

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

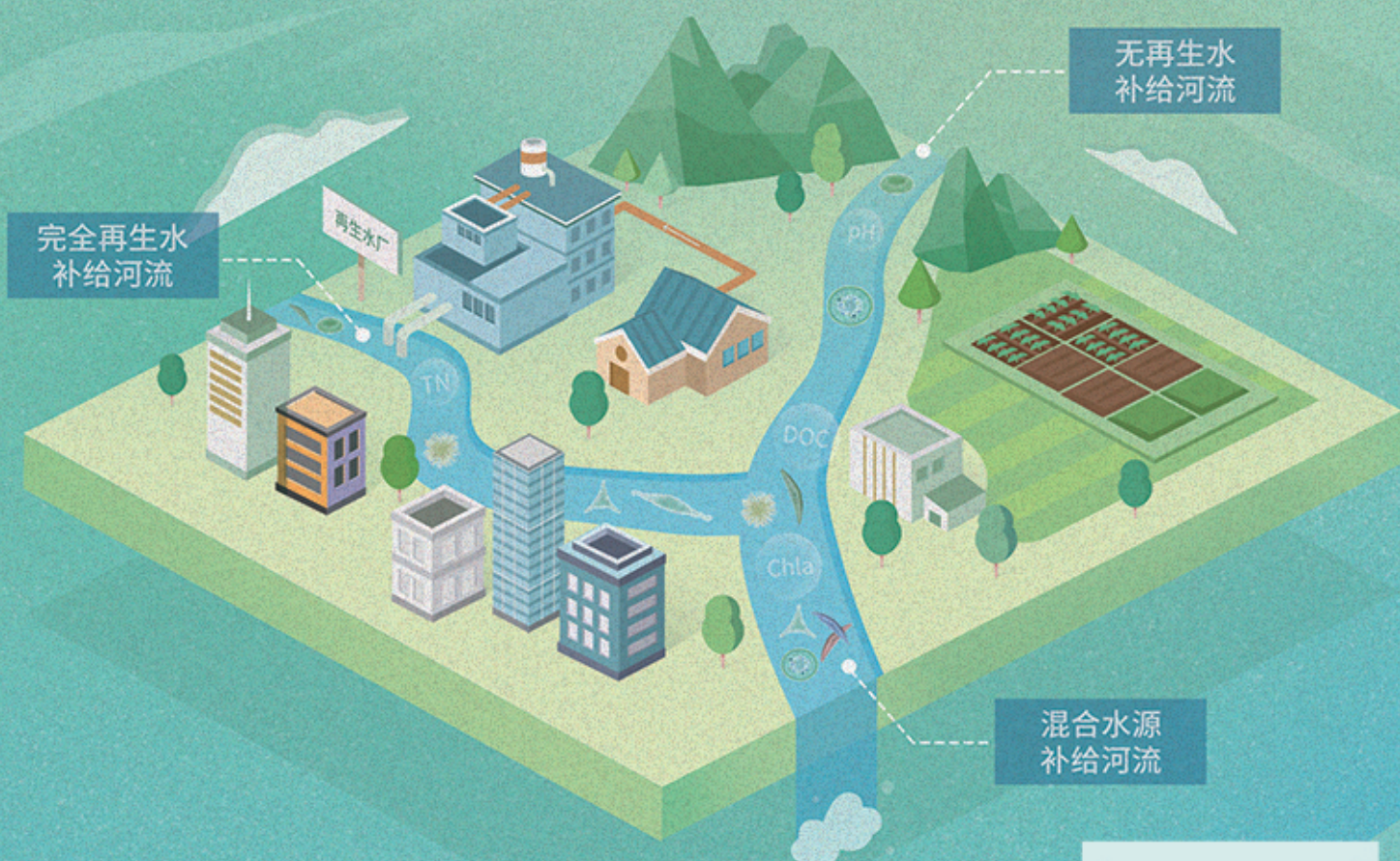
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期
Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价

杨北辰^{1,2}, 解启来^{1,2*}, 郑芊^{1,2}, 郑晓波^{1,2}, 叶金明^{1,2}, 唐成金^{1,2}, 梁晓晖^{1,2}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 广州 510642)

摘要: 利用气相色谱-质谱法 (GC-MS) 测定新疆多段公路沿线和 3 个风景区植物和土壤中多环芳烃 (PAHs) 含量。结果表明, 11 个采样点的 11 个土壤样品 $\sum_{16}$ PAHs 含量为 18.82 ~ 2153.54 ng·g⁻¹, 平均值为 425.95 ng·g⁻¹, 36 个采样点的 59 个植物样品中 $\sum_{16}$ PAHs 含量范围为 9.93 ~ 748.30 ng·g⁻¹, 平均值为 154.11 ng·g⁻¹。植物样品中不同环数的 PAHs 平均含量高低次序为: 低环 (2~3 环) > 中环 (4 环) > 高环 (5~6 环), 土壤样品不同环数的 PAHs 平均含量高低次序为: 中环 (4 环) > 高环 (5~6 环) > 低环 (2~3 环)。特征比值法和主成分分析法分析得出, 土壤中 PAHs 主要为燃烧和石油源, 植物吸收的 PAHs 主要来源为木材燃烧和炼焦工业。健康风险评价结果表明, S323 省道库尔勒段土壤 PAHs 对道路工作人员致癌风险值 (CR) 为 1.26×10^{-6} , 存在潜在健康风险。

关键词: 新疆; 土壤; 植物; 多环芳烃 (PAHs); 源解析; 健康风险评价

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301 (2022) 12-5751-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202112229

Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China

YANG Bei-chen^{1,2}, XIE Qi-lai^{1,2*}, ZHENG Qian^{1,2}, ZHENG Xiao-bo^{1,2}, YE Jin-ming^{1,2}, TANG Cheng-jin^{1,2}, LIANG Xiao-hui^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural & Rural Pollution Abatement and Environmental Safety, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Gas chromatography-mass spectrometry was utilized to determine the contents of PAHs in plants and soil collected around several highways and three scenic areas in Xinjiang. The concentrations of $\sum_{16}$ PAHs ranged from 18.82 to 2153.54 ng·g⁻¹ in 11 soil samples from 11 sampling sites, with an average value of 425.95 ng·g⁻¹. The concentrations of $\sum_{16}$ PAHs ranged from 9.93 to 748.30 ng·g⁻¹ in 59 plant samples from 36 sampling sites, with an average value of 154.11 ng·g⁻¹. In the plant samples, the order of the average content with different ring numbers of PAHs were ranked as low rings (2-3 rings) > middle rings (4 rings) > high rings (5-6 rings), and in soil samples, the order of the average content with different ring numbers of PAHs were ranked as middle rings (4 rings) > high rings (5-6 rings) > low rings (2-3 rings). According to the ratios of indicator PAHs and principal component analysis, PAHs in soil and plant samples came from various sources, mainly the burning of fossil fuels and biomass. The main sources of PAHs in soil were combustion and petroleum, and the main sources of PAHs absorbed by plants were wood burning and coking industries. The carcinogenic risk (CR) of soil PAHs in the Korla section of the S323 provincial road to road workers was 1.26×10^{-6} , indicating potential health risks.

