

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.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

种植油麦菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险

焦海华¹, 郭佳佳², 张婧旻³, 张晓霞¹, 茹文明^{1*}, 白志辉^{4*}

(1. 长治学院生物科学与技术系, 长治 046011; 2. 山西师范大学生命科学院, 临汾 041004; 3. 海南大学热带农林学院, 海口 570228; 4. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 污染土壤引起的农产品安全问题已不容忽视。为了探讨多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)污染土壤农用的安全性, 本文通过盆栽实验方法, 以某焦化企业周边长期受PAHs污染的农田土壤为研究对象, 以广泛种植的油麦菜(*Lactuca sativa* L.)为农产品代表, 利用超声振荡提取和气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析方法, 解析样品中优先控制的16种PAHs的含量, 揭示土壤-油麦菜体系中PAHs的迁移转化与富集特征, 评估其潜在风险。结果表明, 油麦菜地上部分(YS)PAHs的含量($\sum 16\text{PAHs}$)大于地下部分(GS), YS中3~5环PAHs相对含量高, GS中4~6环PAHs含量高。YS对不同PAHs的富集系数均大于GS, YS中蒽(Ant)的富集系数最大(2.41), 荧蒽(Fla)最小(0.458), GS中苯并[a]芘(Bap)最大(0.862), Fla最小(0.130)。16种PAHs从GS到YS的转运系数均大于1.00。关联性分析表明GS与初始土壤(SS)PAHs拟合优度中等($R^2=0.71$), YS与SS的PAHs拟合优度最大($R^2=1.0$), YS和GS的PAHs拟合优度最小($R^2=0.39$)。YS和GS的健康风险值分别是国家食品标准Bap最大风险控制值的11.8和12.7倍。表明油麦菜食用的潜在风险较高, 焦化企业周边污染土壤农用的安全问题不容忽视。

关键词: 多环芳烃(PAHs); 油麦菜; 富集; 迁移转化; 污染土壤

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2460-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807080

Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting *Lactuca sativa* L.

JIAO Hai-hua¹, GUO Jia-jia², ZHANG Jing-min³, ZHANG Xiao-xia¹, RU Wen-ming^{1*}, BAI Zhi-hui^{4*}

(1. Department of Biological Sciences and Technology, Changzhi University, Changzhi 046011, China; 2. School of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China; 3. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 4. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to evaluate the potential agricultural risks of soil contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Lactuca sativa* L. was used as a model leaf vegetable plant to investigate the enrichment characteristics of PAHs in the different tissues of *Lactuca sativa* L., such as its underground parts (GS) and aboveground parts (YS), which were studied through an experiment involving potted cultivation in PAHs contaminated soil that was taken from the agricultural soil around a coking enterprise area. The concentrations of the different PAHs in the soil and plant tissues were analyzed using ultrasonic oscillation extraction and high-performance liquid chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis methods. The results show that the enrichment of the total PAHs ($\sum 16\text{PAHs}$) in the YS is higher than that in the GS. The components enriched in the YS mainly consist of 3-5 ring PAHs, and those in the GS consist of 4-6 ring PAHs. The coefficients of the different PAHs enriched in the YS were higher than those of the GS. The enrichment coefficient of anthracene (Ant) was the largest and that of fluoranthene (Fla) was the smallest in the YS, while the enrichment coefficient of benzene[a]pyrene (Bap) was the largest and that of Fla was the smallest in the GS. The transfer coefficients of the different PAHs from the GS to the YS were greater than the rate from the initial soil (SS) to the GS; the value is less than 1 from the SS to GS. The correlations and goodness of fit were analyzed for the concentrations of PAHs in the SS, GS and YS. The $\sum 16\text{PAHs}$ in the SS showed positive correlations with the $\sum 16\text{PAHs}$ in the YS and in GS. The goodness of fit of the correlation of the PAHs in YS to those in the SS was the largest ($R^2=1.0$), while the goodness-of-fit for the correlation between the GS and SS was lower ($R^2=0.71$). The benzo[a]pyrene equivalent concentration values ($\sum 16\text{PAHsBap}_{\text{eq}}$) of YS and GS were 11.8 and 12.7 times the maximum value of Bap level allowed in food. The study indicates that contaminated farmland soil would present a high health risk when it was used to grow the plant.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); *Lactuca sativa* L.; accumulation; transport; contaminated soil

农田土壤污染产生的农产品安全问题, 引起人们的普遍关注。笔者的前期研究发现, 煤化工产业

收稿日期: 2018-07-11; 修订日期: 2018-11-03

基金项目: 山西省重点学科建设经费项目(FSKSC); 山西省1331重点学科建设计划经费项目(1331KSC); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201610122002); 长治学院大学生创新项目(2017DC08, 2018DC); 国家自然科学基金项目(31570494)

作者简介: 焦海华(1968~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为污染土壤生物修复技术, E-mail: jiaohaihua68@163.com

* 通信作者, E-mail: rwm9098@163.com; zhbai@cees.ac.cn

区周边农田土壤多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 含量较高, 如某焦化厂周边农田土壤 16 种 PAHs 的平均质量分数为 $3.46 \times 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[1], 某化肥厂周边为 $1.26 \times 10^4 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[2]. Duan 等^[3]报道山西某焦炭生产基地周边农田土壤 PAHs 含量在 $294 \sim 1.67 \times 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 60% 的样点达到严重污染的水平 ($>1000 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). PAHs 是环境中广泛分布的一类持久性有机污染物. 其中, 16 种被美国环保署列为优先控制的污染物类型^[4], 8 种被国际癌症研究机构证明具有或可能具有潜在致癌作用^[5,6]. 根据文献^[7]提出的农田土壤污染分类标准 (大于 $1.00 \times 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 严重污染)、文献^[8]提出的人类健康土壤质量标准值 ($1.50 \times 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和生态健康标准值 ($1.00 \times 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 可知, 许多煤化工产业区周边农田土壤 PAHs 含量已达到严重污染水平. 从理论上讲, 这些农田土壤的耕种存在较高的生态与人类健康风险, 但客观上, 许多此类土地仍然被农用, 生产的农产品是否会存在安全风险? 本文以某煤化工产业区周边农田污染土壤为研究对象, 选种当地广泛种植的油麦菜, 采用盆栽方式, 探讨 PAHs 在土壤-油麦菜体系中的迁移、转化与富集特征, 评估污染土壤农用的潜在风险, 以期为农业安全生产提供理论指导, 并为污染土壤生物修复技术的研发提供实践经验.

1 材料与方法

1.1 实验设计

供试油麦菜 (*Lactuca sativa* L.) 种子购自四川种都种业有限公司, 土壤来源于某煤化工企业周边 PAHs 污染农田土壤. 将取回的土样, 放置在阴凉、通风处自然风干. 去除植物残片、石块等过 20 目金属筛. 每盆 (直径 15 cm、高 20 cm) 分装 1.5 kg 干土, 播种油麦菜种子 10 颗, 出苗后每盆留取 3 株, 设置 5 个平行处理, 放置温室培养. 实验期从 2016 年 7 月 20 日至 9 月 20 日. 生长期自然光照、温度 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 、自来水浇灌, 土壤湿度 40% ~ 60%. 生长 60 d 一次性收获植物样品和根际土壤. 植株样品清洗干净放 4°C 冰箱保存备用, 土壤样品放置阴凉通风处干燥. 初始土壤记作 (SS), 收获期土壤记作 (HS), 油麦菜地下部分记作 (GS), 地上部分记作 (YS).

