

E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



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)

2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析 郑庆锋, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)

夏季大气PM_{2.5}中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例 刘威杰, 石明明, 程敏, 黎荧, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)

呼包鄂地区冬季、夏季PM_{2.5}污染特征 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)

2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析 周静博, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)

基于模型模拟的成都市PM_{2.5}污染来源解析 许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)

北京市PM_{2.5}中砷污染特征 石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段菁春, 谭吉华, 陈荣志 (57)

夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析 易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)

安阳市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节特征及来源解析 孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)

新乡市夏冬季节PM_{2.5}稳定碳同位素特征分析 闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)

基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估 梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)

京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)

安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)

长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响 王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)

华东典型城市非道路移动机械排气烟度 鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昫, 黄成 (133)

国内外储油库VOCs排放现状与标准分析 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)

四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响 庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)

巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例 田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)

典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)

长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估 李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)

白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)

松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评估 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)

鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)

臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响 刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)

镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制 吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)

一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制 廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)

酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)

脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)

宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因 陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)

淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)

基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控 陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)

基于间歇饥饿的SNAD工艺运行 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)

反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)

硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现 刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)

高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)

中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评估 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)

北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)

长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)

宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响 王晶, 马丽娟, 刘泽华, 闵伟, 侯振安 (420)

基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)

塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征 陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)

广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)

不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响 栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)

《环境科学》征订启事(89) 《环境科学》征稿简则(97) 信息(303, 329, 344)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征

孟祥帅^{1,2}, 吴萌萌¹, 陈鸿汉^{1*}, 岳希², 陶抒远³

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北京京诚嘉宇环境科技有限公司, 北京 100053; 3. 北京首钢建设投资有限公司, 北京 100041)

摘要: 利用某废弃焦化场地内6眼深层采样孔, 样品最大采集深度9.5~42 m不等, 分析包气带剖面上16种PAHs分布特征、污染来源以及影响迁移的因素。结果表明, 各钻孔 \sum PAHs最大含量介于134.79~11266.81 mg·kg⁻¹之间, 主要分布层位为地表以下1~5 m, 含量以低环(2+3环)为主, 单体以萘含量最高。场地污染主要来自于煤的燃烧源。焦油、沥青及其深加工产品的污染对场地 \sum PAHs含量起控制作用。包气带砂卵石层作为污染物良好的下渗通道, 砂层透镜体通过吸附及截留作用成为PAHs的主要富集层。化产区排放或泄漏的各类油液通过混溶、竞争性吸附等作用增强了PAHs垂向迁移能力, 并致使深部包气带受到污染。地表0~1 m土壤受人为扰动、降雨淋滤、降解作用, 30 m以下岩层受到地下水溶滤作用, 导致低环/高环比例随深度增加呈现先升高后降低的趋势。污染来源、包气带理化指标及水文地质条件等共同作用控制PAHs垂向分布及迁移。

关键词: 包气带; 非均质; 多环芳烃(PAHs); 垂向分布; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0377-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201903142

Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant

MENG Xiang-shuai^{1,2}, WU Meng-meng¹, CHEN Hong-han^{1*}, YUE Xi², TAO Shu-yuan³

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. CERI Eco Technology Co., Ltd., Beijing 100053, China; 3. Beijing Shougang Construction Investment Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: Six deep sampling boreholes are used for studying the sources and vertical distribution of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an abandoned coking plant. The maximum depth of soil sampling ranged from 9.5-42 m. The present study analyzes the distribution characteristics and sources of PAHs in addition to the important factors affecting migration of PAHs in the unsaturated zone. Results showed that the maximum values of total PAHs range of 134.79-11266.81 mg·kg⁻¹ at vertical depths ranging from 1-5 m. We found that 2+3 rings dominated total PAHs and that the highest content was Nap. Results also showed that the main source of PAH pollution was coal combustion. Coal tar pitch and different oils from deep processing of tar played an important role in PAH pollution. The gravel layer served as a good infiltration channel for pollutants, and the sand lens below 20 m depth became the main enrichment layer for PAHs through adsorption and interception. Oils and wastewater from discharge and leaching of chemicals contributed to the migration of PAHs through inter-miscibility and competitive adsorption, which led to deep soil pollution. Soil layers above 1 m depth were affected by artificial disturbance, rainfall leaching, and degradation, and the unsaturated zone below 30 m depth was affected by leaching from groundwater. Consequently, the ratio of low to high rings first increased before decreasing with increased depth of the unsaturated zone. The types of pollution sources, rock particle sizes, organic matter content, and hydrogeological conditions all affected the vertical distribution and migration of PAHs.

Key words: unsaturated zone; heterogeneous soil; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); vertical distribution; sources apportionment

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)作为广泛存在于环境中的污染物,对人类具有致癌、致畸和致突变的“三致效应”,美国EPA优先控制的16种PAHs中,有7种具有潜在的致癌性^[1]。焦化厂排放的PAHs来自于化石燃料的不完全燃烧及焦油沥青、煤气等化工产品的加工过程,是环境中PAHs的重要来源之一^[2~4],并导致土壤常受到高含量污染^[5,6]。特别是在我国,由于生产历史长,受工艺技术条件及污染管理水平所限,焦化场地环境污染较严重^[7]。