Key words: Xinjiang; soil; plant; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); source apportionment; health risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类持久性有机污染物, 由多个苯环通过共轭作用而形成^[1], 其主要来源为化石燃料和生物有机质的不完全燃烧及高温裂解^[2]。PAHs 具有生物蓄积性、半挥发性、长期残留性和“三致”作用, 已经越来越受到人们的重视^[3]。PAHs 在环境中的沉降、挥发受到温度影响, 导致其含量和组成会随排放源距离增加而改变^[4]。由于 PAHs 具有亲脂性, 能被富含有机质的表层土壤吸附, 因此土壤中 PAHs 含量和组成能够反映当地的污染水平及污染来源^[5-7]。PAHs 进入植物体主要有两种途径, 即土壤-植物体和空气-植物体途径^[8]。有研究表明, 土壤中 PAHs 不易从根系传递到植物体^[9-11], 而主要是通过植物表面的气体交换或通过 PM_{2.5} 等颗粒物沉降到植株表面吸收大气中 PAHs, 因此

常被作为大气中 PAHs 的生物监测器^[12]。目前已有相关报道, 利用一些植物可作天然的被动采样器, 进行大气环境中气态和颗粒污染物监测^[4, 13-17]。本文以新疆多段公路沿线和典型景区表层土壤及多种植物为研究对象, 分析研究区土壤和植物中 PAHs 的污染水平及来源, 评估 PAHs 污染对人体的健康风险。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

本文涉及的仪器设备主要有: 超声波清洗器

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2022-03-24

作者简介: 杨北辰 (1997 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机污染防治, E-mail: 496425224@qq.com

* 通信作者, E-mail: xieql@scau.edu.cn

(上海安谱科学仪器有限公司)、旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂)、氮吹仪(美国安胜科技有限公司)、超纯水系统(广州誉维生物科技仪器有限公司)、电热恒温水浴锅(上海博迅实业有限公司)、索氏提取器(广州市芊芸化玻仪器有限公司)、马弗炉和玻璃层析柱(8 mm × 30 mm)。

所用试剂材料:丙酮、二氯甲烷、正己烷和乙腈(色谱纯)、无水硫酸钠(分析纯)、硅胶(200 ~ 300 目,分析纯)和氧化铝(200 ~ 300 目,分析纯)。标样为 16 种 PAHs 混标:萘(Nap)、苊烯(Acy)、二氢苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䟽(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)和苯并[g,h,i]芘(BghiP)(O2Si,美

国),回收率指示物为 5 种氘代同位素 PAHs(Nap-d₈, Ace-d₁₀, Ant-d₁₀, Chry-d₁₂ 和 Pyr-d₁₂, aladdin, 上海),内标为对三联苯-d₁₄(O2Si,美国)。

1.2 样品采集

2019 年 8 月,在新疆地区多段公路(G210、G216、G314、S216、S319 和 S323)周边和 3 个风景区(天山天池景区、喀纳斯景区和那拉提景区)共采集了 70 个土壤和植物样品。样品分布于 36 个采样点(见图 1)。36 个采样点中,11 个土壤采样点附近采集了 1 种或多种植物,采集的植物种类包括桦树叶和树皮、杨树树叶和树皮、松针和松树皮、红柳、梭梭草和苔藓。按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)采集和保存土壤样品,树皮样品是树干上采集的枯干树皮。样品采集后放入样品袋密封,在 4℃ 以下冰箱中冷藏。

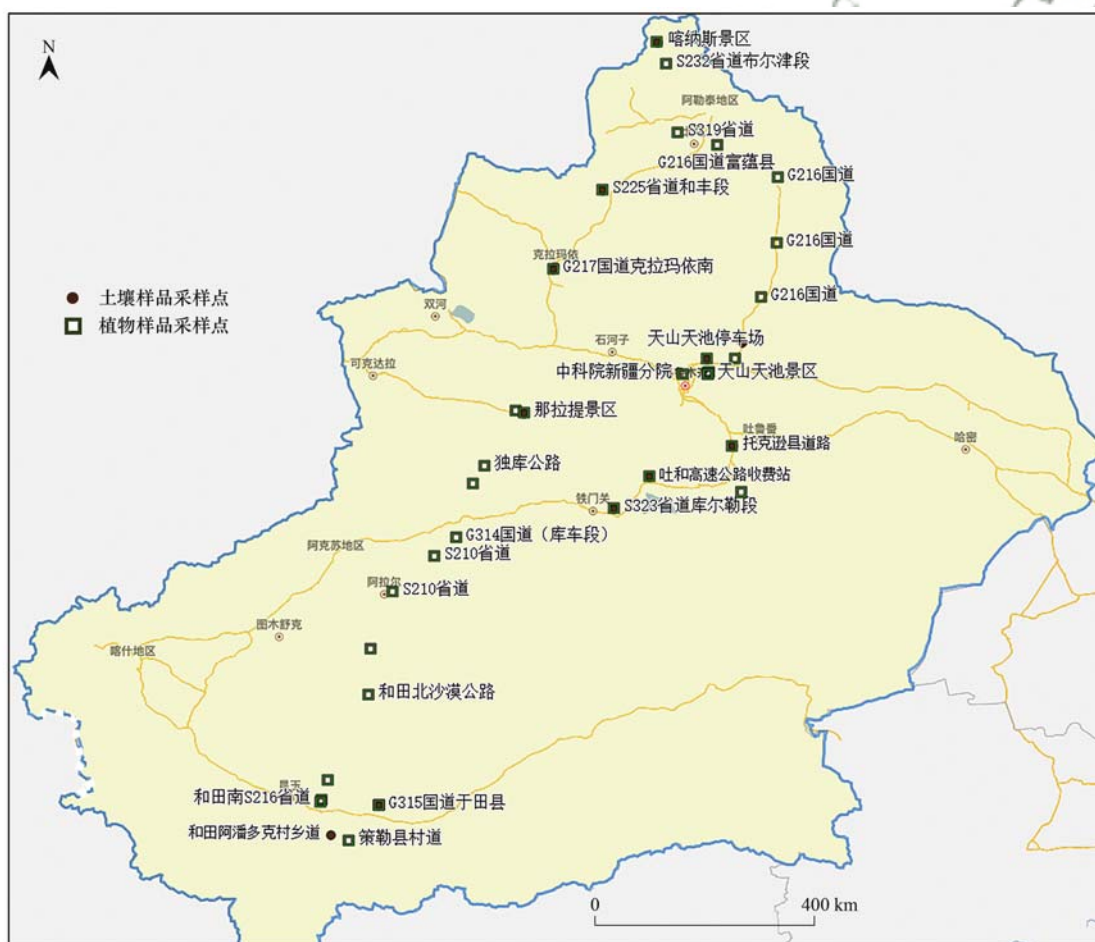


图 1 研究区土壤和植物采样点位置示意

Fig. 1 Soil and plant sampling site locations in the study area

1.3 样品前处理

本试验前,将玻璃器皿用碱性洗涤液浸洗 24 h,柱层析用的氧化铝放入马弗炉 650℃ 灼烧 4 h,冷却后加 3% 的去离子水活化,无水硫酸钠放入马弗炉 450℃ 灼烧 4 h。硅胶用分析纯二氯甲烷润洗后放入烘箱中 120℃ 活化 12 h。