1.2 PAHs 的提取方法

土壤 PAHs 提取方法根据 Jiao 等^[9]的报道, 即准确称取 5.0 g 研磨过 100 目筛的干燥土样和 3 g 无水 Na_2SO_4 (烘箱 120°C , 烘干 2 h) 混合; 丙酮: 二

氯甲烷 (1:1, 体积比) 混合溶剂, 30°C 条件下, 超声振荡提取 30 min, 用干燥无水 Na_2SO_4 柱过滤, 重复提取 2 次, 合并两次滤液; 在 40°C 下, 氮气吹干; 色谱级甲醇定容到 2 mL, 过 $0.22 \mu\text{m}$ 有机相滤膜于棕色样品瓶, 暂置于 -20°C 冰箱保存待仪器分析.

植物样品中 PAHs 提取方法, 根据 Nicola 等^[10]的方法稍加改进, 即准确称取 5.0 g 植物样品 (鲜重), 同时, 通过烘干法测定植物样品的含水率, 样品 PAHs 含量换算成样品干重. 研磨后用 30 mL 丙酮二氯甲烷混合溶剂 (1:1, 体积比) 冲洗至锥形瓶中, 通过超声振荡提取 2 次, 用无水 Na_2SO_4 (用前烘干) 过滤, 合并滤液; 加入 50 mL 超纯水充分混合, 静置至分层, 保留有机相, 重复两次; 将有机相加入 2.5% 的 KOH 乙醇溶液 50 mL, 80°C 水浴条件下磺化 2 min, 然后加入 2% 的 Na_2SO_4 水溶液 50 mL, 混匀、静置分层, 保留有机相, 重复此步骤直到水层为中性; 将有机相过硅胶柱, 用丙酮二氯甲烷混合溶剂洗脱, 收集洗脱液至 KD 浓缩器, 氮气吹干. 用色谱级甲醇定容 2 mL, 过 $0.22 \mu\text{m}$ 有机相滤膜至棕色进样瓶, 放置 -20°C 冰箱保存待仪器分析.

1.3 分析方法与质量控制

采用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS, QP2010Ultra), HP-5MS 毛细柱长 $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$ 直径 $\times 0.25 \mu\text{m}$ 厚度 (Shimadzu enterprise management (China) Co. Ltd.) 检测样品中 PAHs. 氮气作为载体气体, 载气流量 $1.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样体积为 $1 \mu\text{L}$, 不分流模式. 升温程序: 起始温度 50°C (保持 1 min), 以 $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 200°C , 保持 1 min; 以 $6^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 260°C 并保持 1 min; $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 290°C , 保持 10 min.

不同组份的定性检测通过保留时间和 2 个提取离子的丰富度识别. 16 种 PAHs 的基本信息和识别离子信息 (表 1), 不同组分的定量采用外标法 16 种 PAHs 混合标样 (纯度 99.9%), 0.01、0.1、0.5、1.0、5.0、10.0、50 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (美国 AccuStandard 公司) 以峰面积大小与标样峰面积的比值计算. 16 种 PAHs 的回收率在 87% ~ 108%. 采用 3 个重复计算标准差.

1.4 数据处理

本实验结果采用 Orgion 8.5 作图, 用 Microsoft Excel 2007 以及 SPSS 16.0 进行数据处理和统计分析.

$$\text{富集系数 (BF)} = \frac{\text{油麦菜 PAHs 含量}}{\text{土壤 PAHs 含量}} \quad (1)$$

表 1 16 中优先控制的 16 种 PAHs 基本信息^[4]

Table 1 Basic information of the 16 priority controlled species of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)				
名称	英文名称	缩写	毒性系数 TEF(致癌性) ¹⁾	环数/个
萘	Naphthalene	Nap	0.001(2B)	2
萘烯	Acenaphthylene	Acel	0.001(—)	3
萘	Acenaphthene	Ace	0.001(—)	3
芴	Fluorene	Flu	0.001(—)	3
菲	Phenanthrene	Phe	0.001(—)	3
蒽	Anthracene	Ant	0.01(—)	3
芘	Pyrene	Pyr	0.001(—)	4
荧蒽	Fluoranthene	Fla	0.001(—)	4
苯并[a]蒽	Benz[a]anthracene	Baa	0.1(B)	4
䓛	Chrysene	Chr	0.01(2B)	4
苯并[k]荧蒽	Benzo[k]fluoranthene	Bkf	0.1(2B)	5
苯并[b]荧蒽	Benzo[b]fluoranthene	Bbfl	0.1(2B)	5
苯并[a]芘	Benzo[a]pyrene	Bap	1(B)	5
二苯并[a,h]蒽	Dibenz[a,h]anthracene	Daa	1(B)	5
茚并[1,2,3-cd]芘	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	Ind	0.1(2B)	6
苯并[g,h,i]芘	Benzo[g,h,i]pyrene	Bghip	0.01(—)	6

1) B 已被通过实验证明对人具有致癌作用; 2B 已被证明对动物具有致癌作用, 对人可能具有致癌作用, 但证据还不充分; “—”表示该物质未被列为致癌性物质, 还没有证据证明该物质对动物具有致癌作用^[11,12]

富集系数越大, 表示油麦菜积累 PAHs 能力越强.

转移系数(TF) = $\frac{\text{油麦菜地上部 PAHs 含量}}{\text{油麦菜地下部 PAHs 含量}}$

(2)

转移系数表示 PAHs 由地下部分转运、分配到地上部位的能力, 其值越高, 表示 PAHs 从根部转运到地上部位的能力越强.

1.5 风险评价

根据 Nisbet 等^[13]提出的 Bap 等效毒性系数法评估油麦菜富集 PAHs 的潜在致癌风险. 油麦菜中不同类型 PAHs 的 Bap 等效浓度(Bap_{eq})根据式(3)计算:

Bap_{eqi} = C_i × TEF_i

(3)

式中, C_i 是油麦菜中某一类型 PAHs (i) 的含量 (μg·kg⁻¹), TEF_i 是 i 的等效毒性系数, 16 种 PAHs 的 TEF 值见表 1.

油麦菜的潜在致癌风险是各个 PAH 的 Bap 等效浓度的总和(∑16PAHsBap_{eq}). 所有 PAHs 总的 Bap 等效浓度计算公式:

$$\sum 16\text{PAHsBap}_{eq} = \sum_{i=1}^{16} \text{Bap}_{eq\text{PAHi}}$$

(4)

2 结果与分析

2.1 多环芳烃含量

由表 2 可知, 油麦菜地上部分 PAHs 的总量 (YS, ∑16PAHs, 0.446 × 10³ μg·kg⁻¹) 大于地下部

分 (GS, 0.192 × 10³ μg·kg⁻¹), 其中, 高分子量 PAHs (苯环数 ≥ 4, HMWPAHs) 含量是 GS 的 2.05 倍; 低分子量 PAHs (苯环数 ≤ 3, LMWPAHs) 含量是 GS 的 3.22 倍; 致癌性 PAHs (∑BPAHs) 含量是 GS 的 1.90 倍. 同时可知, 同一组织对不同类型 PAHs 的富集量有较大的差异, 如 YS 中单一 PAHs 的含量在 7.18 (Ant) ~ 59.0 (Baa) μg·kg⁻¹ 之间; GS 的含量在 1.39 (Fla) ~ 63.7 (Bap) μg·kg⁻¹ 之间.