目前国内外学者对PAHs在工业区、城郊区、

河流沉积物以及污灌区土壤的分布及迁移特征进行了大量研究。由于PAHs为非极性疏水组分,且污染普遍来自燃烧源产物,垂向迁移能力有限,研究范围多限于表层0~100 cm土壤^[8~10],对深部包气带关注较少^[11]。焦化场地由于长期受污水排放,化学品泄漏及人为扰动等作用共同影响,深部包气带及地

收稿日期: 2019-03-16; 修订日期: 2019-05-24

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2016ZX05040002-003); 国家自然科学基金项目(41572225)

作者简介: 孟祥帅(1986~),男,博士研究生,主要研究方向土壤与地下水修复, E-mail: mengxiangshuai@ceri.com.cn

* 通信作者, E-mail: chenhh56@126.com

下水易遭受污染.且随深度的增加,地层的理化指标往往呈现出非均质性,由此导致 PAHs 在垂向上形成复杂的污染时空分布特征.本文利用某钢铁企业焦化场地 6 眼深层采样孔检测数据,以 16 种 PAHs 为主要研究对象,对包气带垂向剖面上 PAHs 污染来源、分布及迁移特征等进行分析,以期为非均质条件下包气带中 PAHs 风险管控或修复方案制定提供参考.

1 材料及方法

1.1 场地情况介绍

该焦化单元始建于 1937 年,2010 年停产,场地占地面积约 0.31 km².焦化厂以生产焦炭及焦炉煤气为主,1981 年建成化产区,开始生产苯、萘、酚、沥青和硫酸等化工产品.场地位于冲洪积扇前缘,包气带表层岩性以素填土、粉质黏土为主,厚度在 1~5 m 之间;下部岩性为砂卵石层,厚度在 40 m 左右,由于历史上粗放型生产及场地良好的渗透条件,包气带遭受严重污染,同时局部范围地下水也受到一定影响.

1.2 样品的采集与保存

在焦化场地不同生产单元设置 S1~S6 共 6 眼采样孔,其中 S1、S3 和 S5 位于化产区.根据钻孔岩性、颜色、气味变化及光离子化检测器(PID)读数结果等,共采集 41 个土层样品,取样深度 0.1~42 m 不等.样品的收集与保存按照《场地环境评价导则》(DB 11T656-2009)的要求,土壤样品利用 250 mL 透明玻璃瓶保存.保存温度在 4℃ 下,并利用装有干冰的保温箱送至具有计量认证(CMA)资质的专业实验室进行检测分析.

1.3 样品分析与质量控制

采用 USEPA8270D 的分析方法^[12],对 USEPA 规定的 16 种优先控制 PAHs 进行分析.每 10 个样品至少设置一个质量控制样,平行样误差在 0.4%~28.6% 之间,均小于 30%,符合实验室质量控制要求.在前期调查阶段对场地及周边土样有机质含量进行了测定,测试采用《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)的 950℃ 灼烧失量法.以上数据来源于场地环境调查与风险评价报告,取样时间为 2014 年 1 月.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 垂向分布及影响因素

PAHs 含量随深度变化见图 1.各钻孔 \sum PAHs 最大值在 134.79~11 266.81 mg·kg⁻¹ 之间,其含量

大于国内其他钢铁及焦化企业^[13~15],这由于表层土壤受到焦油、沥青渣及油类的严重污染.S1、S3 和 S5 最大污染深度均超过 30 m,其中以 S1 污染最为严重,在地下 42 m 处 \sum PAHs 仍高达 65.27 mg·kg⁻¹.S4 和 S6 在垂向上 PAHs 含量随深度地增加而降低,其他钻孔随深度增加呈现出双峰变化趋势,主要表现为地表以下 0~5 m 内 PAHs 含量最高,5~20 m 范围内 PAHs 含量随深度逐渐降低,至 20~35 m 时,PAHs 含量出现不同程度地增高.各钻孔 PAHs 最大检出深度在 9.5~42 m 不等.

\sum PAHs 最大值主要分布在地表以下 1.6~4.7 m 之间,仅 S2 和 S5 分别出现在 0.1 m 和 0.15 m.主要原因:①场地表层 0~5 m 以人工填土层为主,土壤中含有大量的煤粉、煤渣、焦油及沥青渣等成分,并反复受到强烈的人为扰动.扰动作用导致 PAHs 含量随着深度的增加而增大的现象较为普遍^[16].②场地内埋地式储罐、管线及半地下水池等装置较多,由于腐蚀、破损发生渗漏,导致装置下部土层遭受严重污染.③企业停产,场地内不再有外界污染源持续输入,表层土壤与外环境直接接触,更易受到降解、挥发和淋溶作用的影响,致使 PAHs 含量下降.

地表 5 m 以下 \sum PAHs 含量受地层岩性控制明显,典型钻孔剖面与 \sum PAHs 含量关系见图 2 和图 3.该场地 5 m 以下包气带岩性为单一的砂卵石层,20 m 以下局部分布有细砂透镜体,厚度在 0.5~3.0 m 不等.深层 PAHs 含量峰值多出现在该层位的砂层透镜体中,其中 S1 在 31.1 m 处 \sum PAHs 含量达 1 900.60 mg·kg⁻¹,说明 PAHs 发生了明显的累积作用.

