

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.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征

鲁垠涛^{1,2}, 向鑫鑫^{1,2}, 张士超³, 刘明丽⁴, 王静⁵, 李爽^{1,2}, 姚宏^{1,2*}, 孙绍斌^{1,2}

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 水中典型污染物控制与水质保障北京重点实验室, 北京 100044; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司节能环保保卫研究所, 北京 100081; 4. 华康昇泰环境科技有限公司, 北京 100088; 5. 杭州华电华源环境工程有限公司, 杭州 310051)

摘要: 为研究城镇化过程中不同土地利用类型土壤中多环芳烃(PAHs)的纵向迁移特征, 在快速进行城镇化建设的沈阳东部地区选择了3种不同土地利用类型(城市用地、耕地及林地)的5个土壤剖面(0~1 m), 分析了土壤剖面层中PAHs的残留特征, 讨论了影响PAHs纵向分布和迁移的因素以及土壤PAHs的来源. 结果表明, 5个采样点土壤表层 \sum PAHs的含量为: 城市1号点 513.19~12 689.04 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、旱田点 36.18~7 196.10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、水田点 70.92~747.53 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、城市2号点 19.39~636.47 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和林地 4.79~349.24 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. PAHs在城市用地和林地中主要被截留在0~30 cm浅层土壤中, 在耕地可以迁移至较深的土壤层; 高环数PAHs在浅层土壤层中所占比例较大, 深层土壤低环数占比较高; 土壤有机质与PAHs分布呈显著正相关, PAHs的理化属性对其迁移能力有一定影响; 源解析表明, 研究区域的PAHs主要来源于工业活动和交通等燃烧, 部分低环数PAHs来自于石油产品输入.

关键词: 城镇化; 土地利用类型; 多环芳烃(PAHs); 纵向分布; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3369-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201809094

Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization

LU Yin-tao^{1,2}, XIANG Xin-xin^{1,2}, ZHANG Shi-chao³, LIU Ming-li⁴, WANG Jing⁵, LI Shuang^{1,2}, YAO Hong^{1,2*}, SUN Shao-bin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Key Laboratory of Aqueous Typical Pollutants Control and Water Quality Safeguard, Beijing 100044, China; 3. Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health Research Institute, China Academy of Railway Science Co., Ltd., Beijing 100081, China; 4. CCCC-AECOM Eco-Environmental Co., Ltd., Beijing 100088, China; 5. Hangzhou Huadian Huayuan Environmental Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: To study the vertical distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soils from different land use types during urbanization, three land use types (urban land, cultivated land, and woodland) were selected in the eastern part of Shenyang, where urbanization is occurring rapidly. In each case, five soil samples were obtained from different depths (0-1 m). Change in the concentrations of PAHs, vertical migration factors, and the distribution and sources of PAHs were analyzed in the vertical soil profiles. Total concentrations of PAHs in the different soil type were ordered as follows: city 1 (513.19-12 689.04 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); dry field (36.18-7 196.10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); paddy field (70.92-747.53 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); city 2 (19.39-636.47 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); and woodland (4.79-349.24 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). PAHs were mainly trapped in shallow soils in urban and forest land, but can migrate deeper into the soil profile in cultivated land. High-ring PAHs were abundant at depths of 0-30 cm, while low-ring PAHs were abundant deeper in the soil profiles. SOM had a significant effect on the vertical distribution of PAHs, and the physical and chemical properties of PAHs had a significant influence on their migration ability. However, combustion sources from industrial activities and transportation in the region are still considered the main sources of PAHs despite the fact that some low-ring PAHs derive from petroleum product inputs.

Key words: urbanization; land use type; polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs); vertical distribution; source apportionment

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类典型的持久性有机污染物, 因具有难降解和毒性强等特点, 引起了人们的关注^[1]. PAHs广泛存在于空气、水、土壤等各种介质中, 因PAHs的亲脂疏水性, 土壤为PAHs在环境介质中的一个主要汇^[2-4]. 环境介质中的PAHs通过大气沉降、地表径流等方式进入土壤中, PAHs在土壤中的环境行为主要包括吸附、扩散、挥发、降解、渗滤等过程, 其影响因素主要有PAHs的理化性质与土

壤的理化性质^[5,6]. 目前国内外学者对土壤剖面PAHs的分布特征研究主要集中在城市或沉积物中, 薛建涛等^[7]分析武汉城区土壤剖面的PAHs分布特征, 结果表明PAHs主要富集在0~40 cm

收稿日期: 2018-09-11; 修订日期: 2019-01-10

基金项目: 北京交通大学基本科研业务费专项(2016JBM038); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202-011)

作者简介: 鲁垠涛(1978~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污染物迁移转化, E-mail: luyt@bjtu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yaohongts@163.com

土壤层,以 4 环 PAHs 为主,而随着土壤深度增加,PAHs 的组成特征发生了较大的变化.曾丽^[8]研究了 PAHs 在土壤剖面上的迁移特征,结果显示 PAHs 在土壤中的迁移行为受 TOC 显著影响. Basavaiah 等^[9]分析了沉积物中 PAHs 的残留,结果表明 PAHs 的削减主要存在 0~80 cm 的积物层中.

城镇化的建设促进了土地利用类型的转变,同时也对污染物的排放、残留和迁移等过程产生影响.位于沈阳的沈抚新城的城镇化水平从 2010 年的 5% 增长到 2016 年的 40% 以上^[10],河流两岸的农村用地和耕地转变为城市用地及工业用地.为研究 PAHs 在不同利用类型土壤剖面层中的分布特征和控制因素,本研究以沈抚新城为例,采集不同土地利用类型的土壤剖面样品,分析土壤剖面层中 PAHs 的纵向分布、迁移和来源,以期为国内其他快速城镇化地区土壤中的污染物控制提供基础数据参考和借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区域和采样点布置

沈抚新城位于中国东北辽宁省沈阳抚顺两市之间,面积 605 km²,浑河自西向东横穿新城.年降水量 600~800 mm,主要土地利用类型为城市用地、耕地、林地等,土壤类型以棕壤为主.基于土地利

用类型、交通干线、工厂分布等指标,本研究于 2015 年 7 月中旬采集了 3 种主要土地利用类型(城市用地、耕地和林地)的 5 个土壤剖面(0~1 m)的样品.采样点包括城市点 2 个、水田和旱田各 1 个、林地 1 个,分别采取 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90 和 90~100 cm 的土壤样品,并保存于密封小铝盒,运回实验室于 -20℃ 的冰箱中保存,以待后续预处理与监测.采样点分布如图 1 所示,采样点信息见表 1.