由图 1(a)可知, GS 中相对含量(质量分数)较高的是 Bap (31.2%)、Baa (7.60%)、Bghip (7.41%), YS 中是 Baa (13.2%)、Bap (13.2%) 和 Ind (12.0%); SS 中相对含量较高的是 Bap (19.3%)、Ind (12.5%)、Baa (10.8%); HS 中较高的是 Bap (17.0%)、Daa (13.7%)、Baa (12.7%). 根据 GS 和 YS 的相对含量可分为 2 类, GS 含量大于 YS, 包括 Daa (GS 5.75%, YS 4.09%)、Bbfl (GS 4.96%, YS 3.47%)、Bap (GS 33.2%, YS 13.2%)、Bkf (GS 4.90%, YS 3.86%); GS 含量小于 YS, 包括 Nap (GS 2.78%, YS 2.94%)、Acel (GS 2.80%, YS 3.47%)、Ace (GS 7.30%, YS 10.7%)、Ant (GS 1.33%, YS 1.61%)、Flu (GS 6.83%, YS 10.9%)、Phe (GS 2.56%, YS 2.94%)、Fla (GS 0.73%, YS 1.7%)、Pye (GS 1.04%, YS 2.33%)、Chr (GS 4.73%, YS 5.64%)、Baa (GS 7.60%, YS 13.2%)、Ind (GS 7.41%, YS 12.0%)、Bghip (GS 6.13%, YS 7.98%).

表 2 不同样品中多环芳烃的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Contents of the polycyclic aromatic hydrocarbons in the different samples/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
类型	初始时土样 (SS)	收获期土样 (HS)	地下部分 (GS)	地上部分 (YS)
Nap	205	14.5	5.34	13.1
Acel	203	21.0	5.38	15.4
Ace	596	34.1	14.0	47.8
Flu	539	27.5	13.1	48.5
Phe	358	35.2	4.92	13.1
Ant	63.8	5.82	2.56	7.18
Pyr	156	15.4	2.00	10.4
Fla	154	17.5	1.39	7.94
Baa	788	68.0	14.6	59.0
Chr	310	23.4	9.08	25.1
Bkf	346	20.5	9.41	17.2
Bbf	367	30.3	9.52	14.9
Bap	141	91.4	63.7	58.9
Daa	297	73.3	11.0	18.2
Ind	914	21.2	14.2	53.3
Bghip	591	37.2	11.8	35.6
$\sum 16\text{PAHs} \times 10^3$	7.30	0.536	0.192	0.446
$\sum \text{HMWPAHs} \times 10^3$	5.33	0.398	0.147	0.301
$\sum \text{LMWPAHs} \times 10^3$	1.96	0.138	0.045	0.145
$\sum \text{BPAHs} \times 10^3$	4.64	0.343	0.137	0.260

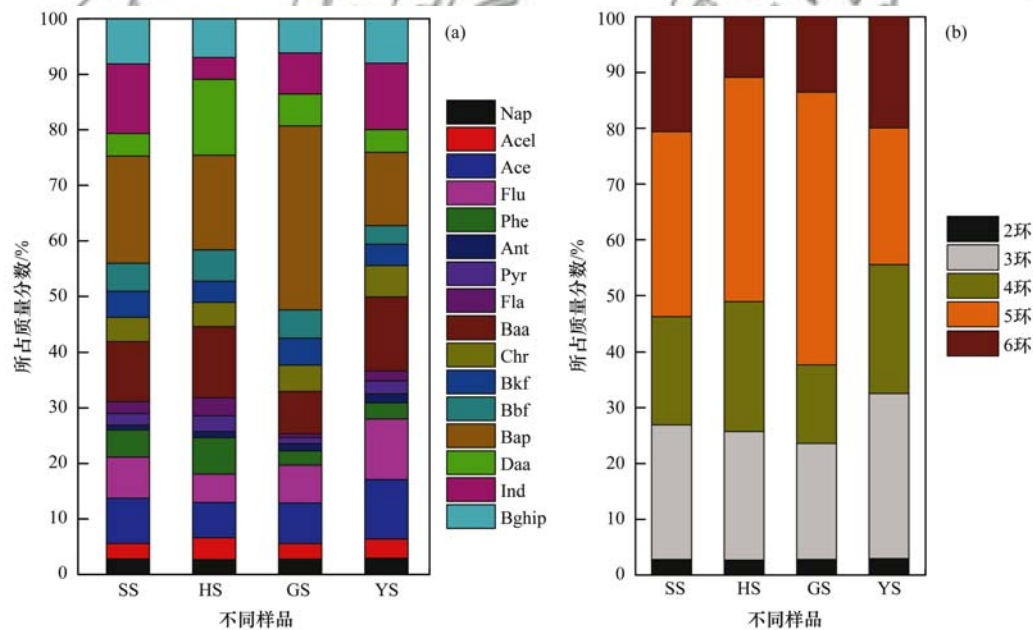


图 1 不同样品中多环芳烃 (PAHs) 所占质量分数

Fig. 1 Relative contents of the polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in the samples

由图 1(b)可知, YS 中 3 环 PAHs 的相对含量最高 (29.6%), 其次是 5 环 (24.5%) 和 4 环 (23.0%); 而 GS 中 5 环 PAHs 的相对含量最高 (48.8%), 其次是 3 环 (20.8%)、4 环 (14.1%)、6 环 (13.5%) PAHs. 总体来看, 油麦菜地下部分 HMWPAHs 相对含量较高, 地上部分 LMWPAHs 的相对含量较高.

2.2 富集系数

根据公式(1) 计算油麦菜对不同种类 PAHs 的

富集系数(图 2). 由图 2 可知, 油麦菜 YS 对不同 PAHs 的富集系数在 0.458 ~ 2.41 之间, 其中, Ant 最大, Fla 最小, 除 Fla (0.458)、Bbf (0.558)、Pyr (0.600)、Phe (0.809)、Bap (0.862)、Baa (0.953)之外, 富集系数均大于 1; GS 对不同 PAHs 的富集系数在 0.130 ~ 0.870 之间, Fla 最小, Bap 最大, 富集系数均小于 1. 由此可知, 油麦菜地上部分对 PAHs 的富集能力大于地下部分, 且不同类型之间有较大的差异, 同时可知, 无论油麦菜的地

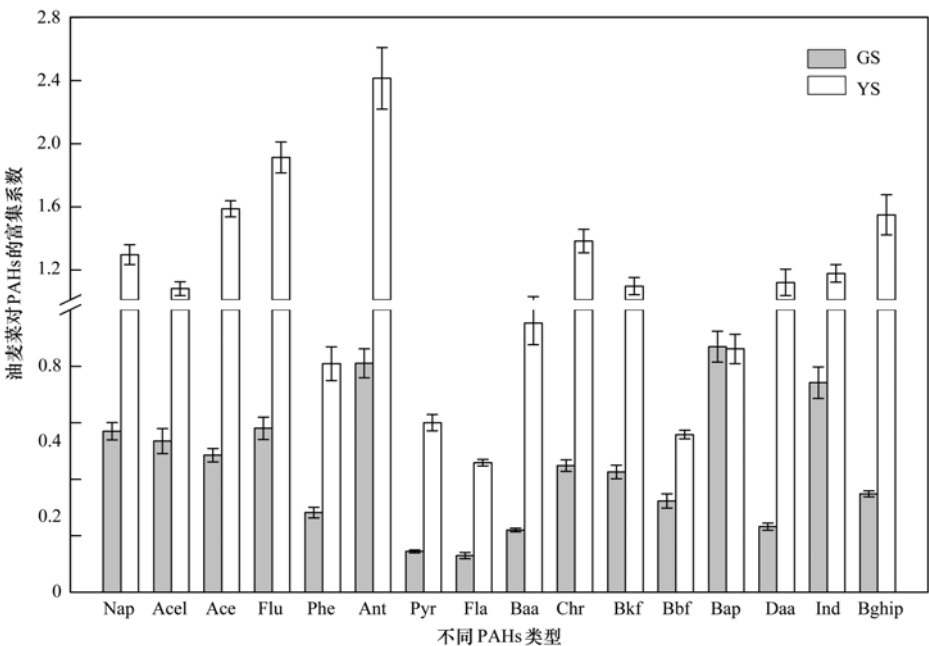


图2 油麦菜地上(YS)、地下部分(GS)对不同PAHs的富集系数

Fig. 2 Ratio of the accumulation of the individual PAHs in the aboveground (YS) or underground (GS) fractions of *Lactuca sativa* L.