通常认为,土壤颗粒的粒径越小,往往比表面积越大,有机质含量越高,可提供更多的吸附的点位,细颗粒对 PAHs 具有更强的吸附、阻滞和截留作用^[17,18].也有研究发现,粗颗粒的有机碳、PAHs 含量均高于细颗粒,这主要由于粗颗粒中含有颗粒态污染物^[19,20].Totsche 等^[21]对焦油污染的砾质土壤进行淋滤实验时发现,进行释放并发生迁移的 PAHs 中,颗粒态占 42%.焦化厂土壤中颗粒态 PAHs 污染源包括煤烟、炭渣、焦油渣以及废水中悬浮物等,粒径一般在几十到几百 μm 不等.细砂层利用岩石孔隙充填机制截留此类颗粒态的 PAHs 时,在某种程度上可能较黏土等细颗粒具有更好的效果.该场地包气带细砂层透镜体通过吸附和截留作用,成为 PAHs(特别是以颗粒态存在的高环 PAHs)良好的富

集层,而砂卵石层比表面积小、有机碳含量少且渗透能力强,主要作为污染物的下渗通道.

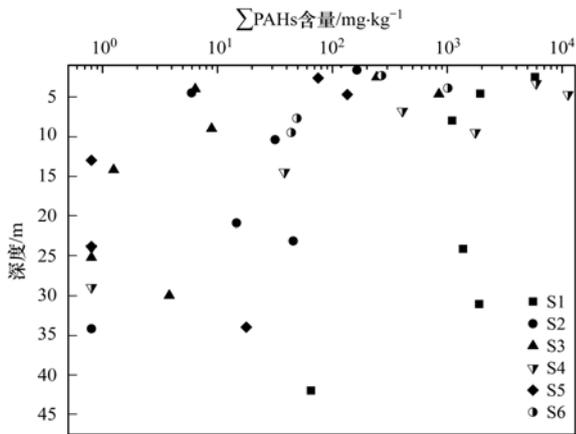


图 1 ΣPAHs 含量垂向变化

Fig. 1 Vertical distribution of ΣPAHs in the unsaturated zone

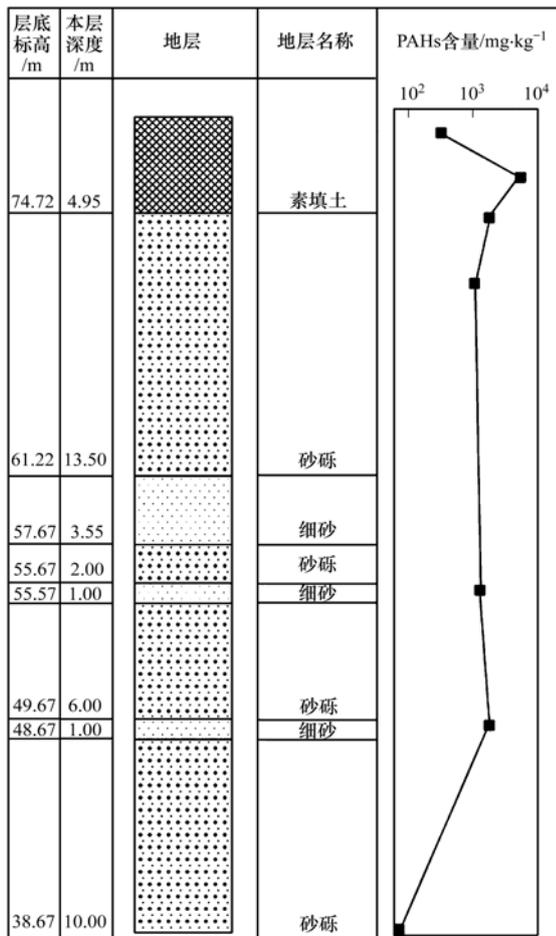


图 2 S1 钻孔剖面 PAHs 含量

Fig. 2 Vertical distribution of PAHs concentrations in the soil profile of boreholes S1

有研究认为^[9,22,23],PAHs 在土壤中垂向迁移过程明显受到有机碳(TOC)含量的影响,残存量与 TOC 存在较强的正相关关系.本次收集焦化场地内 S3 钻孔及周边其它生产单元土壤中的 TOC 含量,

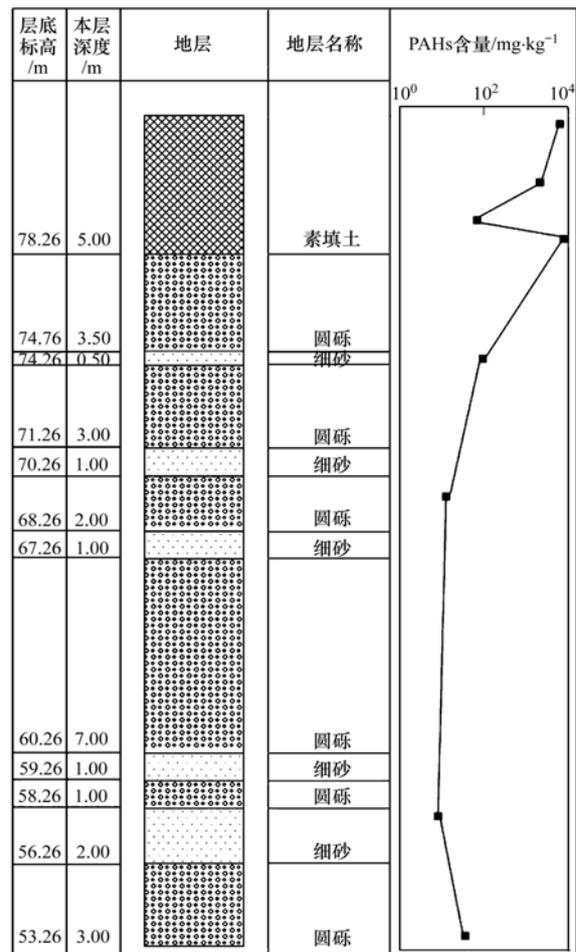


图 3 S3 钻孔剖面 PAHs 含量

Fig. 3 Vertical distribution of PAHs concentrations in the soil profile of borehole S3

