings were the dominant, typically fluorene (Flu) and pyrene (Pyr). Compared with related domestic research, PAH pollution in the steel enterprise reached medium level, with fifty percent of the soil points were at moderate and severe pollution levels, mainly in the coking and pellet plant area. The concentrations of 10 PAHs in 20 soil samples exceeded the Dutch target reference values. Compared with soil screening value of Beijing contaminated industrial sites, only part of the sample points exceeded the standard, typically benzo[a]anthracene (BaA) and benzo[a]pyrene (BaP). The source apportionment showed that soil PAHs mainly originated from combustion products of coal and other fossil fuels with only a small portion contributed by oil combustion and spill. The health risk assessment showed that the carcinogenic risks of benzo[a]pyrene (BaP), benzo[a]anthracene (BaA), dibenz(a,h)anthracene (DBA), benzo[b]fluoranthene (BbF), indeno[1,2,3-cd]pyrene (InP) exceeded the threshold of  $1 \times 10^{-6}$  under residential land condition, the carcinogenic risks of benzo[a]pyrene (BaP), benzo[a]anthracene (BaA), dibenz(a,h)anthracene (DBA) also exceeded the threshold of  $1 \times 10^{-6}$  under industrial land condition. The carcinogenic risk value of benzo[a]pyrene (BaP) was the biggest among the 16 PAHs. The soil PAHs in the steel enterprise already caused harm to human health and the soil restoration project must be carried out.

**Key words:** PAHs; a large steel enterprise; surface soils; pollution characteristic; source; health risk assessment

多环芳烃(PAHs)是一类由 2 个或 2 个以上的苯环连接而成的有机化合物,广泛存在于自然环境中<sup>[1]</sup>. PAHs 主要来源于化石燃料的加工使用和燃烧(如炼焦、燃煤)、生物质和有机物的燃烧<sup>[2-4]</sup>,因具有明显的“三致”作用和内分泌干扰作用而备受关注<sup>[5,6]</sup>. 多环芳烃可能包含数百种化合物,其中 16 种于 1976 年被美国环保署(EPA)列入优先控制

污染物名单. 土壤是多环芳烃主要的汇<sup>[7]</sup>,环境中产生的多环芳烃可直接进入土壤或者通过降水、降尘进入土壤,土壤承担了 90% 以上多环芳烃的环境

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2016-04-08

基金项目: 山东省科技攻关项目(2008GG10006006)

作者简介: 董捷(1971~),女,博士,高级工程师,主要研究方向为环境监测方法, E-mail: dongjie@jn.gov.cn

\* 通讯联系人, E-mail: ecosoil@sina.com

负荷<sup>[8]</sup>. 土壤中的 PAHs 可通过土壤扬尘的呼吸摄入、皮肤接触、以及食物链传递等方式对人类健康产生更大的威胁<sup>[9]</sup>, 由土壤进入人体的多环芳烃量要高于大气和水体<sup>[10]</sup>.

钢铁企业是我国国民经济的重要支柱, 在企业生产活动中涉及了炼焦、烧结、炼铁、炼钢、轧钢等生产行为, 消耗大量的煤炭等化石燃料, 加之大型运输车辆的燃油排放, 导致大量多环芳烃的产生和排放. 已有研究表明, 储煤厂、焦化厂、发电厂、钢铁厂等周边地区的土壤 PAHs 污染水平较高<sup>[11~13]</sup>. 张强等<sup>[14]</sup>对无锡某钢铁厂土壤中 15 种多环芳烃分布做了研究, 但该钢铁厂没有焦化、烧结、球团等工艺, 不能代表工艺完整的大型钢铁企业土壤中 PAHs 的污染特征.

本文以我国北方某大型钢铁企业表层土壤为研究对象, 探讨了 16 种优控 PAHs 的含量特征、污染水平、来源与健康风险, 对预防钢铁企业土壤污染, 指导钢铁企业搬迁后土壤的修复及安全处置具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与点位布设

该大型钢铁企业建于 20 世纪 50 年代, 年生产钢 1 000 余万 t, 拥有从原料、焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢到轧钢完整的生产工艺系统. 点位布设以烧结机头、球团竖炉、焦炉装煤出焦、高炉出铁场等废气排放点源为中心采取放射状布点, 每个方向至少布设 5 个监测点, 主导风向向下风向增加 2 个点监测点, 共布设 22 个监测点位, 点位布设如图 1 所示.

