

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

电子垃圾拆解废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估

张亚萍^{1,2}, 吕占禄^{1*}, 王先良^{1,3}, 张晗¹, 郭凌川¹, 丁秀丽^{1,2}, 张金良^{1*}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012; 2. 兰州大学公共卫生学院, 兰州 730000; 3. 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100021)

摘要: 为研究某电子垃圾拆解区废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯(PCBs)污染特征及对人体的潜在健康风险. 对电子垃圾废渣样品采样3个、废渣旁的农田土壤和蔬菜分别采样10个和18个(油麦菜6个、四季豆6个和圆白菜6个). 废渣、土壤和蔬菜中PCBs含量测定采用高分辨气相色谱-质谱法. 结果表明, 总PCBs水平: 废渣(11 938 ng·g⁻¹, 以dw计, 下同) > 土壤(45.54 ng·g⁻¹) > 蔬菜(11.51 ng·g⁻¹); 生物-沉积物/土壤富集因子: 油麦菜(0.18) > 四季豆(0.05) > 圆白菜(0.01). 废渣与土壤检出37种PCBs相同同系物, 蔬菜检出33种, 均在废渣与土壤检出同系物之内; 土壤中部分同系物与圆白菜出现相关性($P < 0.05$). 废渣、土壤和蔬菜中PCBs氯代数以三氯联苯~五氯联苯的低氯联苯质量分数占比最多, 分别占比77.92%、59.73%和73.96%, 土壤中占比相对较低, 总体随氯代数增加, 占比呈现下降趋势. 健康风险评估结果表明, 成人(男/女)和儿童暴露土壤与蔬菜中PCBs的总非致癌风险商值(HQ)均小于1, 处于可接受水平; 成人(男/女)和儿童暴露土壤与蔬菜中PCBs的总致癌风险(CR)均超过了 1×10^{-6} , 处于不可接受水平, 且成人(男/女)高于儿童.

关键词: 电子垃圾; 废渣; 土壤; 蔬菜; 多氯联苯; 污染特征; 风险评估

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0490-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104198

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable

ZHANG Ya-ping^{1,2}, LÜ Zhan-lu^{1*}, WANG Xian-liang^{1,3}, ZHANG Han¹, GUO Ling-chuan¹, DING Xiu-li^{1,2}, ZHANG Jin-liang^{1*}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Public Health, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. National Institute of Environmental Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100021, China)

Abstract: To study the characteristics of polychlorinated biphenyls (PCBs) in waste residue-soil-vegetable in an e-waste dismantling area and the potential health risks to humans, three samples of e-waste residue were collected, and 10 and 18 samples were taken from farmland soil and vegetables (six lettuce, six green bean, and six cabbage samples), respectively, next to the waste residue. High-resolution gas chromatography-mass spectrometry was used to detect the content of PCBs in waste residue, soil, and vegetables. The results showed that the total PCBs levels were as follows: waste residue (11 938 ng·g⁻¹, dw) > soil (45.54 ng·g⁻¹, dw) > vegetables (11.51 ng·g⁻¹, dw). The bio-sediment/soil enrichment factor values were as follows: lettuce samples (0.18) > green bean samples (0.05) > cabbage samples (0.01). There were 37 PCB identical homologues detected in the waste residue and soil, and 33 types were detected in vegetables, all of which were within the homologues detected in the waste residue and soil. Some homologues in the soil were correlated with cabbages ($P < 0.05$). The column chart of PCB chlorination number in waste residues, soil, and vegetables showed that low-chlorinated biphenyls from trichlorobiphenyl to pentachlorobiphenyl mass fraction accounted for the largest proportion, accounting for 77.92%, 59.73%, and 73.96%, respectively. The proportion in the soil was relatively low, with the overall proportion showing a downward trend with increasing rate of chlorine generation. The results of the health risk assessment showed that the total HQ of PCBs in the soil and vegetables exposed to adults (male/female) and children was less than 1, which was at an acceptable level. The total CR of PCBs in the soil and vegetables exposed to adults (male/female) and children all exceeded 1×10^{-6} , which is at an unacceptable level, and the values for adults (male/female) were higher than those for children.

Key words: electronic waste; waste residue; soil; vegetables; polychlorinated biphenyls; pollution characteristics; risk assessment

我国科技发展迅速,随之而来产生的电子垃圾数量也巨大,预计我国在2040年将有2000万t的电子垃圾产生^[1]. 电子垃圾在拆解和焚烧等处理处置过程中产生大量的有毒有害重金属和有机污染物,其中多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)是释放的重要持久性有机污染物之一,其分子式为C₁₂H_{10-n}Cl_n,共有209种同系物,由于其高致癌性、难降解、远距离迁徙性、持久性、生物累积性和生物毒性较高,对人体健康及生态系统带来了严重危

害^[2~4]. PCBs在多种环境介质与生物介质中分布广泛,土壤是PCBs最大的储存库^[5],土壤中的污染物通过农作物根部吸收,随后进入作物木质部并通过蒸腾作用迁移到植株的其他组织^[6]. 环境和生物介质中的PCBs主要通过职业暴露、饮食暴露、宫内及

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-06-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1804600)

作者简介: 张亚萍(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境与健康风险评估, E-mail: zhangyp18@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lv.zhanlu@cracs.org.cn; jinliangzhg@263.net

母乳暴露和意外事故暴露等,对人体产生健康风险^[7]. 有研究显示,在人体血清、母乳和头发等,都观察到了非常高的 PCBs 水平^[8~11],居住在电子垃圾拆解点附近的儿童也容易受到污染物的影响^[12]. 目前 PCBs 的研究主要集中在土壤、水体、大气、人体、陆生生物和海洋生物等单一环境介质与生物介质,对于从点源-环境介质-生物介质系统性的研究较少. 本文选择某废弃电子垃圾拆解地为研究对象,采集电子垃圾残留废渣、菜地土壤和该菜地上种植的蔬菜,围绕“源(废渣)-非生物介质(土壤)-生物介质(蔬菜)-健康风险(人体)”的因果关系链,从整体角度探讨 PCBs 污染特征、可能的迁移过程和对人体健康的潜在风险,以期为该农田土壤使用、蔬菜种植及人体活动与膳食摄入提出建设性指导和意见.

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

某电子垃圾拆解区位于我国的华东地区,背山面海,地形以平原为主,四季分明,雨水较为充足,具有较高的人口城镇化率. 电子垃圾拆解历史悠久,自 20 世纪 70 年代末开始电子垃圾回收、处理和处置等活动.