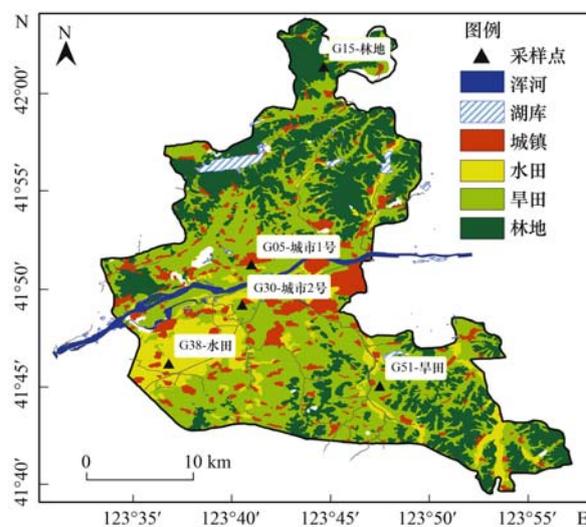


图 1 研究区域概况及采样点分布示意

Fig. 1 Location and sampling sites of the study region

表 1 采样点信息

Table 1 Details of the sampling sites

编号	名称	土地利用类型	土壤类型	周围环境
G05	城市 1 号点	城镇用地	棕壤	周围是商户,有工厂分布,2010 年以前完成城镇化
G30	城市 2 号点	城镇用地	棕壤	周围是大量施工建筑,2010 年以后开始快速城镇化
G38	水田点	耕地	水稻土	水田,灌溉水源为浑河支流水渠
G51	旱田点	耕地	棕壤	周围是农村居民点,灌溉水源为浑河支流拉古河,上游为抚顺拉古经济区,工厂较多
G15	林地点	林地	棕壤	北部林区,温带落叶阔叶林,周围人类活动较少

1.2 化学标准品及主要试剂

本实验所用 16 种 USEPA 优控的 PAHs 混合标准品:萘(Nap)、蒽(Acy)、芘(Ace)、芴(Flo)、菲(Phe)、蒎(Ant)、荧蒹(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒹(BaA)、䓛(Chr)、苯并[b]荧蒹(BbF)、苯并[k]荧蒹(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒹(DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(IcdP)、苯并[ghi]芘(BghiP),以及氘标记的代标物(Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10、Perylene-D12、Phenanthrene-D10)均购于美国 Accustandard 公司.农残级的正己烷、丙酮、二氯甲烷、异辛烷购于美国 J. T. Baker 公司.硅胶(100~200 目)购于德国 Merck 公司,在 130℃ 下活化 18~24 h,平衡 6 h 密

封保存于棕色瓶中待用.无水硫酸钠(优级纯)购于天津第三化工有限公司,于马弗炉中 600℃ 烘烤 6~8 h,密封于棕色瓶中置于干燥器中待用.

1.3 多环芳烃测定和土壤理化性质分析

土壤样品预处理见文献[11].样品经过冷冻干燥研磨后筛分,取 10 g 样品与无水硫酸钠混合,并加入标记替代标准物 100 μL (Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10 和 Perylene-D12).然后加入 200 mL 混合溶剂(己烷/丙酮,1:1),利用索氏提取法提取 18~24 h.将提取物浓缩,通过含有 10 g 活性硅胶的净化柱进行净化.提取物经 60 mL 二氯甲烷和己烷(1:1)的混合物洗脱.收集的洗脱液经旋蒸浓缩至 2~3 mL,并继续用缓慢氮气流将

洗脱液浓缩, 加入 100 μL 内标物 (Phenanthrene-D10) 定容至 1 mL.

PAHs 测定采用 Agilent 6890-5975 GC/MS, 色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱 (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm), 载气为氦气 (99.999%). GC 升温步骤见文献 [11]. 使用五点校准曲线 ($r^2 > 0.999$) 通过内标法对 PAHs 的含量进行定量. 实验中对于每一组 12 个样品运行程序空白以检查程序性能和基质效应.

土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法.

1.4 质量控制与质量保证

为保证实验数据可靠, 在每 10 个土壤样品分析的过程中, 加入 1 个空白样及 1 个平行样, 分别监测人为影响情况及实验的重现性. 4 种 PAHs 代标 (Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10 和 Perylene-D12) 的回收率分别为: 59% ~ 86%、72% ~ 117%、69% ~ 106% 和 86% ~ 126%, 其中萘的挥发性较高, 回收率较低, 符合质控要求.

2 结果与分析

2.1 土壤剖面层中 PAHs 残留特征

研究区域不同土地利用类型的土壤剖面层中 16 种 PAHs 残留范围如表 2 所示. 5 个采样点 0 ~ 100 cm 土壤层中 \sum PAHs 的含量为: 城市 1 号点 (513.19 ~ 12 689.04 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、旱田点 (31.22 ~ 7 196.10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、水田点 (70.92 ~ 747.53 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、城市 2 号点 (19.39 ~ 636.47 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和林地点 (4.79 ~ 349.24 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 与其他地区相比 (表 3), 城市 1 号点含量与污染严重的焦化厂土

壤剖面层中的含量 (n. d. ~ 14 363.7 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相似 [12], 高于武汉和北京地区的城市用地点 [7, 13]. 旱田点含量高于南京地区耕地 0 ~ 100 cm 剖面土壤 (35.2 ~ 717.1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 以及沈阳污灌区 0 ~ 100 cm 剖面土壤 (n. d. ~ 2 883.1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) [14, 15], 高于重庆岩溶土含量 (161 ~ 3 285 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) [16], 林地点与扎龙湿地核心区沉积物 0 ~ 100 cm 垂向分层含量 (56.81 ~ 396.61 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 接近 [17].

