

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.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析

邱慧¹, 刘月仙^{1*}, 解小凡¹, 张萌², 王伟³

(1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 2. 中国矿业大学化学与环境工程学院, 北京 100083; 3. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 采集黄河三角洲石油开采区滨州市 89 个土壤样品(其中:83 个农田土壤样品, 6 个石油开采区土壤样品), 采用气相色谱-质谱仪(GC-MS)分析土壤中的 16 种 EPA 优控的多环芳烃(PAHs)组成与含量, 运用主成分分析(PCA)和正定矩阵因子法(PMF)模型判断农田土壤中多环芳烃的来源。结果表明, 农田土壤中 16 种 PAHs 总含量(以干重计)范围 31.5 ~ 1399.4 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其平均值为 149.8 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。PAHs 组成特征表明, 该地区农田土壤中主要以 4~6 环多环芳烃为主, 单体 PAH 间大多呈显著相关($P < 0.01$), 表明采样区某些单体 PAH 的污染来源具有一定的相似性。两种源解析方法对多环芳烃的来源判定有相似的结果, 农田土壤中 PAHs 主要来源于燃煤、生物质燃烧、化石燃料燃烧以及柴油燃烧; 4 类源的贡献率依次是汽油燃烧(24.05%)、柴油燃烧(6.17%)、低温热解过程(60.67%)与煤燃烧(9.11%)。

关键词: 黄河三角洲; 农田土壤; 多环芳烃(PAHs); 源解析; 受体模型

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3509-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901193

Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta

QIU Hui¹, LIU Yue-xian^{1*}, XIE Xiao-fan¹, ZHANG Meng², WANG Wei³

(1. College of Resources and Environment, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Eighty-nine soil samples were collected from the Binzhou oil mining area of the Yellow River Delta (including 83 farmland soil samples and 6 soil samples from an oil extraction area). A total of 16 US-EPA priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were measured by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Principal component analysis (PCA) and positive matrix factorization (PMF) were employed to investigate potential source apportionment of PAHs in the farmland soil. The total PAH concentrations ranged from 31.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 1399.4 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (dry weight) with an arithmetic mean concentration of 149.8 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The characteristics of PAHs showed that 4- to 6-ring PAHs were slightly dominant in this study area, and most of the PAHs were significantly correlated ($P < 0.01$), which indicates that the sources of the PAHs had some similarities in this sampling area. Source apportionment results derived from two different models were similar, indicating that the sources of PAHs were coal combustion, biomass combustion, fossil fuel combustion, and diesel combustion. The results of the PMF were more detailed, with the following four factors being identified: gasoline combustion (24.05%), diesel combustion (6.17%), low-temperature pyrolysis processes (60.67%), and coal combustion (9.11%).

Key words: Yellow River delta; farmland soil; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); source identification; receptor models

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是环境中普遍存在的持久性有机污染物^[1], 其土壤污染状况受到广泛的关注。人类活动产生的 PAHs 通过污水灌溉和干湿沉降等途径进入农田土壤, 进入土壤中的 PAHs 可通过皮肤和口腔直接进入人体, 也可被植物和动物吸收, 通过食物链危及人类健康。

近年来我国关于农田土壤 PAHs 的研究报道, 主要集中在东北污灌区、京津冀地区、长江三角洲地区和珠江三角洲等地区, 如刘江生^[2]研究了东北某灌溉区农田土壤中 16 种多环芳烃, 其土壤 PAHs

含量为 7.88 ~ 2231.42 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Peng 等^[3]测定北京地区 16 种多环芳烃, 其含量范围为 93 ~ 13141 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 1228 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。朱媛媛等^[4]得出天津市土壤中 16 种 PAHs 的含量范围为 142 ~ 1490 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量 765 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。李静雅等^[5]研究了长江三角地区 11 个地级市土壤中 29 种 PAHs, 其含量范围为 21.0 ~ 3578.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均

收稿日期: 2019-01-23; 修订日期: 2019-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YF0503604)

作者简介: 邱慧(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤多环芳烃污染, E-mail: qiu_hui16@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: liuyue-xian@ucas.ac.cn

值为 $310.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中以苏州土壤中 PAHs 的污染最为严重. 杨国义等^[6]测定珠江三角洲研究区 5 个地级市农田土壤中 16 种 PAHs 含量为 $3.3 \sim 4\,079.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量 $244.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 以 3 环和 4 环的 PAHs 为主.

黄河三角洲的盐渍化土地面积占土地总面积的 63%, 其中含盐量高于 0.8% 的重度盐渍化土地约占 $1/4$ ^[7, 8]. 该地区石油资源丰富, 在石油开采、运输和加工过程中, 不可避免造成盐渍化土壤石油污染. 依据采油井污染范围约在 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}^2$ 估计, 该地区石油污染盐渍化土壤面积在 $2\,000 \text{ km}^2$ 以上. 石油组分成分复杂, 主要有烷烃、芳香烃及含氮、硫化物等, 其中 PAHs 作为石油的主要成分之一, 主要来自化石燃料的不完全燃烧, 具有强烈的“三致”效应. 表层土壤是 PAHs 重要的承载体. PAHs 通过大气沉降、地表径流等途径进入到农田土壤, 会被土壤中的有机质吸附^[9], 很难降解, 从而造成土壤污染, 致使土壤性质发生变化, 导致本已脆弱的盐渍化土壤生态系统受到破坏, 盐渍化农田土壤石油污染问题成为当前正在面临的重要生态环境问题之一.