1.2 样品采集

本研究采集的样品为堆放在农田土壤旁边的电子垃圾废渣、农田土壤和农田土壤中种植的蔬菜(油麦菜、四季豆和圆白菜). 废渣样品在废渣堆放处采集 5 个子样品,经均匀混合后,作为一个样品,共采集废渣样品 3 个. 土壤样品的采集参照土壤环境监测技术规范(HJ/T 166-2004),采集 0~20 cm 的农田耕作层土壤. 根据研究目的与当地的实际情况,在监测区域中布设 10 个面积相等的网格,每个网格作为一个采样点,每个采样点的样品为土壤农田样品混合样,即分别在其上、下、左、右、中采样 5 个,进行混匀,并经四分法缩分为 1 kg 左右,作为一个样品,共采集土壤样品 10 个. 对监测区域农田土壤中种植的 3 种蔬菜(油麦菜、四季豆和圆白菜)进行采样,为保证蔬菜样品的随机性、代表性与对比性,蔬菜采样也按照网格布点法进行,在每个网格上、下、左、右、中这 5 个点采集蔬菜可食部分样品并汇合,作为一个样品,共采集蔬菜样品 18 个,其中油麦菜 6 个、四季豆 6 个和圆白菜 6 个. 以上样品均置于聚乙烯袋中,采用锡箔纸进行包裹,4℃冷藏转运至实验室,-20℃保存待检. 研究区域与采样点分布见图 1.

1.3 样品实验室分析

废渣、土壤和蔬菜样品中 PCBs 含量由气相色谱-

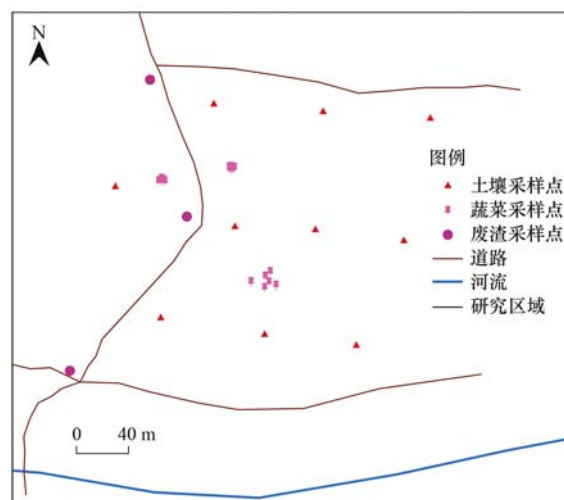


图 1 研究区域与采样点分布示意

Fig. 1 Research area and sampling point distribution

谱-质谱联用仪(Agilent 7000A Triple Quadrupole GC/MS)检测. 废渣的前处理及测定参照危险废物毒性鉴定,根据毒性物质含量鉴别(GB 5085.3-2007)附录 N 固体废物 PCBs 的测定方法;土壤样品参照(EPA 1668B-2008)进行测定;蔬菜样品参照(EPA 1668B-2008)及食品中二噁英及其类似物毒性当量的测定(GB/T 5009.205-2007)方法进行检测. 废渣的方法检出限为 57~70 ng·g⁻¹;土壤检出限为 1.1~2.4 × 10⁻² ng·g⁻¹;蔬菜方法检出限为 1 × 10⁻³ ng·g⁻¹.

1.4 质量控制

样品质量控制:用于质量保障体系的质控样品分为两类,一类为样品的重复样,用于考察实验室分析样品的可靠性,另外一类是基质加回收率指示物的质控样,基质分别为实验室之前抽提过的土壤样品等,用于考察前处理流程中是否有 PCBs 的背景污染. 样品 PCBs 测定主要采用重复测量、加标回收和实验室空白加标样品:①样品重复测量 12 次,重复测量平均偏差均 < 10%;②实验室样品加标次数为 12 次,回收率均 ≥ 90%;③有实验室空白加标样品,空白加标次数是 2 次,回收率均 ≥ 90%.

仪器分析质量控制:进样过程中每 10 个样品加进一个空白溶剂和一个 PCBs 混合标样,用以考察仪器的稳定性;当仪器灵敏度下降后,若响应下调 15% 时,仪器会进行维护;所测样品通过 7 点标准曲线进行定量,当样品中 PCBs 含量不在工作曲线范围内时,样品将进行浓缩或稀释后重新进样,确保所测含量在工作曲线内.

1.5 分析与评价

1.5.1 统计学分析

采用 IBM SPSS Statistics 21 和 GraphPad Prism 8

软件进行描述性统计分析和相关性分析. 定量资料采用最小值 (Min)、最大值 (Max)、均数 $\pm$ 标准差 ($\bar{X} \pm SD$) 和中位数 (Median) 描述; 两独立样本采用 t 检验或 Mann-Whitney U 检验; 多组独立样本采用方差分析. 相关性分析即 Pearson 相关或 Spearman 秩相关, 记相关系数分别为 r 或 r_s , r/r_s 取值介于 -1 和 1 之间, r/r_s 值为正表示正相关, r/r_s 值为负表示负相关, r/r_s 值为零表示无相关性出现. 本研究当样品检出率超过 50% 时进行统计学分析, 其中未检出的数据统计处理时使用 $1/2$ 最低检出限 (limit of detection, LOD) 替代. 记检验水准 $\alpha = 0.05$.

1.5.2 生物-沉积物/土壤富集因子

生物-沉积物/土壤富集因子为土壤与蔬菜中污染物含量达到平衡时, 定义为根 (或茎) 与土壤污染物含量的比值, 无量纲, 此处采用样品中 PCBs 的平均含量计算, 表明蔬菜从土壤中吸收污染物或土壤污染物向蔬菜中的迁移趋势^[13,14].

计算公式如下:

$$\text{生物-沉积物/土壤富集因子} = \frac{\text{蔬菜可食部分 PCBs 平均浓度}}{\text{种植蔬菜的土壤 PCBs 平均浓度}}$$

1.5.3 环境健康风险评估

本研究仅考虑 PCBs 母体对人体的危害, 暂不考虑 PCBs 进入人体的衍生物和代谢产物, 即危害识别; PCBs 暴露对人体的致癌效应属线性关系, 非致癌效应属非线性关系, 即剂量-反应关系.

1.5.3.1 暴露评估

本研究参照美国环境保护署制定的环境健康风险评估模型并结合文献^[15~18] 计算成人 (男/女) 和儿童暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的日均暴露量 (average daily dose, ADD) 和终身日均暴露量 (life average daily dose, LADD), 单位均为 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 关键参数的说明见表 1.