各 PAHs 在土壤剖面层中检出率分别为: 城市 1 号点 (90% ~ 100%)、旱田点 (70% ~ 100%)、水田点 (50% ~ 100%)、城市 2 号点 (30% ~ 100%) 和林地点 (10% ~ 100%). 低检出率集中在 3 环和 4 环 PAHs. 5 环及 6 环等高环数的 PAHs 的检出率较高, 多为 100% 检出.

土壤中 PAHs 主要来源于大气沉降、降水等自然因素和人类对土地的改造利用, 如灌溉和污染排放等 [18]. 本研究中 PAHs 在不同土地利用类型土壤含量和检出率的结果表明, 城市 1 号点和旱田点的 PAHs 含量较高, 污染较严重, 林地点污染较轻. 这主要是因为城市 1 号点较早完成城镇化, 周围存在化工、机械加工等企业, 以及大量个体经营商户 (如钣金、喷漆等), 这些活动可能会在采样点周围产生严重污染. 城市 2 号点周围虽然有大量的建设活动, 但是周围没有明显污染源, 其他人类活动较少, 污染较轻. 因此, 城镇化中大规模的住宅施工建设在一定程度上影响和改变了自然环境, 城镇化后的工业和人类生产活动进一步增大了环境中污染物的排放量.

表 2 不同利用类型土壤剖面层中 PAHs 含量¹⁾

Table 2 Concentrations of PAHs in soils profiles

环数	PAHs	G05-城市 1 号		G30-城市 2 号		G38-水田		G51-旱田		G15-林地	
		范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%								
2	Nap	7.72 ~ 62.63	100	5.01 ~ 28.26	100	49.34 ~ 197.41	100	n. d. ~ 42.65	90	n. d. ~ 11.24	90
	Acy	0.78 ~ 184.35	100	n. d. ~ 3.60	70	0.87 ~ 8.78	100	n. d. ~ 18.16	90	n. d. ~ 1.59	40
	Ace	n. d. ~ 31.36	90	n. d. ~ 34.23	90	n. d. ~ 10.68	90	n. d. ~ 69.85	70	n. d. ~ 2.43	10
3	Flo	n. d. ~ 73.24	90	n. d. ~ 38.18	60	n. d. ~ 19.96	90	4.00 ~ 54.79	100	n. d. ~ 3.77	50
	Phe	n. d. ~ 1 071.81	90	n. d. ~ 393.61	80	n. d. ~ 121.60	80	13.74 ~ 624.17	100	n. d. ~ 72.37	90
	Ant	n. d. ~ 129.78	90	n. d. ~ 39.27	30	n. d. ~ 12.87	60	n. d. ~ 138.34	70	n. d. ~ 2.46	10
4	Fla	n. d. ~ 2 209.53	90	2.62 ~ 125.37	100	n. d. ~ 128.77	80	n. d. ~ 1 323.21	90	n. d. ~ 72.10	80
	Pyr	n. d. ~ 1 899.51	90	n. d. ~ 105.94	80	n. d. ~ 104.26	70	n. d. ~ 1 142.18	90	n. d. ~ 46.17	50
	BaA	1.30 ~ 942.91	100	n. d. ~ 341.67	70	n. d. ~ 48.35	50	n. d. ~ 679.32	70	n. d. ~ 18.32	40
5	Chr	3.62 ~ 1 098.24	100	n. d. ~ 387.80	80	n. d. ~ 60.55	70	n. d. ~ 833.71	90	n. d. ~ 32.42	80
	BbF	3.16 ~ 1 346.27	100	0.68 ~ 71.55	100	0.59 ~ 58.12	100	0.68 ~ 797.79	100	0.27 ~ 36.85	100
	BkF	1.06 ~ 1 250.47	100	0.12 ~ 18.86	10	0.24 ~ 16.74	100	0.16 ~ 377.20	100	n. d. ~ 7.75	80
6	BaP	1.80 ~ 940.69	100	n. d. ~ 323.05	80	0.20 ~ 29.65	100	0.20 ~ 532.27	100	n. d. ~ 14.97	80
	DahA	0.06 ~ 110.70	100	n. d. ~ 32.77	90	0.03 ~ 3.22	100	n. d. ~ 50.05	80	n. d. ~ 1.72	90
6	IcdP	1.45 ~ 770.76	100	0.16 ~ 15.85	100	0.17 ~ 19.22	100	0.35 ~ 254.58	100	n. d. ~ 12.88	90
	BghjP	1.22 ~ 590.48	100	n. d. ~ 313.06	90	n. d. ~ 16.49	90	n. d. ~ 257.85	90	n. d. ~ 12.54	60
总和	PAHs	513.19 ~ 12 689.04	100	19.39 ~ 636.47	100	70.92 ~ 747.53	100	31.22 ~ 7 196.1	100	4.79 ~ 349.24	100

1) n. d. 为未检出, 下同

表 3 世界其他地区土壤剖面层中 PAHs 含量

Table 3 Concentrations of PAHs in soils from other regions of the world

地区	土地类型	采样深度/cm	PAHs 种类	范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
武汉, 中国	城镇用地	0~100	16	10~991	[7]
北京, 中国	焦化厂土壤	0~1 800	16	n. d. ~14 363.7	[12]
北京, 中国	城镇用地	0~100	16	40~3 420	[13]
重庆, 中国	岩溶土	0~100	16	161~3 285	[14]
沈阳, 中国	耕地(污灌)	0~100	16	n. d. ~2 883.1	[15]
南京, 中国	耕地	0~80	16	35.2~717.1	[16]
松嫩平原, 中国	湿地	0~100	16	56.81~396.61	[17]
孟买, 印度	河口沉积物	0~170	16	3.14~320.00	[9]
沈抚新城, 中国	城市用地、耕地、林地	0~100	16	4.79~12 689.04	本研究

