

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11  
第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征 ..... 沈吉, 曹念文(4743)

2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征 ..... 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)

武汉市PM<sub>2.5</sub>化学组分时空分布及聚类分析 ..... 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)

郑州市某生活区大气PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及生态、健康风险评估 ..... 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析 ..... 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)

2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征 ..... 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析 ..... 闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 ..... 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枫亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素 ..... 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)

中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素 ..... 侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)

石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析 ..... 杨阳, 李杏茹, 刘水桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)

郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估 ..... 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)

典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用 ..... 鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)

2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 ..... 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)

焦化厂建筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险 ..... 赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)

中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价 ..... 杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)

岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素 ..... 原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)

长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送 ..... 吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 ..... 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)

不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响 ..... 陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 笪文怡, 黄亚文(4924)

合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 ..... 陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)

三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征 ..... 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)

丹江口水库氮磷内源释放对比 ..... 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 ..... 李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王瑀(4962)

纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响 ..... 王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能 ..... 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)

MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性 ..... 王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)

微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响 ..... 王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)

基于铁锰泥的除砷颗粒吸附剂制备及其比较 ..... 曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)

氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B ..... 张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)

天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估 ..... 陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)

废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 ..... 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 ..... 印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)

FeCl<sub>3</sub>-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀 ..... 魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 ..... 李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)

厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征 ..... 宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)

基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响 ..... 陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文焯, 倪敏(5066)

太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 ..... 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例 ..... 王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)

半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响 ..... 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 ..... 周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)

改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复 ..... 韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)

铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应 ..... 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)

温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤 ..... 徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)

重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应 ..... 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)

双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响 ..... 郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)

不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 ..... 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)

黄土高原地区两种土地利用方式CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放特征 ..... 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)

生物质炭对华北平原4种典型土壤N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)

《环境科学》征订启事(4995) 《环境科学》征稿简则(5039) 信息(4782, 4979, 5056)

# 焦化厂建构筑物和生产设施表面 PAHs 的赋存特征及健康风险

赵一澍<sup>1,2,3</sup>, 廖晓勇<sup>1,2,3\*</sup>, 李尤<sup>2,3</sup>, 罗俊鹏<sup>1,2,3</sup>, 龚雪刚<sup>2,3</sup>, 侯艺璇<sup>2,3</sup>

(1. 南昌大学资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 环境损害与污染修复北京市重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 本研究以某典型焦化厂建构筑物及生产设施为对象, 从不同功能区、不同材质等角度分析建构筑物及生产设施表面多环芳烃(PAHs)的赋存特征, 并评价其健康风险. 结果表明, 焦化厂建构筑物及生产设施表面的 PAHs 含量范围为  $8.00 \times 10^{-2} \sim 1.98 \times 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$ . 其中, 22.0% 的擦拭样品 PAHs 含量超出了世界贸易中心工作组(WTCTG)的规定限值( $1.45 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$ ), PAHs 最大超标可达 135 倍. PAHs 含量高值主要分布在炼焦区和精制区, 其中, 炼焦区样品 PAHs 含量均值最高, 达  $12.1 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$ . 研究区中防锈漆材质表面 PAHs 含量均值和超标率最高, 砖和水泥次之, 玻璃对 PAHs 的吸附和富集能力最小. 采用美国超级基金方法对各功能区开展健康风险评估研究, 其中, 炼焦区及精制区内 PAHs 存在致癌风险, 其致癌单体对暴露人群的总致癌风险值可达  $3.78 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-5}$ , 均高于 US EPA 标准下限  $10^{-6}$ . 场地建构筑物及生产设施表面的有机污染物分布规律及健康风险结果可为污染场地环境管理和治理对策提供科学依据.

**关键词:** 工业场地; 建构筑物; 生产设施; 多环芳烃(PAHs); 吸附; 风险评估

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4870-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201905170

## Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant

ZHAO Yi-shu<sup>1,2,3</sup>, LIAO Xiao-yong<sup>1,2,3\*</sup>, LI You<sup>2,3</sup>, LUO Jun-peng<sup>1,2,3</sup>, GONG Xue-gang<sup>2,3</sup>, HOU Yi-xuan<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Beijing Key Laboratory of Environmental Damage Assessment and Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The occurrence characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on the surfaces of buildings and devices in a typical coking plant were analyzed with the samples from different functional zones and materials. The health risk of PAHs was also evaluated. The results showed that PAHs concentrations ranged from  $8.00 \times 10^{-2} \sim 1.98 \times 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$ , and 22.0% wiping samples exceeded the World Trade Center Task Group (WTCTG) standard ( $1.45 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$ ), the highest rate beyond the standard in the samples was 135. The functional zones with the high PAHs concentration were mainly located in the coking and refinery zone. The PAHs concentration on the surfaces of buildings in the coking zone was  $12.1 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$ , which was the highest in all functional zones. Among the surface materials, the antirust paint contained the highest concentrations of PAHs and were over the standard rate, whereas the glass had the lowest adsorption ability for PAHs. The US Superfund Risk Assessment Method was used to evaluate the health risk of PAHs. The evaluation results showed that PAHs in the coking and refinery zones were a risk for carcinogenicity, the total carcinogenic risk value to the exposed population ( $3.78 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-5}$ ) was higher than the lower limit of the US EPA standard ( $10^{-6}$ ). The results could provide the scientific basis for environmental management and remediation of contaminated sites.

**Key words:** industrial site; buildings; devices; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); adsorption; risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类含有两个及两个以上苯环的碳氢化合物, 主要是由化石燃料和有机物的不完全燃烧及热解产生, 具有致癌、致畸和致突变的高毒性<sup>[1,2]</sup>. 焦化行业是 PAHs 的重要人为污染源之一<sup>[3]</sup>, 厂区内 PAHs 污染浓度可高达  $9.91 \times 10^2 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[4]</sup>. 焦化过程产生的 PAHs 一部分以气态形式直接散逸到大气中, 一部分吸附在颗粒物上散布在大气飘尘中<sup>[5]</sup>, 最终随着大气的扩散迁移-沉降于土壤、水体及建构筑物表面等介质中<sup>[6]</sup>. 有研究学者对炼焦过

程不同环节中 PAHs 的含量进行测定, 其中, 焦化厂装煤、推焦、炼焦过程产生的 PAHs 含量分别可达  $1.24 \times 10^2$ 、 $3.60 \times 10^2$  和  $2.27 \times 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>[7]</sup>. 值得注意的是, PAHs 颗粒物具有吸附性、吸湿性和凝聚性, 极易吸附于硬质和非渗水性建构筑物表面<sup>[8]</sup>, 并在不透水层上的有机薄膜内不断富集和累

收稿日期: 2019-05-22; 修订日期: 2019-06-04

基金项目: 美丽中国生态文明建设科技工程专项 (XDA23010400)

作者简介: 赵一澍 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染场地修复, E-mail: zhaoyishu@163.com

\* 通信作者, E-mail: liaoxiyong@igsnrr.ac.cn

积<sup>[9]</sup>.