表 1 人群暴露土壤与蔬菜中 PCBs 的暴露参数
Table 1 Exposure parameters of PCBs in soil and vegetables of the population

参数	含义	单位	取值	文献
IR _s	儿童/成人土壤日均摄入量	mg·d ⁻¹	87/50	[19,20]
ED	儿童/成人暴露持续时间	a	8/30	[21]
EF	儿童/成人暴露频率	d·a ⁻¹	365	[21]
BW	儿童与成人 (男/女) 体重	kg	21.2/60.6 (65.0/56.8)	[20,22]
AT	儿童/成人非致癌效应平均时间	d	8×365/30×365	[21]
LT	儿童/成人致癌效应平均时间	d	70×365	[21]
ABS _o	经口摄入吸收效率因子	无量纲	1	[17]
SA	儿童/成人 (男/女) 暴露皮肤表面积	cm ²	2 852.3/5 120 (5 440/4 800)	[17,20,22]
ABS _d	皮肤接触吸收效率因子	无量纲	0.14	[17]
EV	每日皮肤事件接触频率	次·d ⁻¹	1	[17]
AF	儿童/成人皮肤表面土壤黏附系数	mg·cm ⁻²	0.2/0.07	[17]
IR _i	儿童/成人呼吸速率	m ³ ·d ⁻¹	8.3/15.7 (18/14.5)	[20,22]
SAF	暴露于土壤的参考剂量分配系数	无量纲	0.20	[17]
PEF	土壤尘扩散因子	m ³ ·kg ⁻¹	1.32×10 ⁹	[18]
RfD _o	经口摄入参考剂量	mg·(kg·d) ⁻¹	2×10 ⁻⁵	[23]
RfD _d	经皮肤接触参考剂量	mg·(kg·d) ⁻¹	2×10 ⁻⁵	[17]
RfD _i	经呼吸吸入参考剂量	mg·(kg·d) ⁻¹	2×10 ⁻⁵	[24]
SF _o	经口摄入致癌斜率因子	(kg·d)·mg ⁻¹	2	[17]
SF _d	经皮肤接触致癌斜率因子	(kg·d)·mg ⁻¹	2	[17]
SF _i	经呼吸吸入致癌斜率因子	(kg·d)·mg ⁻¹	2.2	[25]
10 ⁻⁶ /10 ⁻³	单位转换系数	无量纲	—	—
C _s	土壤中 PCBs 含量	ng·g ⁻¹	实测	—
C _v	蔬菜中 PCBs 含量	ng·g ⁻¹	实测	—

1) “—”表示无数据或无对应文献

计算公式如下.

经口吸入土壤:

$$\text{ADD}_{\text{oral}} (\text{LADD}_{\text{oral}}) = \frac{C_s \times \text{IR}_s \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AT}(\text{LT})} \times \text{ABS}_o \times 10^{-6}$$

经皮肤接触土壤:

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} (\text{LADD}_{\text{dermal}}) =$$

$$\frac{C_s \times \text{SA} \times \text{ABS}_d \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{EV} \times \text{AF}}{\text{BW} \times \text{AT}(\text{LT})} \times 10^{-6}$$

经呼吸吸入土壤:

$$\text{ADD}_{\text{inh}} (\text{LADD}_{\text{inh}}) = \frac{C_s \times \text{IR}_i \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}(\text{LT}) \times \text{PET}}$$

经膳食 (口) 摄入蔬菜:

$$\text{ADD}_{\text{int}} (\text{LADD}_{\text{int}}) = \frac{C_v \times \text{IR}_v \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}(\text{LT})} \times 10^{-3}$$

1.5.3.2 风险表征

非致癌风险可用危害商 (hazard quotient, HQ) 表示, 目前公认的可接受 HQ 为 1, 无量纲; 致癌风险 (cancer risk, CR) 可以预测癌症的发生概率, 目前国际公认的最大可接受致癌风险水平为 1×10^{-6} .

计算公式如下:

$$HQ = ADD / (RfD \times SAF)$$

$$CR = LADD \times SF$$

查询成人和儿童当年蔬菜的日均摄入量 (IR_v), 单位为 $g \cdot d^{-1}$, 可估计中国成人蔬菜的 IR_v , 分别为: 油麦菜 $55.0 g \cdot d^{-1}$ 、四季豆 $3.7 g \cdot d^{-1}$ 和圆白菜 $126.5 g \cdot d^{-1}$; 儿童油麦菜 IR_v 为 $32.3 g \cdot d^{-1}$ 、四季豆 $2.2 g \cdot d^{-1}$ 和圆白菜 $74.4 g \cdot d^{-1}$ [20,26,27]; IR_v 无成人男、女之分, 故以成人的 IR_v 进行替代.

2 结果与讨论

2.1 废渣-土壤-蔬菜系统中 PCBs 污染特征

2.1.1 废渣-土壤-蔬菜系统中总 PCBs 水平

废渣、土壤和蔬菜中总 PCBs 水平如表 2 所示. 废渣中 ω (总 PCBs) 为 $11\,938 ng \cdot g^{-1}$ ($8\,363 \sim 15\,159 ng \cdot g^{-1}$, 以 dw 计, 下同), 均值低于路风辉等 [28] 研究电子垃圾废渣中 ω (总 PCBs) $41\,200 ng \cdot g^{-1}$. 一方面, 可能由于两地电子垃圾拆解类型不同, 电子垃圾本身 PCBs 含量不同; 另一方面, 由于本研究区域是已废弃的电子垃圾拆解地, 拆解活动已终止, 废渣中 PCBs 经挥发等物理性过程, 导致其含量较小. 土壤

中 ω (总 PCBs) 为 $45.54 ng \cdot g^{-1}$ ($6.96 \sim 296.90 ng \cdot g^{-1}$), 我国目前无农用地土壤标准限值, 但高于中国表层土壤背景值 ($0.138 \sim 1.84 ng \cdot g^{-1}$) [29], 低于加拿大制定的农业用地土壤 ω (PCBs) 的指导值 ($500 ng \cdot g^{-1}$) [30]; 土壤中 ω (PCBs) 空间范围变异较大, 靠近废渣堆放一侧含量明显高于其他区域. 本研究废渣中 ω (总 PCBs) 均值为土壤中的 262 倍. 蔬菜合计 ω (总 PCBs) 为 $11.51 ng \cdot g^{-1}$ ($5.64 \sim 16.42 ng \cdot g^{-1}$), 低于文献 [31,32] 中蔬菜的 PCBs 水平. 不同蔬菜 ω (总 PCBs) 排序: 油麦菜 > 四季豆 > 圆白菜, 差异具有统计学意义 ($P < 0.05$), 提示不同蔬菜积累 PCBs 存在差异性, 与 Voutsas 等 [33] 的研究结果一致. 土壤中 ω (总 PCBs) 均值约为蔬菜合计的 3.96 倍, 分别为油麦菜、四季豆和圆白菜的 5.40、18.98 和 66.97 倍.

蔬菜对土壤中 PCBs 的富集能力较小, 接近于 0, 生物-沉积物/土壤富集因子大小排序: 油麦菜 (0.18) > 四季豆 (0.05) > 圆白菜 (0.01), 与李艳等 [34] 的研究发现部分蔬菜对土壤中 PCBs 的生物-沉积物/土壤富集因子值相似. 土壤总 PCBs 水平与油麦菜、四季豆和圆白菜总 PCBs 水平无相关性 ($P > 0.05$), 目前土壤与蔬菜中 PCBs 水平的相关性研究出现一定的分歧 [32,35], 本研究土壤中 PCBs 含量较小, 将很难促进地上部分蔬菜对 PCBs 的吸收 [35] 或相比于根系吸收, 大气沉降可能是地上部分蔬菜吸收 PCBs 更重要的途径.