图 2 为 0~100 cm 土壤剖面层中各 PAHs 平均含量. 城市 1 号点、城市 2 号点和旱田点的 4 环和 5 环等高环数 PAHs 丰度较大, 包括 Phe、Fla、Pyr、BaA、Chr 和 BbF 这 6 种单体. 水田点的 Nap 含量最高, 林地点中的 Phe 含量最高. 4~6 环 PAHs 等主要来源燃烧源, 包括煤、石油和生物质的不完全燃烧^[19], 本地区沈阳和抚顺是重要的工业基地, 集中了大量煤化工和石油化工企业, 这些可能是本地区 PAHs 的主要来源. 水田点中的 Nap 与其他成分相比表现出较高的含量, Nap 是焦炉燃烧排放的标志物^[10], 因此推测本区域存在炼焦企业, 影响了本地区水体和大气, 最终在土壤中形成汇. 此外, 本地区土壤剖面层中 PAHs 残留情况与曾丽^[8]对北京典型土壤剖面中的 PAHs 残留情况的研究相似, 4 环和 5 环 PAHs 均表现了出较高含量, 这可能是由 PAHs 的物化性质所影响的.

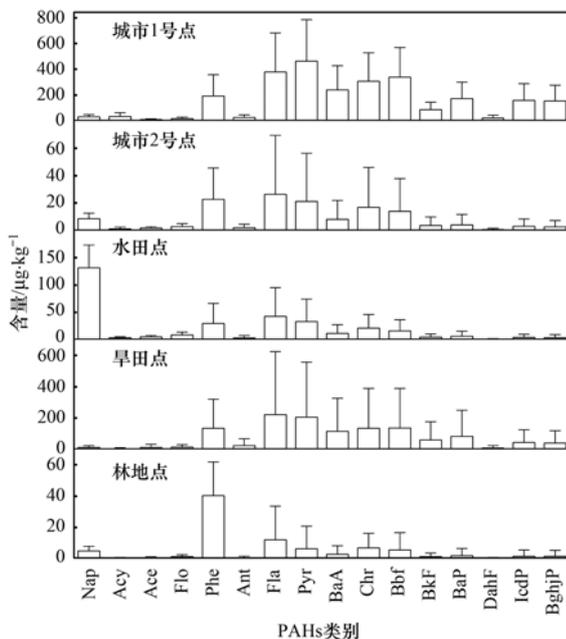


图 2 不同 PAHs 在 0~1m 土壤层的均值

Fig. 2 Variations in the average concentrations of PAHs in the soil profiles

2.2 PAHs 的纵向分布和组成

图 3 为不同土壤剖面层中 PAHs 纵向分布和组成特征. 城市 1 号点 PAHs 含量最高点出现在 50 cm 处的土壤层, 超过 $12\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分布规律与其他 4 点显著不同, 可能与土壤层的人类活动有关. 城市 2 号点、水田点、旱田点和林地点的 PAHs 分布表现出表层含量高, 随着深度依次降低的规律, 显示出土壤对污染物的吸附和截留作用^[20]. 城市 2 号点和林地点 PAHs 最大值在 0~20 cm 之间, 30 cm 以下土壤剖面中含量处于较低水平 ($<100\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 两个耕地点的 PAHs 随土壤层深度增加逐渐下降, 因灌溉方式的不同, 水田点在 40 cm 土壤层仍高于 $200\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与陈静等^[21]对天津地区剖面 PAHs 的分布结果一致. 不同类型土地土壤中的 PAHs 纵向分布表现出一定差异, PAHs 在城市用地和林地中主要被截留在表层土壤 (0~20 cm), 在耕地中因灌溉等人类活动能迁移至较深的土壤层^[20].

不同土地利用类型土壤剖面层的 PAHs 组成表现出较大差异. 城市 1 号点 0~100 cm 土壤层以高环数 PAHs 为主, 4~6 环 PAHs 的比例在 80% 以上 (60~70 cm 土壤层除外). 城市 2 号点 4~6 环 PAHs 在 0~20 cm 土壤层占比超过 80%, 随土壤层深度的增加, 2~3 环比例上升, 在 100 cm 深度处达到 79%. 水田点 PAHs 在 30~100 cm 土壤层中以 2 环为主, 占比范围为 48%~85%. 旱田点 0~40 cm 土壤层中高环数 PAHs 比例较大. 林地点 0~30 cm 土壤层中 4~6 环占比高, 30~100 cm 土壤层 3 环 PAHs 所占比例最大, 在 45%~75% 之间. 综上, 除城市 1 号点外, 其余土壤剖面层中 4~6 环高环数 PAHs 在 0~30 cm 土壤层中丰度较高, 比例较大, 在深层土壤层中比例较小, 这与费佳佳等^[3]和曾丽^[8]在实验室进行土壤淋滤模拟的结果一致, 即在不同淋滤条件下, 土壤中的 PAHs 主要截留在 0~30 cm 左右的土壤剖面层.