环境中 PAHs 分布广泛, 具有持久性、远距离迁移等特性<sup>[10]</sup>, 且难被生物降解, 易通过呼吸、皮肤接触和饮食等途径进入人体并累积<sup>[11,12]</sup>. 附着在建构筑物及生产设施表面的 PAHs 在自然或人为的干扰作用下会再次进入大气环境中, 可黏附于人体皮肤表面或被吸入肺部<sup>[13]</sup>. 进入人体中的 PAHs 通过干扰细胞膜功能及耦合酶系统等途径损害人体神经系统及生化系统, 影响生育能力<sup>[14,15]</sup>, 同时也会增加膀胱癌、肺癌及肾癌等癌症患病概率<sup>[16]</sup>, 增大人体的健康风险. 研究指出, 某油田城市建筑物表面 PAHs 含量高达 11.4 ~ 45.3  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 对城市居民存在潜在的致癌风险<sup>[17]</sup>.

目前对焦化行业 PAHs 的研究多集中于土壤、大气和废水等方面<sup>[18~20]</sup>, 对焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 的污染水平及健康风险的研究鲜有涉及. 本文以典型焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 为研究对象, 通过擦拭采样分析了该场地不同功能区、不同材质的建构筑物及生产设施表面 PAHs 含量水平和赋存特征, 同时对 16 种优控 PAHs 进行了健康风险评估, 以为焦化行业搬迁企业污染场地的环境管理提供决策依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究以中国北方某典型焦化厂为研究对象, 该企业于 1959 年建成投产, 生产工艺覆盖了炼焦与副产品加工的所有过程, 主要产品包括焦炭、焦炉煤气, 焦油以及苯、硫铵和沥青等 40 多种化工产品, 生产期间产生的主要污染物为多环芳烃、芳香类有机物及酚类等. 企业关停后根据工业旧址保护与开发利用规划, 焦化厂的部分原有建构筑物将作为工业遗产保留下来, 厂区旧址用地性质规划为商业、公共设施、工业旧址公园等.

### 1.2 采样

基于焦化厂的生产工艺将厂区划分为 5 个主要区域: 炼焦区、精制区、制气区、办公生活区及其他区域. 根据实际调研情况, 在焦化厂内共布设 56 个建构筑物及生产设施采样点, 对部分采样点采集不同材质的擦拭样品, 共采集 91 个擦拭样品, 采样点用 GPS 精确定位, 采样点分布见图 1. 同时, 采取

了距焦化厂约 25 km 某办公园区内玻璃、防锈漆、水泥和砖表面的擦拭样品作为对照区样品.

参照 US EPA 和 ASTM 方法<sup>[21,22]</sup>, 采用擦拭取样方法. 擦拭工具为无菌纱布片 (7.5 cm × 7.5 cm), 无菌纱布片在使用前用二氯甲烷索氏提取 12 h, 以除去部分干扰有机物, 提取后放置通风橱风干, 用铝箔包裹放入自封袋中待用; 采样时将无菌纱布蘸取 2 mL 二氯甲烷, 擦拭面积为 1 dm<sup>2</sup> (1 dm × 1 dm), 采用先垂直后水平擦拭方式, 以确保覆盖全部面积, 样品收集于玻璃瓶内, 对样品进行编号并记录取样信息, 于 4℃ 下保存待分析.

### 1.3 样品分析

将擦拭后的无菌纱布片剪碎转移至三角瓶内, 加入 20 mL 二氯甲烷使用超声仪萃取 1 h (0.5 h 换一次水). 移取 5 mL 萃取液至层析柱内净化, 净化前层析柱依次填入脱脂棉、10 g 活化硅胶和 1 ~ 2 cm 无水硫酸钠. 先以 30 mL 正己烷润洗层析柱, 待正己烷下降至无水硫酸钠上层界面时再加入 5 mL PAHs 萃取液, 最后向层析柱中加入 50 mL 正己烷: 二氯甲烷 (1:1) 混合溶液洗脱, 收集洗脱液于 100 mL 圆底烧瓶中, 使用旋转蒸发仪 (R-215 Buchi Inc, 瑞士) 在 40℃ 恒温下将洗脱液浓缩至 1 mL 装入 Agilent 色谱样品瓶, 按照 Zhao 等<sup>[23]</sup>的方法使用气相色谱-质谱联用仪 (Agilent 7890A-5975C, 美国) 检测样品的 PAHs 含量.

### 1.4 健康风险评估

根据美国环保署超级基金风险评估指南中标准风险等式<sup>[24,25]</sup>来计算焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 对暴露人群的致癌风险值及非致癌危害商. 致癌物质也具有非致癌风险, 但 US EPA 对致癌单体的非致癌风险无相应参考值, 故只考虑非致癌单体的非致癌危害<sup>[26]</sup>. 本研究根据焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 对不同暴露人群的影响差异, 共考虑了 3 种暴露情景, 4 类暴露人群, 分别为长期驻场工人的一般工业暴露情景、临时拆卸工人的拆除清理暴露情景以及厂区周边成人和儿童居民的生活暴露情景. 致癌风险值与非致癌危害商计算公式为式 (1) ~ (5), 以 PAHs 可接受的致癌风险值 (target cancer risk, TR) 为  $10^{-6}$ , 可接受的非致癌危害商 (target hazard quotient, THQ) 为 1, 超过可接受限值证明存在健康风险<sup>[27]</sup>.

$$\text{CR}_{\text{der}} = \text{SA}_{\text{d}} \times F_{\text{d}} \times \text{EV} \times \text{FT}_{\text{ss}} \times \text{DAF} \quad (1)$$

$$\text{CR}_{\text{ing}} = \text{SA}_{\text{g}} \times F_{\text{g}} \times \text{EV} \times \text{FT}_{\text{ss}} \times \text{FT}_{\text{sm}} \times \text{HTME} \quad (2)$$

$$\text{CR}_{\text{inh}} = \text{IR} \times K \quad (3)$$

$$\text{TR} = \frac{\text{CF} \times C_{\text{s}} [(\text{CR}_{\text{der}} \times \text{CSF}_{\text{der}}) + (\text{CR}_{\text{ing}} \times \text{CSF}_{\text{ing}}) + (\text{CR}_{\text{inh}} \times \text{CSF}_{\text{inh}})] \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}_{\text{ca}} \times 365} \quad (4)$$

$$THQ = \frac{CF \times C_s [(CR_{der}/Rfd_{der}) + (CR_{ing}/Rfd_{ing}) + (CR_{inh}/Rfd_{inh})] \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc} \times 365} \quad (5)$$

式中,  $CR_{der}$  为皮肤接触速率,  $m^2 \cdot d^{-1}$ ,  $CR_{ing}$  为口腔摄入接触速率,  $m^2 \cdot d^{-1}$ ,  $CR_{inh}$  为呼吸吸入接触速率,  $m^2 \cdot d^{-1}$ ,  $C_s$  为建构物及生产设施表面 PAHs 的含量,  $\mu g \cdot dm^{-2}$ , CF 为单位转换因子, 本研究取 0.1,  $CSF_{der}$ 、 $CSF_{inh}$  和  $CSF_{ing}$  为各途径

致癌斜率因子,  $[mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}]^{-1}$ ,  $Rfd_{der}$ 、 $Rfd_{inh}$  和  $Rfd_{ing}$  为各途径非致癌参考剂量,  $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ; 公式中其他参数及取值参见表 1, 16 种 PAHs 的非致癌参考剂量 (RfD) 及致癌斜率因子 (CSF) 参数见表 2.