称取样品 15.00 g 至滤纸筒中,加入 10 μL 氘代 PAHs 回收率指示物(2 ng·μL⁻¹, 纯物质量 20 ng),量取 200 mL 体积比为 1:1 丙酮和正己烷混合液于圆底烧瓶,在 60℃ 水浴中抽提 48 h 后,将提取液用正己烷溶剂置换,旋蒸浓缩至 2 mL。

在层析柱底填玻璃棉,采用湿法装柱,从柱底依

次填入中性氧化铝 6 cm、活化硅胶 12 cm 和无水硫酸钠 2 cm. 将提取液用 30 mL 正己烷和二氯甲烷 1:1 混合液转至层析柱, 再加入 40 mL 正己烷洗脱. 再次旋蒸浓缩至 2 mL, 氮吹至近干, 加入 2 mL 乙腈萃取. 在 -20℃ 冰箱静置沉淀 8 h 后, 取上清液过 0.22 μm 滤膜. 将溶液转移至细胞瓶中氮吹, 添加 5 μL 质量浓度为 5 ng·μL⁻¹ 的对三联苯-d₁₄ 内标溶液, 用正己烷定容至 100 μL 待测.

1.4 仪器分析条件

采用 GCMS-QP2010 型气相色谱质谱联用仪(岛津)测定 PAHs. 色谱柱为 DB-5 MS 柱(毛细管柱, 长度 30 m, 内径 0.25 mm, 膜厚 0.25 μm); 柱箱温度 80℃, 进样口温度 300℃; 进样模式: 不分流, 进样时间 1 min; 载气为高纯氦气; 初始压力: 500~900 kPa; 流量控制方式: 线速度; 压力 81.3 kPa, 总流量 25.0 mL·min⁻¹, 柱流量 1.2 mL·min⁻¹, 线速度 40.4 cm·s⁻¹, 吹扫流量 3.0 mL·min⁻¹. 柱箱升温程序: 80℃ 保持 1 min, 以 10℃·min⁻¹ 升至 300℃, 保持 10 min; 总程序时间 33 min. 质谱分析条件: 离子化方式为 EI 正离子电离模式; 离子源温度 250℃, 接口温度 270℃, 溶剂延迟时间 5 min, 检测器电压 0.2 kV. 用全

扫描方式(Scan)定性, 质量扫描范围 50~500 *m/z*, 随后用选择离子监测模式(SIM)定性.

1.5 质量保证与控制

采用空白试验和加标试验进行控制. 用石英砂制备 4 个加标空白样, 与其他样品在同一条件进行检测; 在所有样品中加入氘代 PAHs 回收率指示物, 加标回收率范围为 64.14%~127.98%, 最终数据结果经过回收率校正; 平行样测定结果相对偏差小于 15%. 采用 3 倍信噪比作为方法检出限, 检出限为 0.08~0.67 ng·g⁻¹; 在标准曲线的设置上, PAHs 标样的 7 个质量浓度梯度为 10、20、50、100、150、200 和 500 μg·L⁻¹, 以目标化合物与内标的特征离子峰面积响应之比作为横坐标, 以目标化合物与内标的质量浓度之比作为纵坐标作线性回归方程, 线性关系良好, 回归系数 *R*² > 0.99.

1.6 土壤 PAHs 健康风险评价

终生癌症风险增量模型(incremental lifetime cancer risk, ILCRs)在健康风险评估中被广泛应用^[5,18,19]. 利用该模型评估儿童和成人通过摄食、呼吸吸入和皮肤接触 3 种途径暴露于土壤中 PAHs 所致的健康风险, 具体计算见公式(1)~(6)^[20,21].

$$ILCR_{\text{摄食}} = \frac{CS \times CSF_{\text{摄食}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{\text{摄食}} \times EF \times ED_i}{BW \times AT \times 10^6} \quad (1)$$

$$ILCR_{\text{呼吸吸入}} = \frac{CS \times CSF_{\text{呼吸吸入}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{\text{呼吸吸入}} \times EF \times ED_i}{BW \times AT \times PEF} \quad (2)$$

$$ILCR_{\text{皮肤接触}} = \frac{CS \times CSF_{\text{皮肤接触}} \times \sqrt[3]{BW/70} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED_i}{BW \times AT \times 10^6} \quad (3)$$

$$CS = \sum (PAH_i \times TEF_i) \quad (4)$$

$$CR = \sum (ILCR_{\text{摄食}} + ILCR_{\text{呼吸吸入}} + ILCR_{\text{皮肤接触}}) \quad (5)$$

$$ED_i = ED \times \frac{1}{24} \sum_{j=1}^5 OP_{ij} \times OT_j \quad (6)$$

式中, CS 为土壤中单体 PAHs 基于 BaP 的等效毒性当量含量(mg·kg⁻¹); TEF 为单体 PAHs 基于 BaP 的毒性当量, 参数见文献[22]; CSF 为 PAHs 的致癌斜率因子, kg·d·mg⁻¹, CSF_{摄食} = 7.3, CSF_{呼吸吸入} = 3.85 和 CSF_{皮肤接触} = 25^[23]; CR 为摄食、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种暴露途径下的总和, 根据 CR 值大小将致癌风险划分为 3 个级别: 不存在健康风险(CR < 10⁻⁶)、存在潜在健康风险(10⁻⁶ ≤ CR < 10⁻⁴)和存在健康风险(CR ≥ 10⁻⁴). 其他相关参数及取值来自 USEPA^[24,25] 和文献[26,27]. 由于土壤采样点为公路、景区两种特定环境, 因此在计算人体暴露时, 在 *i* 场景的具体暴露时间(ED_{*i*}) 参数根据公式(6)确定(*i* = 1 为交通环境, *i* = 2 为工作环境), 该公式引入 1 d 内人在各时段的特定场景花费时间

的概率 OP(occupancy probability) 值, 和该时段时长 OT_{*j*}(occupancy time) 值两个参数. 本研究将 1 d 分为 5 个时段, 分别是 00:00~07:00、07:00~9:00、9:00~17:00、17:00~19:00 和 19:00~24:00. OP_{*ij*} 为 *j* 时段在 *i* 场景的概率, OT_{*j*} 为 *j* 时段的时长(h)^[26]. 具体计算所需的参数数值等信息见表 1.