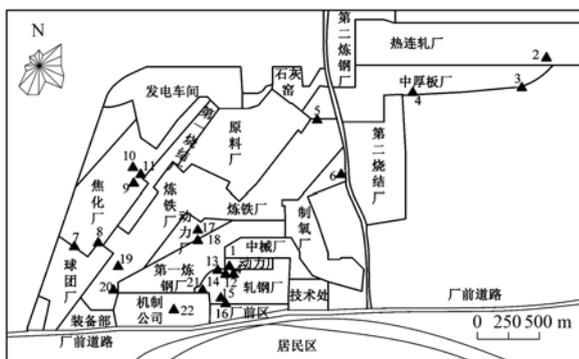


图 1 钢铁厂表层土壤采样点位布设示意

Fig. 1 Map of the surface soil sampling sites in the steel enterprise

### 1.2 样品采集与处理

在每个采样点上, 用采样铲向下切取 1 片长 10 cm、宽 5 cm、深 20 cm 的土壤样品至 1 000 mL 棕色

玻璃广口瓶, 并装实装满, 于实验室  $-18^{\circ}\text{C}$  冷冻保存. 分析前将样品放入冻干机中冻干, 去除砾石和植物根系, 研磨过 1 mm 筛, 备用.

### 1.3 分析测试

采用气相色谱-质谱联用仪 (GCMS-QP2010plus) 分析 EPA 优控的 16 种 PAHs, 2 环: 萘 (Nap); 3 环: 萘烯 (Acy)、萘 (Ace)、芴 (Fl)、菲 (Phe)、葱 (Ant); 4 环: 荧葱 (Flu)、芘 (Pyr)、苯并 (a) 葱 (BaA)、䓛 (Chr); 5 环: 苯并 (b) 荧葱 (BbF)、苯并 (k) 荧葱 (BkF)、苯并 (a) 芘 (BaP)、二苯并 (a, h) 葱 (DBA); 6 环: 苯并 (g, h, i) 芘 (BgP)、茚并 (1, 2, 3-cd) 芘 (InP).

气相色谱条件: 色谱柱为亚芳基聚合物色谱柱 (DB-5MS;  $60\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 0.32\text{ }\mu\text{m}$ ), 升温程序为: 初始温度  $45^{\circ}\text{C}$ , 保持 1 min, 以  $40^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温至  $130^{\circ}\text{C}$ , 以  $12^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温至  $180^{\circ}\text{C}$ , 以  $7^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温至  $240^{\circ}\text{C}$ , 以  $12^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温至  $320^{\circ}\text{C}$ , 保持 8 min; 载气为 He; 流速控制模式: 线流速控制模式, 柱流速  $1.66\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、线流速  $2.33\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 进样方式: 高压注射模式, 进样口压力 100 kPa、进样量为  $1.0\text{ }\mu\text{L}$ 、分流比 7:1.

质谱条件为, 离子源: EI 源; 扫描方式: SIM 模式; 溶剂延迟时间: 5 min; 调谐方式: DFTPP.

萃取条件: 丙酮与正己烷混合溶剂萃取 (体积比 50:50); 静态萃取时间 5 min; 萃取温度  $120^{\circ}\text{C}$ ; 萃取 3 次.

GPC 净化条件: 凝胶柱  $500\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ , 柱填料为 200~400 目 Bio Bead S-X3; 流动相为二氯甲烷, 柱流速  $5\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 样品定量环 5 mL, 收集 800~1 800 s 流出液.

浓缩装置 (旋转蒸发装置); 氮吹仪 (可控制流速和可控制加热).

### 1.4 质量控制

实验室内部质量控制采用仪器空白检查 (进样瓶装入空白溶剂, 按照样品分析步骤运行仪器空白, 空白色谱图中应无目标物影响定性定量分析); 仪器连续校准 (仪器每运行 12 h 采用校准曲线中间点进行检查, 校准化合物响应因子相对偏差大于 20% 应需要重新校准)、溶剂空白 (所用有机试剂按分析过程最大浓缩倍数浓缩后进行空白检查)、全程序空白 (每批样品以石英砂替代土壤样品, 按照与试样相同预处理和测定步骤进行全程序空白试验)、替代物加标回收试验 (替代物在样品制备前加入土壤中, 分析时测定回收率, 替代物回收率控制在

60% ~ 120%)。

### 1.5 数据处理

采用 Excel 2003、Origin 8.6 对数据统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中 PAHs 含量与组成特征

将土壤中 16 种优控 PAHs 单体的统计数据列于表 1。16 种多环芳烃单体在钢铁厂各功能区表层土壤中均有检出,检出率为 22.7% ~ 95.5%。不同单体含量的变异系数均大于 110%,显示出较强的空间分布差异性。各单体均值高于对应的中位值,呈现正偏态分布,以 4 环 Flu、Pyr 的平均含量最高,检出率低的 Acy、DBA 其含量亦较低。16 种 PAHs ( $\sum 16\text{PAHs}$ ) 含量范围为 22.0 ~ 20 062.0  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为 2 564.7  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。7 种致癌性 PAHs ( $\sum 7\text{CarPAHs}$ ) 含量范围为 n. d. ~ 7 010.3  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为 1 051.8  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占  $\sum 16\text{PAHs}$  的 41.0%。