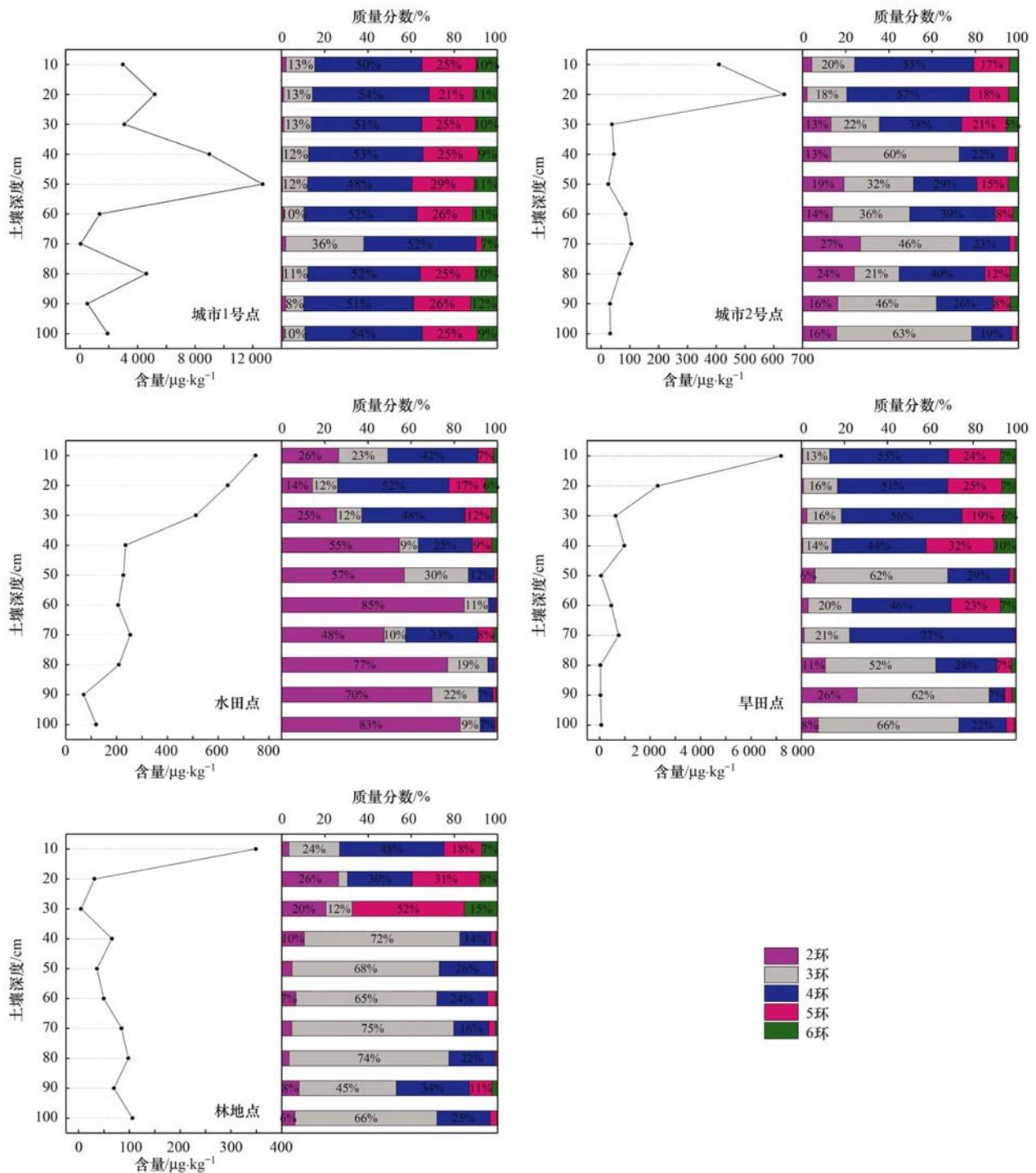


图3 不同土壤层剖面中 PAHs 纵向分布和组成特征

Fig. 3 Distribution and composition characteristics of different rings of PAHs in the soil profiles

3 讨论

3.1 PAHs 纵向分布和迁移影响因素分析

土壤是一个复杂的系统, 污染物在其中的分布和迁移与土壤本身的理化性质(如有机质含量和 pH 等)有显著联系。图 4 显示了不同利用类型土壤的有机质和 pH 随土壤深度的变化, 表层土壤的有机质含量在 3% ~ 4% 之间。林地点 pH 在 5.0 左右, 为酸性土壤。城市 1 号点土壤 pH 范围为 7.5 ~

8 之间, 偏碱性, 其余为中性土壤。

通过皮尔森相关分析法量化土壤理化性质与 PAHs 之间的关系, 结果如表 4 所示。其中, 城市 1 号点土壤剖面层中 2 环 PAHs 与有机质呈显著相关, 相关系数为 0.918, 3 ~ 6 环 PAHs 相关性不显著。与城市 1 不同, 城市 2 号点和水田点土壤剖面中 3 ~ 6 环 PAHs 与有机质显著相关。旱田点土壤剖面 PAHs 与有机质的相关系数在 0.815 ~ 0.942 之间, 呈显著相关性。林地点土壤剖面层中, 3 环

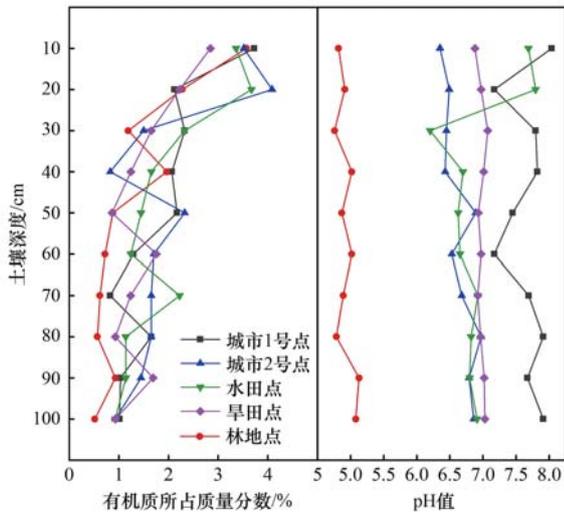


图 4 纵向土壤有机质和 pH 变化
Fig. 4 Variations in the organic matter content and pH of the soil profiles

PAHs 与有机质无相关关系, 其余 PAHs 均呈显著相关. 土壤中 PAHs 一般在土壤有机质与孔隙水之间分配, 一旦超过土壤的最大容量, 必然会向深层迁移^[3], 图 3 中城市 1 号点的峰值出现在 50 cm 土壤层, 推测其土壤中较高的 PAHs 含量超过了土壤有机质能容纳的最大含量, PAHs 随孔隙水向下迁移到更深的土壤层, 城市 1 号点的 PAHs 与有机质表现出正相关关系.

PAHs 与土壤 pH 之间相关性不显著, 部分土壤层与 pH 之间的相关系数为负, 旱田点相关系数在 -0.413 ~ -0.595 之间, 其余土壤剖面层中 PAHs 与土壤 pH 之间的相关性无明显规律, 研究表明 pH 对 PAHs 在土壤层中的分布并无显著影响.