表 1 健康风险暴露参数

Table 1 Exposure parameters of health risk assessment

| 暴露参数                      | 工作人员                 |                      | 居民                   |                      | 单位                 | 文献       |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------|
|                           | 长期驻场工人               | 临时拆卸工人               | 成人                   | 儿童                   |                    |          |
| $SA_d$ (皮肤表面有效吸附表面积)      | 0.507                | 0.507                | 0.507                | 0.218                | $m^2$              | [27]     |
| $F_d$ (每日有效皮肤接触面积分数)      | 0.25                 | 0.25                 | 0.25                 | 0.25                 | 无量纲                | [25]     |
| $SA_g$ (可供摄入的皮肤有效表面积)     | 0.085                | 0.085                | 0.085                | 0.048                | $m^2$              | [25, 28] |
| $F_g$ (接触口部的有效皮肤面积分数)     | 0.1                  | 0.1                  | 0.1                  | 0.1                  | 无量纲                | [25]     |
| EV (接触表面频率)               | 3                    | 12                   | 1                    | 1                    | $d^{-1}$           | [25]     |
| $FT_{ss}$ (颗粒从表面迁移到皮肤的分数) | 0.1                  | 0.1                  | 0.1                  | 0.1                  | 无量纲                | [25]     |
| $FT_{sm}$ (颗粒从皮肤到口部的分数)   | 0.3                  | 0.5                  | 0.3                  | 0.3                  | 无量纲                | [29]     |
| HTME (从手到口部发生次数)          | 3                    | 3                    | 3                    | 10                   | 无量纲                | [25]     |
| IR (呼吸速率)                 | 15.0                 | 20.0                 | 13.9                 | 12.2                 | $m^3 \cdot d^{-1}$ | [25, 30] |
| K (再悬浮因子)                 | $5.0 \times 10^{-8}$ | $1.0 \times 10^{-4}$ | $5.0 \times 10^{-8}$ | $5.0 \times 10^{-8}$ | $m^{-1}$           | [25]     |
| EF (暴露频率)                 | 250                  | 21                   | 350                  | 350                  | $d \cdot a^{-1}$   | [25, 27] |
| ED (暴露周期)                 | 25                   | 1                    | 24                   | 6                    | a                  | [25, 27] |
| BW (体重)                   | 56.8                 | 56.8                 | 56.8                 | 15.9                 | kg                 | [27]     |
| $AT_{ca}$ (致癌效应平均时间)      | 70                   | 70                   | 70                   | 70                   | a                  | [25]     |
| $AT_{nc}$ (非致癌效应平均时间)     | 25                   | 0.5                  | 6                    | 6                    | a                  | [25, 27] |
| DAF (皮肤吸收效率因子)            | 0.13                 | 0.13                 | 0.13                 | 0.13                 | 无量纲                | [27]     |

表 2 PAHs 毒性参数<sup>1)</sup>

Table 2 Toxicity parameters of PAHs

| 非致癌单体            | 非致癌参考剂量 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ |                       |                       | 致癌单体                | 致癌斜率因子 $[mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}]^{-1}$ |                       |                       |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--|-----------------------|-----------------------|
|                  | $Rfd_{der}$                          | $Rfd_{ing}$           | $Rfd_{inh}$           |                     | $CSF_{der}$                                | $CSF_{ing}$           | $CSF_{inh}$           |
| 萘 (Nap)          | $2.00 \times 10^{-2}$                | $4.00 \times 10^{-2}$ | $9.00 \times 10^{-4}$ | 苯并[a]蒽 (BaA)        | 1.46                                       | 0.73                  | 0.31                  |
| 蒽 (Acy)          | $3.00 \times 10^{-2}$                | $6.00 \times 10^{-2}$ | $3.00 \times 10^{-2}$ | 蒽 (Chry)            | $1.46 \times 10^{-2}$                      | $7.30 \times 10^{-3}$ | $3.10 \times 10^{-3}$ |
| 二氢蒽 (Ace)        | $3.00 \times 10^{-2}$                | $6.00 \times 10^{-2}$ | $3.00 \times 10^{-2}$ | 苯并[b]荧蒽 (BbF)       | 1.46                                       | 0.73                  | 0.31                  |
| 芴 (Flu)          | $2.00 \times 10^{-2}$                | $4.00 \times 10^{-2}$ | $2.00 \times 10^{-2}$ | 苯并[k]荧蒽 (BkF)       | $1.46 \times 10^{-1}$                      | $7.30 \times 10^{-2}$ | $3.10 \times 10^{-2}$ |
| 菲 (Phe)          | $1.50 \times 10^{-2}$                | $3.00 \times 10^{-2}$ | $1.50 \times 10^{-2}$ | 苯并[a]芘 (BaP)        | 14.60                                      | 7.30                  | 3.10                  |
| 蒽 (Ant)          | $1.50 \times 10^{-1}$                | $3.00 \times 10^{-1}$ | $1.50 \times 10^{-1}$ | 茚并[1,2,3-cd]芘 (InP) | 1.46                                       | 0.73                  | 0.31                  |
| 荧蒽 (Fla)         | $2.00 \times 10^{-2}$                | $4.00 \times 10^{-2}$ | $2.00 \times 10^{-2}$ | 二苯并[a,h]蒽 (DahA)    | 14.60                                      | 7.30                  | 3.10                  |
| 芘 (Pyr)          | $1.50 \times 10^{-2}$                | $3.00 \times 10^{-2}$ | $1.50 \times 10^{-2}$ |                     |  |                       |                       |
| 苯并[ghi]芘 (BghiP) | $1.50 \times 10^{-2}$                | $3.00 \times 10^{-2}$ | $1.50 \times 10^{-2}$ |                     |  |                       |                       |

1) 数据来自美国风险综合信息系统<sup>[31]</sup>、美国超级基金同行评议临时毒性值<sup>[32]</sup>和健康影响评估概要表格<sup>[33]</sup>; Phe 和 BghiP 的非致癌参考剂量参考 Pyr<sup>[24]</sup>

## 1.5 质量保证与质量控制

样品空白和试剂空白: 在 PAHs 检测过程中, 每 9 个样品加 1 个样品空白, 样品空白中无目标化合物检出。

仪器校正: 检测 PAHs 时, 每运行 9 针样品, 加 1 针混合标样 (16 种多环芳烃混合标样和 2 种替代标准物, 浓度  $250 \mu g \cdot L^{-1}$ ), 并对仪器进行质量校正。检测完成后, 标准样品定量结果相对标准偏差为 0.55% ~ 1.85%。