由表 1 可知,16 种 PAHs 单体中致癌性最强的 BaP 浓度范围为 n. d. ~ 1 305  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为 164  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由图 2 可以看出,表层土壤中 PAHs 总量

与 BaP 具有相似的变化趋势 ( $R = 0.89, P < 0.01$ )。PAHs 总量以在炼铁厂 S20 中最大, BaP 则以在焦化厂、球团厂附近 S7 中最大,二者的相对高值均位于焦化厂、球团厂、炼铁厂等区域,可能与炼钢、炼铁过程中煤炭、焦炭的燃烧有关,而原料厂、烧结厂等采样点 PAHs 总量及 BaP 含量相对较低。焦化厂以煤为主要原料,其车间内化石燃料的不完全燃烧及焦油、煤气等产品的加工过程都可能导致 PAHs 类物质的排放<sup>[13,15]</sup>。有研究表明,焦化厂是多环芳烃的重要污染源,所排放出的污染物能够影响 2 ~ 3 km 或更大范围的地区<sup>[16]</sup>。

不同采样点 PAHs 组分差异如图 3 所示,钢铁厂表层土壤中 S2、S4 PAHs 组成仅为 4 环, S3 PAHs 组成仅为 2 环和 3 环, S5、S13、S15 高环(5 环、6 环)组分缺失。研究区表层土壤 PAHs 的组成主要以 4 环组分为主,占 PAHs 总量的 31.9% ~ 100%。在 PAHs 总量较高的土壤采样点中,5 环组分仅次于 4 环(炼铁厂 S20 4 环、3 环占较大比例),占比范围为 4.88% ~ 31.25%。由此可知,钢铁厂表层土壤 PAHs 污染主要源于毒性较高的中、高环组分,与已有研究结果一致<sup>[12,17,18]</sup>。

表 1 钢铁厂表层土壤中 16 种 PAHs 含量统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Statistics of the contents of 16 PAHs in surface soils of the steel enterprise/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

PAHs	范围	中位值	平均值	变异系数/%	检出率/%	荷兰土壤目标值	筛选值 <sup>1)</sup>
Nap	n. d. ~ 217.0	33.9	51.3	110	90.9	15	400 000
Ace	n. d. ~ 509.0	20.4	53.4	209	81.8		
Acy	n. d. ~ 51.4	n. d.	7.3	193	40.9		
Fl	n. d. ~ 261.0	14.5	31.5	196	59.1		400 000
Phe	n. d. ~ 2 746.0	52.2	251.0	235	90.9	50	40 000
Ant	n. d. ~ 642.0	22.1	84.4	191	68.2	50	400 000
Flu	n. d. ~ 4 540.0	121.0	492.0	210	95.5	15	400 000
Pyr	n. d. ~ 3 786.0	92.0	401.0	214	95.5		400 000
BaA <sup>2)</sup>	n. d. ~ 3159.0	40.7	289.0	248	59.1	20	400
Chr <sup>2)</sup>	n. d. ~ 831.0	39.3	122.0	183	63.6	20	400 000
BbF <sup>2)</sup>	n. d. ~ 1 621.0	56.6	231.0	181	72.7		4 000
BkF <sup>2)</sup>	n. d. ~ 504.0	21.5	71.6	184	63.6	25	40 000
BaP <sup>2)</sup>	n. d. ~ 1 305.0	32.4	164.0	198	63.6	25	400
InP <sup>2)</sup>	n. d. ~ 1 156.0	12.0	150.0	199	50	25	4 000
DBA <sup>2)</sup>	n. d. ~ 207.0	n. d.	27.3	215	22.7		400
BgP	n. d. ~ 1 049.0	33.0	142.0	189	63.6	20	40 000
$\sum 16\text{PAHs}$	22.0 ~ 20 062.0		2 564.7				
$\sum 7\text{CarPAHs}$	0 ~ 7 010.3		1 051.8				

1) 场地土壤环境风险评价筛选值(工业用地)(DB11/T 811-2011); 2) 具有致癌性的 PAHs

### 2.2 土壤中 PAHs 污染水平与评价

与国内其他钢铁企业厂区或周边土壤中 PAHs 含量相比(表 2),该钢铁厂表层土壤 PAHs 含量基本处于中等水平,低于北京市某焦化厂<sup>[13]</sup>、东北某

钢铁厂<sup>[17]</sup>及苏南地区某钢铁厂周边农田表层土壤<sup>[18]</sup>中 PAHs 含量,高于无锡某钢铁厂<sup>[14]</sup>、杭州某钢铁厂<sup>[19]</sup>及邯郸某钢铁厂<sup>[12]</sup>周边农田表层土壤中 PAHs 含量,与本市典型工业区<sup>[20]</sup>土壤 PAHs 含量