对环境污染进行源解析有助于了解其主要污染途径, 进而为污染控制提供依据. 源解析方法有定性方法和定量方法两大类, 定性方法就是利用污染物的化学性质进行源识别, 如比值法、特征污染物法、轮廓图法和碳同位素法^[10~13]; 定量方法则是利用数学分析模型对污染物来源进行量化解析. 有研究针对石油开采区有机污染场地周边农田土壤采用主成分分析方法和比值法单独进行源解析^[14, 15], 但在因果关系判定方面存在源贡献率不清的问题. 在定量方法中, 受体模型是一种有效的源解析工具^[16~20], 其中正定矩阵因子法对源谱信息的依赖性较低, 近年来被广泛用于各种环境介质中污染物的源解析, 如边璐等^[21]对降雨地表径流中的多环芳烃进行来源解析, 刘现明等^[22]对大连湾沉积物中的多环芳烃进行来源解析, 王成龙^[23]对长江流域水体中的多环芳烃来源解析.

本文以黄河三角洲石油开采区盐渍化农田为研究对象, 分析农田土壤样品中 PAHs 的污染水平和空间分布, 运用主成分分析方法与正定矩阵因子法对 PAHs 的来源进行探讨, 明确污染物与受体的因果关系, 以期为司法定责、生态补偿和环境管理提供理论与实践指导, 并为保护当地农田土壤环境提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲位于中国东部, 是典型的石化工业区域. 采样研究区域为山东省滨州市滨城区石油开采区周边农田 ($118^{\circ}0'E \sim 118^{\circ}6'E$, $37^{\circ}26'N \sim 37^{\circ}30'N$). 该区域工业园区占地 48 km^2 , 住宅生活区面积 6.23 km^2 . 全年主导风向是东南风, 频率为 $8\% \sim 10\%$. 农田分布在生活区和工业区周边, 主要种植农作物是玉米、小麦、棉花等, 周边有石油开采、农药生产、炼焦工业、石油化工、燃煤发电等工业活动. 高速公路、铁路等组成的交通运输网路作为链接通道, 将原材料运入以及加工产品的运出.

1.2 样品采集

农田土壤采样布点主要考虑农田周边潜在污染源的分布、土地利用状况以及区域间样点分布均匀性等特点. 采样区域位于工业区的东南方向, 根据抽油机以及区域道路分布, 在发电厂周围半径 5 km 范围内, 共采集土壤样品 89 个, 其中 6 个为抽油机附近土壤样品, 其余为农田土壤样品 (见图 1), 采样时用 GPS 记录每个采样点的经纬度, 详细记载样点的地理位置和现有及潜在污染源等信息. 土壤样品为表层土壤 ($0 \sim 20 \text{ cm}$), 采用梅花采样法. 采集好的样品装入自封袋中, 带回实验室 -20°C 冷冻保存直至分析.

1.3 样品预处理

土壤样品进行冷冻干燥, 去除植物根系、石子等杂质后, 过 1 mm 筛.

土壤样品多环芳烃预处理参见文献^[24, 25]: 取 10 g 土样, 使用加速溶剂萃取仪 (瑞士步琦 E-916) 进行萃取, 萃取剂选择二氯甲烷和正己烷 ($1:1$, 体积比), 萃取条件为: 载气 (氮气) 压力: 0.8 MPa ; 加热温度: 100°C ; 萃取池压力: $1 \times 10^4 \text{ kPa}$; 预加热平衡: 5 min ; 静态萃取时间: 5 min ; 溶剂淋洗时间: 4 min ; 氮气吹扫时间: 3 min ; 静态萃取次数: 2 次.

将接收瓶中的提取液转移到旋转蒸发瓶中, 用适量的正己烷-二氯甲烷 ($1:1$, 体积比) 润洗接收瓶 3 次并转移到旋转蒸发瓶中, 旋转蒸发至 2 mL . 用 4 mL 二氯甲烷淋洗佛罗里硅土小柱, 加入 5 mL 正己烷待柱充满后关闭流速阀浸润 5 min . 继续加 5 mL 正己烷, 缓慢打开控制阀, 在填料暴露空气前关闭.

将提取液转移至小柱内, 用 3 mL 正己烷分 3 次洗涤旋转蒸发瓶, 并全部转移至小柱中. 缓慢打

同)范围为 $31.5 \sim 1\,399.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $149.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 根据 Trapido^[28] 对未受人类活动干扰的农业土壤 PAHs 本底值 ($100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的界定, 研究区域 65.1% 的采样点受到污染. 其中, 在滨州 89 个土样中, $\sum$ PAHs 含量最大值是最小值的 72 倍, 最高值为 $2\,287.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 该采样点位于 88 号石油开采点(见图 1); 此外, $\sum$ PAHs 高于 1 000 的

点位共有 2 个, 分别位于 88 号石油开采点和 35 号农田土壤采集点.

与国内其他地区农田土壤中已报道的 PAHs 含量相比(表 2), 滨州石油开采区农田土壤中 $\sum$ PAHs 含量偏低, 略高于江苏南京长江流域稻田土壤^[30], 低于其余地区农田土壤多环芳烃的含量.