上还是地下部分对 Fla 的富集能力均最小.

2.3 转移系数

根据公式(2)计算不同种类的 PAHs 在油麦菜体内的转移系数(TF). 由图 3 可知, 不同 PAHs 从地下向地上部分的 TF 在 1.42 ~ 16.5 之间, 其中, Fla 的转移系数最高(16.5), Bap 的转移系数最低(1.42). 依据 TF 的大小可以分为 3 个等级:① $TF < 5.00$, 包括 Baa (4.64)、Bghip (4.63)、Nap (3.60)、Acel (3.79)、Ant (3.73)、Bkf (3.37)、Bbf (3.49)、Phe (2.85)、Ind (2.05)、Bap

(1.42); ② $5.00 \leq TF < 10.0$, 包括 Flu (7.61)、Pyr (5.69)、Daa (5.87)、Chr (5.01) 和 Ace (9.13); ③ $TF \geq 10.0$, 只有 Fla (16.5). 结果表明, 不同种类的 PAHs 在油麦菜体内的转运能力差异较大, 最大的转移系数(Fla)是最小的 Bap 的 11.6 倍, 62.5% 的种类转运系数小于 5.00.

2.4 土壤-油麦菜体系 PAHs 的迁移特征

依据 PAHs 各组份在 SS-HS-GS-YS 的相对含量(%), 16 种 PAHs 在这一体系中的迁移特征可分为 4 组(图 4):① GS 的相对含量最高, HS 最低, 即

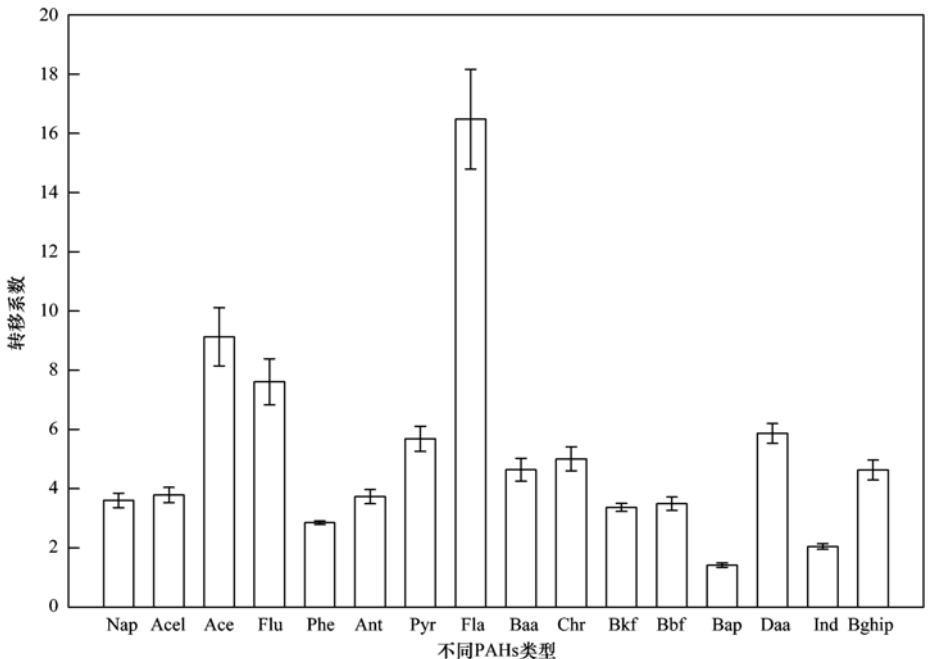


图3 不同PAHs在油麦菜体内从地下到地上部分的转移能力

Fig. 3 Transfer coefficients of the different PAHs from the underground (GS) to the aboveground fraction (YS) of *Lactuca sativa* L.

SS > HS < GS > YS, 包括 Bap、Ind 和 Nap [图 4(a)]. 表明油麦菜的生长过程中, 对此类型的 PAHs 有较高的吸收作用, SS 与 HS 差异较大, 从 GS 向 YS 的转移能力较低 ($TF < 5.00$), 在 GS 中富集多. ② HS 的相对含量最高, YS 最低, 即 SS < HS > GS > YS, 表明根部能从土壤中吸收此类 PAHs, 但其吸收、富集和转运率均不高, 仅包括 Bbf 一种类型 [图 4(c)]. ③ YS 的相对含量最高, HS 最低, 即 SS > HS < GS < YS. 包括 Ace、Flu、Ant、Chr [图 4(b)]. 表明油麦菜 GS 分吸收并贮存了此类 PAHs, 但其吸收能力小于从 GS 到 YS 的转运能力, 且 YS 中富集能力大于 GS. ④ HS 的相对含量最高, GS 最低, 即 SS < HS > GS < YS. 包括 Acel、Phe、Pyr、Fla、Daa、Baa 和 Bghip [图 4(c)]. 表明油麦菜根部能够从土壤中吸收此类 PAHs, 但吸收能力小于从 GS 到 YS 的转运能力, 导致 GS < YS, 同时认为植物代谢过程中可能会合成此类 PAHs, 通过根的分秘作用进入土壤, 引起 HS > SS. 由此可知, 油麦菜 GS 对 Nap、Bkf、Bap 和 Ind 吸收与富集能力较高 (HS < GS > YS); 对 Ace、Flu、Ant、Chr 的吸收与转运能力较高 (HS < GS < YS); 对 Acel、Phe、Pyr、Daa、Baa、Bghip 富集能力小于 YS. 部分种类的 PAHs 在 HS 高于 SS 的原因, 笔者认为可能有外源性进入, 如植物代谢合成或大气沉降, 有待进一步研究.

2.5 相关性分析

依据不同种类 PAHs 的含量, 对 SS-HS、SS-GS、SS-YS、HS-GS、HS-YS 和 GS-YS 进行线性回归分析, 分析不同样品中 PAHs 的定量关系 (图 5). 由图 5(a) 可知, SS 和 HS 中 PAHs 的拟合优度为 $R^2 = 0.46$; SS 和 GS 中 PAHs 的拟合优度为 $R^2 = 0.71$ [图 5(b)]; SS 和 YS 中 PAHs 的拟合优度为 $R^2 = 1$ [图 5(c)]; HS 和 GS 中 PAHs 的拟合优度为 $R^2 = 0.59$ [图 5(d)]; HS 和 YS 中的 PAHs 的拟合优度为 $R^2 = 0.68$ [图 5(e)]; GS 和 YS 中 PAHs 的拟合优度为 $R^2 = 0.39$ [图 5(f)]. 结果表明, SS 和 HS、GS 和 YS 的拟合优度 $R^2 < 0.5$. 分析原因, 认为油麦菜选择性吸收某些种类的 PAHs, 一些不能被吸收或吸收量较少的类型, 继续留存在 HS 中, 因此, HS 中的 PAHs 与 SS 中有较大的差异, 拟合优度较低 ($R^2 = 0.46$); 同时认为, 油麦菜吸收的 PAHs, 不同类型从地下部分到地上部分的迁移转化能力差异较大, 一些种类被迁移到地上部分, 一些种类在地下部分富集较多, 因而 GS 和 YS 的拟合优度较低, 差异最大 ($R^2 = 0.39$). 结果分析认为油麦菜地下部分 PAHs 的来源有 3 个, 一个是根从 SS 中吸收, 第