有机污染物进入土壤后发生的吸附、降解、挥发、渗滤等行为与污染物的理化属性, 如挥发性、

表 4 PAHs 纵向分布与有机质和 pH 相关性系数¹⁾

Table 4 Correlations between the organic matter content, pH, and PAHs in the soil profiles

土地类型	理化性质	环数				
		2	3	4	5	6
城市 1 号点	有机质	0.918 **	0.426	0.382	0.354	0.385
	pH	0.103	-0.131	-0.121	-0.109	-0.218
城市 2 号点	有机质	0.330	0.805 **	0.921 **	0.920 **	0.930 **
	pH	-0.089	-0.515	-0.485	-0.473	-0.474
水田点	有机质	0.142	0.697 *	0.964 **	0.915 **	0.910 **
	pH	0.072	0.545	0.579	0.562	0.611
旱田点	有机质	0.942 **	0.849 **	0.830 **	0.841 **	0.815 **
	pH	-0.413	-0.592	-0.595	-0.528	-0.536
林地点	有机质	0.794 **	0.055	0.742 *	0.837 **	0.827 **
	pH	0.211	0.007	-0.200	-0.251	-0.283

1) ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

憎水性及稳定性等有显著联系^[22]. Laskowski^[23] 定义了有机污染物在土壤中的渗滤势, 来表征有机污染物的纵向迁移能力, 如下所示:

$$L_p = S / (K_{oc} \cdot p)$$

式中, L_p 表示污染物的渗滤势; S 表示有机污染物的溶解度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$); K_{oc} 表示土壤/沉积物-水分配系数; p 表示有机污染物的蒸气压 (Pa).

L_p 越大, 有机污染物越容易渗滤. 渗滤势综合

了影响有机污染物在土壤中迁移能力的 3 种重要的理化属性, 能够综合反映有机污染物的理化属性对纵向迁移能力的影响. 由于污染物种类较多, 选择丰度较高的几种 PAHs 计算其渗滤势. Nap、Phe、Fla、BaP 和 IcdP 计算出的渗滤势如表 5 所示. 其中, 萘的渗滤势最大, 随着环数的增高和分子量的增大, 渗滤势降低, 说明低环数 PAHs 更容易向下迁移.

表 5 部分 PAHs 的理化参数及渗滤势 (25°C)

Table 5 Physicochemical parameters and L_p of some PAHs (25°C)

PAHs	环数	溶解度 $S^{[24]}/\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$	$\lg K_{oc}^{[8]}$	蒸气压 (p) ^[24] /Pa	渗滤势 (L_p)
Nap	2	9.75E-01	2.97	36.44	2.87E-05
Phe	3	2.32E-02	4.15	8.32E-02	1.97E-05
Fla	4	2.92E-03	4.58	6.33E-03	1.21E-05
BaP	5	4.55E-05	6.74	7.2E-06	1.15E-06
IcdP	6	8.01E-06	6.20	1.1E-06	4.72E-06

相对丰度^[16]为不同深度 PAHs 占表层土壤 PAHs(0~10 cm)的质量分数,可表征 PAHs 在土壤中的迁移能力. 相对丰度随深度降低越快,表示该物质易吸附在表层土壤中,越难向下迁移. 如图 5 所示,相比于 Nap 和 Phe, Fla、BaP 和 IcdP 这 3 种物质的相对丰度在表层土壤有显著下降趋势. 根据相对丰度变化情况,5 种 PAHs 的迁移能力表现出

Nap > Phe > Fla > BaP > IcdP. 即低环数 PAHs 更容易随土壤层向下迁移,这与渗滤势的计算结果基本一致,表明在实际条件下 PAHs 的迁移能力与计算所得数据吻合. 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,而低环多环芳烃则主要是以溶解态形式发生迁移,容易发生迁移^[25].