如图 4 所示.从中可以看出,TOC 含量关系大小依次为人工填土 > 粉质黏土 > 砂卵石层.这主要由于人工填土中含有煤尘、煤渣及焦油沥青等有机碳含量高的组分,此类物质既是 PAHs 污染源,也是疏水性有机物的强吸附剂^[19],由于外界 PAHs 持续输入,填土层通过强吸附作用致使场地表层土壤出现 PAHs 的高含量累积. TOC 含量随深度增加呈下降趋势,这表明随深度增加,PAHs 迁移能力得到增强. S3 剖面砂卵石层在垂向上 TOC 含量明显高于同类岩性的其他点位,且根据前期场地调查结果,该点 PAHs 含量远大于其它生产单元点位,这可能是由于 S3 表层土壤中吸附或残存于 TOC 中的 PAHs,以胶体或颗粒态下渗并滞留在岩层中所致.

2.2 PAHs 组成垂向变化

利用采样深度大于 30 m 的 4 眼钻孔绘制 PAHs 垂向组成分布(见图 5).从中可以看出,低环/高环比例总体先升高后降低,且 30 m 以下有明显降低趋势.其中 S1 规律明显,在地下 0.2 m 处 2 + 3 环占 ΣPAHs 比例为 46%, 2.5 ~ 31.1 m 平均比例为

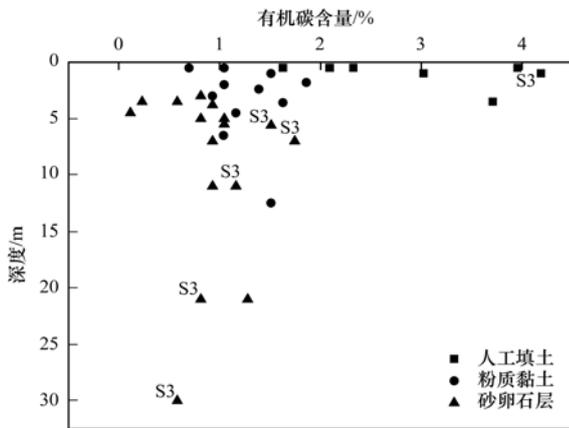


图 4 有机碳含量随深度变化

Fig. 4 Vertical distribution of organic matter content in the unsaturated zone

84.8%,至 42 m 处下降至 62%。除 S2 外,包气带中低环/高环比例未呈现出随深度增加而增高的趋势。与一般情况下,污染物在剖面上垂向迁移时,2~3 环相对含量逐渐增加,4~6 环相对含量逐渐减少的特征^[24]不一致。分析原因为:表层土壤由于与大气界面直接接触,低环更易受挥发、降解、淋滤及人为干扰等作用影响。而在深度 > 30 m 的包气带,上述消减作用微弱,不是导致低环/高环比例出现下降的主要原因。根据 2014 年场地地下水水位观测资料,水位埋深在 49 m 左右,而历史水位资料显示,该区域 20 世纪 90 年代水位埋深在 30 m 左右,最小埋深可达 10 m。由于低环 PAHs 具有更强的水溶性,包气带中 PAHs 历史上受到地下水水位波动产生的溶

滤作用影响,低环向地下水中的释放速率大于高环,从而导致该比例出现下降。在受外源污染影响较弱的情况下,河流沉积物中的 PAHs 组成分布往往也具有相同的规律^[25,26]。

S5 钻孔 0~5 m 为人工填土,4.7 m 处 2+3 环比例远低于上层土样,说明人为扰动对表层 PAHs 组成具有一定控制作用。S2 位于焦化煤场,最大污染深度小于 34.2 m,PAHs 主要来自煤及其不完全燃烧的产物,此类物质是 PAHs 的强吸附剂,通过大气沉降及降雨淋滤作用,污染物垂向迁移速率缓慢,导致该点包气带中的 PAHs 受地下水溶滤作用时间较短或未受影响。

2.3 PAHs 来源分析

2.3.1 PAHs 组成分析

各钻孔剖面上 \sum PAHs 最大值样品由于高含量的污染不易受到生物降解作用,能够指示 PAHs 污染来源特征,6 个样品中单体 PAHs 分布如图 6 所示。从中可以看出,单体 PAHs 具有明显的规律性,萘(Nap)、菲(Phe)、荧蒽(Fla)和芘(Pyr)这 4 项含量较高,这与北京某焦化厂^[27]特征较一致,说明污染既有焦油、苯、萘和酚等各种油类,也有来自煤的高温燃烧源。其中 Nap 含量波动最大,在 1.74~3 200.00 mg·kg⁻¹之间,说明场地局部遭受严重的油类污染。