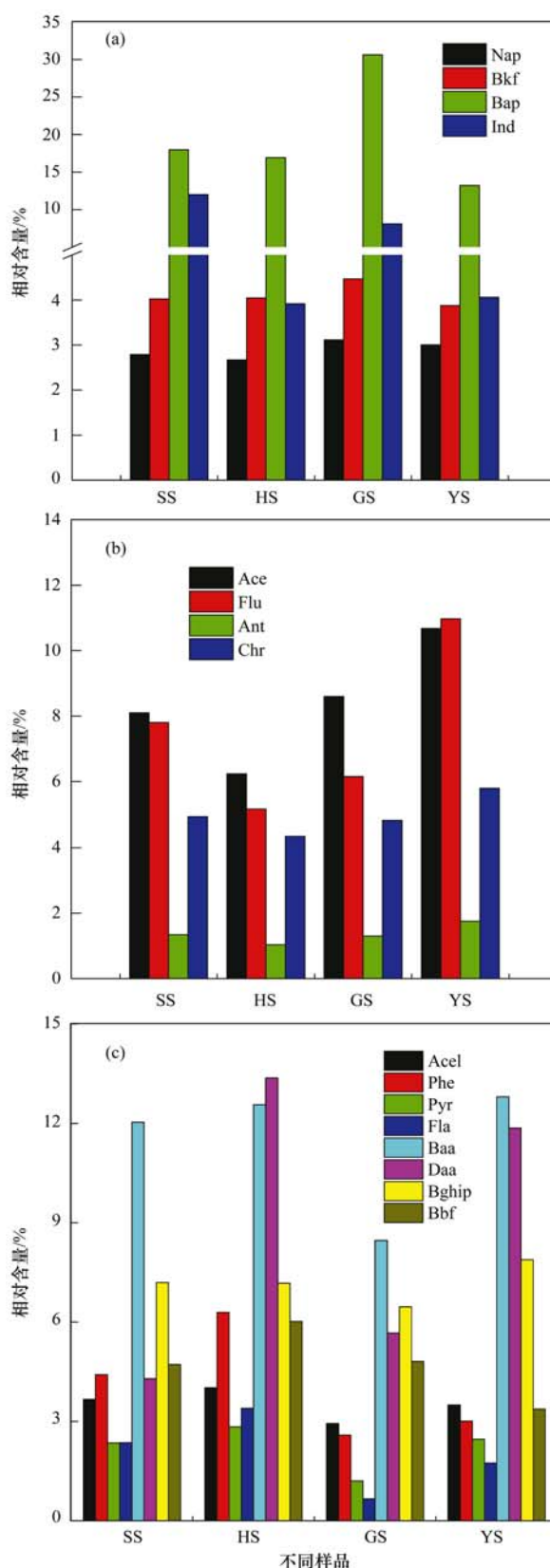


图 4 不同类型的 PAHs 在土壤-油麦菜体系中的迁移特征

Fig. 4 Characteristics of the individual PAHs in the polluted soil-plant (*Lactuca sativa* L.) system

二个由于土壤粉尘降落到地上部分通过地上部分的吸收进入体内, 然后选择性转运, 决定其富集部位; 第三个来源于植物代谢合成. 同时认为, PAHs

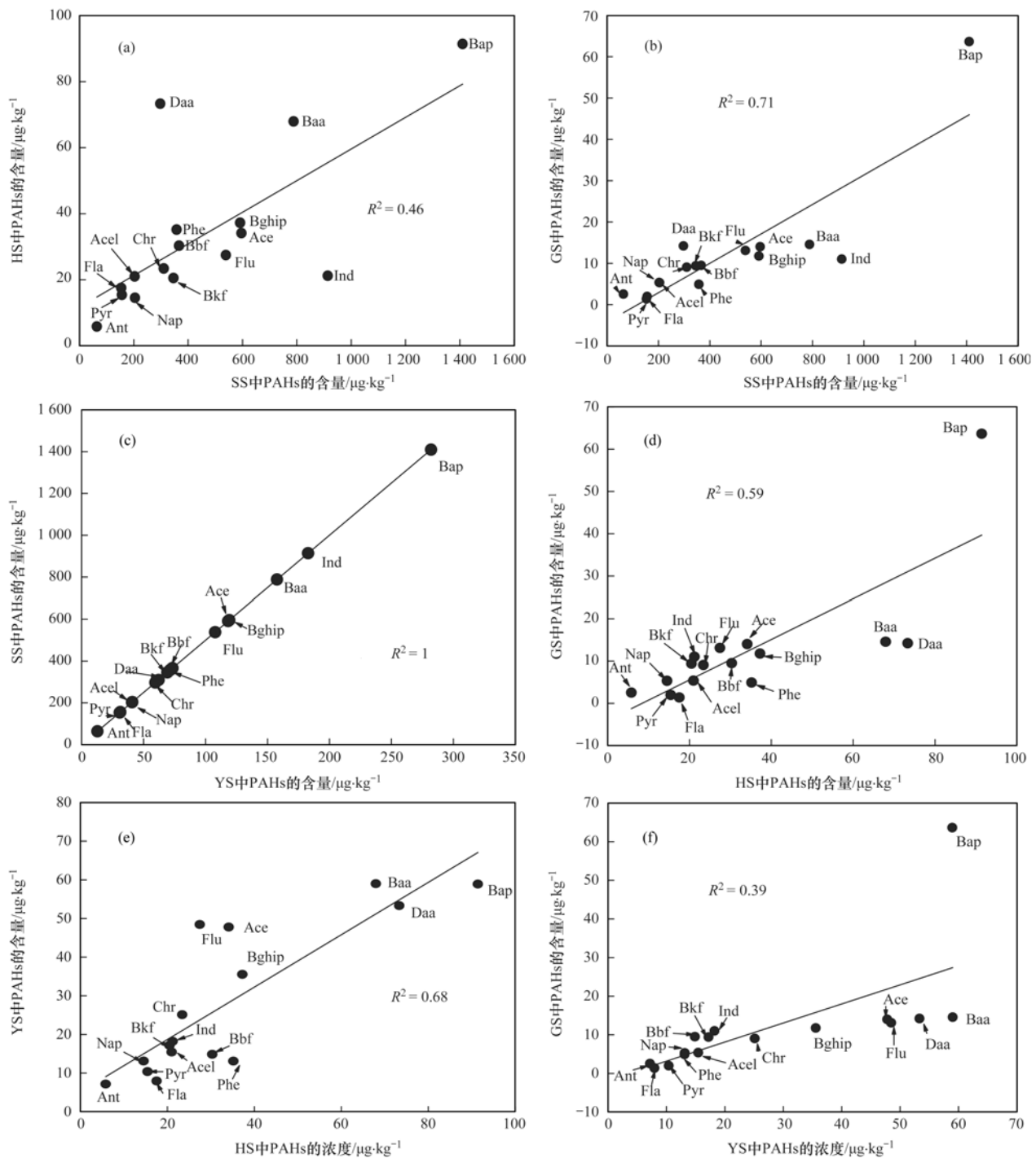


图5 土壤和油麦菜中 PAHs 的相关性

Fig. 5 Correlations among the individual PAHs in the soil and the HS, GS, and YS

被根从土壤中吸收进入体内和从地下向地上部分的运输过程,是一个选择性过程. 这一推论比较合理地解释 SS 和 GS、HS 和 GS、HS 和 YS 中 PAHs 的拟合优度在 $0.5 \leq R^2 \leq 0.8$ 之间的结果. 同时认为,油麦菜体内的 PAHs 主要来源于根的吸收,地上部分的 PAHs 主要来源于 GS 的迁移转化,SS 和 YS 中 PAHs 的拟合优度 ($R^2 = 1.0$).