2 结果与讨论

2.1 研究区土壤和植物中 PAHs 的污染水平

研究区土壤样品中 16 种 PAHs 含量见表 2, $\sum_{16}$ PAHs 含量范围为 18.82~2 153.54 ng·g⁻¹, 平均值为 425.95 ng·g⁻¹, 中位值为 114.35 ng·g⁻¹, 低于 2000~2016 年间全国土壤 $\sum_{16}$ PAHs 均值

表 1 计算日平均暴露剂量所需参数

Table 1 Parameters required for calculation of daily average exposure dose

参数	含义	单位	儿童(5~19岁)	成人(20~70岁)	文献
IR _{摄食}	摄食速率	mg·d ⁻¹	200	100	[25]
IR _{呼吸摄入}	呼吸速率	m ³ ·d ⁻¹	16.29	20.88	[26]
EF	暴露频率	d·a ⁻¹	252	252	[26]
ED	暴露年限	a	14	50	[26]
BW	平均体重	kg	36.24	59.78	[26]
PEF	土壤尘形成系数	m ³ ·kg ⁻¹	1.316×10 ⁹	1.316×10 ⁹	[27]
AT	人均寿命	d	70×365	70×365	[25]
SA	皮肤面积	cm ²	2 800	5 700	[24]
AF	灰尘附着因子	mg·cm ⁻²	0.2	0.07	[25]
ABS	皮肤吸附系数	—	0.13	0.13	[25]
OP ₁₁	交通占用率	—	0.040	0.040	[26]
OP ₁₂	交通占用率	—	0.491	0.491	[26]
OP ₁₃	交通占用率	—	0.314	0.044	[26]
OP ₁₄	交通占用率	—	0.606	0.491	[26]
OP ₁₅	交通占用率	—	0.097	0.190	[26]
OP ₂₁	工作占用率	—	—	0.049	[26]
OP ₂₂	工作占用率	—	—	0.252	[26]
OP ₂₃	工作占用率	—	—	0.947	[26]
OP ₂₄	工作占用率	—	—	0.265	[26]
OP ₂₅	工作占用率	—	—	0.226	[26]

(994.63 ng·g⁻¹)和西北地区土壤 $\sum_{16}$ PAHs均值(1 778.5 ng·g⁻¹)[7],高于西藏色季拉山公路沿线 $\sum_{16}$ PAHs均值(187.58 ng·g⁻¹,2017年3月)和新疆阿勒泰地区(32.24 ng·g⁻¹,2018年10月) $\sum_{16}$ PAHs均值[28,29].原因可能是2012年国家环境保护部推行的西部大开发战略环评使新疆地区工业污染排放得到控制.研究区土壤中PAHs含量高于同期西藏公路沿线,原因可能是新疆受到工矿企业和人类活动的影响更大.位于新疆中部的库尔勒市S323省道沿线的土壤样品中PAHs总量最高, $\sum_{16}$ PAHs值为2 153.54 ng·g⁻¹,与呼和浩特城区道路土壤接近[30].该地有较成熟的石油工业,PAHs总量高于其他地区可能与其油气开发活动有关.

在3个风景区的土壤样品中,天山天池景区停车场土壤中 $\sum_{16}$ PAHs含量为984.50 ng·g⁻¹,远高于那拉提景区(46.49 ng·g⁻¹)、喀纳斯景区(157.87 ng·g⁻¹)和各采样点土壤 $\sum_{16}$ PAHs均值,这可能与该地旅游旺季的客流量较大、车辆活动密集和机动车驻车时燃油燃烧不充分有关[31].

植物样品中 $\sum_{16}$ PAHs含量范围为9.93~748.30 ng·g⁻¹,平均值为(154.11±19.46) ng·g⁻¹.总体污染水平低于北京西直门道路旁的绿化树叶片(314.93~1 000.45 ng·g⁻¹)[15]、长江中下游平原松树、杨树、樟树和冷杉等树种的树皮(389

表 2 研究区土壤样品中 $\sum_{16}$ PAHs含量¹⁾

Table 2 $\sum_{16}$ PAHs contents in soil samples in the study area

编号	点位类型	采样地点	$\sum_{16}$ PAHs 含量 /ng·g ⁻¹
A01	公路	G216 国道红旗农场	40.12
A02	公路	S225 省道	663.42
A03	公路	G217 国道克拉玛依南	18.82
A04	景区	那拉提景区	46.49
A05	公路	和田县喀什塔什乡阿潘多克村	59.04
A06	公路	G315 国道于田县	114.35
A07	公路	库尔勒市 S323 省道	2 153.54
A08	公路	和硕县收费站	104.54
A09	公路	托克逊县	342.77
A10	景区	喀纳斯景区	157.87
A11	景区	天山天池景区停车场	984.50
平均值±标准误差			425.95±195.99

1) 样品种类为土壤,样品数量为11

ng·g⁻¹)[32]和意大利那不勒斯道路冬青树叶片(106.6~4 607.5 ng·g⁻¹)[9],总体属于低污染水平.出现这种差异的原因可能是研究区与其他地区交通和工业活动情况的差异.植物样品中16种PAHs含量见表3.对样本数≥6的植物样品分析,发现同一地点不同种类的植物样品 $\sum_{16}$ PAHs含量高低顺序为:胡杨树皮>白杨树皮>红柳,存在明显的种间差异,这可能与不同植物比表面积、脂肪、角质含量以及生长年限不同有关[33].

2.2 研究区土壤和植物中PAHs的组成特征

根据苯环数可将16种PAHs分为低环(2~3环)、中环(4环)、高环(5~6环).研究区土壤和植

表 3 研究区植物样品中 $\sum_{16}$ PAHs 含量
Table 3 $\sum_{16}$ PAHs contents in plant samples in the study area

样品种类	样品数目	编号	采样地点	$\sum_{16}$ PAHs 含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
红柳	12	B01	S225 省道	48.56
		B02	G217 国道克拉玛依南	40.16
		B03	独库公路 1 004 km 界碑	12.41
		B04	和田北沙漠公路 602 km 界碑	91.57
		B05	G315 国道于田县	24.02
		B06	库尔勒市 S323 省道	152.47
		B07	和田县喀什塔什乡阿潘多克村	72.60
		B08	S210 省道 205 km 处	375.52
		B09	G216 国道(火烧山收费站)	351.36
		B10	和田北沙漠公路 412 km 界碑	37.66
		B11	G216 国道富蕴县	122.46
		B12	S319 省道	51.55
平均值 $\pm$ 标准误差			115.03 $\pm$ 35.50	
白杨树皮	6	C01	和田县喀什塔什乡阿潘多克村	241.91
		C02	和田南 S216 省道	98.07
		C03	轮台县塔拉克乡	234.41
		C04	独库公路 944 km 界碑	212.71
		C05	那拉提镇	167.64
		C06	库尔勒市 S323 省道	265.94
平均值 $\pm$ 标准误差			203.45 $\pm$ 25.04	
胡杨树皮	7	D01	G315 国道于田县	117.51
		D02	和田北沙漠公路 602 km 界碑	188.05
		D03	G315 国道于田县	139.56
		D04	库尔勒市 S323 省道	382.66
		D05	轮台县塔拉克乡	342.28
		D06	S210 省道 98 km 界碑	340.44
		D07	和田北沙漠公路 353 km 界碑	84.58
平均值 $\pm$ 标准误差			227.87 $\pm$ 46.76	
松树皮	7	E01	轮台县塔拉克乡	96.86
		E02	天山天池景区马牙山索道起点	124.84
		E03	天山天池景区停车场	70.08
		E04	乌鲁木齐市中科院新疆分院	297.86
		E05	喀纳斯景区	40.28
		E06	和硕县收费站	210.43
		E07	那拉提镇	187.44
平均值 $\pm$ 标准误差			146.83 $\pm$ 34.06	
所有植物	59	平均值 $\pm$ 标准误差		154.11 $\pm$ 19.46