表 1 石油开采区农田土壤多环芳烃含量¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 1 Concentrations of 16 PAHs in agricultural soils/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

污染物	环数	含量范围	均值	中值	检出率/%
Nap	2	2.5 ~ 229.3	23.6 ± 35.5	11.6	100.0
Acy	3	ND ~ 21.8	0.4 ± 2.4	ND	2.4
Ace	3	ND ~ 10.4	0.2 ± 1.1	ND	1.2
Flu	3	ND ~ 22.5	7.1 ± 4.0	6.4	97.6
Phe	3	4.6 ~ 103.0	20.6 ± 15.3	16.2	100.0
Ant	3	0.4 ~ 38.3	3.5 ± 4.2	2.9	100.0
Fla	4	3.2 ~ 103.3	12.5 ± 11.5	10.0	100.0
Pyr	4	2.6 ~ 216.3	15.6 ± 23.2	11.6	100.0
BaA	4	ND ~ 117.5	9.9 ± 12.8	9.1	95.2
Chr	4	ND ~ 227.1	12.7 ± 25.2	7.5	100.0
BbF	5	ND ~ 142.5	15.6 ± 16.4	12.8	95.2
BkF	5	ND ~ 14.3	3.5 ± 3.2	5.4	67.5
BaP	5	ND ~ 124.1	13.2 ± 14.1	12.0	97.6
IcdP	6	ND ~ 100.6	5.1 ± 12.9	ND	22.9
DahA	5	ND ~ 20.7	0.6 ± 3.0	ND	2.4
BghiP	6	ND ~ 120.5	5.7 ± 15.0	ND	26.5
$\sum_{16}$ PAH	—	31.5 ~ 1 399.4	149.8 ± 153.1	119.4	—
2 ~ 3 环 PAHs	—	9.8 ~ 242.7	55.4 ± 43.2	38.4	—
4 ~ 6 环 PAHs	—	11.9 ~ 1 172.8	94.4 ± 128.6	70.1	—

1) ND 表示未检出

2.2 石油开采区农田土壤中多环芳烃成分组成特征

83 个农田土壤样品中不同单体多环芳烃含量中, Nap 平均含量最高, 为 $(23.6 \pm 35.5) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Phe 和 Pyr 次之, 分别为 $(20.6 \pm 15.3) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(15.6 \pm 23.2) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 含量最低的是 Ace, 为 $(0.2 \pm 1.1) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 单体多环芳烃的中值含量均低于它们的平均值, 这表明大多数单体多环芳烃在较低含量范围. 图 2 显示的是农田土壤中多环芳烃的结构特征, 可以看出, 该区域农田土壤中 2 ~ 3 环多环芳烃比例较高, 所占比例为 14.2% ~ 95.5%, 平均比例为 39.2%; 4 环所占比例为 3.4% ~ 63.3%, 平均为 33.6%; 5 ~ 6 环所占比例为 0% ~ 49.2%, 平均占 27.2%. 其中, 低分子质量 LMW PAHs(2 ~ 3 环)的含量为 $55.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高分子质量 HMW PAHs(4 ~ 6 环)的含量为 $94.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. LMW/HMW PAHs 的比值是 0.587, 表明该区域 HMW PAHs 为农田土壤主要污染成分. 这与山西某污灌区农田土壤中的多环芳烃的组成相似^[35].

2.3 石油开采区农田土壤中多环芳烃成分空间分布

运用 ArcGIS 10.6 软件统计分析模块, 将滨州 89 个采样点的 $\sum$ PAHs 含量数据进行分析(图 3), 发现含量相对较高的点位主要分布在发电厂、石油开采区以及铁路交通周边. $\sum$ PAHs 含量范围 200 ~ $600 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的采样点大多分布在发电厂周边, 距离发电厂 800 ~ 1 500 m, 而采样点 25 和 53 则分布在工业园区内, 采样点 18 和 36 距离工业园区 1 000 m 范围内; 采样点 84、88 和 89 都是石油开采点抽油机的位置, 其 $\sum$ PAHs 含量范围在 600 ~ $2\,500 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 采样点 88 与 68 分别是多环芳烃含量最高和最低的点. 采样点 88 的样品是石油开采区的土壤样品, 采样点 68 是在居民区周边农田采集的土壤样品. 说明该区域的工业活动已经影响到周边的农田土壤.

2.4 多环芳烃各单体及其与有机质的相关性分析

表 3 显示的是各单体多环芳烃的相关性, 各单

表 2 其他地区农田土壤中多环芳烃的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 2 Content of PAHs in farmland soils in other areas/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

研究地区	土壤来源	多环芳烃种类	含量范围	平均值	文献
山东滨州	滨州农田	16	31.5 ~ 1 399.4	149.8	本研究
上海	崇明岛农田	16	24.92 ~ 1 014.61	192.83	[24]
黄淮平原	麦田	15	33.44 ~ 1 246	152.4	[29]
江苏兴化	里下河流域稻田	16	673.6 ~ 2 286.8	1370.3	[30]
江苏吴江	太湖流域稻田	16	219.5 ~ 1 628.6	801.1	[30]
江苏宜兴	太湖流域稻田	16	93.0 ~ 266.5	210.8	[30]
江苏南京	长江流域稻田	16	45.6 ~ 210.9	126.7	[30]
江苏苏州	农田	15	45.4 ~ 3 703	312.5	[31]
浙江嘉兴	农田	15	9.0 ~ 2 421	152.4	[31]
韩国	稻田	16	23.3 ~ 2 834	236	[32]
希腊	发电厂周边农田	16	50 ~ 500	—	[33]
德黑兰	炼油厂周边农田	16	130 ~ 3 920	—	[34]