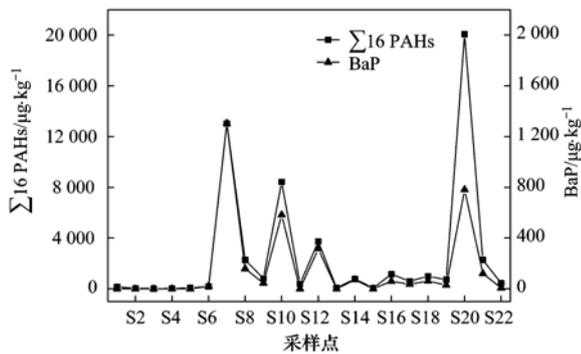


图2 不同采样点表层土壤中 PAHs 和 BaP 含量

Fig. 2 PAHs and BaP concentrations in the surface soil samples at different sampling points

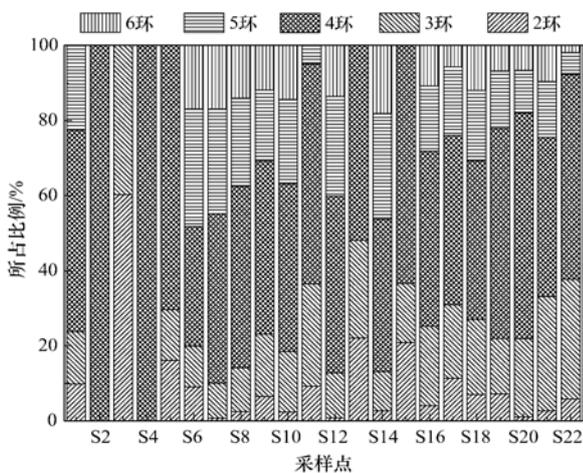


图3 不同采样点表层土壤中 PAHs 组成比例

Fig. 3 Proportion of PAHs components in the surface soil samples at different sampling points

(包括 BaP) 基本持平。

土壤中典型的内源性 PAHs 为  $1 \sim 10 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 主要来自植物的分解和自然火灾<sup>[21]</sup>. Trapido<sup>[22]</sup> 对未受人类活动干扰的土壤 PAHs 本底值的界定为小于  $100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 该钢铁厂表层土壤中 PAHs 总量明显高于上述限值, 表明土壤已经受到了一定程度 PAHs 的人为污染. 由于我国尚无统一的 PAHs 土壤环境质量标准, 参照 Maliszewska-Kordybach<sup>[23]</sup> 建议的对土壤中 16 种优控 PAHs 污染程度的分级方法, 在钢铁厂各功能区生产活动影响下, 清洁土壤采样点 ( $< 200 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 仅占 36.4%, 而中度 ( $600 \sim 1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、重度 ( $> 1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 污染采样点分别为 18.2%、31.8%, 主要位于焦化厂、球团厂、炼铁厂、轧钢厂这 4 个典型区域, 应当引起关注.

对表层土壤中 16 种 PAHs 单体采用荷兰土壤质量标准<sup>[24]</sup> 中 10 种 PAHs 的目标值、北京市工业场地土壤 14 种 PAHs 筛选值进行评价 (表 1). 根据荷兰土壤质量目标值, S3、S4 中 10 种 PAHs 含量低于目标值, 其他采样点都存在部分 PAHs 单体超标, 超标率为 27.3% (Ant) ~ 90.9% (Flu), 且 10 种 PAHs 均值都超过对应目标值, 超标倍数为 1.69 (Ant) ~ 14.45 (BaA). 由于标准制定的差异性, 北京工业场地土壤中 14 种 PAHs 筛选值均高于相应的荷兰土壤质量目标值, 除 S7、S10、S12、S20 采样点 BaA、BaP 超标外, 其余 PAHs 单体均低于筛选值, BaA、BaP 超标率分别为 18.2%、13.6%.

表2 相关研究区域土壤中  $\sum$  PAHs 含量水平Table 2 Concentrations of  $\sum$  PAHs in soil of other researches

研究区域	样品数目	PAHs 数目	浓度范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
东北某钢铁厂	6	16	3 390 ~ 15 400	32 100	[17]
无锡某钢铁厂	20	15	27.22 ~ 702.75	207.36	[14]
杭州某钢铁厂	4	15	476.2 ~ 3 251.9	1 435.3	[18]
北京市某焦化厂	7	16	672.8 ~ 144 814.3	32 447.9	[13]
邯郸某钢铁厂周边农田	239	15	123.4 ~ 1 626.4	398.9	[12]
苏南地区某钢铁厂周边农田	13	16	193 ~ 15 700	6 130	[19]
本市典型工业区	10	16	98.4 ~ 12 400.0	2 700.0	[20]
北方某大型钢铁企业	22	16	20.99 ~ 20 062.02	2 564.71	本研究