表 2 废渣、土壤和蔬菜中总 PCBs 水平与其他文献案例对比/ $ng \cdot g^{-1}$

Table 2 Comparison of total PCBs in waste residue, soil, and vegetables with other literature cases/ $ng \cdot g^{-1}$

样品	Min ~ Max	$\bar{X}$	Median	SD	文献
本研究废渣	8 363 ~ 15 159	11 938	12 292	3 412	—
电子垃圾废渣	150 ~ 196 000	41 200	—	—	[28]
电子垃圾焚烧废渣	2 800 ~ 370 600	99 300	—	—	[28]
本研究土壤	6.96 ~ 296.9	45.54	15.38	89.32	—
台州市	0.779 ~ 937	75.7	—	—	[36]
浙江某地	6.78 ~ 15.48	—	—	—	[37]
太原市	16.88 ~ 256.04	87.29	—	75.86	[38]
本研究蔬菜合计	5.64 ~ 16.42	11.51	—	—	—
油麦菜*#	4.11 ~ 12.27	8.43	8.74	3.47	—
四季豆*#	1.09 ~ 3.26	2.40	2.77	1.00	—
圆白菜*#	0.44 ~ 0.89	0.68	0.66	0.15	—
芥菜和莴苣叶等	52.9 ~ 190	108	—	—	[32]
蔬菜合计	1.32 ~ 1981	432.6	—	—	[31]

1) * 表示土壤与油麦菜、四季豆和圆白菜比较差异具有统计学意义; # 表示油麦菜、四季豆和圆白菜间比较差异具有统计学意义; “—”表示无数据或无对应文献

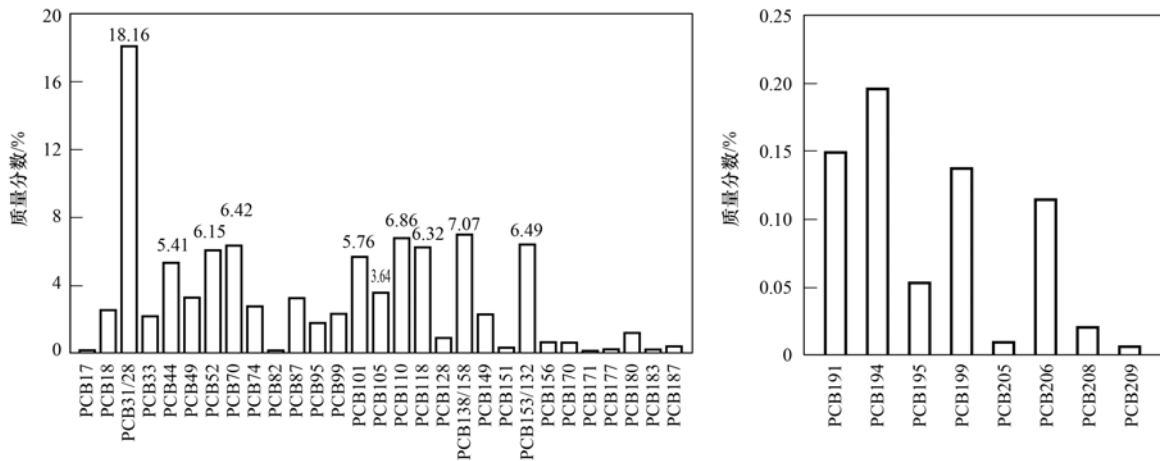
2.1.2 废渣-土壤-蔬菜系统中 PCBs 同系物分布

图 2~4 为废渣、土壤和蔬菜中 PCBs 同系物质量分数分布. 废渣中共检出 37 种同系物, 检出率均为 100%, 以同系物 PCB31/28 质量分数占比最高, 其次是 PCB138/158 和 PCB110; 土壤中检出与废渣

完全相同的 37 种同系物, 检出率均为 100%, 以同系物 PCB138/158 质量分数占比最高, 其次是 PCB153/132 和 PCB118. 与废渣不同的是, PCB31/28 在土壤含量与占比相对较低, 可能是生物利用度对土壤含量的影响或与其本身的物理性质有关,

如环境中 PCB31/28 可能受到较低的辛醇-空气分配系数(K_{OA})值和较高的蒸气压影响易存在于气相中,较强的挥发性,导致与沉积粒子联系更小^[35,39]. 蔬菜中共检出 33 种 PCBs 同系物,检出率在 16.67%~100% 不等,均在废渣、土壤检出的 37 种

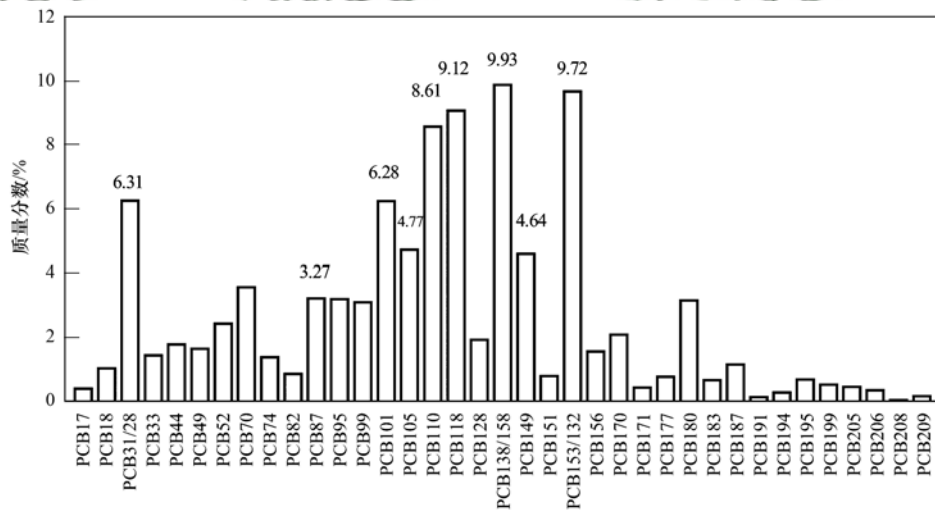
同系物内. 蔬菜合计中以同系物 PCB31/28 质量分数占比最高,与废渣相同,其次是 PCB33 和 PCB52,其中不同蔬菜中也均以同系物 PCB31/28 质量分数占比最高,但由于不同蔬菜的差异性,不同蔬菜间 PCBs 同系物分布模式不同.