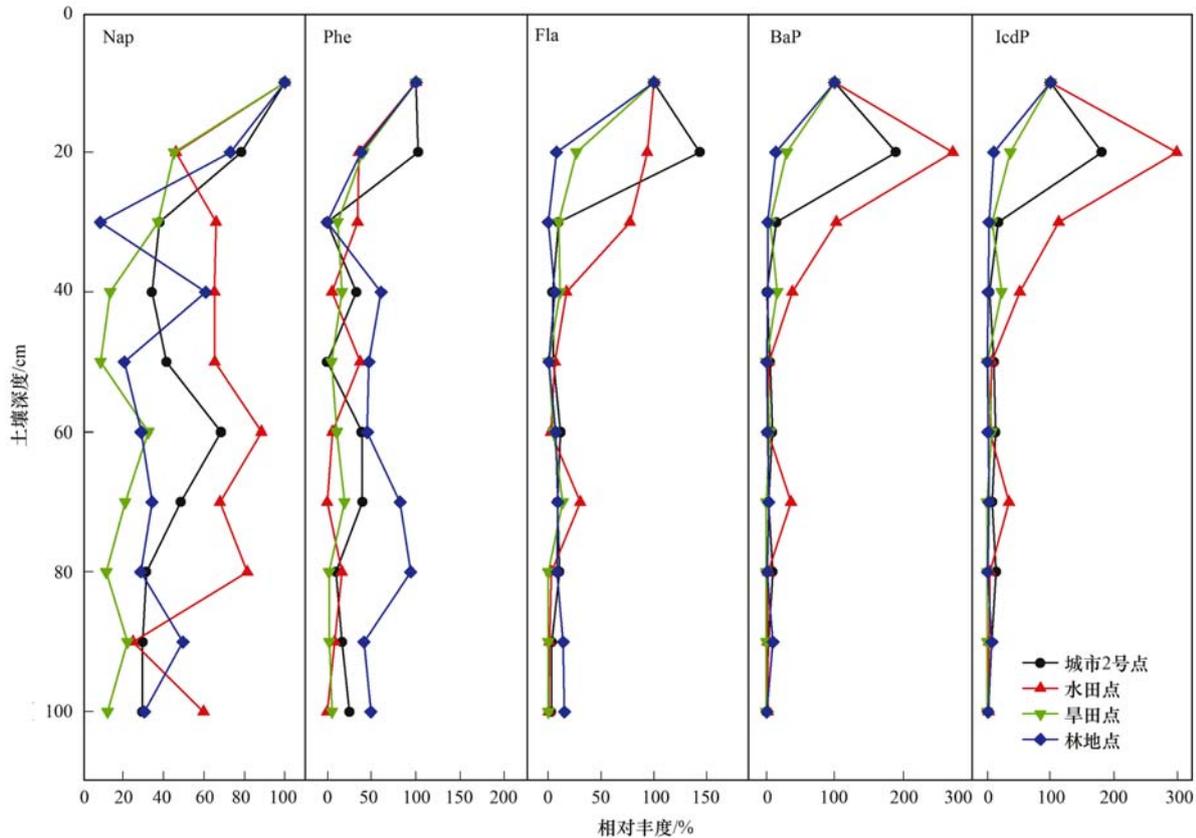


图 5 不同深度 PAHs 占表层土壤(0~10 cm)的相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of PAHs in the soil profiles (0-10 cm)

综上,影响城镇化进程中不同土地利用类型土壤中 PAHs 的组成和迁移的因素与 PAHs 的理化属性、土壤的性质和土地利用方式等有关. 在快速城镇化地区,有机质与 PAHs 的分布显著相关,PAHs 的理化属性会影响其在土壤中的纵向迁移行为.

3.2 PAHs 来源分析

互为异构体的多环芳烃具有相似的热力学分配系数和动力学质量转移系数,因此可以通过多环芳烃化合物异构体的含量比值来区分石油源和热源或区分不同热源如交通源和燃煤源等. InP/(InP + BaP)、InP/(InP + BghiP)、Fla/(Fla + Pyr)、BaA/(BaA + Chry)以及 Ant/(Ant + Phe)等比值通常被用来进行 PAHs 来源分析^[26]. 比值结果如图 6 所示.

城镇化中的建设活动如沥青道路的铺设、燃料油泄漏以及城镇化后的工业生产活动等都可能造成 PAHs 污染. 异构体比值分析结果显示:5 环和 6

环 PAHs 如 BaP 和 BghiP 等主要来自燃烧源,低环数 PAHs 如 Phe 和 Ant 在水田点、林地点和城市 2 号点来源于石油输入. 城市 1 号点的 PAHs 污染主要来源是草、木、煤等燃烧源,同时少量来源于石油产品输入;城市 2 号点的低环数 PAHs 主要来自于石油输入,可能来源于城镇化建设过程中的机械的燃料油泄漏以及沥青道路铺设等;水田点的高环数 PAHs 主要来源于燃烧源,包括石油燃烧源和草、木、煤燃烧源,与其灌溉水源浑河中的 PAHs 来源一致^[10];旱田点 PAHs 主要来源石油燃烧,同时伴随部分石油输入,其上游存在大量的设备加工、机械制造和化工企业,是石油污染物的输入源;林地点 PAHs 主要来自燃烧源和石油输入. 因此,从城市 1 号点和城市 2 号点对比来看,城市中的 PAHs 主要来源于工业、交通以及燃烧活动,快速的城镇化基础设施建设活动未产生严重的 PAHs

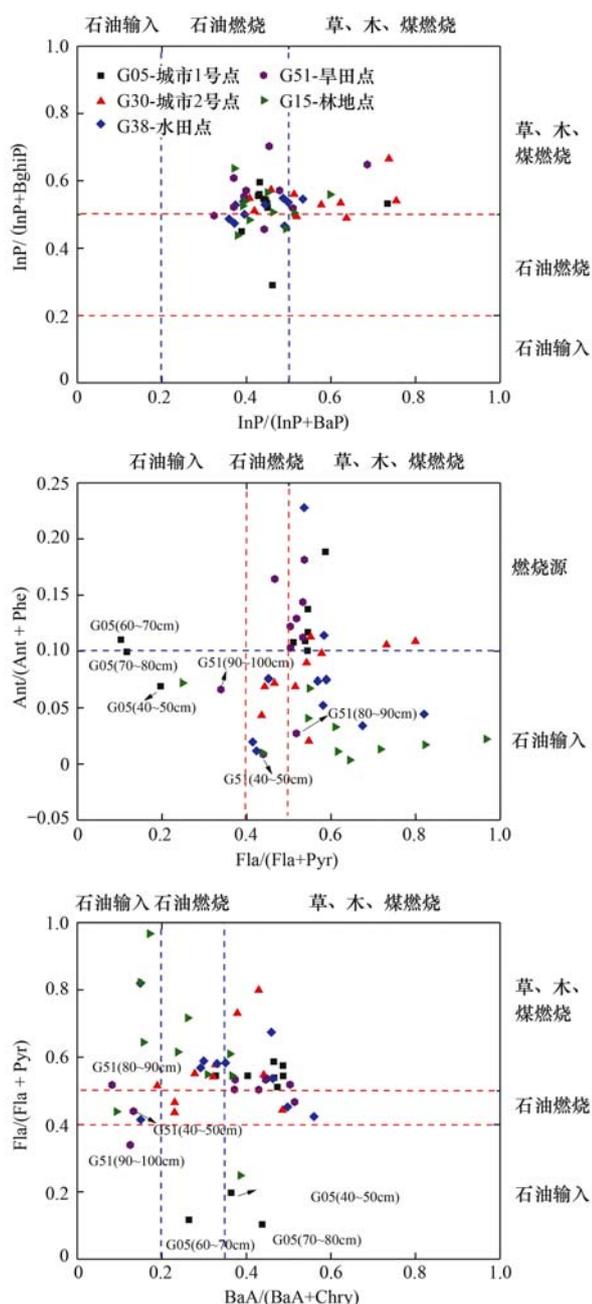


图 6 土壤剖面层中 PAHs 异构体比例

Fig. 6 Diagnostic ratios of soil PAHs in the soil profiles

污染。

4 结论

(1) 5 环和 6 环 PAHs 在本地区检出率较高, 0 ~ 100 cm 土壤中总 PAHs 的含量水平高低依次为: 城市 1 号点 > 旱田点 > 水田点 > 城市 2 号点 > 林地点。Phe、Fla、Pyr、BaA、Chr 和 BbF 这 6 种单体均表现出了较高的残留水平。