2.6 来源比较

同分异构体如 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 、 $\text{Ind}/(\text{Ind} +$

$\text{BghiP})$ 、 $\text{Bap}/(\text{Bap} + \text{Chr})$ 、 $\text{Baa}/(\text{Baa} + \text{Chr})$ 和 $\text{HMWPAHs}/\text{LMWPAHs}$ 的比值可以作为环境中 PAHs 来源指示^[14,15]. 由图 6 (a) 可知,以 $\text{HMWPAHs}/\text{LMWPAHs}$ 与 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值为参照解析其来源,在 SS、HS、GS 和 YS 样品中,仅有 HS 中的 PAHs 来源有一定的差异;以 $\text{Ind}/(\text{Ind} + \text{BghiP})$ 与 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 为标准判定其来源,也仅有 HS 和 GS 中的 PAHs 来源有一定的差异[图 6 (b)];以 $\text{Bap}/(\text{Bap} + \text{Chr})$ 与 $\text{Baa}/(\text{Baa} + \text{Chr})$ 为

标准判定其来源可知，不同样品中 100% PAHs 属于同一来源[图 6 (c)]。

总体来说，SS、HS、GS、YS 样品中的 PAHs，可以认为具有相同的来源，主要包括煤、化石和生物质燃料燃烧和车辆排放。

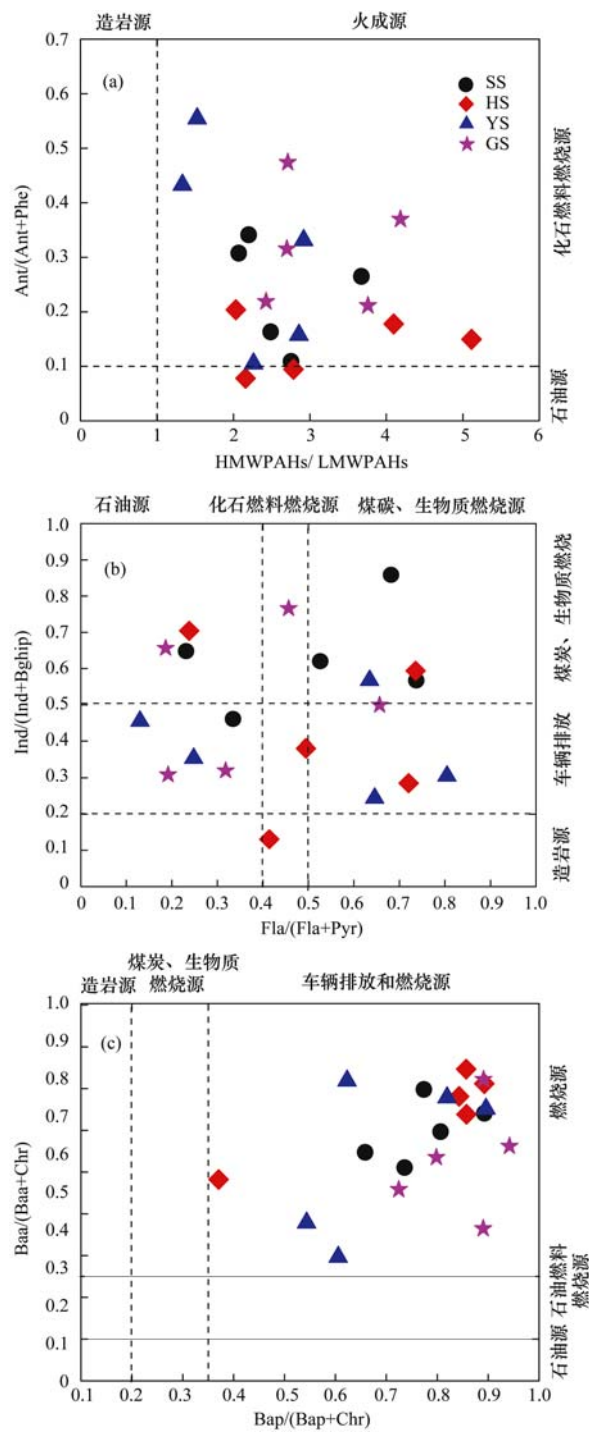


图 6 土壤和油麦菜中 HMWPAHs/LMWPAs 与 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{Bap}/(\text{Bap} + \text{Chr})$ 与 $\text{Baa}/(\text{Baa} + \text{Chr})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 与 $\text{Ind}/(\text{Ind} + \text{BghiP})$ 的双变量源解析

Fig. 6 Bivariate plot of the diagnostic ratios HMWPAHs/LMWPAs against $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$, $\text{Bap}/(\text{Bap} + \text{Chr})$ against $\text{Baa}/(\text{Baa} + \text{Chr})$, and $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ against $\text{Ind}/(\text{Ind} + \text{BghiP})$ in the soil and *Lactuca sativa* L.

2.7 潜在风险

根据公式(3)和(4)分别计算油麦菜地上和地下部分 PAHs 的苯并[a]芘的等效毒性当量 (Bap_{eq}) (表 3)。由表 3 可知在地下部分不同 PAHs 的 Bap_{eq} 在 $1.39 \times 10^{-3} \sim 63.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，其中，Bap ($63.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Daa ($14.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Baa ($1.46 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Ind ($1.10 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的毒性当量较大；地上部分在 $7.94 \times 10^{-3} \sim 58.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，其中，Bap ($58.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Daa ($53.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Baa ($5.90 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Ind ($1.82 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Bkf ($1.72 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Bbf ($1.49 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 较大。总体来看，主要是 5~6 环 PAHs 的毒性，其中，Fla 的毒性当量最小，Bap 的最大。

地下和地上部分中 $\sum 16\text{PAHs}$ 的 Bap 等效毒性当量 ($\sum 16\text{PAHsBap}_{\text{eq}}$) 分别为 $82.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $124 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中，致癌性 PAHs 的 Bap 等效毒性当量 ($\sum \text{BPAHsBap}_{\text{eq}}$) 分别占到总量的 99.8% (GS) 和 99.5% (YS)，表明油麦菜的潜在风险较高。

表 3 油麦菜地上部分(YS)与地下部分(GS)PAHs 的 Bap 等效毒性当量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Bap_{eq} concentration of the PAHs in the aboveground and underground parts of *Lactuca sativa* L. / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Bap 等效毒性当量	
	地下部分(GS)	地上部分(YS)
Nap	0.005 ± 0.002	0.013 ± 0.002
Acel	0.005 ± 0.002	0.015 ± 0.007
Ace	0.014 ± 0.006	0.048 ± 0.012
Flu	0.013 ± 0.007	0.049 ± 0.026
Phe	0.005 ± 0.002	0.013 ± 0.003
Ant	0.026 ± 0.015	0.072 ± 0.053
Pyr	0.002 ± 0.001	0.010 ± 0.008
Fla	0.001 ± 0	0.008 ± 0.003
Baa	1.46 ± 0.472	5.90 ± 4.12
Chr	0.091 ± 0.037	0.251 ± 0.105
Bkf	0.941 ± 0.82	1.72 ± 0.301
Bbf	0.952 ± 0.818	1.49 ± 0.146
Bap	63.7 ± 35.7	58.9 ± 12.2
Daa	14.2 ± 7.25	53.3 ± 19.0
Ind	1.10 ± 0.441	1.82 ± 0.303
BghiP	0.118 ± 0.069	0.356 ± 0.176
$\sum 16\text{PAHsBap}_{\text{eq}}$	82.6 ± 45.7	124.0 ± 36.5
$\sum \text{BPAHsBap}_{\text{eq}}$	82.4 ± 45.6	123 ± 36.2