### 2.3 土壤中 PAHs 的迁移沉降

结合厂区布置和常年主导方向, 以 BaP 含量最高的 S7 为起点, 对 PAHs 不同组分在主导风向的下风向 (即东北和东南方向) 含量变化进行研究 (图 4). 表层土壤 PAHs 含量受常年主导风向的影响十分明显, 大气沉降可能是导致研究区 PAHs 污染的

重要途径之一. 不同环数 PAHs 含量随距离增加均表现出较好的衰减规律, 但衰减幅度不同, 低环组分的空间变异程度小于高环组分. 原因可能在于各 PAH 单体的含量及理化性质不同, 低环芳烃挥发性强, 饱和蒸气压高, 通常趋向以气态形式存在于空气中并易于长距离迁移, 反映大气输送的影响; 而高

环芳烃不易挥发,多趋向于结合在固相颗粒物上,并伴随干、湿沉降返回地表,反映本地污染源的影响<sup>[25~27]</sup>. 在东北方向0.3 km处,除2环PAHs组分外,均有近90%的衰减,在0.7 km处不同环数PAHs含量相似,并与3 km处PAHs含量基本持平.

东南方向在长距离的迁移过程中,除2环PAHs组分外,其余组分PAHs含量变化呈阶梯状,在距离0.6 km处比0.2 km处略有升高,可能的原因包括:一是采样点周围PAHs排放源较多,颗粒物性质复杂,二是新污染源(轧钢厂、交通源)的叠加效应.

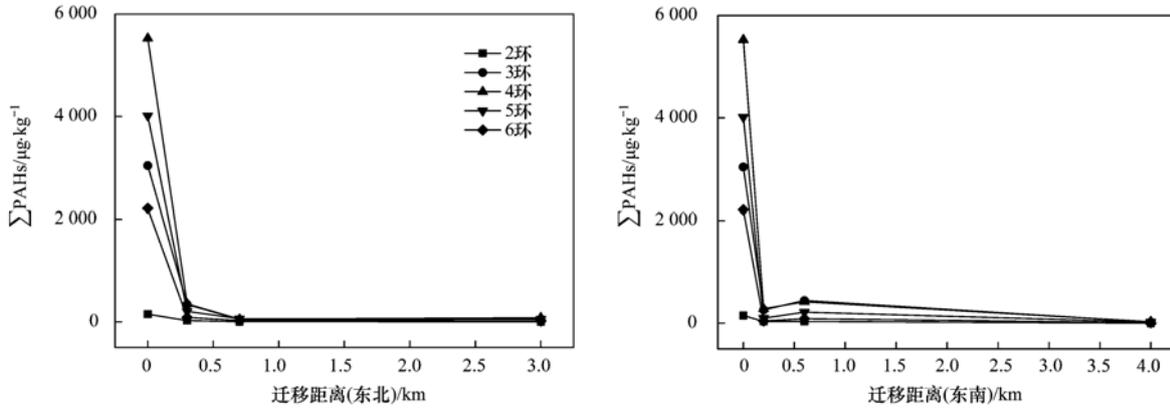


图4 不同方向多环芳烃迁移沉降趋势

Fig. 4 PAHs migration and deposition trends in different directions

2.4 土壤中PAHs的来源解析

不同分子量PAHs的相对丰度可以用来解析其来源于不完全燃烧过程还是石油泄漏. 通常低分子量(2环和3环)PAHs主要来源于石油类泄漏,而高分子量(4环及其以上)PAHs来源于煤等化石燃料的不完全燃烧<sup>[28,29]</sup>. 由于研究区表层土壤PAHs组成以中高环组分为主,说明PAHs主要来源于煤等化石燃料的燃烧,但在炼铁厂、轧钢厂的部分重度污染点位,3环组分亦占有较大比例,厂区内繁忙的运输工作可能会引起部分石油类产品的泄漏,从而污染该采样点的土壤.