样品加标回收率: 采用对三联苯-d14 和 2-氟联苯标准品作回收率替代标准, 加标水平为  $250$

$\mu g \cdot kg^{-1}$  时, 回收率在 80.8% ~ 102.3% 范围内。多环芳烃最终检测结果经回收率校正。

## 1.6 数据分析方法

实验数据采用 Microsoft Excel 2010 及 SPSS 20.0 进行统计分析, 采用 Origin 2018 及 ArcGIS 10.2 软件进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焦化厂建构物和生产设施表面 PAHs 的含量及分布特征

焦化厂建构物及生产设施表面 PAHs 的含量

分布情况如图 1 所示. 结果表明, 在 91 个擦拭样品中均检测到 PAHs, 且不同样品间 PAHs 污染水平差异较大, 其含量范围为  $8.00 \times 10^{-2} \sim 1.98 \times 10^2 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ , 平均值达  $5.10 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ , 7 种致癌 PAHs 的总量(PAHs)均值为  $1.10 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ . 22.0% 的擦拭样品 PAHs 含量超出了 WTCTG 的规定限值 1.45

$\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ [34]. 其中, 生产车间防锈漆表面 PAHs 含量最高, 达  $1.98 \times 10^2 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ , 超过标准限值 135 倍; 生产车间砖表面的 PAHs 含量次之, 为  $96.5 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ . 此外, 东初冷器装置的防锈漆表面也具有较高的 PAHs 含量, 为  $38.8 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ , 质检楼玻璃表面的 PAHs 含量最低, 仅为  $8.00 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ .



图 1 焦化厂建筑物和生产设施表面 PAHs 含量分布示意

Fig. 1 Distribution patterns of PAHs concentrations on the building and device surfaces

焦化厂内建筑物及生产设施表面 PAHs 含量的空间分布差异较大. 其中, PAHs 重污染区域主要分布在焦化厂中部及东南部, 而西部及东北部区域样点 PAHs 含量较低, 仅有 1 个采样点 PAHs 含量超过规定限值. 研究结果与焦化厂表层土壤中 PAHs 分布具有相似规律, 各区域土壤中 PAHs 含量差异显著, 且分布具有典型区域性<sup>[35,36]</sup>, 推测造成 PAHs 含量空间分布差异较大的原因与区域的使用功能及其生产工艺有关. 此外, Liao 等<sup>[37]</sup>发现焦化厂建筑物所处的区域及表面材质是影响其表面污染物浓度的主要因素.

## 2.2 焦化厂不同功能区中建筑物及生产设施表面 PAHs 的赋存情况

通过对焦化厂不同功能区中建筑物及生产设施表面 PAHs 研究发现, 各功能区总 PAHs 含量均值规律呈炼焦区 > 精制区 > 其他区域 > 制气区 > 办公生活区(表 3). 精制区内 PAHs 超标率最高, 可达 43.5%, 炼焦区(31.0%)和制气区(7.1%)次

之. 分析不同功能区 PAHs 污染浓度可知, 炼焦区中样品的 PAHs 平均含量最高( $12.1 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ ), 为污染限值( $1.45 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ )的 8.4 倍; 精制区样品 PAHs 含量均值超标 2.7 倍; 制气区采集的 14 个擦拭样品中, 仅有 1 个样品 PAHs 含量超标( $1.50 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ ); 办公生活区及其他区域内样品含量均低于污染限值. 造成炼焦区及精制区擦拭样品 PAHs 含量较高的原因可能与其所处区域涉及的生产工艺有关. 有研究表明, 炼焦区内配煤及燃煤过程中会产生大量的 PAHs 烟气<sup>[6]</sup>, 同时精制区内脱硫、蒸氨、洗苯等工艺环节也会溢散出大量 PAHs 废气<sup>[36]</sup>, 产生的 PAHs 气体及颗粒物大部分会以沉降形式附着在区域内建筑物及生产设施表面, 造成表面污染. 对 5 个功能区的擦拭样品 PAHs 含量进行显著性检验, 结果表明, 各功能区之间的总 PAHs 含量差异不显著.

各功能区建筑物及生产设施表面 PAHs 负载以低环为主, 且同一功能区内, 低环 PAHs(2~3

环)含量和中环 PAHs(4 环)、高环 PAHs(5~6 环)的含量存在显著性差异(表 3). 炼焦区和精制区中, Phe、Fla 和 Pyr 是区域内含量最高的 3 种 PAHs, 占污染总量的 43.4%~67.9%. 制气区、办公生活区和其他区域内以 Phe、Ace 和 Nap 类低环 PAHs 为主, 占比高于 70%. 结合生产工艺、污染物性质及其环境行为, 对区域内 PAHs 污染来源及成因进行系统分析. 低环 PAHs 具有挥发性、高饱和蒸气压等特点, 是炼焦废气<sup>[38]</sup>和焦炉配煤工序产生的烟气<sup>[20]</sup>的主要成分. 通过对焦化厂区土壤样品的采集与分析发现, 煤的不完全燃烧和炼焦产生的飞灰是导致周边土壤中环 PAHs 污染的最主要驱动因素<sup>[39,40]</sup>, 通常人们将 Pyr 和 Fla 作为煤燃烧的重要指示物<sup>[41]</sup>. 由此推断, 燃煤炼焦及焦炉配煤环节是造成焦化厂区污染的最主要原因, 生产过程

中产生的气态、颗粒态 PAHs 会随着大气沉降等过程附着于周边土壤、建构物及设施表面, 并通过吸附、富集等行为造成污染. 冯嫣等<sup>[36]</sup>在研究中指出, 废弃焦化厂内土壤表层污染状况严重, 其中, 低环及中环 PAHs 的占比分别高达 54.7% 和 31.7%, 这与本文所述建构物及生产设施表面 PAHs 赋存规律基本一致.

### 2.3 焦化厂不同建构物及生产设施材质表面 PAHs 的赋存情况

玻璃、防锈漆、水泥和砖是研究区域内建构物及生产设施最常用的 4 种材质, 各材质表面 PAHs 的赋存特征如表 4 所示. 比较可知, 研究区域内 4 种材质表面 PAHs 平均含量大小依次为防锈漆 > 砖 > 水泥 > 玻璃, 且同种材质表面 PAHs 含量均值及中值远高于对照区. 其中, 防锈漆材质表面

