

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



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)

2015~2018年我国PM_{2.5}健康损害价值的动态评估 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)

2011~2017年中国PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)

关中地区PM_{2.5}时空演化及人口暴露风险 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)

中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)

西北工业城市冬季PM_{2.5}污染特征及理化性质 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)

基于PMF模型的PM_{2.5}中金属元素污染及来源的区域特征分析 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏(5276)

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)

鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞锋, 许彩琴(5295)

杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)

石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)

厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)

建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)

我国西北工业城市大气多氯联苯来源及健康风险 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)

基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 卓海华, 姜保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)

宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)

梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀(5410)

汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)

山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 王世亮, 曹雪雅(5428)

太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)

岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)

澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)

白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)

生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)

Bi₂MoO₆/Bi₂S₃异质结构催化降解四环素-铜复合物 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)

超滤膜负载UiO-66@Fe₃O₄@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)

盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)

限NH₄⁺和限NO₂⁻厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)

厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)

二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)

中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 赵靛, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)

我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)

晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)

胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)

毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)

1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)

铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)

生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姍, 杨林章(5648)

基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥(5656)

氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N₂O排放的影响 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)

《环境科学》第41卷(2020年)总目录 (5677)

《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评估

叶脉¹, 张景茹^{1*}, 张路路¹, 李朝晖¹, 李兴远², 周永章²

(1. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; 2. 中山大学广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州 510275)

摘要: 为揭示广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险, 选择鼻咽癌高发区四会市农田系统为研究对象, 采集了稻谷和油麦菜样品及对应的土壤样品, 在分析土壤和农作物样品中 As、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Cd 这 7 种重金属含量及化学形态的基础上, 采用统计学分析、污染指数评价法、迁移系数法和健康风险评估法等开展土壤-作物系统重金属的迁移特征及健康风险评估。结果表明, 研究区农田土壤基本清洁 ($P_{\text{综}} = 0.43$); 土壤中 Cd 和 Mn 主要以生物可利用态存在, Hg 主要以潜在可利用态存在, As、Cu、Ni 和 Pb 主要存在于残渣态中。研究区油麦菜基本安全 ($P_{\text{综}} = 0.48$), 稻米污染指数 ($P_{\text{综}} = 7.66$) 高于油麦菜, 主要污染元素为 Pb ($PI = 10.25$)。研究区土壤中 Cd 和 Cu 更容易被油麦菜吸收富集, Cd、Cu 和 As 更容易被稻米吸收富集, 农田土壤重金属污染防治工作应特别关注 Cd 和 Cu 污染, 对于稻田应同时关注 As 的污染。研究区成人和儿童食用油麦菜的非致癌风险指数 (HI) 均小于 1, 总致癌危害指数 (Risk) 均值小于 1×10^{-4} , 食用当地油麦菜的人体健康风险在可接受范围内。当地成人和儿童食用稻米的平均 HI 指数大于 1, 主要非致癌因子为 Pb, 食用稻米的 Risk 指数均高于 1×10^{-4} , 主要致癌因子为 As, 研究区人群食用当地稻米具有一定的健康风险, 且对成人的威胁大于儿童。稻米中的 As 可能与当地鼻咽癌高发有关。

关键词: 鼻咽癌高发区; 重金属; 土壤-作物系统; 迁移系数; 健康风险评估

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5579-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202005053

Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong

YE Mai¹, ZHANG Jing-ru^{1*}, ZHANG Lu-lu¹, LI Zhao-hui¹, LI Xing-yuan², ZHOU Yong-zhang²