物样品以及植物中 4 种样本数 ≥ 6 的典型植物中,低、中和高环的 16 种 PAHs 分布情况如图 2. 土壤样品中,低环 PAHs 占比为 21.04%~73.28%,中环占比为 21.05%~55.05%,高环占比为 1.41%~77.36%,不同环数的 PAHs 含量在 $\sum_{16}$ PAHs 含量中占比平均值为:中环(42.35%)>高环(29.41%)>低环(28.24%);植物样品中,低环 PAHs 占比为 21.78%~93.81%,中环占比为 0.85%~48.31%,高环占比为 5.45%~35.12%,各环 PAHs 占比平均值为低环(61.56%)>中环(21.57%)>高环(16.87%). 低环 PAHs 更容易分布在气相中,中环 PAHs 在环境中的形态受温度影响较大,同时存在于气相和固相中,高环 PAHs 分子量较大较稳定,容

易沉积在固相中^[34]. 植物中的 PAHs 以从大气中吸收的低环 PAHs 为主;而土壤易富集沉积在固相中的高环 PAHs,因此土壤中高环 PAHs 的比例高于植物.

分析 11 个土壤采样点及其附近植物不同环数 PAHs 占比均值,同一采样点的土壤和植物样品(含量平均值)中各环 PAHs 含量见图 3. 使用 SPSS 22 对同一采样地点的土壤和植物各环数 PAHs 以及 $\sum_{16}$ PAHs 含量进行相关分析,发现土壤和植物之间均无显著相关关系. 原因可能是土壤和植物的 PAHs 有不同的来源.

2.3 研究区土壤和植物中 PAHs 的来源解析
不同污染源排放的 PAHs 的种类和组成不同,

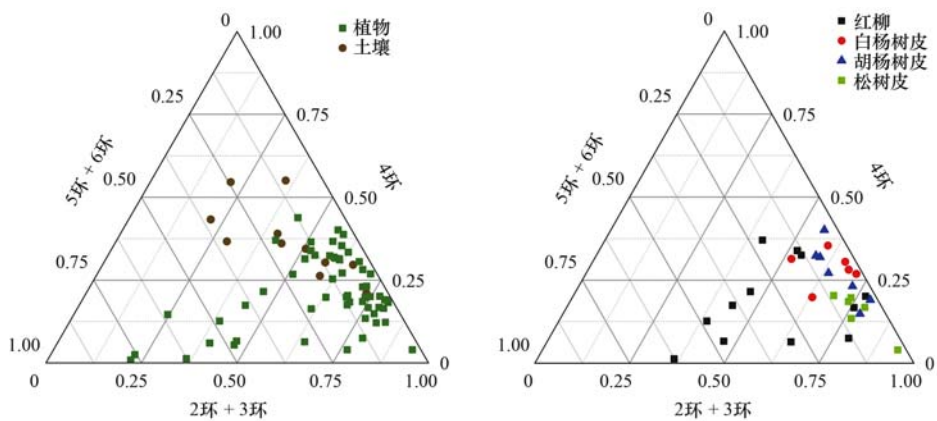


图2 研究区植物和土壤样品各环 PAHs 组成
Fig. 2 PAHs composition of plant and soil samples in the study area

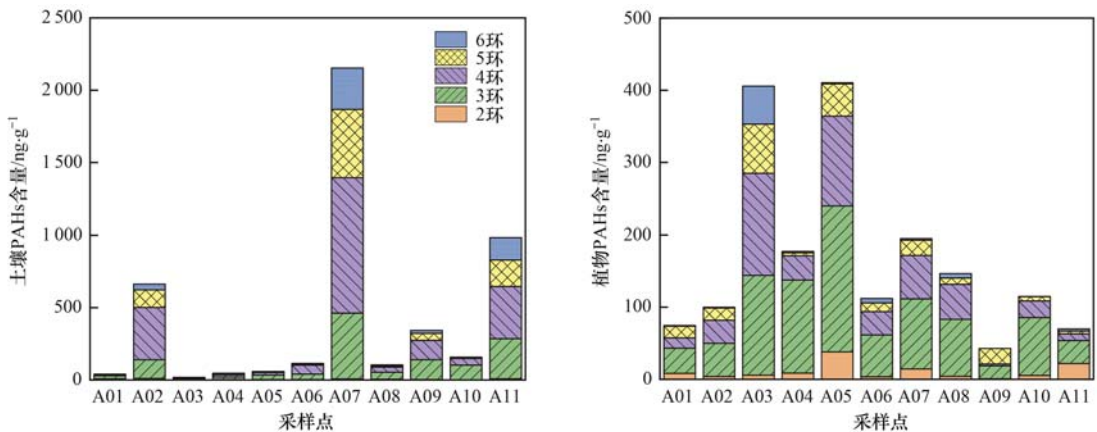


图3 同一采样点土壤和植物各环 PAHs 含量
Fig. 3 PAHs content of each ring number in soil and plants at the same sampling site

利用它们的特点,可以分析 PAHs 的来源^[35]. 不同环数的 PAHs 来自不同的排放源,2~3 环 PAHs 来源于石油污染^[36],4 环 PAHs 来源于燃煤排放^[37],5~6 环 PAHs 来源于机动车尾气排放^[38]. 使用特征比值法分析 PAHs 的来源,以 $\text{Ant}/(\text{Phe} + \text{Ant})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 作为分析 PAHs 的来源的常用参数^[39,40]. 4 种特征比值的判断来源见表 4. 以 4 种特征比值作为 x 和 y 坐标轴作 PAHs 源解析图,见图 4.

土壤样品 $\text{Ant}/(\text{Phe} + \text{Ant})$ 在 0.03 ~ 0.08 之间,均小于 0.1,指示为化石燃烧源. $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 在 0.57 ~ 0.64 之间,均大于 0.5,指示为煤和生物质燃烧源. $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 为 0.09 ~ 0.38, $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 为 0.30 ~ 0.55,说明土壤中 PAHs 有多种来源.