母体PAHs同分异构体具有相似的理化性质,进入环境后具有相同的迁移分配与稀释行为,因此

一些特定的PAHs异构体,如Ant/(Ant + Phe)、Flu/(Flu + Pyr)、BaA/(BaA + Chr)和InP/(InP + BgP),被用来解析环境中PAHs的来源<sup>[30]</sup>. 如图5所示,Ant/(Ant + Phe)在0.11 ~ 0.67, Flu/(Flu + Pyr)在0.51 ~ 0.57, BaA/(BaA + Chr)在0.39 ~ 0.85,说明钢铁厂表层土壤主要来源于煤和生物质燃烧,在S3、S10、S12、S13采样点InP/(InP + BgP)在0.2 ~ 0.5之间,其中S10、S12为重度污染采样点,说明焦化厂、轧钢厂土壤中PAHs可能来自石油、煤和生物质的混合燃烧. 表层土壤中Flu、Pyr的检出含量最高,而Phe、Flu、Pyr和Ane的排放是煤燃烧源的重要特征<sup>[31]</sup>. 总体而言,钢铁厂不同功能区表层土壤中的PAHs主要来源于以煤为主

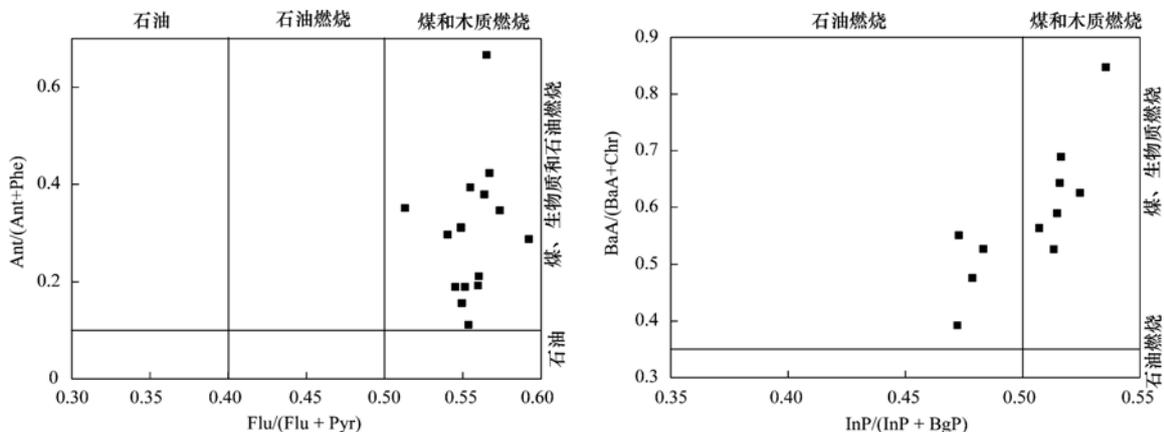


图5 土壤中PAHs多特征比值判源

Fig. 5 Source identification with compositional analysis of PAHs in soil samples

的化石燃料的燃烧,石油类燃烧和泄漏的贡献较少。

有研究认为用于特征比值的同分异构体的环境行为不完全一致,从排放源进入多介质环境后,受其自身稳定性(挥发、迁移、降解等)及环境介质性质(土壤性质如有机质等)的影响,其比例并非一成不变,且对于实际环境中各 PAHs 组分降解的速率,观点也不尽相同<sup>[12,32]</sup>。因此,在进行 PAHs 的来源识别时,采用多元统计方法(主成分分析法、正定矩阵因子分析法等),并深入研究 PAHs 组分及单体的环境行为是十分必要的。

## 2.5 PAHs 健康风险评价

参照《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014),以钢铁厂表层土壤中 16 种 PAHs 的含量进行健康风险评价,考虑经口摄入、呼吸吸入、皮肤接触这 3 种暴露途径。该土地现为工业用地,将来或规划为居住用地。工业用地条件下以成人作为敏感

受体,居住用地条件下综合考虑儿童和成人的健康风险。表 3 结果显示,在两种用地方式下,9 种 PAHs 的危害商均在可接受风险水平以内( $< 1$ ),不会对目标人群产生非致癌危害。在居住用地条件下 BaP、BaA、DBA、BbF、InP 最大值的致癌风险超过了可接受风险水平( $1 \times 10^{-6}$ ),且 BaP 的平均致癌风险水平亦超过了此限值。在工业用地条件下 BaP、BaA、DBA 最大值的致癌风险超过此限值,表明钢铁厂表层土壤中 PAHs 已对人群健康产生危害。BaP 在 16 种 PAHs 中致癌性最强,不同用地方式下 BaP 的致癌风险水平均高于其他 6 种致癌性 PAHs。超风险 PAHs 单体主要位于焦化厂、球团厂北部、炼铁厂南部及轧钢厂部分地区,并以 BaP 的修复范围最大。因此,厂区有必要进行能源结构改造与污染监控,并对上述功能区实施土壤修复工程。

表 3 不同用地方式下土壤中多环芳烃的健康风险

Table 3 Health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils with different land utilization manners