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources Exploration, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to reveal the transfer factor and perform health risk assessments of heavy metals in soil-crop systems in the high incidence area of nasopharyngeal carcinoma (NPC) in Guangdong province of China, the farmland system of Sihui City in the high incidence area of NPC was selected as the research object, and rice, lettuce, and corresponding soil samples were collected. As, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, and Cd in the soil and crop samples were analyzed. Based on the contents and chemical forms of seven heavy metals, the environmental pollution, bioavailability, and transfer factors of heavy metals in the soil-crop system were assessed using statistical analyses, pollution index evaluations, and transfer factor methods, and the health risks of adults and children in the study area were assessed using the health risk assessment model recommended by the U. S. Environmental Protection Agency. The results showed that the farmland soil in the study area was basically clean ($P = 0.43$); Cd and Mn mainly existed in a bioavailable state, Hg mainly existed in a potentially available state, and As, Cu, Ni, and Pb mainly existed in a residual state. The lettuce was safe ($P = 0.48$), while the pollution index of rice ($P = 7.66$) was higher than that of lettuce, and the main polluting element was Pb ($PI = 10.25$). The results of soil pollution assessments are not completely consistent with those of crop pollution assessments, so they should be combined with the bioavailability of heavy metals and crop effects for correlation analyses. Cd and Cu are more easily absorbed by lettuce, while Cd, Cu, and As are more easily enriched by rice. Special attention should be paid to Cd and Cu pollution in farmland soils, and As pollution should be of focus in paddy fields. In the study area, the non-carcinogenic risk index (HI) value of edible lettuce for adults and children was less than 1 and the average value of the total carcinogenic risk index (Risk) of edible lettuce was less than 1×10^{-4} . Therefore, the health risk of edible local lettuce was within the acceptable range. The average HI index of rice for adults and children was more than 1 and the main non-carcinogenic factor was Pb; the risk index of rice was more than 1×10^{-4} , and the main carcinogenic factor was As. Rice consumption in the study area will cause certain health risks, and the threat to adults is greater than that to children. Therefore, As in rice may be related to the high incidence of NPC in Sihui City. It is suggested that the remediation of heavy metals in farmland soils be strengthened or that residents be forbidden to plant or eat local rice and other crops with greater health risks.

Key words: high incidence area of nasopharyngeal carcinoma; heavy metals; soil crop system; transfer factor; health risk assessment

收稿日期: 2020-05-07; 修订日期: 2020-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41802251)

作者简介: 叶脉(1980~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境风险管理与环境损害鉴定评估, E-mail: 6109940@qq.com

* 通信作者, E-mail: 419892286@qq.com

随着工业化、城市化进程的加速,人类生产、生活将大量重金属带入土壤,重金属可以在土壤-农作物系统中迁移并富集到农作物(蔬菜和稻米等)中,并通过大气、水体或食物链直接或间接地威胁着食品安全和人体健康^[1~4],环境中很多重金属具有致畸、致癌和致突变的作用^[5].

前人针对矿产开发区、尾矿库、污水灌溉区、冶炼厂、电子废弃物回收厂和典型稻区等土壤-作物系统重金属的污染特征、迁移规律及健康风险评估开展了大量研究^[2,6~11],例如陈洁宜等^[9]分析了广东大宝山废弃采矿场地附近农田的土壤植物体系重金属迁移过程,发现研究区 Cu、Pb 及 Al 等重金属易从土壤中释放并被植物吸收累积. Luo 等^[4]调查了广东省一个电子废弃物处理设施周边稻田和菜地土壤中重金属生物可利用性,发现 Cu、Pb 和 Zn 主要以残渣态存在, Cd 主要以可利用态存在,粗放式的电子垃圾处理作业对当地土壤和蔬菜造成严重污染. 张浩等^[12]研究了尾矿库周边表层土壤和农田蔬菜中重金属污染特征及健康风险,发现尾矿库周边土壤及蔬菜重金属污染对周边生态环境和居民健康生活构成严重威胁. 田美玲等^[13]的研究发现南丹矿业活动区周边稻田土壤和稻米均受重金属严重污染,当地居民通过稻米摄入重金属具有较大的健康风险. 秦越华等^[14]的研究发现食用徐州市典型稻区生产的稻米对人体健康产生较大的影响,尤其是 As 的健康危害突出.

然而,对鼻咽癌高发区的土壤-农作物系统的重金属迁移特征及人群健康风险的研究鲜见报道. 据世界卫生组织统计,全世界 80% 的鼻咽癌发生在中国,其中最高发地区出现在广东四会、佛山和广州这 3 个地区,发病率高达 30/10 万人^[15],因此,鼻咽癌又有“广东癌”之称^[16]. 医学界认为,癌症发病率 80%~90% 是由环境引发的^[17]. 有限的研究指出,国外突尼斯人群血液中的砷和镉水平与鼻咽癌风险相关^[18,19]; 中国饮用水中的镍与鼻咽癌死亡率呈显著正相关^[20]; 四会鼻咽癌高发区地表水、井水中硝酸盐、亚硝酸盐、N-亚硝胺化合物的异常含量与其癌症高发可能有关^[21,22]. 事实上,关于重金属与鼻咽癌的关系,无论是机制研究还是典型案例研究,都相对缺乏. 因而本文选取四会市鼻咽癌高发区开展相关研究,采集区内主要粮食作物稻谷和蔬菜(油麦菜)及其对应的根系土壤,在分析测试土壤、农作物样品中 As、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Cd 等 7 种重金属含量及化学形态的基础上,采用统计学分析、污染指数评价法、迁移系数法和健康风险评估法等开展土壤-作物系统重金属迁移特征和健康风险评估,其结