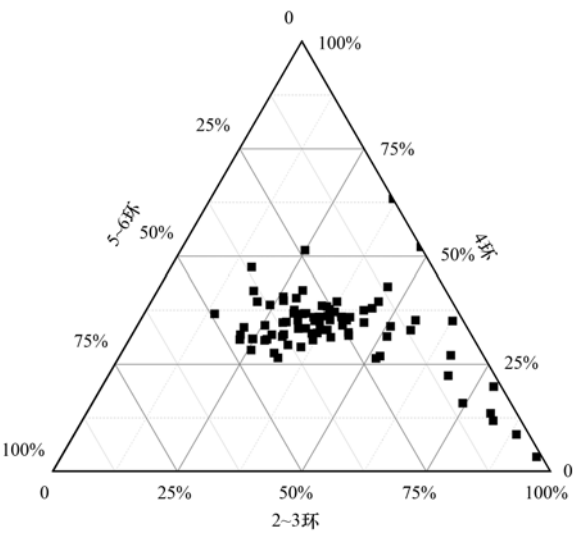


图 2 研究区农田土壤中多环芳烃结构组成
Fig. 2 Structural composition of PAHs in farmland soils of the study area

体多环芳烃组分之间大多存在显著相关性 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 除 Nap 和 BkF 以外, 表明研究区域内多环芳烃的来源具有一定的相似性, 与其他研究所得到的结果相似^[36, 37].

如表 3 所示, 多环芳烃总含量与有机质的相关性较弱, 并没有明显的相关性. 与其他研究区域相比较, Wang^[38] 也得出了相似的结果. 张迪瀚等^[39] 的研究认为在污染程度较弱的土壤中, 多环芳烃与有机质的含量之间不存在明显相关性, 只有当 PAHs 的污染到达一定含量水平, PAHs 与有机质含量的相关性才会凸显.

2.5 土壤中多环芳烃来源分析

2.5.1 主成分分析法(PCA)

主成分分析法是一种多元统计方法. 运用主成分分析法定量解析农用地土壤中多环芳烃的来源, 以特征值大于 1 的成分作为主成分, 通过方差极大法对因子进行旋转, 经正交旋转后的因子载荷, 当

单体 PAH 的因子载荷在 0.5 以下则被剔除, 若单体 PAH 的因子载荷在 0.5 以上且解释方差累计比例大于 50%, 则认为达到要求. 由表 4 可知, 两个因子可以解释 87.7% 的方差.

因子 1 解释了 79.6% 的方差, 由 3 ~ 6 环多环芳烃组成, 包括 Acy、Ace、Flu、Phe、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chr、BbF、BaP、IcdP、DahA 和 BghiP. LMW PAHs 与 HMW PAHs 均存在这个因子中, 这表明该因子是一个混合源. 一些研究者发现 LMW PAHs 是煤或生物质燃烧的标志物, 尤其在家用燃烧和炼焦过程中的低温煤燃烧过程^[40, 41]. HMW PAHs 主要来源于交通相关排放^[25, 42 ~ 44]. 综上, 因子 1 反映研究区农田土壤中多环芳烃的来源为煤、生物质以及化石燃料的燃烧.

因子 2 解释了 8.1% 的方差, 主要是 BkF. BkF 主要是柴油的燃烧^[45, 46]. 这可能是受到拖拉机等农用器械的影响(燃油尾气排放以及燃油渗漏). 因此, 因子 2 反映了交通排放.

2.5.2 正定矩阵因子法(PMF)

该模型通过信噪比检查, 判断单体多环芳烃的数据质量. 信噪比大于 1 的表明该物质是强信号, 小于 0.5 的表明是差信号, 在 0.5 ~ 1 之间表明是弱信号. 与此同时, 如果含量实际值与预测值具有较差的匹配性, 那么该物质也要被划分为差信号. 因此, 在本研究中得到: 强信号 (Flu、Phe、Ant、Fla、BaA、BbF、BkF、BaP、IcdP 和 BghiP)、弱信号 (Pyr 和 Chr) 以及差信号 (Nap、Acy、Ace 和 DahA). PMF 模型的因子数由 Q(稳健)与 Q(真)来决定. 本研究结果得出 4 个因子数是最为合适的.

PMF 的运行结果见图 4. 因子 1 主要由 IcdP 和 BghiP 组成, 占总来源的 24.05%, 它们是汽油^[47 ~ 49]以及重油燃烧的典型产物^[50, 51]. 滨州工业园区交通便利, 有高速公路、铁路组成的交通枢