植物样品 $\text{Ant}/(\text{Phe} + \text{Ant})$ 在 0.03 ~ 0.48 之间,小于 0.1 的样品占总样品数的 84.75%,指示为化石燃烧源. $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 为 0 ~ 1.00,大于 0.5

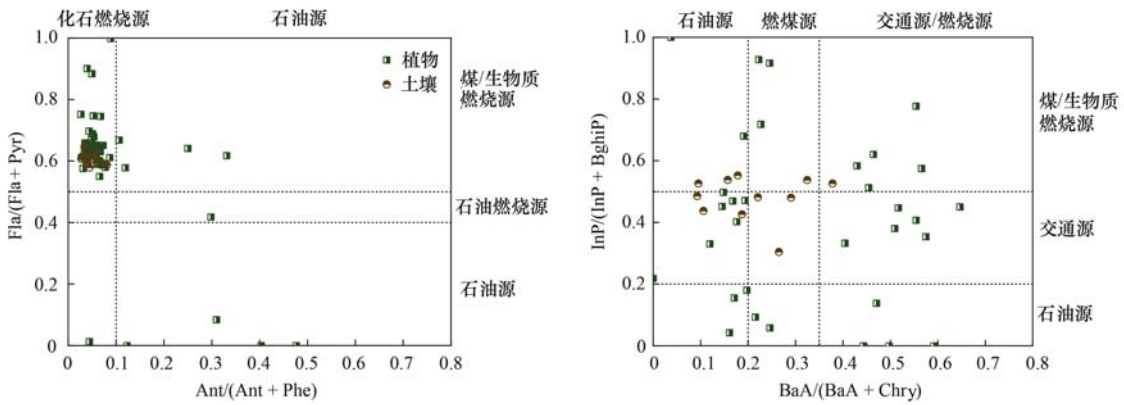


图4 研究区植物和土壤样品 PAHs 源解析
Fig. 4 Source analysis of PAHs in plant and soil samples in the study area

的样品数占 91.53%, 指示为煤和生物质燃烧源。 $BaA/(BaA + Chry)$ 和 $InP/(InP + BghiP)$ 为 0 ~ 1, 说明植物吸收的大气中 PAHs 为混合源。

表 4 PAHs 的特征比值和来源

Table 4 Diagnostic ratios and sources of PAHs		
PAHs	比值范围	来源类型
$Fla/(Fla + Pyr)^{[41]}$	≤ 0.4	石油源
	$0.4 \sim 0.5$	石油燃烧源
	≥ 0.5	煤和生物质燃烧
$InP/(InP + BghiP)^{[42]}$	< 0.2	石油源
	$0.2 \sim 0.5$	交通源
	> 0.5	煤和生物质燃烧
$Ant/(Phe + Ant)^{[40]}$	< 0.1	生物质/煤炭燃烧源
	≥ 0.1	石油源
$BaA/(BaA + Chry)^{[42]}$	< 0.2	石油源
	$0.2 \sim 0.35$	燃煤源
	> 0.35	交通源/燃烧源

利用主成分分析法定量分析样品中 PAHs 来源的贡献率. 运用 SPSS 22 软件对 16 种 PAHs 进行因子分析, 提取特征值大于 1 的因子, 仅显示绝对值大于 0.4 的系数, 分析结果如表 5 所示. 土壤样品数据采用最大方差旋转后得到 1 个主成分因子, 对总方差的解释累计达到 89.747%, 16 种 PAHs 除 2 环的 Nap 以外, 均有较高的载荷 (> 0.8). 该因子是一个混合源, 表明土壤中 PAHs 主要来源于化石燃料、煤、生物质燃烧和石油泄漏。

将植物样品 16 种 PAHs 含量数据采用最大方差旋转后得到 4 个主成分因子, 对总方差的解释累计达到 81.660%; 因子 1 方差贡献率为 50.028%, 其中 Nap、Acy、Ace 和 Flu 载荷较高, Nap 和 Acy 是木材燃烧的产物^[43], Ace 和 Flu 跟炼焦活动有关^[44], 因子 1 可认为是燃烧和炼焦工业的混合源。

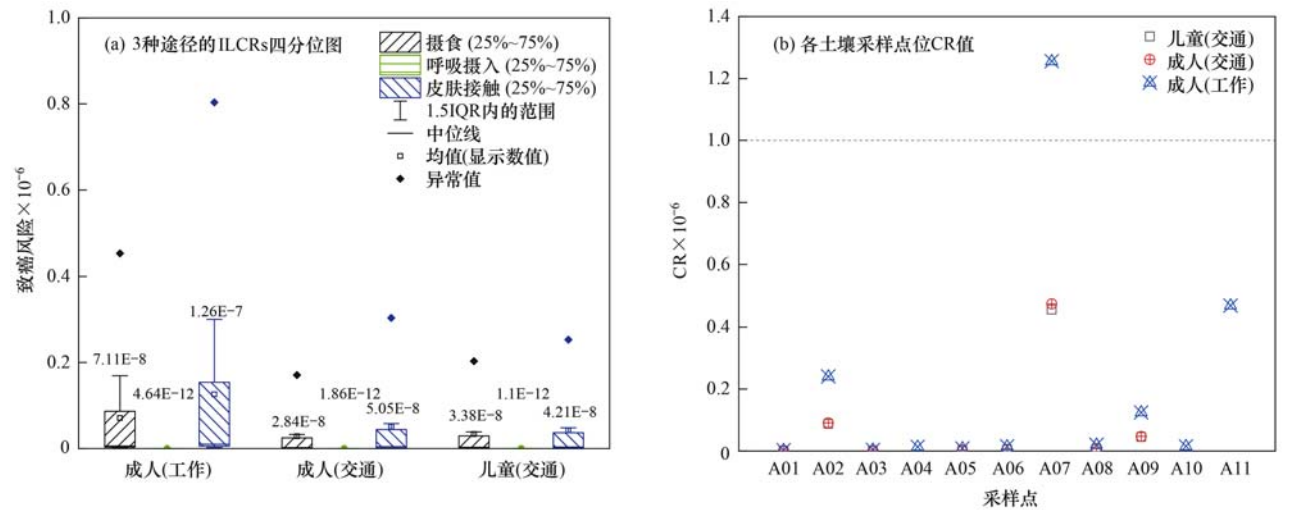
表 5 研究区土壤和植物的 PAHs 的主成分分析因子载荷

Table 5 Principal component analysis of PAHs of soil and plants in the study area					
PAHs	土壤	植物			
	因子 1	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
Nap	0.530	0.855	—	—	—
Acy	0.954	0.864	—	—	—
Ace	0.959	0.831	—	—	—
Flu	0.816	0.859	—	—	—
Phe	0.984	0.547	0.772	—	—
Ant	0.984	0.627	—	—	—
Fla	0.978	—	0.852	—	—
Pyr	0.984	0.503	0.762	—	—
BaA	0.985	0.523	0.510	0.445	—
Chry	0.981	—	0.850	—	—
BbF	0.995	—	0.449	0.727	—
BkF	0.993	0.437	—	0.732	—
BaP	0.995	—	—	0.848	—
InP	0.982	—	—	—	0.910
DahA	0.980	—	—	—	0.935
BghiP	0.948	—	0.853	—	—
特征值	14.360	8.004	2.074	1.659	1.328
方差贡献率/%	89.747	50.028	12.963	10.371	8.298
累计方差贡献率/%	89.747	50.028	62.990	73.362	81.660