表 3 焦化厂不同功能区建构物及生产设施表面 PAHs 的赋存特征<sup>1)</sup>  
Table 3 PAHs concentrations on the building and device surfaces in different zones

| 功能区   | PAHs 类型 | 范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$           | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ | 标准差   | 变异系数 | 超标率/% |
|-------|---------|--|--------------------------------------|-------|------|-------|
| 炼焦区   | 低环      | $7.00 \times 10^{-2} \sim 74.2$                | 5.19a                                | 15.13 | 2.91 | —     |
|       | 中环      | $1.00 \times 10^{-2} \sim 90.1$                | 5.16b                                | 18.29 | 3.54 | —     |
|       | 高环      | nd~15.5  | 1.78c                                | 6.64  | 3.74 | —     |
|       | 总 PAHs  | $8.00 \times 10^{-2} \sim 1.98 \times 10^2$    | 12.1A                                | 39.99 | 3.30 | 31.0  |
| 精制区   | 低环      | 0.160~7.07                                     | 1.17a                                | 1.54  | 1.36 | —     |
|       | 中环      | nd~19.1  | 1.44b                                | 3.99  | 2.70 | —     |
|       | 高环      | nd~12.7  | 1.29b                                | 2.72  | 2.11 | —     |
|       | 总 PAHs  | 0.190~38.8                                     | 3.90A                                | 8.11  | 2.08 | 43.5  |
| 制气区   | 低环      | 0.310~1.34                                     | 0.570a                               | 0.28  | 0.49 | —     |
|       | 中环      | $2.00 \times 10^{-2} \sim 0.130$               | $5.00 \times 10^{-2}$ b              | 0.04  | 0.67 | —     |
|       | 高环      | $2.00 \times 10^{-2} \sim 5.00 \times 10^{-2}$ | $3.00 \times 10^{-2}$ c              | 0.01  | 0.29 | —     |
|       | 总 PAHs  | 0.400~1.50                                     | 0.650AB                              | 0.30  | 0.46 | 7.1   |
| 办公生活区 | 低环      | $1.00 \times 10^{-2} \sim 1.11$                | 0.390a                               | 0.24  | 0.63 | —     |
|       | 中环      | $1.00 \times 10^{-2} \sim 0.540$               | $7.00 \times 10^{-2}$ b              | 0.12  | 1.61 | —     |
|       | 高环      | $1.00 \times 10^{-2} \sim 6.00 \times 10^{-2}$ | $3.00 \times 10^{-2}$ b              | 0.01  | 0.42 | —     |
|       | 总 PAHs  | 0.160~1.30                                     | 0.490B                               | 0.32  | 0.66 | 0     |
| 其他区域  | 低环      | 0.280~0.750                                    | 0.530a                               | 0.15  | 0.29 | —     |
|       | 中环      | $2.00 \times 10^{-2} \sim 0.470$               | 0.110b                               | 0.18  | 1.67 | —     |
|       | 高环      | $3.00 \times 10^{-2} \sim 0.390$               | $9.00 \times 10^{-2}$ b              | 0.14  | 1.55 | —     |
|       | 总 PAHs  | 0.350~1.36                                     | 0.730AB                              | 0.35  | 0.48 | 0     |

1) “nd”表示未检出; 小写字母代表各功能区低、中、高环 PAHs 含量间的显著性差异( $P < 0.05$ ), 大写字母为 5 个功能区之间总 PAHs 含量的显著性差异( $P < 0.05$ ), 相同字母为无显著性差异, 不同字母为达到显著性差异

PAHs 含量的均值和中值分别高达  $14.6 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$  及  $1.32 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ , 是对照区防锈漆材质 PAHs 含量 ( $0.330 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ ) 的 44.2 倍和 4.0 倍. 4 种材质表面 PAHs 的超标情况与其含量变化略有不同, 其超标率由高到低分别为防锈漆 > 水泥 > 砖 > 玻璃, 其中防锈漆表面样品超标率高达 42.1%, 是其他 3 种材质样品 PAHs 超标率的 2.6~5.5 倍.

建构物及生产设施材质的性质(粗糙度、吸水性、疏水性及材料表面作用力等)是影响其表面

负载污染物含量和形态的决定性因素<sup>[42,43]</sup>. 本研究中, 防锈漆表面 PAHs 平均含量及超标率远高于其他 3 种材质. 推测其原因主要包括以下两点: ①防锈漆表面存在一层有机漆膜, 使其对气态、颗粒态 PAHs 的吸附和滞留能力显著增强; ②部分防锈涂料自身含有一定含量的 PAHs<sup>[44,45]</sup>, 会对其表面擦拭样品的 PAHs 含量造成一定影响. 水泥是仅次于防锈漆的高超标材质, 这是由材质结构性质和样点与污染源间的距离共同决定的. 水泥材质自身的粗

表 4 焦化厂构筑物及生产设施中 4 种主要材质表面 PAHs 的赋存特征<sup>1)</sup>  
Table 4 PAHs concentrations on the building and device surfaces of the four main materials

| 材质  | PAHs 类型 | 范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$       | 均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ | 标准差   | 变异系数 | 超标率/% |
|-----|---------|--|--------------------------------------|-------|------|-------|
| 玻璃  | 低环      | 0.120 ~ 4.57                               | 0.700a                               | 1.18  | 1.68 | —     |
|     | 中环      | $2.00 \times 10^{-2}$ ~ 0.110              | $5.00 \times 10^{-2}$ b              | 0.03  | 0.58 | —     |
|     | 高环      | nd ~ 0.590                                 | $7.00 \times 10^{-2}$ b              | 0.16  | 2.31 | —     |
|     | 总 PAHs  | 0.160 ~ 4.68                               | 0.820B                               | 1.19  | 1.45 | 7.7   |
| 防锈漆 | 低环      | $7.00 \times 10^{-2}$ ~ 74.2               | 5.16a                                | 16.80 | 3.25 | —     |
|     | 中环      | $1.00 \times 10^{-2}$ ~ 90.1               | 6.28a                                | 20.76 | 3.30 | —     |
|     | 高环      | nd ~ 33.7                                  | 3.13b                                | 7.98  | 2.55 | —     |
|     | 总 PAHs  | $8.00 \times 10^{-2}$ ~ $1.98 \times 10^2$ | 14.6A                                | 45.28 | 3.11 | 42.1  |
| 水泥  | 低环      | 0.120 ~ 10.9                               | 0.960a                               | 2.10  | 2.19 | —     |
|     | 中环      | $2.00 \times 10^{-2}$ ~ 5.43               | 0.340b                               | 1.10  | 3.21 | —     |
|     | 高环      | nd ~ 1.18                                  | 0.110c                               | 0.26  | 2.31 | —     |
|     | 总 PAHs  | 0.170 ~ 17.5                               | 1.42B                                | 3.42  | 2.42 | 16.0  |
| 砖   | 低环      | 0.100 ~ 38.7                               | 2.06b                                | 8.79  | 3.40 | —     |
|     | 中环      | nd ~ 44.1                                  | 3.21a                                | 10.13 | 3.77 | —     |
|     | 高环      | $1.00 \times 10^{-2}$ ~ 13.7               | 0.830c                               | 3.14  | 3.81 | —     |
|     | 总 PAHs  | 0.180 ~ 96.5                               | 6.10B                                | 22.05 | 3.62 | 10.5  |

1) “nd”表示未检出;小写字母代表各材质内低、中、高环 PAHs 含量间的显著性差异( $P < 0.05$ ),大写字母为 4 种材质之间总 PAHs 含量的显著性差异( $P < 0.05$ ),相同字母为无显著性差异,不同字母为达到显著性差异