表 3 多环芳烃与土壤有机质的相关性¹⁾
Table 3 Correlations between PAHs and soil organic matter

	SOM	∑ PAHs	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	IcdP	DahA	BghiP
SOM	1																	
∑ PAHs	-0.068	1																
Nap	0.275 **	0.172	1															
Acy	-0.089	0.923 **	0.086	1														
Ace	-0.149	0.780 **	0.06	0.708 **	1													
Flu	-0.17	0.670 **	0.036	0.510 **	0.599 **	1												
Phe	-0.099	0.892 **	0.05	0.744 **	0.765 **	0.874 **	1											
Ant	-0.01	0.924 **	0.027	0.876 **	0.735 **	0.549 **	0.842 **	1										
Fla	-0.022	0.938 **	0.045	0.823 **	0.798 **	0.65 **	0.915 **	0.954 **	1									
Pyr	-0.021	0.947 **	0.045	0.883 **	0.797 **	0.583 **	0.871 **	0.972 **	0.985 **	1								
BaA	-0.144	0.941 **	-0.006	0.956 **	0.649 **	0.585 **	0.785 **	0.863 **	0.838 **	0.879 **	1							
Chr	-0.138	0.967 **	0.08	0.874 **	0.87 **	0.688 **	0.888 **	0.87 **	0.921 **	0.918 **	0.89 **	1						
BbF	-0.107	0.951 **	0.031	0.923 **	0.614 **	0.628 **	0.816 **	0.858 **	0.846 **	0.866 **	0.981 **	0.896 **	1					
BkF	-0.122	-0.184	-0.234 *	-0.164	-0.196	0.053	-0.106	-0.171	-0.195	-0.202	-0.093	-0.211 *	-0.106	1				
BaP	-0.162	0.933 **	-0.001	0.797 **	0.803 **	0.689 **	0.865 **	0.831 **	0.886 **	0.872 **	0.869 **	0.967 **	0.884 **	-0.17	1			
IcdP	-0.092	0.905 **	0.049	0.945 **	0.649 **	0.511 **	0.731 **	0.86 **	0.796 **	0.842 **	0.931 **	0.834 **	0.923 **	-0.117	0.782 **	1		
DahA	-0.119	0.887 **	0.081	0.916 **	0.622 **	0.476 **	0.708 **	0.863 **	0.768 **	0.816 **	0.9 **	0.823 **	0.900 **	-0.165	0.775 **	0.937 **	1	
BghiP	-0.089	0.945 **	0.054	0.896 **	0.611 **	0.542 **	0.774 **	0.857 **	0.835 **	0.862 **	0.959	0.894 **	0.972 **	-0.148	0.898 **	0.906 **	0.892 **	1

1) * 表示在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾), 相关性显著

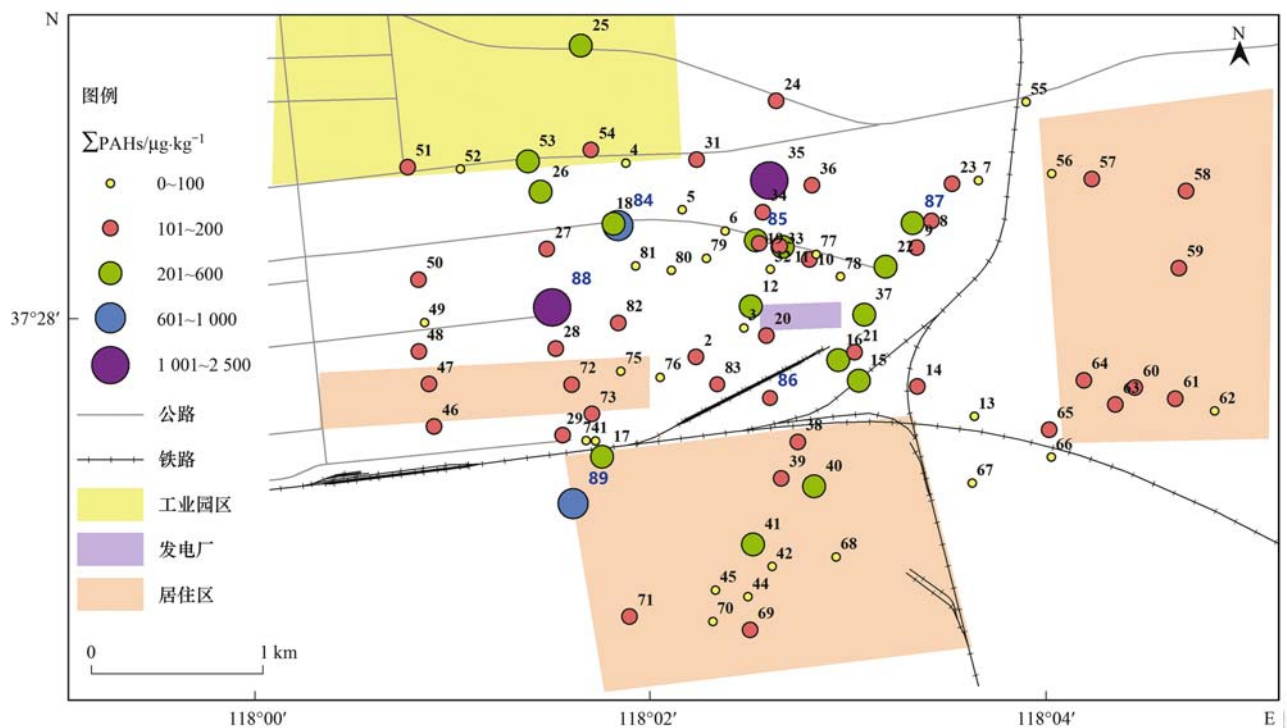


图3 研究区域农田土壤中多环芳烃含量分布
Fig. 3 Spatial distribution of total PAHs in the surface soils of the study area

表4 方差旋转所得因子分析得分¹⁾
Table 4 Factor analysis scores following Varimax rotation for each PAH

项目	PC1	PC2
Nap	0.081	-0.551
Acy	0.974	-0.115
Ace	0.961	-0.104
Flu	0.675	0.399
Phe	0.893	0.234
Ant	0.990	0.005
Fla	0.987	0.044
Pyr	0.992	-0.021
BaA	0.987	0.021
Chr	0.990	-0.063
BbF	0.992	0.046
BkF	-0.105	0.848
BaP	0.986	0.024
IcdP	0.965	-0.039
DahA	0.932	-0.129
BghiP	0.976	-0.031
方差/%	79.6	8.1

1) 黑体字表示因子载荷数高

组, 周边为公路运输枢纽, 交通尾气的排放, 即汽油的燃烧可产生 IcdP 和 BghiP. 因此, 因子 1 代表了交通排放源.