(2) 不同土地利用类型土壤剖面层中 PAHs 的纵向分布规律不同, PAHs 在城市用地和林地中主要被截留在浅层土壤中, 在耕地能迁移至较深的土壤层。除城市 1 号点以外, 4 ~ 6 环 PAHs 在采样点

的 0 ~ 30 cm 土壤层中比例比较大, 深层土壤的低环数占比逐渐升高, 各采样点 PAHs 组成差异较大。

(3) 土壤 pH 对 PAHs 的纵向分布影响较小, 在快速城镇化地区, 土壤有机质与 PAHs 的分布显著相关。在实际场地条件下, 不同类型 PAHs 的理化属性对其在土壤剖面层的纵向迁移有显著影响。

(4) 本地区工业活动和交通等产生的燃烧源是 PAHs 的主要来源, 低环数 PAHs 部分来源于石油产品输入。

参考文献:

- [1] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [2] Suman S, Sinha A, Tarafdar A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration levels, pattern, source identification and soil toxicity assessment in urban traffic soil of Dhanbad, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**: 353-360.
- [3] 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.
- [4] 李静雅, 吴迪, 许芸松, 等. 长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 253-261.
Li J Y, Wu D, Xu Y S, et al. Recent distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Yangtze river delta[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 253-261.
- [5] 崔嵩, 付强, 李天霄, 等. 冻融期土壤温度对有机污染物迁移行为的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(3): 314-320.
Cui S, Fu Q, Li T X, et al. Effect of soil temperature on migration behavior of organic pollutants during freeze-thaw period[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(3): 314-320.
- [6] 何奉朋, 张枝焕, 汪淑洁. 多环芳烃在土壤剖面中迁移行为的土柱淋滤模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(5): 988-996.
He F P, Zhang Z H, Wang S J. China University of Petroleum, et al. Modeling vertical migration characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil columns by leaching[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(5): 988-996.
- [7] 薛建涛, 张金祥, 黄咸雨. 武汉城区土壤剖面多环芳烃的分布特征及来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(2): 1-5, 11.
Xue J T, Zhang J X, Huang X Y. Distributions and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil profiles at Wuhan[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(2): 1-5, 11.
- [8] 曾丽. 有机碳含量对土壤剖面中多环芳烃残留作用的影响及模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. 26-31.
- [9] Basavaiah N, Mohite R D, Singare P U, et al. Vertical

- distribution, composition profiles, sources and toxicity assessment of PAH residues in the reclaimed mudflat sediments from the adjacent Thane Creek of Mumbai[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **118**(1-2): 112-124.
- [10] 王静. 浑河沈抚段城镇化进程对土壤及河水中多环芳烃残留影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. 17-21.
- [11] 张士超. 城镇化程度对区域不同介质中 PAHs 和 OCPs 累积影响及健康风险评估研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. 19-20.
- [12] 贾晓洋, 姜林, 夏天翔, 等. 焦化厂土壤中 PAHs 的累积、垂直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.
- [13] 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.
- [14] 丁爱芳, 潘根兴, 李恋卿. 南京和宜兴市土壤中多环芳烃 (PAHs) 的纵向分布[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(6): 115-118.
- Ding A F, Pan G X, Li L Q. Distribution profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Nanjing and Yixing city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(6): 115-118.
- [15] 肖汝, 汪群慧, 杜晓明, 等. 典型污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布特征[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 49-53.
- Xiao R, Wang Q H, Du X M, *et al.* Vertical distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbon in typical wastewater irrigated soils [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, **19**(6): 49-53.
- [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. 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] 刘广民, 尹莉莉, 刘子靖, 等. 扎龙湿地沉积物垂向剖面中多环芳烃分布特征[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(3): 36-39.
- Liu G M, Yin L L, Liu Z J, *et al.* Distributional characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in vertical section of sediments from Zhalong Wetland[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(3): 36-39.
- [18] 郭雪. 上海市郊区土壤—蔬菜系统中多环芳烃污染效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015. 3-4.
- [19] 王静, 刘明丽, 张士超, 等. 沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 703-710.
- Wang J, Liu M L, Zhang S C, *et al.* Concentration, sources and ecological risks of PAHs of different land use types in Shenfu New City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 703-710.
- [20] 王珂, 张枝焕, 曾丽, 等. 淋滤水量对多环芳烃在土壤剖面中纵向迁移的影响研究[J]. *环境科学与管理*, 2018, **43**(1): 32-37.
- Wang K, Zhang Z H, Zeng L, *et al.* Study on impacts of leaching water amount on vertical migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils [J]. *Environmental Science and Management*, 2018, **43**(1): 32-37.
- [21] 陈静, 王学军, 陶澍. 天津地区土壤有机碳和粘粒对 PAHs 纵向分布的影响[J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(4): 79-83.
- Chen J, Wang X J, Tao S. The influences of soil total organic carbon and clay contents on PAHs vertical distributions in soils in Tianjin Area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(4): 79-83.
- [22] 崔嵩, 刘丽艳, 李一凡. 土壤有机质影响多氯联苯土壤残留变化特征[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, **44**(11): 4759-4767.
- Cui S, Liu L Y, Li Y F. Influence of soil organic matter on soil residue characteristics of polychlorinated biphenyls[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, **44**(11): 4759-4767.
- [23] Laskowski D A, Goring C A I, McCall P J, *et al.* Terrestrial environment[A]. In: Conway R A (Ed.). *Environmental Risk Analysis for Chemicals*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 198-240.
- [24] Ma Y G, Lei Y D, Xiao H, *et al.* Critical review and recommended values for the physical-chemical property data of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons at 25°C [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2010, **55**(2): 819-825.
- [25] 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.
- [26] Fukushima T, Watanabe S, Kamiya K, *et al.* Vertical distributions of PAHs in the sediments of four lakes in Japan[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, **12**(10): 1530-1540.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settleability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)