果将有助于追踪鼻咽癌高发区环境中的致癌因子,通过揭示该区人群健康风险状况,以期相关部门制定鼻咽癌防治方案提供重要的科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省中西部肇庆市四会市,珠江三角洲西北边缘,为平原与山区结合部,西江、北江和绥江下游,面积约 77 km². 位于东经 112°25'25"~112°51'35",北纬 23°11'40"~23°41'42". 四会市地处北回归线以南,属亚热带季风气候,年平均气温 22.3℃,年总日照量 2 225.4 h,年均降雨量 1 832 mm. 全市总面积约 1 252 km². 研究区土壤普遍属砖红壤(即赤红壤)^[23]. 本区土壤可划分为山地黄壤、山地红壤、赤红壤、水稻土、潮沙泥土和菜园土等 6 个土类,农作物主要以水稻和小白菜、油麦菜、菜花和油麦菜等蔬菜为主^[24].

1.2 样品采集

按照中国多目标区域地球化学调查规范^[25]分别采集土壤样品和农作物样品.

1.2.1 土壤样品采集

选择四会市龙江河沿岸河谷地带以及威整、江林镇为研究区,采集土壤样点 68 组,样品采集以均匀布点为原则,同时避开明显的污染源. 土壤样采集深度为 0~20 cm,在采样点 20 m² 范围内采集 5 个子样混合组成一件样品,样品采集重量大约 0.5 kg,采样点见图 1.

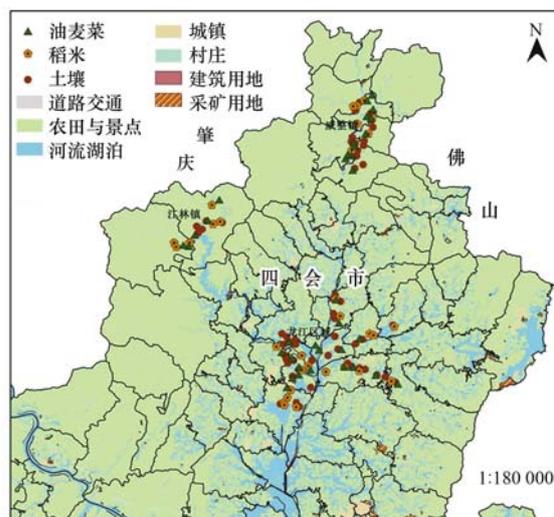


图 1 四会市土壤-农作物对应样点分布示意

Fig. 1 Map of the sampling sites in Sihui

1.2.2 农作物样品采集

采集当地主要农作物:水稻和蔬菜(油麦菜)可食用部分,农作物样品采集点与表土样品采样点基本一一对应,为确保样品的代表性和可比性,样品采

集以大田作物样品为主。采样时避开株体过大过小、遭受病虫害或机械损伤以及田边路旁的植株。样品采集数量视具体品种和大小而定,总鲜重以 0.5 kg 左右为宜,样品采集时将样品放入塑料袋,并将袋口扎紧,防止水分蒸发。按照上述方法和原则共采集稻谷 31 件,蔬菜(油麦菜)样品 35 件,采样点如图 1。

1.3 样品处理与测试

1.3.1 土壤重金属前处理与测试

土壤样品在室内通风处自然风干,剔除其中的植物根系、有机残渣以及可见侵入体,混匀后缩分取样品 200 g,用木棍碾碎并用玛瑙研钵研磨,分别过 60 目和 100 目尼龙筛装袋并写好编号备用^[26]。

土壤样品分析测试指标:As、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Cd,同时测定土壤 pH 值、有机质(OM)含量;土壤重金属元素形态分析包括 As、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Cd 共 7 种元素 7 种形态(水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐植酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机态和残留态)。

土壤重金属总量测试:土壤中各元素分析方法和检出限均按照文献[26]进行。

测定 As 和 Hg 的含量:称取 0.50 g(过 100 目尼龙筛)土样于 50 mL 烧杯中,水润湿,加 20 mL 王水,盖上表面皿,电热板上加热蒸至 5 mL 左右(勿干),取下冷却,吹洗表面皿,加 10 mL 1:1 HCl,移至 50 mL 比色管中,定容至刻度,摇匀。实验过程均加入标准样、平行样和空白样,以确保数据的准确性。采用原子荧光光谱法(北京海光 AFS230)测定。