因子 2 的主要物质是 BkF, 占总来源的 6.17%. BkF 是柴油燃烧的产物. 这可能与当地收割机、拖拉机等农用机械的使用有关, 其大多以柴油机为动力. 因此, 因子 2 代表了交通排放源.

因子 3 的来源贡献率是 60.67%, 主要物质是

Phe、Flu、Fla、Chr 和 Pyr. 这些属于 3~4 环的多环芳烃, 表明木材以及生物质的燃烧是主要的来源^[52]. 研究区域的村民生活存在生物质燃烧现象 (如烹饪方式、秸秆燃烧). Flu 和 Phe 也是炼焦产物^[53], 且 Flu、Pyr 以及 Phe 通常是煤燃烧的标志物^[54]. 一些研究表明 LMW PAHs 是低温热解过程中的重要燃烧产物^[55]. 因此, 这个来源是低温热解过程, 包括煤和生物质的燃烧.

因子 4 主要由 BaP、BbF 和 BaA 组成, 其贡献率是 9.11%. 这些物质通常是煤燃烧的产物. 这可能与当地的工业活动相关; 发电厂以及工厂锅炉大多以燃煤获得生产动力, 该研究区域存在农药生产、炼焦工业、石油化工、燃煤发电等工业活动. 因此, 因子 4 代表煤的燃烧.

2.5.3 两种源解析方法的比较

传统的基于多环芳烃组分含量比的源解析方法一般只可以对污染源进行定性. 为了更好地解析多环芳烃的来源, 有必要使用定量方法. 本研究采用了主成分分析和正定矩阵因子模型进行多环芳烃来源的定量分析.

主成分分析法和正定矩阵因子法都可以在不需要已知污染源成分的情况下, 通过样品的含量估计来源. 然而, 主成分分析法不能给出各因子源贡献的定量结果. 与主成分分析法相比, 正定矩阵因子法可以更好地解释来源, 可以更详尽地解释污染源. 除此之外, 正定矩阵因子的输出结果是非负

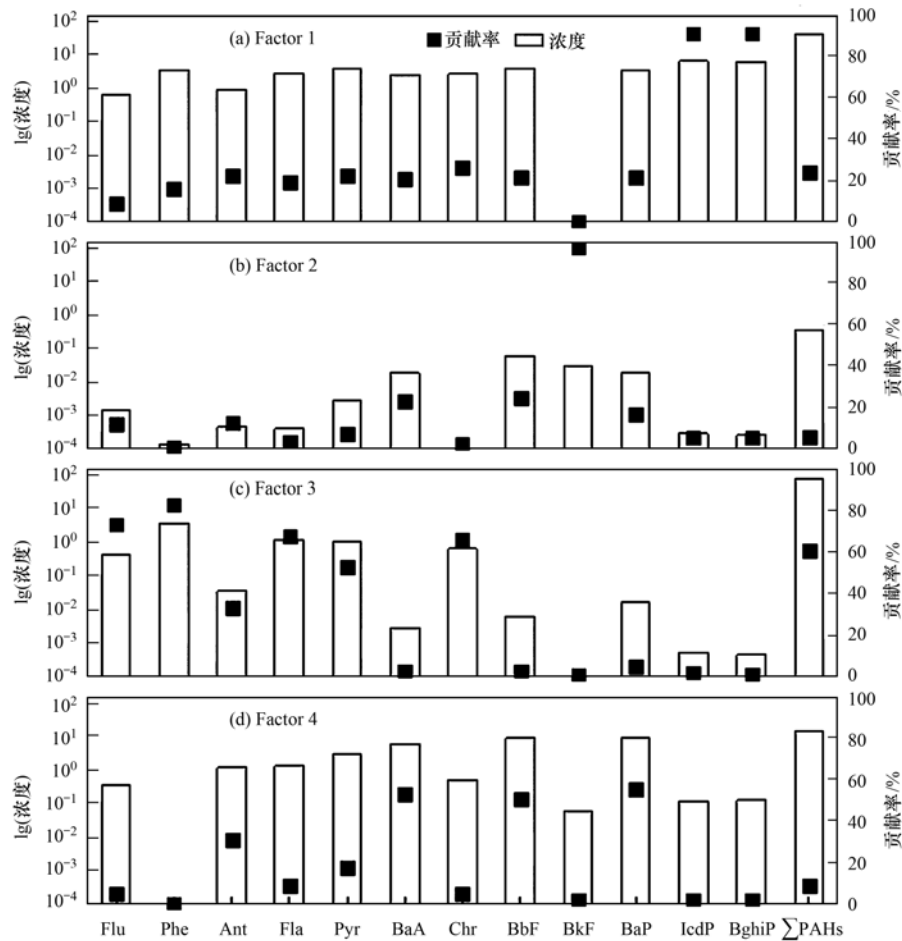


图4 PMF模型得到的PAHs因子成分

Fig. 4 Factor profiles for PAHs sources in farmland soils obtained using PMF

的。而主成分分析的结果会出现负值。

在本研究中, PMF 解析出 4 种源: 汽油燃烧 (24.05%)、柴油燃烧 (6.17%)、低温热解过程 (60.67%) 与煤燃烧 (9.11%)。主成分分析法解析了煤、生物质和化石燃料燃烧的混合源以及柴油燃烧源。两种方法得出的源成分谱是相似的。