PAHs	最大值/平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	居住用地		工业用地	
		致癌风险	危害商	致癌风险	危害商
Nap	217/51.3	/	$4.92 \times 10^{-6}/1.16 \times 10^{-6}$	/	$1.02 \times 10^{-1}/2.41 \times 10^{-2}$
Ace	509/53.4	/	$6.74 \times 10^{-4}/7.07 \times 10^{-5}$	/	$9.02 \times 10^{-5}/9.46 \times 10^{-6}$
Acy	51.4/7.25	/	$6.81 \times 10^{-5}/9.61 \times 10^{-6}$	/	$9.11 \times 10^{-6}/1.28 \times 10^{-6}$
Fl	261/31.5	/	$5.19 \times 10^{-4}/6.26 \times 10^{-5}$	/	$6.94 \times 10^{-5}/8.38 \times 10^{-6}$
Phe	2746/251	/	$7.28 \times 10^{-3}/6.65 \times 10^{-4}$	/	$9.74 \times 10^{-4}/8.90 \times 10^{-5}$
Ant	642/84.4	/	$1.70 \times 10^{-4}/2.23 \times 10^{-5}$	/	$2.28 \times 10^{-5}/3.00 \times 10^{-6}$
Flu	4540/492	/	$9.02 \times 10^{-3}/9.77 \times 10^{-4}$	/	$1.21 \times 10^{-3}/1.31 \times 10^{-4}$
Pyr	3786/401	/	$1.00 \times 10^{-2}/1.06 \times 10^{-3}$	/	$1.34 \times 10^{-3}/1.42 \times 10^{-4}$
BaA	3159/289	$4.99 \times 10^{-6}/4.57 \times 10^{-7}$	/	$1.71 \times 10^{-6}/1.56 \times 10^{-7}$	/
Chr	831/122	$1.31 \times 10^{-8}/1.92 \times 10^{-9}$	/	$4.50 \times 10^{-9}/6.61 \times 10^{-10}$	/
BbF	1621/231	$2.56 \times 10^{-6}/3.65 \times 10^{-7}$	/	$8.77 \times 10^{-7}/1.25 \times 10^{-7}$	/
BkF	504/71.6	$7.96 \times 10^{-8}/1.13 \times 10^{-8}$	/	$2.73 \times 10^{-8}/3.88 \times 10^{-9}$	/
BaP	1305/164	$2.06 \times 10^{-5}/2.59 \times 10^{-6}$	/	$7.06 \times 10^{-6}/8.87 \times 10^{-7}$	/
InP	1156/150	$1.83 \times 10^{-6}/2.37 \times 10^{-7}$	/	$6.25 \times 10^{-7}/8.11 \times 10^{-8}$	/
DBA	207/27.3	$3.27 \times 10^{-6}/5.17 \times 10^{-8}$	/	$1.12 \times 10^{-6}/1.48 \times 10^{-7}$	/
BgP	1049/142	/	$2.78 \times 10^{-3}/3.76 \times 10^{-4}$	/	$3.72 \times 10^{-4}/5.04 \times 10^{-5}$

## 3 结论

(1) 钢铁厂表层土壤 PAHs 的组成以毒性较高的中高环(4、5 环)为主,  $\sum 16\text{PAHs}$  含量范围为  $22.0 \sim 20062.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与 BaP 含量具有相似的变化趋势, 单体以 Flu、Pyr 的含量最高。  $\sum 7\text{CarPAHs}$  含量范围为 n. d.  $\sim 7010.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均值为  $1051.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与同类相关研究比较, 土壤 PAHs 污染处于中等水平, 中、重度污染采样点占 50.0%, 主要位于焦化厂、球团厂等典型区域。20 个采样点 PAHs 单体均超过荷兰土壤质量标准中 10 种 PAHs 的目

标值, 而与北京工业场地土壤筛选值相比, 则仅部分采样点 BaA、BaP 超标。

(2) 以 BaP 含量最高的 S7 为起点, 不同环数 PAHs 含量随距离增加呈衰减规律, 但低环组分的空间变异程度小于高环组分。源解析结果表明: 表层土壤中 PAHs 主要来源于以煤为主的化石燃料的燃烧, 石油类燃烧和泄漏的贡献较少。

(3) 健康风险评价结果表明: BaP、BaA、DBA、BbF、InP 在居住用地条件下的致癌风险超过了  $1 \times 10^{-6}$ , BaP、BaA、DBA 在工业用地条件下的致癌风险超过了  $1 \times 10^{-6}$ , BaP 的致癌风险最大, 该钢铁厂表层土壤中 PAHs 已对人群健康产生危害, 需实施