低环与高环 PAHs 的比例也普遍被用来作为 PAHs 来源的指示。上述各样品中 2+3 环与

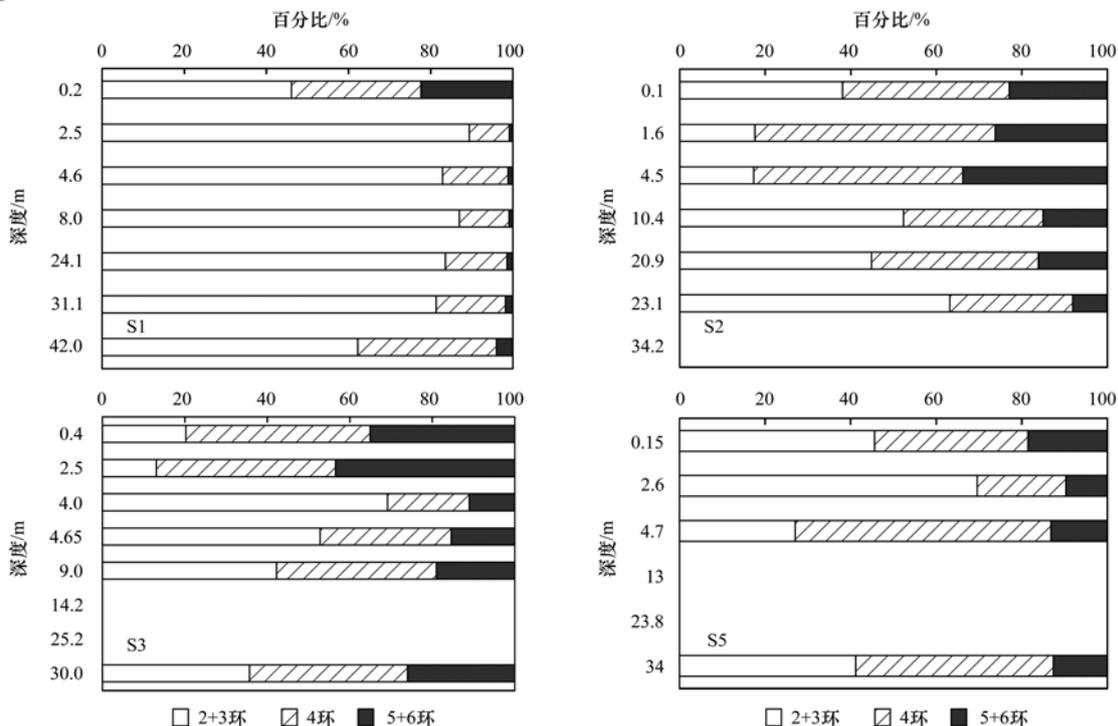


图 5 PAHs 组成垂向变化特征

Fig. 5 Vertical distribution of the percentage composition of PAHs in soil profiles

\sum PAHs 比值具有较大差异, S2 和 S5 比值低于 0.4, 同时该两样品 \sum PAHs 含量也明显低于其他样品, 说明污染以煤的燃烧源为主. 其余样品 2 + 3 环比例在 0.5 以上, 又以 S1 最高, 为 0.89, 说明可能受到油类污染. 2 环(Nap)与 \sum PAHs 相关关系

如图 7 所示. 从中可以看出, Nap 含量与 \sum PAHs 呈明显的正相关关系, 焦化产生的 Nap 主要来源于煤气放散、焦油、沥青及其深加工产物, 这说明上述物质的排放对焦化场地 PAHs 污染程度起控制作用.

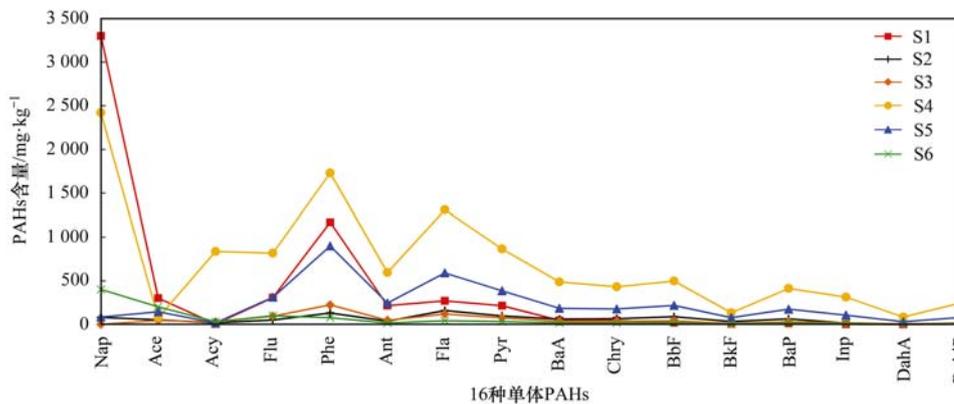


图 6 16 种 PAHs 中的单体含量分布

Fig. 6 Concentration of different rings in 16 PAHs in soil samples

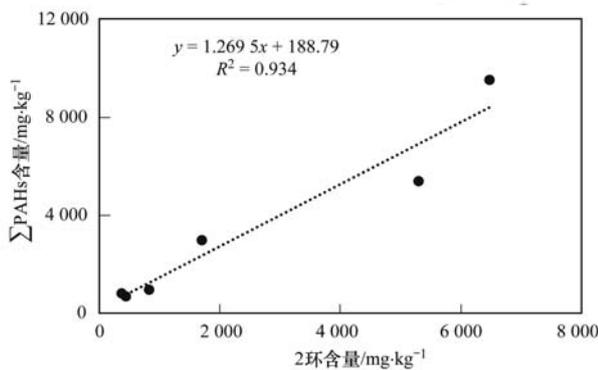


图 7 Nap 与 \sum PAHs 相关关系

Fig. 7 Correlation between Nap and \sum PAHs

2.3.2 特征比值法分析

母体 PAHs 同分异构体具有相似的理化性质, 利用相同分子量和相似结构的 PAHs 含量比值, 常用来判断污染的来源^[28]. 本研究利用文献[29]中的异构体比值对各样品进行污染源解析, 见图 8. 根

据判定结果, 场地污染源以煤的燃烧源为主, 其次为石油源的燃烧. S2 ~ S6 钻孔特征比值未出现明显差异. S1 钻孔 Fla/(Fla + Pyr) 在 0.54 ~ 0.62 之间, 均大于其他点位, 可能与 S1 点受到的污染程度远大于其它点位有关.