3 结论

本文对山东滨州石油开采区农田土壤中优先控制的 16 种典型 PAHs 的含量进行了分析, 研究区域的多环芳烃的总含量范围是 $31.5 \sim 1399.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $149.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中位值为 $119.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, LMW/HMW PAHs 的比值是 0.587, 表明该区域农田土壤中以高分子量多环芳烃为主。该区域各单体多环芳烃组分之间大多存在显著相关性 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 而多环芳烃的总含量与有机质的相关性不显著。相关研究表明这或许与多环芳烃的污染含量水平相关。ΣPAHs 含量较高的采样点主要分布在发电厂、抽油机石油开采区以及铁路交通周边。运用主成分分析和正定矩

阵因子法模型判断了农田土壤中多环芳烃的来源, 两种源解析方法的解析结果是相似的。主成分分析的结果是以煤、生物质和化石燃料燃烧为主的混合源以及柴油燃烧源; 正定矩阵因子法的解析结果是汽油燃烧 (24.05%)、柴油燃烧 (6.17%)、低温热解过程 (60.67%) 与煤燃烧 (9.11%)。

参考文献:

- [1] Hoffman E J, Mills G L, Latimer J S, *et al.* Urban runoff as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons to coastal waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, **18**(8): 580-587.
- [2] 刘江生. 东北老工业基地浑蒲灌区土壤中多环芳烃污染特征、断代、溯源及风险评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [3] Peng C, Chen W P, Liao X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: status, sources, distribution and potential risk [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(3): 802-808.
- [4] 朱媛媛, 田靖, 魏恩琪, 等. 天津市土壤多环芳烃污染特征、源解析和生态风险评价[J]. *环境化学*, 2014, **33**(2): 248-255.
Zhu Y Y, Tian J, Wei E Q, *et al.* Characteristics, sources apportionment and ecological risks assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Tianjin, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(2): 248-255.
- [5] 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.
- [6] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中多环芳烃的含量分布特征及其污染来源[J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2350-2354.
Yang G Y, Zhang T B, Gao S T, *et al.* Source and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(10): 2350-2354.
- [7] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异[J]. *地理研究*, 2006, **25**(4): 649-658.
Wang H, Gong P, Liu G H. Multi-scale spatial variations in soil salt in the Yellow River Delta [J]. *Geographical Research*, 2006, **25**(4): 649-658.
- [8] 姚荣江, 杨劲松. 基于电磁感应仪的黄河三角洲地区土壤盐分时空变异特征[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(3): 107-113.
Yao R J, Yang J S. Spatio-temporal variability of soil salinity in the Yellow River Delta using electromagnetic induction [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, **24**(3): 107-113.
- [9] Means J C, Wood S G, Hassett J J, *et al.* Sorption of polynuclear aromatic hydrocarbons by sediments and soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 1980, **14**(12): 1524-1528.
- [10] 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.
- [11] Zhou J L, Siddiqui E, Ngo H H, *et al.* Estimation of uncertainty in the sampling and analysis of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil in Brighton, UK [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **497-498**: 163-171.
- [12] 翟梦晓. 黄淮水系河南段表层沉积物中多环芳烃的赋存特征及来源解析[D]. 新乡: 河南师范大学, 2011.
- [13] Lin C, Liu J L, Wang R M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of Kunming, China: concentrations, distribution, sources, and potential risk[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2013, **22**(7): 753-766.
- [14] Zuo Q, Duan Y H, Yang Y, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in Tianjin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(2): 303-310.
- [15] Macaskill N D, Walker T R, Oakes K, *et al.* Forensic assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons at the former Sydney Tar Ponds and surrounding environment using fingerprint techniques[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 166-177.
- [16] 薛荔栋, 郎印海, 刘爱霞, 等. 黄海近岸表层沉积物中多环芳烃来源解析[J]. *生态环境*, 2008, **17**(4): 1369-1375.
Xue L D, Lang Y H, Liu A X, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal surface sediments from the Yellow Sea [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(4): 1369-1375.
- [17] Jiang Y F, Wang X T, Wang F, *et al.* Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(8): 1112-1118.
- [18] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中多环芳烃的来源、迁移及生态风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2006, **1**(1): 17-24.
- [19] Warren C S, Mackay D, Bahadur N P, *et al.* A suite of multi-segment fugacity models describing the fate of organic contaminants in aquatic systems: application to the Rihand Reservoir, India [J]. *Water Research*, 2002, **36**(17): 4341-4355.
- [20] Shi G L, Liu G R, Peng X, *et al.* A comparison of multiple combined models for source apportionment, including the PCA/MLR-CMB, Unmix-CMB and PMF-CMB models [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(7): 2040-2050.
- [21] 边璐, 李田, 侯娟. PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3840-3846.
Bian L, Li T, Hou J. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons using two mathematical models for runoff of the Shanghai elevated inner highway, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3840-3846.
- [22] 刘现明, 徐学仁, 张笑天, 等. 大连湾沉积物中 PAHs 的初步研究[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(4): 507-509.
Liu X M, Xu X R, Zhang X T, *et al.* A preliminary study on PAHs in the surface sediment samples from Dalian Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(4): 507-509.
- [23] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 等. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3789-3797.
Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al.* Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze River, China: based on PMF Model [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3789-3797.
- [24] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4270-4275.
Lü J G, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil of the Chongming Island in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4270-4275.
- [25] Syed J H, Iqbal M, Zhong G C, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chinese forest soils: profile composition, spatial variations and source apportionment [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 2692.
- [26] 谢细香. 重铬酸钾稀释放热比色法测定土壤有机质的研究[J]. *安徽农业科学*, 2005, **33**(6): 998-999.
Xie X X. Determination of organic matter in soil with the method of potassium bichromate-dilution heat colorimetric [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2005, **33**(6): 998-999.
- [27] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 375-383.
- [28] Trapido M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Estonian soil: contamination and profiles [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **105**(1): 67-74.
- [29] 周玲莉, 薛南冬, 李发生, 等. 黄淮平原农田土壤中多环芳烃的分布、风险及来源[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(7): 1250-1256.
Zhou L L, Xue N D, Li F S, *et al.* Distribution, source analysis