糙度和比表面积较大,对 PAHs 具有一定的吸附作用<sup>[46]</sup>。同时,生产车间内部多采用水泥作为建筑材料,焦化工序产生的 PAHs 在车间内经短距离迁移后直接被水泥材料吸附,增大了其对 PAHs 的吸附概率,这也是导致其超标率较高的主要原因。个别砖体表面也检测出较高含量的 PAHs,炼焦车间砖墙及砖房表面的 PAHs 含量分别高达  $96.5 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$  和  $12.2 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ ,这是由于部分砖墙老化脱落致使墙体材质更加疏松、比表面积增大,从而增大 PAHs 的吸附量。对焦化厂 4 种表面材质间样品的 PAHs 含量进行显著性差异分析,结果表明,防锈漆表面 PAHs 含量与玻璃、水泥及砖表面的 PAHs 含量存在显著性差异,说明材质的差异对焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 的污染水平影响较大。

#### 2.4 焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 的暴露风险

污染物的健康风险是由污染浓度、暴露途径、暴露时间等因素综合决定的。目前国际上健康风险的表征主要采用致癌风险值和非致癌危害商来表示。通过模型计算可知,5 个功能区中 PAHs 对暴露人群的总非致癌危害商在  $1.77 \times 10^{-4}$  ~  $7.69 \times 10^{-3}$  区间范围内,均低于 US EPA 规定的限值 1,表明焦化厂建构筑物及生产设施表面的 PAHs 对暴露人群不存在明显的非致癌危害。4 种暴露人群中,成人居民和临时拆卸工人的非致癌风险商值较高。

除 NAP 外的 8 种 PAHs 非致癌单体均对成人居民的非致癌风险商最大,分别可达  $6.86 \times 10^{-5}$  (Acy)、 $1.51 \times 10^{-4}$  (Ace)、 $8.23 \times 10^{-5}$  (Flu)、 $3.11 \times 10^{-3}$  (Phe)、 $2.93 \times 10^{-5}$  (Ant)、 $2.19 \times 10^{-3}$  (Fla)、 $1.55 \times 10^{-3}$  (Pyr) 和  $1.10 \times 10^{-4}$  (BghiP),而 Nap 对临时拆卸工人的非致癌风险商最大,为  $4.15 \times 10^{-4}$ 。由于呼吸吸入是对 Nap 单体的非致癌危害商贡献率最大的暴露途径,而临时拆卸工人在施工时的呼吸速率远高于其他 3 类人群,故 Nap 单体对临时拆卸工人的非致癌危害商值最大。

焦化厂各功能区建构筑物及生产设施表面 PAHs 对暴露人群的总致癌风险值 (TR) 见图 2。4 种暴露人群的致癌风险值由大至小依次为:长期驻场工人 > 成人居民 > 儿童居民 > 临时拆卸工人,这是由受体与污染物的接触频率、接触面积及呼吸速率等因素综合决定的。长期驻场工人对场内 PAHs 的暴露时间最长、接触频率最高,因此致癌风险值最大。而相比于儿童,成人的呼吸速率和肺活量大,皮肤裸露面积多,会导致更多的污染物与皮肤接触或被呼吸吸入。虽然临时拆卸工人在暴露情景中的接触表面频率、呼吸速率最大,但其暴露周期及频率远低于其他 3 种人群,故其存在的致癌风险值较低<sup>[29]</sup>。

PAHs 的致癌风险值与研究区域内功能区的种类密切相关。5 个功能区内建构筑物及生产设施表面 PAHs 的总致癌风险大小基本呈现:炼焦区 > 精

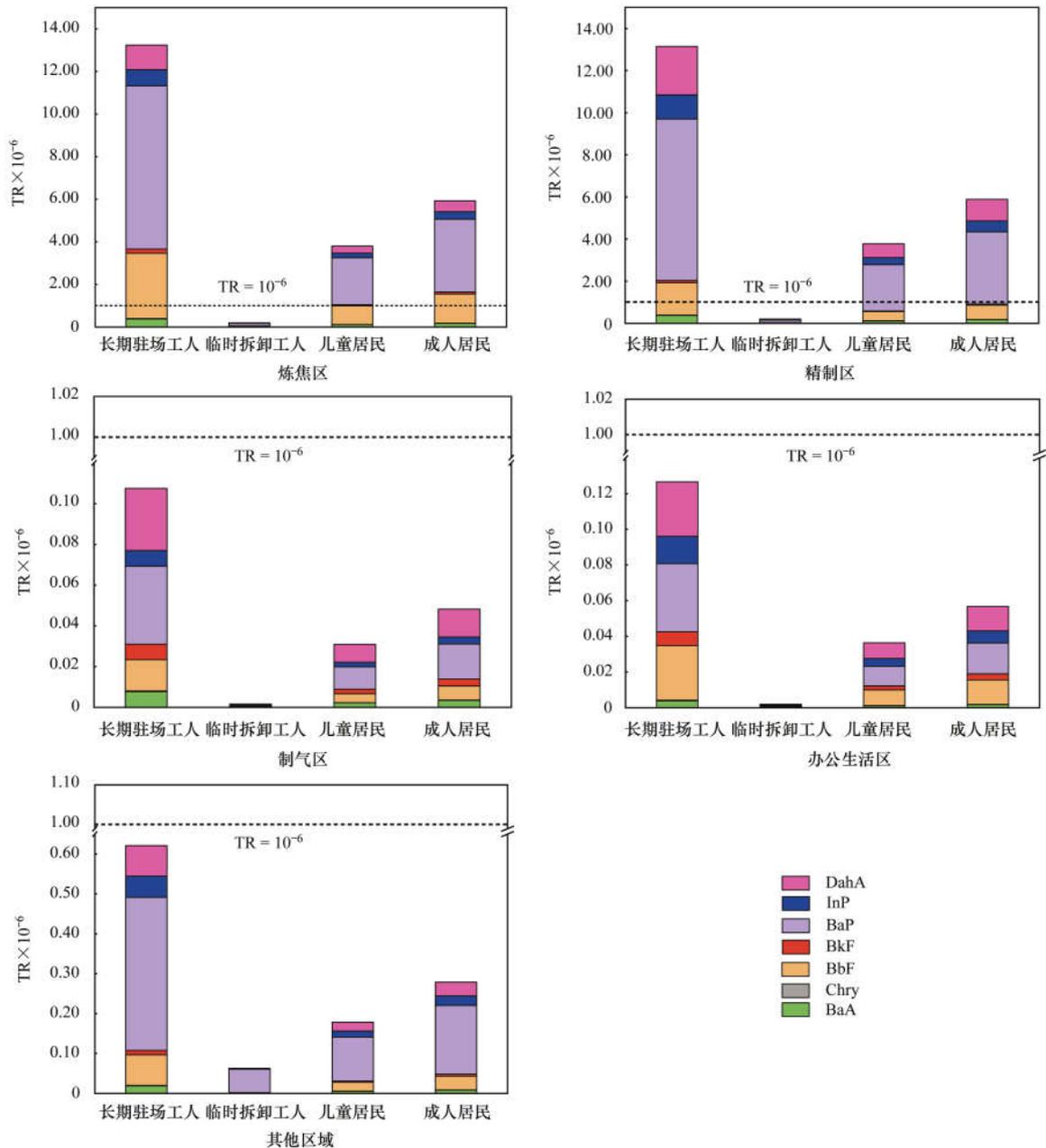


图2 焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 对 4 种暴露人群的总体致癌风险值 TR

Fig. 2 Total target cancer risk of PAHs (TR) in the coking plant samples for four exposed populations