柱子上数字为 PCBs 同系物前 10 位的质量分数(%)

图 2 废渣中 PCBs 同系物质量分数分布

Fig. 2 Distribution of mass fraction of PCBs homologues in waste residue



柱子上数字为 PCBs 同系物前 10 位的质量分数(%)

图 3 土壤中 PCBs 同系物质量分数分布

Fig. 3 Distribution of mass fraction of PCBs homologues in soil

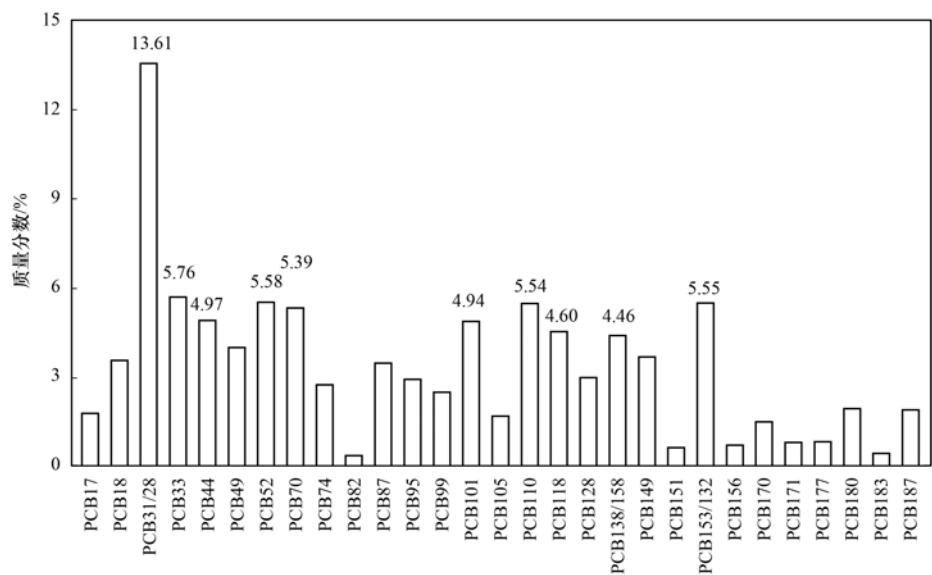
2.1.3 土壤与蔬菜中指示性与类二噁英 PCBs 同系物相关性

因检出 PCBs 同系物种类较多,本研究采用能够反映 PCBs 污染状况的 7 种指示性同系物 (PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153 和 PCB180)^[40] 和 12 种类似于二噁英、毒性较高的 PCBs 同系物 (PCB77、PCB81、PCB126、PCB169、PCB105、PCB114、PCB118、PCB123、PCB156、PCB157、PCB167 和 PCB189)^[41], 分析土壤与蔬菜样品中 PCBs 同系物的相关性. 如表 3 所

示,土壤与油麦菜和四季豆中指示性与类二噁英 PCBs 均无相关性($P > 0.05$),与圆白菜中部分同系物呈现相关性($P < 0.05$),提示蔬菜可能从土壤中吸收并积累一定的 PCBs,但也不排除其他吸收途径.

2.1.4 废渣-土壤-蔬菜系统中 PCBs 氯代数分布

图 5 为废渣、土壤和蔬菜中 PCBs 氯代数分布,从中可知,废渣中 PCBs 氯代数从三到十不等,以五氯联苯为主,三氯联苯~五氯联苯的质量分数占比达到 77.92%,废渣中 PCBs 氯代数主要分布在低氯



柱子上数字为 PCBs 同系物前 10 位的质量分数(%)

图 4 蔬菜中 PCBs 同系物质量分数分布

Fig. 4 Distribution of mass fraction of PCBs homologues in vegetables

表 3 土壤与蔬菜间指示性与类二噁英 PCBs 同系物相关性(r_s)

Table 3 Indicators and dioxin-like PCBs homologues of correlation between soil and vegetables(r_s)

蔬菜种类	同系物	PCB28	PCB52	PCB101	PCB138	PCB153	PCB180	PCB105	PCB118	PCB156
油麦菜	PCB28	0.257	0.143	0.143	0.657	0.143	0.257	0.200	0.200	0.257
	PCB52	0.257	0.143	0.143	0.657	0.143	0.257	0.200	0.200	0.257
	PCB101	0.086	-0.086	-0.086	0.600	-0.086	0.086	0.029	0.029	0.086
	PCB138	0.086	-0.086	-0.086	0.600	-0.086	0.086	0.029	0.029	0.086
	PCB153	0.086	-0.086	-0.086	0.600	-0.086	0.086	0.029	0.029	0.086
	PCB180	0.200	0.086	0.086	0.600	0.086	0.200	0.257	0.257	0.200
	PCB105	0.371	0.257	0.257	0.771	0.257	0.371	0.314	0.314	0.371
	PCB118	0.143	-0.029	-0.029	0.657	-0.029	0.143	0.086	0.086	0.143
	PCB156	0.086	-0.086	-0.086	0.600	-0.086	0.086	0.143	0.143	0.086
四季豆	PCB28	0.143	0.029	0.029	0.371	0.029	0.143	0.029	0.029	0.143
	PCB52	0.143	0.029	0.029	0.371	0.029	0.143	0.029	0.029	0.143
	PCB101	-0.200	-0.371	-0.371	0.086	-0.371	-0.200	-0.371	-0.371	-0.200
	PCB138	-0.086	-0.200	-0.200	0.029	-0.200	-0.086	-0.314	-0.314	-0.086
	PCB153	-0.200	-0.371	-0.371	0.086	-0.371	-0.200	-0.371	-0.371	-0.200
	PCB180	-0.577	-0.698	-0.698	-0.273	-0.698	-0.577	-0.759	-0.759	-0.577
	PCB105	-0.086	-0.200	-0.200	0.029	-0.200	-0.086	-0.314	-0.314	-0.086
	PCB118	-0.086	-0.200	-0.200	0.029	-0.200	-0.086	-0.314	-0.314	-0.086
	PCB156	-0.086	-0.257	-0.257	0.257	-0.257	-0.086	-0.314	-0.314	-0.086
圆白菜	PCB28	0.657	0.600	0.600	0.714	0.600	—	0.829 *	0.829 *	—
	PCB52	0.600	0.486	0.486	0.829 *	0.486	—	0.714	0.714	—
	PCB101	0.714	0.600	0.600	0.657	0.600	—	0.886 *	0.886 *	—
	PCB138	0.714	0.600	0.600	0.943 **	0.600	—	0.600	0.600	—
	PCB153	0.899 *	0.812 *	0.812 *	0.928 **	0.812 *	—	0.754	0.754	—
	PCB180	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	PCB105	0.203	-0.058	-0.058	0.580	-0.058	—	0.058	0.058	—
	PCB118	0.714	0.600	0.600	0.657	0.600	—	0.886 *	0.886 *	—
	PCB156	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; “—”表示无数据

联苯,高氯联苯较少,呈现出随氯代数增加,占比出现下降的趋势.土壤中以五氯联苯质量分数占比最多,三氯联苯~五氯联苯占比 59.73%,低于废渣中的占比,可能与部分低氯代 PCBs 同系物挥发性较强,更易存在于气相中有关;土壤中氯代数分布趋势总体上与废渣相同.蔬菜中(油麦菜、四季豆和圆白菜)氯代数分布主要集中在低氯联苯,以三氯联苯~五氯联苯为主,质量分数占比 73.96%

(71.08%、82.09% 和 81.04%),与废渣中氯代数分布趋势相同. Khan 等^[14]的研究发现低分子量有机污染物的溶解度更高,在蔬菜的芽和根中占主导地位,与本研究的结果一致;蔬菜中低氯联苯与高氯联苯之所以分布差距明显,可能与高氯代 PCBs 进入蔬菜能更快地通过微生物作用分解为低氯代 PCBs 或者高氯代 PCBs 迁移能力较弱,导致在蔬菜中沉积较少有关^[42].