测定 Cu、Mn、Ni、Pb 和 Cd 的含量:称取 0.50 g(过 100 目尼龙筛)土样,放入聚四氟乙烯坩埚内,用少量去离子水润湿,加盐酸、硝酸、高氯酸混合酸(1+1+1)10 mL,氢氟酸 5 mL,于电热板上加热蒸至高氯酸白烟冒尽,取下,加 5 mL 1:1 HCl,冲洗坩埚壁,电热板上加热至盐类溶解,取下冷却,定容 50 mL 比色管,摇匀。实验过程均加入标准样、平行样和空白样,以确保数据的准确性。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 2000DV, Perkin Elemer, 美国)测定。

1.3.2 农作物重金属前处理与测试

稻米和蔬菜样品分别用自来水反复清洗,去除表面泥土,然后用去离子水反复漂洗,晾干后用不锈钢刀切成小块,于 85℃ 烘 30 min 杀青,60℃ 烘至恒重(大约需 2 d),测定干重。另取部分烘干样品用玛瑙研钵研碎,过 40 目尼龙筛^[26]。

准确称取烘干磨细的农作物样品 0.500 g 于消化灌中,加 2 mL H₂O₂、5 mL HNO₃ 微波消解 30

min,消化液定容至 25 mL 待测。实验过程均加入平行样和空白样,以确保数据的准确性。As 和 Hg 的含量测定采用原子荧光光谱法(北京海光 AFS230);Cu、Mn、Ni、Pb 和 Cd 含量测定采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 2000DV, Perkin Elemer, 美国)。稻米和蔬菜样测定结果通过干重-鲜重的换算关系转换为鲜重含量。

1.3.3 质量控制

所用试剂均为优级纯或分析纯,洗涤和溶液配制水均为高纯水,玻璃等器皿均在 20% 硝酸溶液中浸泡过夜洗净后备用。元素提取进行全程同步试剂空白控制,测试以国家一级标准物质(土壤 GSS-12;植物样 GSV-1,2)和平行样进行质量控制,其结果符合质控要求。

1.4 数据处理

1.4.1 统计分析

应用 SPSS19.0 软件进行常规数理统计;应用 Spearman 相关性分析法评估土壤属性与土壤重金属各化学形态间的相关性以及农作物中重金属与土壤重金属各化学形态间的相关性;应用聚类分析法研究土壤重金属各化学形态与农作物中重金属之间的相似性。

1.4.2 污染指数评价法

应用单因子污染指数法(PI)和内梅罗综合污染指数法对土壤或农作物中的重金属的污染程度进行评价。

(1) 单因子污染指数法 单因子污染指数法评价即对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价。它是目前国内普遍采用的方法之一^[12]。计算公式:

$$PI_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中,PI_i 为土壤或农作物中污染物 i 的环境质量指数,PI_i > 1,表示污染;PI_i ≤ 1,表示未污染;且 PI_i 值越大,则污染越严重。C_i 为土壤或农作物中元素 i 的实测值(mg·kg⁻¹);S_i 为土壤或农作物中污染元素 i 的评价标准(mg·kg⁻¹)。本文土壤重金属污染评价标准采用土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)筛选值^[27];农作物重金属污染评价标准采用 2017 年颁布的食品国家安全标准(GB2762-2017)^[28]。

(2) 综合污染指数法 本文采用目前国内普遍采用的方法:内梅罗污染指数法,它兼顾了单因子污染指数的平均值和最高值,能较全面地反映各污染物对土壤的不同作用,而且可以突出高含量污染物对环境质量的影响。

$$P_{综} = \sqrt{[(C_i/S_i)_{max}^2 + (C_i/S_i)_{ave}^2]/2} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为土壤重金属综合污染指数; $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为土壤污染中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤污染中污染指数的平均值. 污染指数分级标准见表 1.

表 1 土壤分级标准

级别	单因子污染指数	污染等级	综合污染指数	污染等级	污染水平
I	$PI < 1$	清洁	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
II	$1 \leq PI < 2$	轻污染	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级	尚清洁
III	$2 \leq PI < 3$	中污染	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻污染	土壤轻污染, 作物开始受到污染
IV	$PI \geq 3$	重污染	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中污染	土壤作物均受中度污染
V			$P_{\text{综}} > 3$	重污染	土壤作物污染已相当严重

1.4.3 土壤-农作物的迁移系数 (transfer factor, TF)

土壤-农作物的迁移系数反映重金属由土壤向农作物转移的有效指标,也是反映农作物从土壤中吸收重金属的能力以及进一步评估通过食物链重金属对人类暴露量的重要指标^[3].

$$TF = C_{\text{plant}}/C_{\text{soil}} \quad (3)$$

式中,TF 表示迁移系数, C_{plant} 表示农作物中重金属含量, C_{soil} 表示土壤重金属含量^[3].