制区 > 其他区域 > 办公生活区 > 制气区。其中, 炼焦区及精制区内 PAHs 对长期驻场工人、儿童居民及成年居民的总致癌风险值达  $3.78 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-5}$ , 均超过了 US EPA 规定的限值  $10^{-6}$ , 但低于可接受致癌风险值范围上限  $10^{-4}$ <sup>[27]</sup>, 表明区域内建构筑物及生产设施表面 PAHs 对暴露人群存在致癌风险, 但存在的健康风险在可接受范围内。在 7 种致癌单体中, BaP 对暴露人群的总体致癌风险值最高, 是最主要的致癌污染物。而 BaP 具有三致性, 职业暴露及接触 BaP 会大幅度增加暴露人群的肺癌患病概率<sup>[47]</sup>。炼焦区及精制区中的 BaP 单体对周边居民及长期驻场工人的致癌风险指数高达

$2.20 \times 10^{-6} \sim 7.66 \times 10^{-6}$ , 均超过致癌风险限值下限, 应引起重视。

### 3 结论

(1) 焦化厂建构筑物及生产设施表面擦拭样品中 PAHs 全部检出, 含量均值为  $5.10 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$ , 22.0% 的擦拭样品超过 WTCTG 的规定限值, 样品 PAHs 含量最高超标可达 135 倍。

(2) 焦化厂建构筑物及生产设施表面 PAHs 主要以低环为主, 厂区内高含量 PAHs 区域主要分布在炼焦区及精制区。其中, 炼焦区样品 PAHs 含量均值最大, 精制区样品 PAHs 超标率最高, 制气区

14 个擦拭样品中仅有 1 个超标, 而办公生活区及其他区域中样品 PAHs 含量均未超过污染限值。

(3) 焦化厂内防锈漆、砖、水泥和玻璃 4 种主要材质表面 PAHs 含量均值及中值均高于对照区内同种材质。其中, 防锈漆表面样品的 PAHs 含量均值最高, 超标率最大; 砖和水泥表面 PAHs 含量次之, 玻璃样品的含量最低, 材质的表面结构特性和距离污染源的距離是影响其表面 PAHs 负载的最主要因素。

(4) 焦化厂炼焦区及精制区内建筑物及生产设施表面 PAHs 存在致癌风险, 其对长期驻场工人、儿童及成人居民的总致癌风险值均高于 US EPA 标准下限, 4 种暴露人群中长期驻场工人的致癌风险值最大, 需引起重视。

#### 参考文献:

- [1] Liao X Y, Liu Q Z, Li Y, *et al.* Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from different soil fractions by persulfate oxidation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **78**(4): 239-246.
- [2] Li Y, Liao X Y, Huling S G, *et al.* The combined effects of surfactant solubilization and chemical oxidation on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbon from soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 1106-1112.
- [3] Zhang P, Chen Y G. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 1011-1020.
- [4] 郝丽虹, 张世晨, 武志花, 等. 低山丘陵区焦化厂土壤中 PAHs 空间分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(7): 2625-2631.
- [5] Hao L H, Zhang S C, Wu Z H, *et al.* Spatial distribution characteristics of PAHs in soil at hilly areal coking plant [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(7): 2625-2631.
- [6] Mu L, Peng L, Liu X F, *et al.* Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and their gas/particle partitioning from fugitive emissions in coke plants [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **83**: 202-210.
- [7] Lin X F, Zhao D Y, Peng L, *et al.* Gas-particle partition and spatial characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air of a prototype coking plant [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **204**: 32-42.
- [8] Mu L, Peng L, Cao J J, *et al.* Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from coking industries in China [J]. *Particuology*, 2013, **11**(1): 86-93.
- [9] 王玉哲, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 焦化工业场地建筑物和生产设施表面 Pb 的赋存特征及健康风险 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 834-841.
- [10] Wang Y Z, Yan X L, Liao X Y, *et al.* Pb pollution on surfaces in a typical coking plant and health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 834-841.
- [11] Huo C Y, Sun Y, Liu L Y, *et al.* Assessment of human indoor exposure to PAHs during the heating and non-heating season: role of window films as passive air samplers [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 293-301.
- [12] 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. 124-150.
- [13] 范博, 王晓南, 黄云, 等. 我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2101-2114.
- [14] Fan B, Wang X N, Huang Y, *et al.* Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water bodies in seven basins of China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2101-2114.
- [15] Yu Y X, Li Q, Wang H, *et al.* Risk of human exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a case study in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **205**: 70-77.
- [16] Martuzevicius D, Kliucininkas L, Prasauskas T, *et al.* Resuspension of particulate matter and PAHs from street dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 310-317.
- [17] Zhu Y Y, Duan X L, Qin N, *et al.* Health risk from dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a typical high cancer incidence area in southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 731-738.
- [18] Wang W, Huang M J, Kang Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: status, sources and human health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(21): 4519-4527.
- [19] Chao S H, Liu J W, Chen Y J, *et al.* Implications of seasonal control of PM<sub>2.5</sub>-bound PAHs: an integrated approach for source apportionment, source region identification and health risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 685-695.
- [20] Kong S F, Lu B, Ji Y Q, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in size-differentiated resuspended dust on building surfaces in an oilfield city, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 7-16.
- [21] Wu J, Li K K, Ma D, *et al.* Contamination, source identification, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils around a typical coking plant in Shandong, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2018, **24**(1): 225-241.
- [22] Kong Q P, Wu H Z, Liu L, *et al.* Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) with phenol in coking wastewater treatment system: interaction and engineering significance [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 467-473.
- [23] 张惠灵, 王宇, 周杨, 等. 某焦化厂 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的排放特征及其对周边环境的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(10): 5571-5576.
- [24] Zhang H L, Wang Y, Zhou Y, *et al.* Emission characteristics and environmental impact of PAHs in PM<sub>2.5</sub> from one coking plant [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(10): 5571-5576.
- [25] US EPA SOP# 2011-Chip, wipe, and sweep sampling [S].
- [26] ASTM D6661-01, Standard practice for field collection of organic compounds from surfaces using wipe sampling [S].
- [27] Zhao D, Liao X Y, Yan X L, *et al.* Effect and mechanism of persulfate activated by different methods for PAHs removal in soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **254-255**: 228-235.
- [28] United States Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual supplemental guidance [EB/OL]. <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-volume-i-human-health-evaluation-manual-supplemental>.
- [29] May L M, Gaborek B, Pitrat T, *et al.* Derivation of risk based wipe surface screening levels for industrial scenarios [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **288**(1-2): 65-80.
- [30] 王丽, 王利军, 史兴民, 等. 西安市地表灰尘中 PAHs 健康风险特征 [J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(12): 1759-1765.