各项异构体比值随深度变化如图 9 所示. 从中可以看出, 各项比值随深度无明显规律性变化, 说明不同深度 PAHs 来源无明显差别. 焦化厂内涉及燃料种类多, 易受到废水、废气排放, 化学品泄漏等不同类型污染, 加之受车辆运输以及钢铁企业其他生产单元的排放影响, 由此造成焦化场地 PAHs 来源复杂. 因此, 仅利用异构体比值法判定焦化场地 PAHs 来源可能很难得出准确结果.

2.4 PAHs 垂向迁移特征

当表层土壤存在高含量的 PAHs 时, PAHs 吸附量超过了土壤的最大容量, 必然会向深层迁移^[30]. 该场地表层土壤 PAHs 含量高, 且地层岩性以砂卵

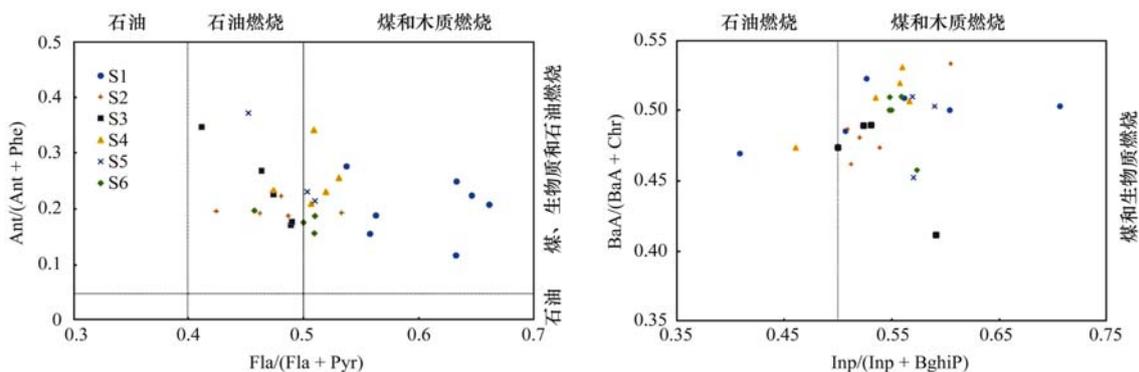


图 8 PAHs 多特征比值判源

Fig. 8 Source identification with compositional analysis of PAHs

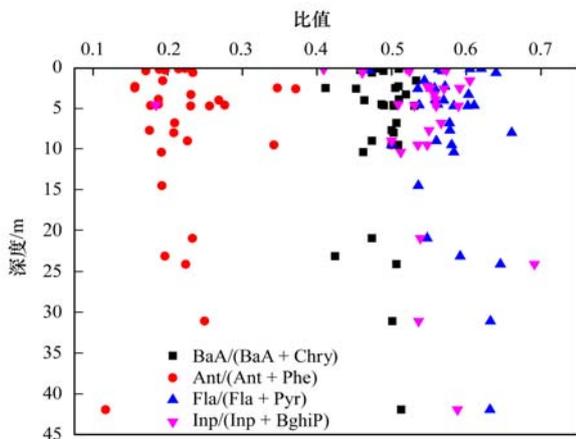


图9 异构体比值随剖面深度变化

Fig. 9 Vertical distribution of PAHs isomeric ratios in soil profiles

石层为主,渗透系数在 $3.8 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-1} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,水力梯度大,为 PAHs 创造了良好的迁移条件.高环 PAHs 主要是以与土壤有机质胶体结合的形式发生迁移,不易迁移至深部,而低环 PAHs 则主要是以溶解态形式,相对较易发生迁移^[31,32]. Ter Laak 等^[33]的研究发现,受污染土壤组成结构和老化作用等影响,污染场地土壤孔隙水中的 PAHs 浓度被高估,实际浓度比平衡分配模型低两个数量级以上.污染土壤中的焦油沥青渣或类似聚合物中,PAHs 质量分量虽可高达 4%,但从上述固体废物中解吸进入水相发生迁移非常困难^[4,34],由此导致其污染深度多限于表层.因此,仅在大气沉降及降雨淋滤条件下,PAHs 迁移至深部并造成高环 PAHs 污染的可能性很小.