3 讨论

3.1 油麦菜对 PAHs 的吸收和积累

油麦菜地上部分 3~5 环 PAHs 含量较高，地下部分 4~6 环 PAHs 较高 (Baa、Bap、Ace、Flu 和 Ind)，与报道的国内其它污染区植物的含量相比有

一定的差异,含量处于中等水平.如珠江三角洲典型城市农业土壤种植的蔬菜,16种PAHs的均值为 $183\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,菜心菜为 $315\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、生菜为 $166\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而且,低分子量的Phe、Ant、Pyr、Chr、Nap富集较多^[16].东莞市蔬菜中PAHs的含量在 $26.4\sim 3748\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,叶菜类的平均含量为 $730\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,PAHs的类型主要是3~4环,其中Fla、Pyr、Phe含量较高^[17].以制造业为主的顺德周边地区,蔬菜中PAHs的含量在 $82\sim 1258\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,其中Ant、Nap、Phe、Pyr、Chr等含量较高且与土壤PAHs含量没有显著的相关性($P>0.05$)^[18].南京某工业区周边农田土壤生长的蔬菜中PAHs含量与土壤PAHs有正相关关系,根的富集量显著高于茎叶($P<0.05$),认为低分子量PAHs容易被根吸收富集,但不同蔬菜类型(菜心菜、四季青小白菜、花红苋菜和油麦菜)积累量差异较小^[19].山西焦化污染区农产品中PAHs含量在 $59.5\sim 1.06\times 10^3\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,2~4环PAHs是主要富集类型,但不同种类的农产品富集趋势为叶菜类>根茎类>果实类^[20].某钢铁企业周边8种蔬菜可食用部分PAHs含量在 $227\sim 1.53\times 10^3\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间^[21].研究发现焦化厂周边植物叶富集的4~6环较多,相对含量在50.4%~72.0%之间,冶炼厂周边3环、4环的相对含量在50.4%~97.0%之间,煤矿周边为68.6%~89.1%之间,而且,植物体内 $\sum 16\text{PAHs}$ 和土壤 $\sum 16\text{PAHs}$ 没有显著的相关性($P>0.05$),2,3环PAHs在植物体内的相对含量大于土壤,而4,6环PAHs低于土壤^[22].

回归性分析表明,油麦菜地上部分PAHs与初始土壤PAHs的拟合优度最高($R^2=1$),地下部分与初始土壤PAH的拟合优度中等($R^2=0.71$),主要差异在Bap、Daa、Ind、Baa等种类.YS和GS的拟合优度较低($R^2=0.39$),差异类型主要有Bap、Bghip、Daa、Ind、Baa、Phe、Ace、Chr.说明油麦菜PAHs来源于土壤PAHs,但油麦菜对不同类型PAHs的吸收能力及其体内迁移转化能力有一定的差异.其中,差异较大的有2类:一类根吸收少而土壤积累多;另一是从地下部分向地上部分迁移少,而在地下部分富集多的类型.这一结论与不同种类的富集系数和转移系数具有一致性.如Ind、Baa、Phe、Ace转移系数大于Bap、Bghip、Daa、Chr;而在YS中Ant的富集系数最大,Fla的最小;在GS中Bap的富集系数最大,Fla的最小;从油麦菜的GS到YS的转运系数Fla最大,而Bap最小.笔者认为油麦菜对不同类型PAHs的吸收与迁移转化能

力有一定的差异且受土壤中含量的影响.该结果与王海翠等^[23]通过盆栽实验得出的结论相似:Fla和Bap在油麦菜YS积累量随其土壤中的含量增加而增加,且不同含量之间的差异较为显著($P<0.05$).

关于植物吸收与富集的机制,目前有较多的观点.有认为富集特征与工业活动引起的环境污染特征正相关^[22]、认为低分子量PAHs在土壤中的持久性相对高分子量PAHs较短,容易通过挥发作用进入大气环境,后通过干湿沉降降落在叶面,通过表皮进入叶内,因此,植物体富集的低分子量PAHs主要受其溶解性和挥发性影响^[23].梁宵等^[24]和蓝家程等^[25]认为,在一定温度下植物对污染物的亲和力取决于植物和底物的类型,而不受底物含量和环境因素的影响;PAHs的正辛醇/水分配系数(K_{ow})、植物表面角质层等均会影响植物对PAHs的吸收与贮存,角质层构成了PAHs的天然吸附剂和蓄积池^[26,27].

综上所述,目前的研究结果存在较大的差异,而且PAHs在植物体内的富集与迁移转化受多种因素的影响.关于影响PAHs在油麦菜体内富集与迁移转化的因素,有待进一步深入探讨.

3.2 土壤-油麦菜体系PAHs的迁移特征

不同PAHs受其分子量、分子结构、疏水性、浓度和生物毒性等的影响,在土壤-油麦菜体系的迁移能力有较大的差异.依据PAHs在土壤-油麦菜根系统中的迁移系数可分成3类.第一类低等迁移率($\text{BF}<0.3$),极难溶解或易吸附在土壤颗粒上,油麦菜根吸收率低,包括Phe、Pyr、Fla、Baa、Daa;第二类,中等迁移率,从土壤到根的迁移系数($0.3<\text{BF}<0.5$),包括Chr、Bkf、Bbf、Ace、Bghip;第三类,高迁移率,迁移系数($0.5<\text{BF}<1.0$)在土壤中溶解度高,容易被油麦菜吸收,包括Nap、Acel、Flu、Ant、Ind、Bap.

依据PAHs从GS-YS的转移系数,也可以分为3类.第一类,低等转移能力,转移系数 $\text{TF}<5.0$,如Baa、Bghip、Nap、Acel、Ant、Bkf、Bbf、Phe、Ind、Bap;第二类中等转移能力,转移系数 $5.00\leq\text{TF}<10.0$,包括Flu、Pyr、Daa、Chr和Ace;第三类,高转移能力,转移系数 $\text{TF}\geq 10.0$,仅Fla一种类型.

比较2种转移系数可知,从地下部分到地上部分的转移能力普遍大于从土壤到根的转移,转移系数均大于1.0,且不同类型PAHs从土壤到根际和从根际到茎叶的转移速率有一定的差异.如Flu、Ace、Chr从土壤到根和从根到茎叶的转移系数相

对来说均较高; Phe、Baa 等从土壤到根和从根到茎叶的转移系数相对均较低; Nap、Acel、Ant、Ind、Bap、Bkf、Bbf、Bghip 从土壤到地下部分转运系数较高, 而从地下部分到地上部分的迁移系数相对较低; Fla 从土壤到根的转移率最低, 而从根到茎叶系统的迁移系数最高. 有研究认为 PAHs 分子结构决定了其生物毒性和生物可利用性, Nap、Flu、Ant 具有“中蒽位/L 区”^[28], 中间苯环的对位碳上容易发生活性反应, 具有较高的活性, 容易被生物体吸收, 而 Acel、Ace、Chr、Fla、Pyr、Phe、Baa 具有中菲/K 区结构, 不易被植物吸收, 具有慢性毒性效应, 而 Bap、Bbf、Bkf、Ind、Bghip 既具有 L 区, 也具有 K 区, 其活性取决于 L 区的活性, 因此, 可以很好地解释, 不同类型的 PAHs 在土壤-油麦菜根部和根部-地上部分的迁移速率. 有的容易被吸收, 表现为高吸收率, 同时由于植物自身的免疫机制而迅速向上转移; 有些因为分子量小挥发性强或不易被植物吸收等特性, 导致从土壤到植物的迁移率低.