- Wang L, Wang L J, Shi X M, *et al.* Heath risk characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface dust of Xi'an City, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(12): 1759-1765.
- [27] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [28] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- Wang Z S, Duan X L, Liu P, *et al.* Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [29] 罗飞, 宋静, 潘云雨, 等. 基于健康风险的三氯杀螨醇生产设备表面污染物筛选值推算的初步研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, **23**(3): 34-38.
- Luo F, Song J, Pan Y Y, *et al.* Preliminary study on derivation of health risk-based surface screening levels of contaminants for dicofol manufacturing equipment [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, **23**(3): 34-38.
- [30] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1171-1175.
- Wang Z S, Wu T, Duan X L, *et al.* Research on inhalation rate exposure factors of Chinese residents in environmental health risk assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1171-1175.
- [31] United States Environmental Protection Agency. Integrated risk information system [EB/OL]. [https://cfpub.epa.gov/ncea/iris\\_drafts/atoz.cfm?list\\_type=alpha](https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/atoz.cfm?list_type=alpha).
- [32] United States Environmental Protection Agency. Provisional Peer-Reviewed Toxicity Values. Derivation support documents [EB/OL]. [https://hhprt.v.ornl.gov/quickview/pprtv\\_papers.php](https://hhprt.v.ornl.gov/quickview/pprtv_papers.php), 2001-2012.
- [33] United States Environmental Protection Agency. Health effects assessment summary tables [EB/OL]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=2877>.
- [34] Mark M, Charles N, Peter G, *et al.* World trade center indoor environment assessment: selecting contaminants of potential concern and setting health-based benchmarks [R]. US: Contaminants of Potential Concern (COPC) Committee of the World Trade Center Indoor Air Task Force Working Group, 2003.
- [35] 王佩, 蒋鹏, 张华, 等. 焦化厂土壤和地下水中 PAHs 分布特征及其污染过程[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(5): 752-759.
- Wang P, Jiang P, Zhang H, *et al.* Distribution characteristics and polluting process of PAHs in soil and groundwater at a coking plant site [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(5): 752-759.
- [36] 冯嫣, 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.
- Feng Y, Lü Y L, Jiao W T, *et al.* Distribution and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from different workshops of an abandoned coking factory in Beijing [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, **4**(3): 399-407.
- [37] Liao X Y, Yan X L, Wang Y Z, *et al.* Environmental risk presented by arsenic contamination of building and facility surfaces in a coking plant [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(6): 915-921.
- [38] 牟玲, 彭林, 刘效峰, 等. 机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1156-1160.
- Mu L, Peng L, Liu X F, *et al.* Characterization of PAHs in fly ashes from coke production [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1156-1160.
- [39] 牟玲. 机械炼焦过程主要大气污染物排放特征及迁移行为研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013. 40-45.
- Mu L. Research on emission characteristics of main atmospheric pollutant and their behavior during mechanical coking processes [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. 40-45.
- [40] 于云江, 杨林, 李良忠, 等. 兰州市大气 PM<sub>10</sub> 中重金属和多环芳烃的健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 2920-2927.
- Yu Y J, Yang L, Li L Z, *et al.* Health risk assessments of heavy metals and PAHs bound to PM<sub>10</sub> in Lanzhou City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(11): 2920-2927.
- [41] Khairy M A, Lohmann R. Source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Alexandria, Egypt [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(7): 895-903.
- [42] 卢金锁, 李少杭. 建筑外墙的污染及相关因素分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2014, **40**(6): 302-306.
- [43] 李少杭. 建筑外墙污染研究及雨洁的可行性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- Li S H. Research about pollutants of exterior surface of buildings and feasibility analysis of rainwater to wash the wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [44] 潘永红, 叶元坚, 蔡锦安, 等. 固相微萃取/气相色谱-质谱联用法测定沥青基防水涂料中 18 种多环芳烃的迁移量[J]. *分析测试学报*, 2018, **37**(7): 772-777.
- Pan Y H, Ye Y J, Cai J A, *et al.* Determination of 18 polycyclic aromatic hydrocarbons migrated from asphalt based waterproof coating by solid phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2018, **37**(7): 772-777.
- [45] 林直宏, 袁彦华, 侯镜德, 等. HPLC 测定油漆中的 16 种多环芳烃[J]. *中国测试*, 2012, **38**(4): 44-46, 102.
- Lin Z H, Yuan Y H, Hou J D, *et al.* Determination 16 species of PAHs in paint by HPLC [J]. *China Measurement & Test*, 2012, **38**(4): 44-46, 102.
- [46] 吴巧花, 陈步峰, 裴男才, 等. 广州不同地表下垫面对暴雨径流 PAHs 含量的影响特征[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(4): 736-743.
- Wu Q H, Chen B F, Pei N C, *et al.* The influence characteristics of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content of rainstorm runoff in different surface in Guangzhou city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(4): 736-743.
- [47] Petit P, Maître A, Persoons R, *et al.* Lung cancer risk assessment for workers exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons in various industries [J]. *Environment International*, 2019, **124**: 109-120.

## CONTENTS

|   |  |
|---|--|
| Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018 .....   | SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)                                       |
| Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang .....   | SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)    |
| Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM <sub>2.5</sub> in Wuhan .....   | ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)  |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in a Living Area of Zhengzhou City .....   | HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)   |
| Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen .....   | WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)   |
| First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017 .....   | HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)      |
| Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan .....   | YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)              |
| Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China .....  | CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)           |
| Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin .....  | CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)  |
| Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building .....   | HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)       |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang .....   | YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)         |
| Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou .....  | ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)         |
| Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta .....  | LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)                           |
| Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017 .....  | HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)            |
| Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant .....   | ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)          |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea .....   | YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)               |
| Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process .....   | YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)          |
| Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River .....  | WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)        |
| Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River .....   | XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)            |
| Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment .....   | CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)              |
| Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China .....  | CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)               |
| Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season .....                                  | YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)        |
| Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir .....  | WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)      |
| Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes .....  | LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)              |
| Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland .....  | WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)              |
| Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants .....   | LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)       |
| Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics .....   | WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)   |
| Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process .....  | WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)      |
| Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge .....   | ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)        |
| Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide .....   | ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)        |
| Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin .....  | CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-ru, <i>et al.</i> (5015)              |
| Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants .....  | YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024) |
| Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal .....   | YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)                   |
| Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl <sub>3</sub> Coupled with Biochemical Methods .....   | WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)        |
| Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System .....   | LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)                 |
| Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics .....   | SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)       |
| Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass .....   | CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)        |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley .....   | LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)     |
| Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example .....   | WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)         |
| Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil .....  | WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)      |
| Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners .....  | ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)           |
| Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite .....  | HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)                        |
| Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils .....   | LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)    |
| Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation .....   | XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)         |
| Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce ( <i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce ..... | WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)           |
| Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil .....  | GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)              |
| Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem .....   | CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)             |
| Characteristics of CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China .....  | HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)           |
| Effects of Biochar on N <sub>2</sub> O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain .....  | ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)     |
| Effects of Optimizing Fertilization on N <sub>2</sub> O and CH <sub>4</sub> Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China .....   | HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)           |