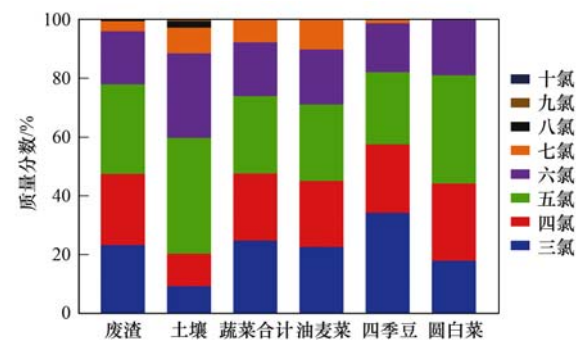


图5 废渣、土壤和蔬菜中 PCBs 氯代数分布
Fig. 5 Algebraic distribution of chlorine in PCBs
in waste residue, soil, and vegetables

表4 人群暴露土壤 PCBs 的健康风险评估

Table 4 Health risk assessment of population exposed to soil PCBs

暴露途径	人群	ADD	LADD	HQ	CR	不同暴露途径贡献比/%
经口摄入	成人	3.76×10^{-8}	1.61×10^{-8}	9.39×10^{-3}	3.22×10^{-8}	49.91
	男性	3.50×10^{-8}	1.50×10^{-8}	8.76×10^{-3}	3.00×10^{-8}	48.39
	女性	4.01×10^{-8}	1.72×10^{-8}	10.02×10^{-3}	3.44×10^{-8}	51.52
	儿童	1.87×10^{-7}	2.14×10^{-8}	46.72×10^{-3}	4.27×10^{-8}	52.14
经皮肤接触	成人	3.77×10^{-8}	1.62×10^{-8}	9.43×10^{-3}	3.23×10^{-8}	50.08
	男性	3.74×10^{-8}	1.60×10^{-8}	9.34×10^{-3}	3.20×10^{-8}	51.60
	女性	3.77×10^{-8}	1.62×10^{-8}	9.43×10^{-3}	3.23×10^{-8}	48.47
	儿童	1.72×10^{-7}	1.96×10^{-8}	42.89×10^{-3}	3.92×10^{-8}	47.86
经呼吸吸入	成人	8.94×10^{-12}	3.83×10^{-12}	2.23×10^{-6}	8.43×10^{-12}	0.01
	男性	9.55×10^{-12}	4.09×10^{-12}	2.39×10^{-6}	9.01×10^{-12}	0.01
	女性	8.81×10^{-12}	3.77×10^{-12}	2.20×10^{-6}	8.30×10^{-12}	0.01
	儿童	1.35×10^{-11}	1.54×10^{-12}	3.38×10^{-6}	3.40×10^{-12}	0.00
合计暴露	成人	7.53×10^{-8}	3.23×10^{-8}	1.88×10^{-2}	6.45×10^{-8}	—
	男性	7.24×10^{-8}	3.10×10^{-8}	1.81×10^{-2}	6.20×10^{-8}	—
	女性	7.78×10^{-8}	3.33×10^{-8}	1.94×10^{-2}	6.67×10^{-8}	—
	儿童	3.58×10^{-7}	4.10×10^{-8}	8.96×10^{-2}	8.19×10^{-8}	—

2.2.2 人群暴露蔬菜 PCBs 的健康风险评估

表5 为人群暴露蔬菜中 PCBs 的健康风险评估,可见,不同人群摄入3种蔬菜中 PCBs 的 HQ 均小于规定的危害商1,对人体的非致癌健康风险处于可接受水平;不同人群摄入3种蔬菜中 PCBs 的 CR 均大于 1×10^{-6} ,可知对人体的致癌健康风险处于不可接受水平. 3种蔬菜摄入对成人(男/女)的致癌健康风险高于儿童;男女性别虽有差异,但差异不大. 不同蔬菜摄入对同一人群致癌风险大小为:油麦菜>圆白菜>四季豆,但四季豆对不同人群的致癌健康风险均处于可接受水平,提示当地农田土

2.2 环境健康风险评估

2.2.1 人群暴露土壤 PCBs 的健康风险评估

表4 为人群暴露土壤 PCBs 的健康风险评估,可知成人(男/女)和儿童经口摄入、经皮肤接触和经呼吸吸入土壤中的 PCBs 非致癌健康风险 HQ 分别为 1.88×10^{-2} ($1.81 \times 10^{-2}/1.94 \times 10^{-2}$) 和 8.96×10^{-2} ,均小于1;致癌健康风险 CR 分别为 6.45×10^{-8} ($6.20 \times 10^{-8}/6.67 \times 10^{-8}$) 和 8.19×10^{-8} ,均小于 1×10^{-6} ,提示不同人群经3种途径暴露于土壤中的 PCBs 非致癌和致癌健康风险均处于可接受水平. 但不同人群经土壤3种途径暴露 PCBs 的 HQ/CR 值贡献程度存在差别,表现为成人(男/女):经口摄入≈经皮肤接触>经呼吸吸入,儿童:经口摄入>经皮肤接触>经呼吸吸入,与鲁垠涛^[18]和张婧雯等^[38]的研究结果一致. 儿童经口摄入略微高于经皮肤接触,可能是儿童处于生长发育阶段,通过手-口接触(玩土、玩具上的残留)土壤机会较多. 计算的 HQ/CR 值儿童高于成人(男/女),男女性别略有差异,但差别不大.

地可以倾向性地种植对人体致癌健康风险较低的蔬菜或停止种植致癌健康风险较高的蔬菜;在膳食摄入方面,当地人群也可适当减少油麦菜和圆白菜的摄入.

2.2.3 人群暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的总健康风险评估

成人(男/女)和儿童暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的总 HQ 分别为 0.480 (0.448/0.511) 和 0.864,均小于1,提示不同人群暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的总非致癌健康风险处于可接受水平;成人(男/女)和儿童暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的总 CR 分别为7.96