本研究没有考虑植物代谢特性、土壤微生物代谢和不同类型 PAHs 之间的相互作用的影响, 因此, 今后需要进一步深入探讨.

3.3 油麦菜的健康风险

我国食品污染物限量标准 (GB 2762-2017)^[29] 规定食品中 Bap 的含量不超过 $5.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 根据此标准可知油麦菜, 具有较高的健康风险. YS 和 GS 的风险值分别超出最大标准值 ($5.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.65 和 2.47 倍. 其中, 风险值较高的 PAHs 类型主要是 Daa、Baa、Bbf、Bkf, 均属于典型的致癌性物质. 依据 $\sum 16\text{PAHsBap}_{\text{eq}}$ 可知, YS 的潜在健康风险是 GS 的 1.50 倍. 尤其是致癌性 PAHs 的风险值占总风险值的 99.5% 以上. 根据研究结果可知, 此类土壤如果用于油麦菜的种植将具有较高的致癌风险.

4 结论

(1) 油麦菜地上部分 (YS) 对 PAHs 的富集能力大于地下部分 (GS). GS 和 YS 富集的 PAHs 主要来源于初始土壤 (SS), 拟合优度 $R^2 = 0.71$ 、 $R^2 = 1$.

(2) 油麦菜地下和地上部分对不同类型的 PAHs 具有选择富集作用. YS 主要富集 3~5 环 PAHs (Ant、Ace、Phe、Baa、Bap), Ant 的富集系数最大; 而 GS 主要是 4~6 环 PAHs (Chr、Daa、Bap、Bghip), Bap 的富集系数最大.

(3) 在 GS-YS 体系中, 不同 PAHs 的转运能力有一定的差异, Fla 的转移系数最大, Bap 的转运系数最小.

(4) 地上和地下部分的潜在风险分别是国家食品标准规定的 Bap 最大限量风险值 ($5.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 11.8、12.7 倍. 污染农田土壤种植油麦菜, 存在较高的安全风险.

参考文献:

- [1] Jiao H H, Bian G P, Chen X, *et al.* Distribution, sources, and potential risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from an industrial district in Shanxi, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(13): 12243-12260.
- [2] Jiao H H, Wang, Q, Zhao N N, *et al.* Distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils around a chemical plant in Shanxi, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(10): 1198.
- [3] Duan Y H, Shen G F, Tao S, *et al.* Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils at a typical coke production base in Shanxi, China [J]. *Chemosphere*, 2015, **127**: 64-69.
- [4] National Academy of Sciences. Report of the committee on research advisory to the U. S. department of agriculture [R]. Washington, DC: National Academy Press, 1972.
- [5] International Agency for Research on Cancer (IARC). Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Polynuclear aromatic compounds, part 1, chemical, environmental, and experimental data [M]. Lyon, France: IARC, 1983. 95-275.
- [6] Lyon (France) International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans: international Agency for Research on Cancer, Lyon, 1986 [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 1987, **25**(9): 717.
- [7] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11**(1-2): 121-127.
- [8] Amador-Muñoz O, Bazán-Torija S, Villa-Ferreira S A, *et al.* Opposing seasonal trends for polycyclic aromatic hydrocarbons and PM₁₀: health risk and sources in southwest Mexico City [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 199-212.
- [9] Jiao H H, Rui X P, Wu S H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Dagang Oilfield (China): distribution, sources, and risk assessment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(6): 5775-5791.
- [10] De Nicola F, Maisto G, Prati M V, *et al.* Leaf accumulation of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Quercus ilex* L. [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **153**(2): 376-383.
- [11] 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 等. 温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4237-4243.
- [12] Zhou J C, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in riparian soils along urban rivers of Wenzhou city [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4237-4243.
- [12] US EPA. Health effects assessments for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [R]. EPA 549/1-86-013, Cincinnati: US Environmental Protection Agency (EPA), Environmental Criteria and Assessment Office, 1984.

- [13] Nisbet I C T, Lagoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, **16**(3): 290-300.
- [14] 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.
- [15] Galarneau E. Source specificity and atmospheric processing of airborne PAHs: implications for source apportionment [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(35): 8139-8149.
- [16] 张天彬, 万洪富, 杨国义, 等. 珠江三角洲典型城市农业土壤及蔬菜中的多环芳烃分布[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(11): 2375-2384.
- Zhang T B, Wan H F, Yang G Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil and vegetables of Foshan City in the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(11): 2375-2384.
- [17] 万开, 江明, 杨国义, 等. 珠江三角洲典型城市蔬菜中多环芳烃分布特征[J]. *土壤*, 2009, **41**(4): 583-587.
- Wan K, Jiang M, Yang G Y, *et al.* Distribution characteristics of PAHs in vegetables of typical city in Pearl River Delta—A case study of Dongguan City [J]. *Soils*, 2009, **41**(4): 583-587.
- [18] Li Y T, Li F B, Chen J J, *et al.* The concentrations, distribution and sources of PAHs in agricultural soils and vegetables from Shunde, Guangdong, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **139**(1-3): 61-76.
- [19] 尹春芹, 蒋新, 杨兴伦, 等. 施肥对花红莧菜吸收和积累土壤中 PAHs 的影响[J]. *环境科学*, 2008, **28**(8): 742-747.
- Yin C Q, Jiang X, Yang X L, *et al.* Influence of fertilization on flower red amaranth uptake and accumulation of PAHs in soil [J]. *Environmental Science*, 2008, **28**(8): 742-747.
- [20] 崔阳, 郭利利, 张桂香, 等. 山西焦化污染区土壤和农产品中 PAHs 风险特征初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(1): 72-79.
- Cui Y, Guo L L, Zhang G X, *et al.* Human health risks of PAHs in soils and agricultural products in coking areas, Shanxi province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(1): 72-79.
- [21] 沈菲. 钢铁工业区农田植物 PAHs 的浓度水平和影响因素[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- Shen F. THE concentration and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants in an iron and steel industrial area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [22] Sun L, Liao X Y, Yan X L, *et al.* Evaluation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons accumulation in plants from typical industrial sites: potential candidate in phytoremediation for co-contamination [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014, **21**(21): 12494-12504.
- [23] 王海翠, 胡林林, 李敏, 等. 多环芳烃(PAHs)对油菜生长的影响及其积累效应[J]. *植物生态学报*, 2013, **37**(12): 1123-1131.
- [24] 梁宵, 占新华, 周立祥. 不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2516-2521.
- Liang X, Zhan X L, Zhou L X. Characterization comparison of polycyclic aromatic hydrocarbon uptake by roots of different crops [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2516-2521.
- [25] 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍. 多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4081-4087.
- Lan J C, Sun Y C, Xiao S Z. Water-Sediment partition of polycyclic aromatic hydrocarbons in Karst underground river [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4081-4087.
- [26] 王戎, 何杞双, 王雁, 等. 可溶性有机物对玉米根部菲与芴吸附与吸收过程的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(1): 35-39.
- Wang R, He Q S, Wang Y, *et al.* Impact of dissolved organic matter on sorption and absorption of fluorene and phenanthrene to maize root [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(1): 35-39.
- [27] Moeckel C, Thomas G O, Barber J H, *et al.* Uptake and storage of PCBs by plant cuticles [J]. *Environment Science & Technology*, 2008, **42**(1): 100-105.
- [28] 焦海华, 张淑珍, 景旭东, 等. 油田区多环芳烃污染盐碱土壤活性微生物群落结构解析[J]. *生态学报*, 2016, **36**(21): 6994-7005.
- Jiao H H, Zhang S Z, Jing X D, *et al.* Analysis of the structure and distribution characteristics of the microbial community in saline-alkali soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(21): 6994-7005.
- [29] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1 534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs)in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)