场地 30 m 以下包气带中 PAHs 含量最高的钻孔均位于化产区,其中 S1 钻孔在 42 m 处 5 + 6 环 PAHs 含量达 $2.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这与以往研究认为高环 PAHs 较难迁移结论有所不同.结合 PAHs 来源分析,本研究认为深层 PAHs 污染主要来自各类油品的渗漏.焦化场地内各类储罐和管线遍布,此类存储设施长期使用过程中发生泄漏情况普遍,且由于过去缺乏环保意识,存在废液倾倒的情况,由此导致场地内土壤存在各类非水相流体(NAPLs)的共同下渗.其中苯、萘油、葱油等既是土壤污染来源,又作为 PAHs 良好的溶剂,其辛醇-水分配系数比 PAHs 低几个数量级,PAHs 通过与此类流体发生混溶作用,大大增强了向深部的迁移能力.此外,有研究表明^[35,36]:苯酚以及甲苯等单环芳烃等,既是焦化的特征污染物,又可很大程度上将 PAHs 从土壤中解吸或与其发生竞争性吸附,降低 PAHs 在土壤中吸附量,并大幅提高 PAHs 的水相溶解性.蔡婷等^[23]通过土柱淋滤实验发现原油中其他组分会影响 PAHs 单体的迁移能力及迁移率.本研究选取 S1 和

S3,绘制不同深度苯系物(BTEX)与 \sum PAHs 含量关系图,如图 10 和图 11 所示.从中可以看出,除 S3 钻孔在 4 m 处可能受人为扰动影响外,PAHs 含量随深度变化趋势总体与 BTEX 一致,两者的迁移存在明显正相关关系.说明高含量复合型污染是导致 PAHs 迁移至包气带深部的重要原因.

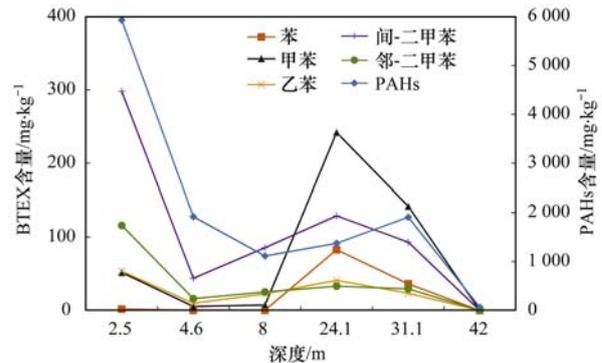


图 10 S1 点随深度变化包气带污染物分布

Fig. 10 Concentration changes of PAHs and BTEX in the unsaturated zone of borehole S1

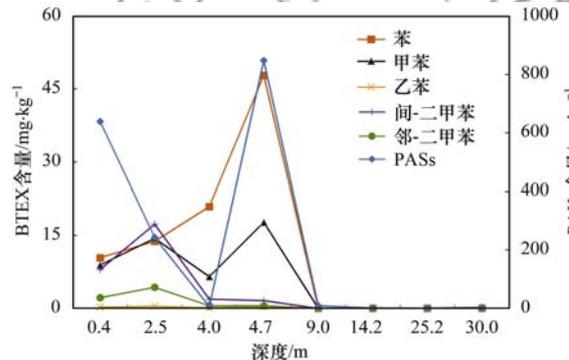


图 11 S3 点随深度变化包气带污染物分布

Fig. 11 Concentration changes of PAHs and BTEX in the unsaturated zone of borehole S3

3 结论

(1) 岩石粒径对 PAHs 垂向迁移具有重要控制作用,该场地包气带的卵砾石层作为污染物下渗通道,砂层透镜体通过吸附和截留作用成为 PAHs 富集层,由此导致地下 20 ~ 35 m 包气带中 PAHs 含量出现增高趋势.

(2) 表层土壤受挥发、降解、降雨淋滤影响,深部包气带受到地下水溶滤作用,从而导致低环所占 \sum PAHs 比例随深度增加呈现先升高后降低的趋势.此外,人为扰动、污染源类型也是影响不同深度 PAHs 组成的重要因素.上述因素共同作用导致不同剖面 PAHs 组成规律有所差别.

(3) 场地各钻孔 \sum PAHs 最大值在 $134.79 \sim 11266.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,污染源以煤的燃烧源为

主,表层土壤受到焦油、沥青渣及油类的严重影响。各类油液又通过混溶、解吸等作用提高了 PAHs 垂向迁移能力,造成深部包气带 PAHs 污染。

(4)缺乏外界污染源持续输入条件下,包气带中富集 PAHs 的砂层透镜体可成为“二次污染源”,在间歇性降雨作用下造成 PAHs 缓慢释放,从而对下部岩层及地下水造成长期污染。查明场地包气带中透镜体的位置分布、厚度及污染物种类、含量等参数,采用原位修复技术对透镜体中的复合型污染进行定向处置,是深部包气带及地下水风险管控或修复的关键。

参考文献:

- [1] Xu P J, Tao B, Ye Z Q, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations, compositions, sources, and associated carcinogenic risks to humans in farmland soils and riverine sediments from Guiyu, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **48**: 102-111.
- [2] 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.
- [3] Yang H H, Lai S O, Hsieh L T, *et al.* Profiles of PAH emission from steel and iron industries [J]. *Chemosphere*, 2002, **48** (10): 1061-1074.
- [4] Ahn S, Werner D, Luthy R G. Physicochemical characterization of coke-plant soil for the assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon availability and the feasibility of phytoremediation [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, **24** (9): 2185-2195.
- [5] Smith M J, Flowers T H, Duncan H J, *et al.* Study of PAH dissipation and phytoremediation in soils: comparing freshly spiked with weathered soil from a former coking works [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192** (3): 1219-1225.
- [6] Jia H Z, Zhao S, Nulaji G, *et al.* Environmentally persistent free radicals in soils of past coking sites: distribution and stabilization [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (11): 6000-6008.
- [7] 张红振,董璟琦,吴舜泽,等. 某焦化厂污染场地环境损害评估案例研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36** (10): 3159-3165.
- Zhang H Z, Dong J Q, Wu S Z, *et al.* Environmental damage assessment case study of a cooking plant contaminated site [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36** (10): 3159-3165.
- [8] Xiao R, Du X M, He X Z, *et al.* Vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Hunpu wastewater-irrigated area in northeast China under different land use patterns [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **142** (1-3): 23-34.
- [9] Bu Q W, Zhang Z H, Lu S, *et al.* Vertical distribution and environmental significance of PAHs in soil profiles in Beijing, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31** (1): 119-131.
- [10] Tong R P, Yang X Y, Su H R, *et al.* Levels, sources and probabilistic health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the agricultural soils from sites neighboring suburban industries in Shanghai [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1365-1373.
- [11] 贾晓洋,姜林,夏天翔,等. 焦化厂土壤中 PAHs 的累积、垂向分布特征及来源分析 [J]. *化工学报*, 2011, **62** (12): 3525-3531.
- Jia X Y, Jiang L, Xia T X, *et al.* Analysis on accumulation, distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils under a coking plant [J]. *CIESC Journal*, 2011, **62** (12): 3525-3531.
- [12] Method 8270D, Semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) [S].
- [13] 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.
- [14] 李永霞,刘燕,王文刚,等. 某钢铁企业表层土壤中多环芳烃含量特征与生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2017, **36** (6): 1320-1327.
- Li Y X, Liu Y, Wang W G, *et al.* Concentration characteristic and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils of a steel plant [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36** (6): 1320-1327.
- [15] 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.
- Hao L H, Zhang S H, 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.
- [16] 孙玉川,沈立成,袁道先. 多环芳烃在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移及控制因素 [J]. *土壤学报*, 2014, **51** (4): 795-805.
- Sun Y C, Shen L C, Yuan D X, *et al.* Rules and controlling factors of vertical migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in the overlying soil in Karst Terranes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51** (4): 795-805.
- [17] Amellal N, Portal J M, Berthelin J. Effect of soil structure on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons within aggregates of a contaminated soil [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **16** (14): 1611-1619.
- [18] Thiele S, Brümmer G W. Bioformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil under oxygen deficient conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34** (5): 733-735.
- [19] Wang X C, Zhang Y X, Chen R F. Distribution and partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different size fractions in sediments from Boston Harbor, United States [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, **42** (11): 1139-1149.
- [20] 魏萌,夏天翔,姜林,等. 焦化厂不同粒径土壤中 PAHs 的赋存特征 [J]. *生态环境学报*, 2013, **22** (5): 863-869.
- Wei M, Xia T X, Jiang L, *et al.* Occurrence characteristics of PAHs in different particle size of soil from a coking plant [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22** (5): 863-869.
- [21] Totsche K U, Jann S, Kögel-Knabner I. Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, dissolved organic carbon, and suspended matter from disturbed NAPL-contaminated gravelly soil material [J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, **5** (1): 469-479.
- [22] 费佳佳,张枝焕,万甜甜,等. 有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (9): 3871-3881.
- Fei J J, Zhang Z H, Wan T T, *et al.* Effects of organic carbon

- content on the residue and migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil profiles[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3871-3881.
- [23] 蔡婷, 张枝焕, 王新伟, 等. 有机碳含量对土壤剖面中多环芳烃纵向迁移的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 880-890.
- Cai T, Zhang Z H, Wang X W, *et al.* Effects of total content of organic carbon (TOC) on the vertical migration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil profiles [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 880-890.
- [24] 姚林林, 张彩香, 李佳乐, 等. 污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1553-1560.
- Yao L L, Zhang C X, Li J L, *et al.* Vertical distribution and possible sources of polycyclic aromatic hydrocarbon in sewage area soil [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1553-1560.
- [25] Chen B L, Xuan X D, Zhu L Z, *et al.* Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou City, China [J]. *Water Research*, 2004, **38**(16): 3558-3568.
- [26] 宋世杰, 黄韬, 周胜, 等. 博斯腾湖流域沉积物中多环芳烃的时空分布、来源及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2780-2790, doi: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0089.
- Song S J, Huang T, Zhou S, *et al.* Spatial and temporal distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Bosten Lake Watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2780-2790, doi: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0089.
- [27] 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.
- [28] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [29] 董捷, 黄莹, 李永霞, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3540-3546.
- Dong J, Huang Y, Li Y X, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils of a large steel enterprise in the North of China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3540-3546.
- [30] 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 等. 不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3369-3377.
- Lu Y T, Xiang X X, Zhang S C, *et al.* Vertical Distribution characteristics of PAHs in soils with different land use types during rapid urbanization [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3369-3377.
- [31] 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.
- [32] Benhabib K, Simonnot M O, Faure P, *et al.* Evidence of colloidal transport of PAHs during column experiments run with contaminated soil samples [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(10): 9220-9228.
- [33] Ter Laak T L, Barendregt A, Hermens J L M. Freely Dissolved pore water concentrations and sorption coefficients of PAHs in spiked, aged, and field-contaminated soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(7): 2184-2190.
- [34] Liu L H, Endo S, Eberhardt C, *et al.* Partition behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons between aged coal tar and water [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, **28**(8): 1578-1584.
- [35] Humel S, Schmidt S N, Sumetzberger-Hasinger M, *et al.* Enhanced accessibility of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and heterocyclic PAHs in industrially contaminated soil after passive dosing of a competitive sorbate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(14): 8017-8026.
- [36] 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.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xixiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwaili, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhou, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)