因子 2 方差贡献率为 12.963%, Fla、Chry 和 BghiP 组分载荷较高. 这可能与当地的工业活动和道路养护相关. Fla 来源于石油燃烧, Chry 和 BghiP 为汽油发动机的排放产物^[45]. 因子 2 可以认为是交通源. 因子 3 和因子 4 方差贡献率为 10.371% 和 8.298%, 载荷较高的 BaP、InP 和 DahA 是机动车尾气排放的产物。

2.4 研究区土壤 PAHs 健康风险评价

研究区内 11 个采样点土壤的 PAHs 对成人和儿童经 3 种暴露途径的 ILCRs 和 CR 见图 5. 对于公路类型的土壤采样点, 计算成人和儿童交通所花时



(a) 中柱体上方的数值为致癌风险的平均值

图 5 研究区成人和儿童不同暴露途径的 ILCRs 和 CR

Fig. 5 ILCRs and CR of different exposure pathways for adults and children in the study area

间暴露的健康风险;考虑到公路和景区内特定职业人群(如收费站人员、道路维护人员、司机和景区工作人员等),对于公路和景区土壤采样点,计算成人工作所花时间暴露的健康风险.根据公式(6)和文献[26]提供的参数,成人和儿童每天在交通中暴露的时间分别为3.810 h和5.788 h,成人每天工作时间为10.080 h,工作时长大于交通时长,因此在公路上的工作人员健康风险高于一般人群.由图5(b)可知,S323省道库尔勒段(A07点)的CR值在工作的场景下为 1.26×10^{-6} ,在该路段工作的人员有潜在健康风险($1 \times 10^{-6} < CR < 1 \times 10^{-4}$),该类人员需要注意做好必要的职业防护.而该地对于一般人群无健康风险($CR < 1 \times 10^{-6}$).除A07点外,其他地区不存在健康风险($CR < 1 \times 10^{-6}$).

由图5(a)可知,ILCRs_{皮肤接触}在成人和儿童的3种ILCRs中均为最高,分别占CR的63.98%(成人)和55.49%(儿童);ILCRs_{摄食}其次,分别占CR的36.02%(成人)和44.51%(儿童);而ILCRs_{呼吸摄入}最低,不足其总量的0.005%,该结论与以往的研究相一致^[34,46~49].需要说明的是,健康风险评价的结果会由于居民个体、暴露途径、暴露年限和模型等的不确定性导致结果的不确定性^[21].

3 结论

(1)土壤中 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 含量范围为18.82~2 153.54 ng·g⁻¹,PAHs以中环(4环)为主,占比平均值为:中环(4环,42.35%)>高环(5~6环,29.41%)>低环(2~3环,28.24%);植物中PAHs的占比平均值为9.93~748.30 ng·g⁻¹,富集的PAHs以低环为主,占比平均值为低环(2~3环,54.39%)>中环(4环,26.32%)>高环(5~6环,19.30%),

(2)特征比值法与主成分分析法溯源表明,研究区各公路与景区沿线采样点附近土壤污染类型为化石燃料、煤、生物质燃烧和石油泄漏的混合源(贡献率89.747%).植物吸收的大气中PAHs主要来源为木材燃烧和炼焦工业(贡献率50.028%),以及机动车燃油排放(贡献率31.632%).

(3)人体健康风险评价结果表明,公路上的工作人员受到的健康风险高于一般人,研究区域内S323省道(库尔勒段)的土壤中所含PAHs对在该路段工作的人员有潜在健康风险($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$).其他地区健康风险属于可接受水平.

参考文献:

[1] 张科. 呼伦湖和查干湖沉积物多环芳烃污染历史与来源分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2019.

Zhang K. Pollution history and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Hulun Lake and Chagan Lake[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2019.

[2] 马妍, 程芦, 阮子渊, 等. 近20年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1065-1072.

Ma Y, Cheng L, Ruan Z Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil of China (2000-2020): Temporal and spatial distribution, influencing factors[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1065-1072.

[3] 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.

[4] 李微微, 马新东, 冉聘, 等. 新疆典型地区土壤/松针中多环芳烃分布特征[J]. 化工学报, 2011, 62(11): 3263-3268.

Li W W, Ma X D, Ran D, et al. Distribution of PAHs between soils and pine needles collected from typical areas of Xinjiang[J]. CIESC Journal, 2011, 62(11): 3263-3268.

[5] Qi P Z, Qu C K, Albanese S, et al. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Caserta provincial territory, southern Italy: Spatial distribution, source apportionment, and risk assessment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 383, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121158.

[6] 孙健, 段永红. 几种常用受体模型在土壤多环芳烃源解析中的应用[J]. 山西农业科学, 2018, 46(5): 856-861.

Sun J, Duan Y H. Application of several receptor model on source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(5): 856-861.

[7] 张俊叶, 俞菲, 俞元春. 中国主要地区表层土壤多环芳烃含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1059-1067.

Zhang J Y, Yu F, Yu Y C. Content and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in major areas of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(6): 1059-1067.

[8] Desalme D, Binet P, Chiapusio G. Challenges in tracing the fate and effects of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbon deposition in vascular plants[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(9): 3967-3981.

[9] Alfani A, Maisto G, Prati M V, et al. Leaves of *Quercus ilex* L. as biomonitors of PAHs in the air of Naples (Italy)[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(21): 3553-3559.

[10] Zuo Q, Lin H, Zhang X L, et al. A two-compartment exposure device for foliar uptake study[J]. Environmental Pollution, 2006, 143(1): 126-128.

[11] 张琳, 陈勇, 孔利锋, 等. 新疆准东煤矿开采区域中多环芳烃的污染特征分析[J]. 环境化学, 2017, 36(3): 677-684.

Zhang L, Chen Y, Kong L F, et al. Analysis of pollution characteristics of PAHs in Xinjiang Zhundong coal mining area[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 677-684.

[12] Collins C, Fryer M, Grosso A. Plant uptake of non-ionic organic chemicals[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(1): 45-52.

[13] Oishi Y. Comparison of moss and pine needles as bioindicators of transboundary polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in central Japan[J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 330-338.