## 土壤修复工程.

## 参考文献:

- [ 1 ] 冯岸红, 朱智成, 陈社军, 等. 寿光土壤中多环芳烃的污染特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1607-1614.
- [ 2 ] Wilcke W, Amelung W, Krauss M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) patterns in climatically different ecological zones of Brazil[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(10): 1405-1417.
- [ 3 ] Wilcke W. Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil[J]. *Geoderma*, 2007, **141**(3-4): 157-166.
- [ 4 ] Guilhermino L, Lopes M C, Carvalho A P, *et al.* Inhibition of acetylcholinesterase activity as effect criterion in acute tests with juvenile *Daphnia Magna* [J]. *Chemosphere*, 1996, **32**(4): 727-738.
- [ 5 ] Durant J L, Busby Jr W F, Lafleur A L, *et al.* Human cell mutagenicity of oxygenated, nitrated and unsubstituted polycyclic aromatic hydrocarbons associated with urban aerosols [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 1996, **371**(3-4): 123-157.
- [ 6 ] Santodonato J. Review of the estrogenic and antiestrogenic activity of polycyclic aromatic hydrocarbons: relationship to carcinogenicity[J]. *Chemosphere*, 1997, **34**(4): 835-848.
- [ 7 ] Ockenden W A, Breivik K, Meijer S N, *et al.* The global recycling of persistent organic pollutants is strongly retarded by soils [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **121**(1): 75-80.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 金相灿. 有机化合物污染化学-有毒有机物污染化学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [ 11 ] Viglianti C, Hanna K, de Brauer C, *et al.* Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from aged-contaminated soil using cyclodextrins; experimental study[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **140**(3): 427-435.
- [ 12 ] 吴迪, 汪宜龙, 刘伟健, 等. 河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 740-749.
- [ 13 ] 冯嫫, 吕永龙, 焦文涛, 等. 北京市某废弃焦化厂不同车间土壤中多环芳烃(PAHs)的分布特征及风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(3): 399-407.
- [ 14 ] 张强, 邹华, 张涛, 等. 无锡某钢铁厂土壤污染现状及评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2012, **26**(6): 25-30.
- [ 15 ] Mastral A M, Callén M S. A review on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from energy generation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(15): 3051-3057.
- [ 16 ] Grimmer G, Naujack K W, Schneide D. Comparison of the profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in different areas of a city by glass-capillary-gas-chromatography in the nanogram-range [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1981, **10**(3-4): 265-276.
- [ 17 ] 田靖, 朱媛媛, 杨洪彪, 等. 大型钢铁厂及其周边土壤多环芳烃污染现状调查、评价与源解析[J]. *环境化学*, 2013, **32**(6): 1002-1008.
- [ 18 ] 张利飞, 杨文龙, 董亮, 等. 苏南地区农田表层土壤中多环芳烃和酞酸酯的污染特征及来源[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2202-2209.
- [ 19 ] 沈菲, 朱利中. 钢铁工业区附近农田蔬菜 PAHs 的浓度水平及分布[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 669-672.
- [ 20 ] 苑金鹏, 王晓利, 周家斌, 等. 济南市表层土壤中 PAHs 的分布、来源及风险分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 166-171.
- [ 21 ] Edwards N T J. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH's) in the terrestrial environment-a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, **12**(4): 427-441.
- [ 22 ] Trapido M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Estonian soil: contamination and profiles[J]. *Environmental Pollution*, 1999, **105**(1): 67-74.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] VROM. Environmental quality objectives in the Netherlands: a review of environmental quality objectives and their policy framework in the Netherlands [M]. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 1994.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] Zhang Y X, Shen H Z, Tao S, *et al.* Modeling the atmospheric transport and outflow of polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(17): 2820-2827.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] Yunker M B, Snowdon L R, Macdonald R W, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon composition and potential sources for sediment samples from the Beaufort and Barents Seas [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(4): 1310-1320.
- [ 29 ] 史兵方, 吴启琳, 欧阳辉祥, 等. 百色市工业区表层土壤中多环芳烃污染特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(10): 2593-2601.
- [ 30 ] Yunker M B, Macdonald R W, Goyette D, *et al.* Natural and anthropogenic inputs of hydrocarbons to the Strait of Georgia[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **225**(3): 181-209.
- [ 31 ] 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.
- [ 32 ] Zhang X L, Tao S, Liu W X, *et al.* Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons based on species ratios: a multimedia approach[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(23): 9109-9114.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i>	(3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i>	(3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i>	(3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i>	(3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i>	(3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i>	(3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i>	(3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....	LIU Da-jun, WANG Jia-quan	(3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing	(3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i>	(3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i>	(3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i>	(3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i>	(3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i>	(3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i>	(3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC .....	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i>	(3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i>	(3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i>	(3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i>	(3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i>	(3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo	(3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i>	(3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i>	(3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i>	(3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i>	(3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells .....	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i>	(3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate .....	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i>	(3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i>	(3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China .....	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i>	(3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i>	(3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i>	(3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i>	(3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui	(3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i>	(3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(3606)
Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i>	(3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i>	(3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia	(3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i>	(3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong	(3670)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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