- and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soils in Huanghuai Plain [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1250-1256.
- [30] 丁爱芳, 潘根兴, 李恋卿. 江苏省部分地区农田表土多环芳烃含量比较及来源分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(2): 71-75.
- Ding A F, Pan G X, Li L Q. Contents and sources of PAHs in top soils of farmlands in parts of Jiangsu, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, **23**(2): 71-75.
- [31] 刘增俊, 滕应, 黄标, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤多环芳烃分布特征与源解析[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(6): 1110-1117.
- Liu Z J, Teng Y, Huang B, *et al.* Distribution and sources analysis of PAHs in farmland soils in areas typical of the Yangtze River Delta, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(6): 1110-1117.
- [32] Nam J J, Song B H, Eom K C, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(10): 1281-1289.
- [33] Stalikas C D, Chaidou C I, Pilidis G A. Enrichment of PAHs and heavy metals in soils in the vicinity of the lignite-fired power plants of West Macedonia (Greece) [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **204**(2): 135-146.
- [34] Bayat J, Hashemi S H, Khoshbakht K, *et al.* Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons on agricultural lands surrounding Tehran oil refinery [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(7): 451.
- [35] 刘庚, 牛俊杰, 王玲, 等. 污灌区农田土壤多环芳烃污染及风险评价[J]. *环境化学*, 2017, **36**(7): 1622-1629.
- Liu G, Niu J J, Wang L, *et al.* Contamination and risk assessment of PAHs in agricultural soil from wastewater irrigated area[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(7): 1622-1629.
- [36] 吴迪, 汪宜龙, 刘伟健, 等. 河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 740-749.
- Wu D, Wang Y L, Liu W J, *et al.* Concentrations and component profiles PAHs in surface soils and wheat grains from the cornfields close to the steel smelting industry in Handan, Hebei Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 740-749.
- [37] 王学彤, 贾英, 孙阳昭, 等. 典型污染区农业土壤中 PAHs 的分布、来源及生态风险[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(11): 2433-2439.
- Wang X T, Jia Y, Sun Y Z, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from a typical contaminated area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(11): 2433-2439.
- [38] Wang C F, Wang X P, Gong P, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil across the Tibetan Plateau: spatial distribution, source and air-soil exchange [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 138-144.
- [39] 张迪瀚, 马永亮, 贺克斌, 等. 北京市大气颗粒物中多环芳烃(PAHs)污染特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1269-1275.
- Zhang D H, Ma Y L, He K B, *et al.* Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on airborne particulates in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(7): 1269-1275.
- [40] Ravindra K, Sokhi R, van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(13): 2895-2921.
- [41] Jenkins B M, Jones A D, Turn S Q, *et al.* Emission factors for polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass burning [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(8): 2462-2469.
- [42] Yang Y, Zhang N, Xue M, *et al.* Effects of soil organic matter on the development of the microbial polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degradation potentials [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 591-595.
- [43] Liu Y, Beckingham B, Ruegger H, *et al.* Comparison of sedimentary PAHs in the rivers of Ammer (Germany) and Liangtan (China): differences between early- and newly-industrialized countries [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(2): 701-709.
- [44] Shen G F, Chen Y C, Wei S Y, *et al.* Can Coronene and/or Benzo(a)pyrene/Coronene ratio act as unique markers for vehicle emission? [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 650-653.
- [45] Boonyatumanond R, Wattayakorn G, Togo A, *et al.* Distribution and origins of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riverine, estuarine, and marine sediments in Thailand [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, **52**(8): 942-956.
- [46] Kavouras I G, Koutrakis P, Tsapakis M, *et al.* Source apportionment of urban particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) using multivariate methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(11): 2288-2294.
- [47] Khalili N R, Scheff P A, Holsen T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(4): 533-542.
- [48] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [49] Jo W K, Lee J H. In-vehicle levels of naphthalene and monocyclic aromatic compounds according to vehicle type [J]. *Environmental Engineering Research*, 2009, **14**(3): 180-185.
- [50] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K. [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(3): 825-832.
- [51] Lee J H, Gigliotti C L, Offenberg J H, *et al.* Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons to the Hudson River Airshed [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(35): 5971-5981.
- [52] Liu D, Lin T, Syed J H, *et al.* Concentration, source identification, and exposure risk assessment of PM_{2.5}-bound parent PAHs and nitro-PAHs in atmosphere from typical Chinese cities [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 10398.
- [53] Dong T T T, Lee B K. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(9): 1245-1253.
- [54] Tian F L, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Sources and seasonal variation of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Dalian, China: Factor analysis with non-negative constraints combined with local source fingerprints [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(17): 2747-2753.
- [55] Simcik M F, Eisenreich S J, Lioy P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(30): 5071-5079.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)