- [14] Zhou R C, Yang R Q, Jing C Y. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and lichen from the western Tibetan Plateau: Concentration profiles, distribution and its influencing factors[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **152**: 151-158.
- [15] 包奋强. 常见树木对大气中 PAHs 的吸收及其分析方法的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
Bao F Q. Analysis method studies on common trees PAHs uptake in atmosphere[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [16] 罗东霞, 杨瑞强. 云南省树皮样品中多环芳烃和有机氯农药的浓度分布及来源解析[J]. *环境化学*, 2016, **35**(8): 1601-1610.
Luo D X, Yang R Q. Distribution and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in the tree bark from Yunnan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(8): 1601-1610.
- [17] Schrlau J E, Geiser L, Hageman K J, *et al.* Comparison of lichen, conifer needles, passive air sampling devices, and snowpack as passive sampling media to measure semi-volatile organic compounds in remote atmospheres [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(24): 10354-10361.
- [18] Sari M F, Del águila D A C, Tasdemir Y, *et al.* Atmospheric concentration, source identification, and health risk assessment of persistent organic pollutants (POPs) in two countries: Peru and Turkey [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(10): doi: 10.1007/s10661-020-08604-8.
- [19] Shi R G, Li X H, Yang Y Y, *et al.* Contamination and human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Tianjin coastal new region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115938.
- [20] Bandowe B A M, Nkansah M A. Occurrence, distribution and health risk from polycyclic aromatic compounds (PAHs, oxygenated-PAHs and azaarenes) in street dust from a major West African Metropolis[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **553**: 439-449.
- [21] 段海静, 蔡晓强, 陈轶楠, 等. 开封市公园地表灰尘 PAHs 污染与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
Duan H J, Cai X Q, Chen Y N, *et al.* Occurrence and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface dust from parks in Kaifeng, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
- [22] Wang W, Huang M J, Kang Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: Status, sources and human health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(21): 4519-4527.
- [23] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 712-723.
- [24] U.S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund Volume 1: Human health evaluation manual (Part B, development of risk-based preliminary remediation goals) [R]. EPA/540/R-92/003, Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1991.
- [25] OSWER 9335.4-24, Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[S].
- [26] 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.
- [27] Shi G T, Chen Z L, Bi C J, *et al.* A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in the most populated city of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(3): 764-771.
- [28] 党天剑, 陆光华, 薛晨旺, 等. 西藏季拉山公路沿线 PAHs 分布、来源及风险[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 1109-1116.
Dang T J, Lu G H, Xue C W, *et al.* Distribution, sources and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons along the highway in Shergyla Mountain in Tibet [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 1109-1116.
- [29] 许安, 刘威杰, 胡天鹏, 等. 新疆阿勒泰地区土壤中多环芳烃含量水平及来源解析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(5): 619-626.
Xu A, Liu W J, Hu T P, *et al.* Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil of Altay, Xinjiang[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(5): 619-626.
- [30] 杜远江. 呼和浩特土壤中持久性有机污染物分布特征、来源及健康风险评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
Du Y J. Characteristic distribution and a source of POPs pollution in soil of Hohhot [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- [31] 吴美璇, 赵子宇, 李浩, 等. 不同工作条件对柴油机尾气污染物排放特性的影响综述[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, **44**(1): 197-206.
Wu M X, Zhao Z Y, Li H, *et al.* Influence of different working conditions on emission characteristics of pollutants in diesel engine exhaust: A review[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, **44**(1): 197-206.
- [32] Niu L L, Xu C, Zhou Y T, *et al.* Tree bark as a biomonitor for assessing the atmospheric pollution and associated human inhalation exposure risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 398-407.
- [33] 解莹然, 张娟, 李乐, 等. 北京市常用常绿树种冬季叶片多环芳烃含量及其富集特征[J]. *北京林业大学学报*, 2017, **39**(10): 95-100.
Xie Y R, Zhang J, Li L, *et al.* Content and absorption features of polycyclic aromatic hydrocarbons in the leaves of frequently-used evergreen trees in Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, **39**(10): 95-100.
- [34] 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 等. 洛阳市秋冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 595-603.
Qi J W, Zhang R Q, Jiang N, *et al.* Characterization, sources, and health risks of PM_{2.5}-bound PAHs during autumn and winter in Luoyang City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 595-603.
- [35] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Urban soils: a review[J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(1): 17-26.
- [36] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 839-846.
Mu Q L, Fang J, Shao J B, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Yangtze estuary and Zhejiang coastal areas [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 839-846.
- [37] 郭志明, 刘岷, 林田, 等. 太原城区 PM_{2.5} 中多环芳烃、硝基多环芳烃的污染特征、来源解析和健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1102-1108.

- Guo Z M, Liu D, Lin T, *et al.* Concentration, source identification, and exposure risk assessment of PM_{2.5}-bound PAHs and nitro-PAHs in the atmosphere of Taiyuan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1102-1108.
- [38] Bourotte C, Forti M C, Taniguchi S, *et al.* A wintertime study of PAHs in fine and coarse aerosols in São Paulo city, Brazil[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3799-3811.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Kuang S P, Su Y Q, Zhang J H, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Shengli Oil Field, China[J]. *Soil and Water Research*, 2018, **13**(2): 74-82.
- [42] 孙焰, 祁士华, 李绘, 等. 福建闽江沿岸土壤中多环芳烃含量、来源及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1821-1829.
- Sun Y, Qi S H, Li H, *et al.* Concentrations, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils collected along the banks of Minjiang River, Fujian, China[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1821-1829.
- [43] Zou L Y, Zhang W D, Atkison S. The characterisation of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from burning of different firewood species in Australia [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **124**(2): 283-289.
- [44] Shen G F, Tao S, Chen Y C, *et al.* Emission characteristics for polycyclic aromatic hydrocarbons from solid fuels burned in domestic stoves in rural China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 14485-14494.
- [45] Wang D G, Yang M, Jia H L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust and surface soil: comparisons of concentration, profile, and source [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **56**(2): 173-180.
- [46] 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 等. 城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5510-5518.
- Zhang X X, Lu X L, Wei Y C, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban farmland soil[J]. *Environmental Sciences*, 2021, **42**(11): 5510-5518.
- [47] Groffen T, Rijnders J, Van Doorn L C, *et al.* Preliminary study on the distribution of metals and persistent organic pollutants (POPs), including perfluoroalkylated acids (PFAS), in the aquatic environment near Morogoro, Tanzania, and the potential health risks for humans [J]. *Environmental Research*, 2021, **192**, doi: 10.1016/j.envres.2020.110299.
- [48] 詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 等. 三亚河沉积物 PAHs 和 PCBs 的分布、来源及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1830-1838.
- Zhan Y, Wei T T, Ye H B, *et al.* Distribution, source, and ecological risk evaluation of the PAHs and PCBs in the sediments from Sanya River[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1830-1838.
- [49] 李慧, 李捷, 宋鹏, 等. 东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 147-158.
- Li H, Li J, Song P, *et al.* Characteristics and ecological risk assessment of POPs pollution in sediments of Xiaoxingkai Lake in the northeast China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 147-158.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)