表 5 人群暴露蔬菜 PCBs 的健康风险评估

Table 5 Health risk assessment of population exposed to vegetable PCBs						
蔬菜种类	人群	ADD	LADD	HQ	CR	不同蔬菜贡献比/%
油麦菜	成人	7.65×10^{-6}	3.28×10^{-6}	0.383	6.56×10^{-6}	83.01
	男性	7.13×10^{-6}	3.06×10^{-6}	0.357	6.11×10^{-6}	83.01
	女性	8.16×10^{-6}	3.50×10^{-6}	0.408	7.00×10^{-6}	83.01
	儿童	1.28×10^{-5}	1.47×10^{-6}	0.642	2.94×10^{-6}	82.97
四季豆	成人	1.46×10^{-7}	6.28×10^{-8}	0.007	1.26×10^{-7}	1.59
	男性	1.37×10^{-7}	5.85×10^{-8}	0.007	1.17×10^{-7}	1.59
	女性	1.56×10^{-7}	6.70×10^{-8}	0.008	1.34×10^{-7}	1.59
	儿童	2.49×10^{-7}	2.85×10^{-8}	0.012	5.69×10^{-8}	1.61
圆白菜	成人	1.42×10^{-6}	6.08×10^{-7}	0.071	1.22×10^{-6}	15.40
	男性	1.32×10^{-6}	5.67×10^{-7}	0.066	1.13×10^{-6}	15.40
	女性	1.51×10^{-6}	6.49×10^{-7}	0.076	1.30×10^{-6}	15.40
	儿童	2.39×10^{-6}	2.73×10^{-7}	0.119	5.45×10^{-7}	15.42
合计暴露	成人	9.22×10^{-6}	3.95×10^{-6}	0.461	7.90×10^{-6}	—
	男性	8.59×10^{-6}	3.68×10^{-6}	0.430	7.36×10^{-6}	—
	女性	9.83×10^{-6}	4.21×10^{-6}	0.492	8.43×10^{-6}	—
	儿童	1.55×10^{-5}	1.77×10^{-6}	0.774	3.54×10^{-6}	—

$\times 10^{-6}$ ($7.43 \times 10^{-6}/8.50 \times 10^{-6}$) 和 3.62×10^{-6} , 均超过最大致癌风险水平 1×10^{-6} , 提示不同人群暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的总致癌健康风险处于不可接受水平, 且成人(男/女) > 儿童, 应及时并重点关注, 如图 6 所示。本研究仅评估研究区域土壤和蔬菜中 PCBs 暴露对人体的健康风险, 对于当地主食和脂肪含量较高的食物(鱼和虾等)暴露对人体的健康风险无法评估, 评估内容有限, 会过低估计 PCBs 暴露对人体的健康风险。

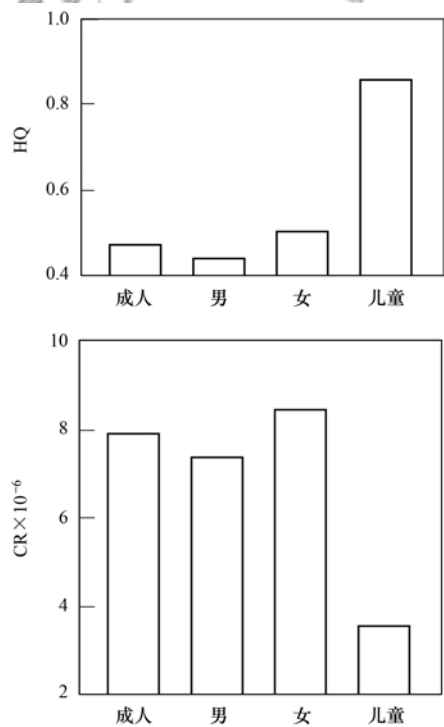


图 6 人群暴露土壤和蔬菜 PCBs 的总非致癌风险与致癌风险
Fig. 6 Total non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of human exposure to soil and vegetable PCBs

3 结论

(1) ω (总 PCBs) 排序: 废渣 ($11\,938\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 土壤 ($45.54\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 蔬菜 ($11.51\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$); 土壤中总 PCBs 水平与油麦菜、四季豆和圆白菜中总 PCBs 水平无相关性 ($P>0.05$); 生物-沉积物/土壤富集因子值排序: 油麦菜 (0.18) > 四季豆 (0.05) > 圆白菜 (0.01)。

(2) 废渣与土壤检出 37 种相同 PCBs 同系物, 蔬菜检出 33 种, 均在废渣和土壤检出同系物之内; 土壤中部分同系物与圆白菜同系物出现相关性 ($P<0.05$)。废渣、土壤和蔬菜中 PCBs 氯代数柱状堆积条图表明, 以三氯联苯~五氯联苯的低氯联苯质量分数占比最多, 分别占比 77.92%、59.73% 和 73.96%, 土壤中占比相对较低, 总体随氯代数增加, 占比呈现下降趋势。

(3) 健康风险评估结果表明, 成人(男/女)和儿童暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的总 HQ 分别为 0.480(0.448/0.511) 和 0.864, 均小于 1, 处于可接受水平; 成人(男/女)和儿童暴露土壤和蔬菜中 PCBs 的总 CR 为 7.96×10^{-6} ($7.43 \times 10^{-6}/8.50 \times 10^{-6}$) 和 3.62×10^{-6} , 均超过了 1×10^{-6} , 处于不可接受水平, 且成人(男/女)的致癌风险高于儿童。

参考文献:

[1] Li J H, Yang J, Liu L L. Development potential of e-waste recycling industry in China[J]. Waste Management & Research: the Journal for A Sustainable Circular Economy, 2015, 33(6): 533-542.
[2] Olatunji O S. Evaluation of selected polychlorinated biphenyls (PCBs) congeners and dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) in fresh root and leafy vegetables using GC-MS[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1), doi: 10.1038/s41598-018-36996-8.

- [3] 王薛平, 黄星, 毕春娟, 等. 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2121-2130.
- Wang X P, Huang X, Bi C J, *et al.* Spatial distribution characteristics and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments and soils from the Dishui Lake and its river system[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2121-2130.
- [4] 朱青青, 刘国瑞, 张宪, 等. 大气中持久性有机污染物的采样技术进展[J]. 生态毒理学报, 2016, **11**(2): 50-60.
- Zhu Q Q, Liu G R, Zhang X, *et al.* Progress on the sampling techniques of persistent organic pollutants in atmosphere[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(2): 50-60.
- [5] Harrad S J, Sewart A P, Alcock R, *et al.* Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the British environment: sinks, sources and temporal trends[J]. *Environmental Pollution*, 1994, **85**(2): 131-146.
- [6] Navarro I, De La Torre A, Sanz P, *et al.* Uptake of perfluoroalkyl substances and halogenated flame retardants by crop plants grown in biosolids-amended soils[J]. *Environmental Research*, 2017, **152**: 199-206.
- [7] 李霜, 李朝林, 吴维皓. 多氯联苯与人体健康[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2005, **23**(4): 316-319.
- Li S, Li C L, Wu W A. Polychlorinated and human health[J]. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, 2005, **23**(4): 316-319.
- [8] Zhao G F, Wang Z J, Dong M H, *et al.* PBBs, PBDEs, and PCBs levels in hair of residents around e-waste disassembly sites in Zhejiang Province, China, and their potential sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **397**(1-3): 46-57.
- [9] Bruce-Vanderpuije P, Megson D, Jobst K, *et al.* Background levels of dioxin-like polychlorinated biphenyls (dlPCBs), polychlorinated, polybrominated and mixed halogenated dibenzop-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs, PBDD/Fs & PXDD/Fs) in sera of pregnant women in Accra, Ghana[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **673**: 631-642.
- [10] Zheng J, Yu L H, Chen S J, *et al.* Polychlorinated biphenyls (PCBs) in human hair and serum from e-waste recycling workers in Southern China: concentrations, chiral signatures, correlations, and source identification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(3): 1579-1586.
- [11] Ferreira A P, De Fátima Ramos Moreira M. Dioxins and furans in breast milk: a case study of mothers from southern Rio de Janeiro, Brazil[J]. *Cadernos de Saude Publica*, 2015, **31**(5): 1107-1111.
- [12] Xu P W, Lou X M, Ding G Q, *et al.* Association of PCB, PBDE and PCDD/F body burdens with hormone levels for children in an e-waste dismantling area of Zhejiang Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **499**: 55-61.
- [13] Tao S, Xu F L, Wang X J, *et al.* Organochlorine pesticides in agricultural soil and vegetables from Tianjin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(8): 2494-2499.
- [14] Khan S, Lin A J, Zhang S Z, *et al.* Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in lettuce grown in the soils contaminated with long-term wastewater irrigation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(2): 506-515.
- [15] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [16] 美国环境保护署(USEPA)[EB/OL]. <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment>, 2021-02-24.
- [17] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [18] 鲁垠涛, 刘明丽, 刘殷佐, 等. 长江表层土壤多氯联苯污染特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(12): 4617-4624.
- Lu Y T, Liu M L, Liu Y Z, *et al.* Characteristics and health risk assessment of polychlorinated biphenyls in surface soil of the Yangtze River[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4617-4624.
- [19] EPA/600/R-090/O52Fa, Exposure factors handbook[S].
- [20] 段小丽. 中国人群暴露参数手册(儿童卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [21] 王晓峰, 蔡建民, 任丽华, 等. 电子垃圾拆解地区多氯联苯经口暴露健康风险评价[J]. 中国公共卫生, 2015, **31**(6): 734-738.
- Wang X F, Cai J M, Ren L H, *et al.* Health risk assessment of oral exposure to PCBs among residents in an e-waste dismantling area[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2015, **31**(6): 734-738.
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [23] 李成. 固废拆解污染区与修复区蔬菜多氯联苯污染及其健康风险评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. 49.
- Li C. Pollution and health risk assessment of PCBs in vegetables in e-waste recycling pollution area and remediated area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. 49.
- [24] 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 等. 我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5352-5361.
- Mao X X, Li Z X, Song S J, *et al.* Sources and health risks of atmospheric polychlorinated biphenyls in an urban/industrial areas, northwest China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5352-5361.
- [25] 穆熙, 李尧捷, 曹红梅, 等. 中国西部某规模化电子垃圾拆解厂多氯联苯排放污染特征及职业呼吸暴露风险[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(8): 2800-2810.
- Mu X, Li Y J, Cao H M, *et al.* Pollution characteristics and occupational inhalation exposure risks of PCBs in a formal and scaled e-waste dismantling plant, western China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2800-2810.
- [26] 国家统计局. 中国统计年鉴-2016[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2016/indexch.htm>, 2021-03-02.
- [27] 李哲敏. 中国城乡居民食物消费及营养发展研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007. 251-252.
- Li Z M. Study on the development of food consumption and nutrition between urban and rural residents in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. 251-252.
- [28] 路风辉, 陈满英, 陈燕舞, 等. 电子垃圾拆解区氯化石蜡和多氯联苯的分布特征——以广东清远龙塘镇为例[J]. 环境化学, 2015, **34**(7): 1297-1303.
- Lu F H, Chen M Y, Chen Y W, *et al.* Distribution of chlorinated paraffins and polychlorinated biphenyls in e-waste, residues and sediment from e-waste areas of Qingyuan[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(7): 1297-1303.
- [29] Ren N Q, Que M X, Li Y F, *et al.* Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(11): 3871-3876.
- [30] Reyes E S, Liberda E N, Tsuji L J S. Human exposure to soil contaminants in subarctic Ontario, Canada[J]. *International Journal of Circumpolar Health*, 2015, **74**(1), doi: 10.3402/ijch.v74.27357.
- [31] 邓绍坡, 骆永明, 宋静, 等. 典型地区多介质环境中多氯联

- 苯、镉致癌风险评估[J]. 土壤学报, 2011, **48**(4): 731-742.
- Deng S P, Luo Y M, Song J, *et al.* Carcinogenic risk assessment of polychlorinated biphenyls and cadmium in multi-media of a typical area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(4): 731-742.
- [32] Zeng L X, Li N, Shao D D, *et al.* Concentrations, sources, and risk assessment of polychlorinated biphenyls in vegetables near a waste-incinerator site, South China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, **67**(1): 78-86.
- [33] Voutsas D, Samara C. Dietary intake of trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons via vegetables grown in an industrial Greek area[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **218**(2-3): 203-216.
- [34] 李艳, 张蕾, 黄俊雄, 等. 灌溉水质对土壤和蔬菜多氯联苯和内源性雌激素含量影响的试验研究[A]. 见: 北京水问题研究与实践(2018年). 专题资料汇编[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019. 32-38.
- [35] Cui S, Hough R, Fu Q, *et al.* Concentrations and uptake pathways of polychlorinated biphenyls from soil to grass [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **182**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109428.
- [36] 王学彤, 李元成, 张媛, 等. 电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 587-591.
- Wang X T, Li Y C, Zhang Y, *et al.* Characteristics of polychlorinated biphenyls in soils from an electronic waste recycling area[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 587-591.
- [37] 张建英, 李丹峰, 王慧芬, 等. 近电器拆解区土壤-蔬菜多氯联苯污染及其健康风险[J]. 土壤学报, 2009, **46**(3): 434-441.
- Zhang J Y, Li D F, Wang H F, *et al.* The health risk assessment and bioaccumulation of PCBs in soil-vegetables nearby e-waste area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, **46**(3): 434-441.
- [38] 张婧雯, 张红, 刘勇, 等. 太原市农田土壤中多氯联苯污染特征及健康风险[J]. 安徽农业科学, 2017, **45**(35): 96-101.
- Zhang J W, Zhang H, Liu Y, *et al.* Residues characters and health risk assessment of PCBs in agricultural soils of Taiyuan City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, **45**(35): 96-101.
- [39] Li Y F, Harner T, Liu L Y, *et al.* Polychlorinated biphenyls in global air and surface soil: distributions, air-soil exchange, and fractionation effect[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(8): 2784-2790.
- [40] 鲁垠涛, 刘明丽, 王静, 等. 通辽地区农田土壤中多氯联苯分布特征及生态风险评价[J]. 北京交通大学学报, 2017, **41**(4): 62-69, 61.
- Lu Y T, Liu M L, Wang J, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls in farmland soil of Tongliao city[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, **41**(4): 62-69, 61.
- [41] Van Den Berg M, Birnbaum L S, Denison M, *et al.* The 2005 world health organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds [J]. *Toxicological Sciences*, 2006, **93**(2): 223-241.
- [42] 郭军辉, 殷月芬, 郑立, 等. 胶州湾东岸表层沉积物中多氯联苯的分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 965-972.
- Guo J H, Yin Y F, Zheng L, *et al.* The distribution and risk assessment of polychlorinated biphenyl in surface sediments in estuaries of Jiaozhou Bay, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(5): 965-972.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)