1.4.4 健康风险评估

本研究选用美国环保署推荐的健康风险评估模型^[29],对食用当地稻米、油麦菜的成人和儿童进行非致癌风险 (As、Cu、Hg、Ni、Pb、Cd) 和致癌风险 (As、Cd、Pb) 评价.

(1) 暴露评估模型 采用以下公式计算人群通过饮食摄入重金属平均每日摄入量^[29]:

$$ADI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

式中,ADI 为单位体重日均摄入量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; C 是特定暴露介质中的重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); IR 是该地区成年人每日的摄入量 ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$),据文献^[24]统计,2018 ~ 2019 年肇庆市人均日稻米消费量约为 0.483 kg,蔬菜消费量约 0.263 kg; EF 是暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$),取值为 $350 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,ED 是暴露持续时间 (a),成人取值为 25 a,儿童为 6 a, BW 是研究区成年人的平均体重 (kg),成人取值为 62 kg,儿童取值为 19.2 kg, AT 是生命期望值,取值为 $70 \text{ a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[29,30].

(2) 非致癌风险评估模型 评价非致癌化学物质对人体健康的危害时,通常假定它存在阈剂量,低于阈剂量时,健康危害不发生,高于阈剂量时,则会有健康危害出现. 单一污染物非致癌危害指数计算公式如下^[29]:

$$HQ = ADI/\text{RfD} \quad (5)$$

式中,RfD 是化学品的慢性参考剂量 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,即 Cu、Pb、Cd、Ni、As 和 Hg 的 RfD 值分别为

0.040、0.004、0.001、0.020、0.0003 和 $0.0003 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[29].

暴露途径累积非致癌危害指数如公式(6)^[29]:

$$HI = \sum HQ_i \quad (6)$$

非致癌危害风险指数描述为人体日摄取总量和参考值的比值,并以“1”作物非致癌风险警戒值,当危害指数大于 1 时,认为存在非致癌健康风险.

(3) 致癌风险评估 致癌风险是通过计算个体一生中因接触潜在致癌物而罹患癌症的概率来估计的^[29],计算公式如下:

$$\text{Risk} = \text{ADI} \times \text{SF} \quad (7)$$

式中,Risk 是个体一生中患癌的概率,SF 是癌症斜率因子 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]^[29],食物摄入 As、Cd 和 Pb 的致癌斜率因子分别为 1.5、0.003 8 和 0.008 5. Risk 超过 1×10^{-4} 的风险被视为不可接受,低于 1×10^{-6} 的风险不会对健康造成重大影响, 1×10^{-4} 和 1×10^{-6} 之间的风险通常被认为是可接受的范围,取决于实际情况和周围环境^[29].

2 结果与讨论

2.1 土壤-农作物系统重金属含量、形态分析与迁移特征

2.1.1 土壤属性与重金属含量及污染评价

研究区土壤属性 (pH 值和 OM) 和重金属含量见表 2, pH 值平均值为 5.87 (3.35 ~ 8.83), 其中 90% 的土壤样点 pH < 7, 仅有一个样点 pH > 8, 研究区土壤总体偏酸性, 极个别样点呈弱碱性, 导致土壤 pH 变异较大的因素, 可能是研究区土地利用和田间管理不同, 施肥不平衡也会造成土壤 pH 值的变化, 如长期大量偏施氮肥造成土壤 pH 值持续下降, 施用有机肥可降低土壤酸化^[31]. 有机质含量 (质量分数) 平均值为 1.31% (0.12% ~ 3.54%). 从表 2 可见, 土壤中 Mn 含量最高, 平均值为 $386 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (148 ~ 825 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这主要与其在地壳的丰度有关. 其他重金属含量依次为 Pb [(31.2 ± 10.8) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] > Cu [(16.6 ± 8.52) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] > Ni

$[(14.7 \pm 7.96) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}] > \text{As} [(12.0 \pm 10.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}] > \text{Hg} [(0.13 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}] > \text{Cd} [(0.12 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$. 与广东省土壤元素背景值相比(表 2), 其中 7 种元素超标率分别为 52.9%、41.2%、82.4%、79.4%、44.1%、30.9% 和 73.5%, 而且 As、Hg、Mn、Ni 和 Cd 的平均含量高于广东省背景值, 可见研究区农田土壤重金属总量已出现严重累积的现象, 其中 Hg、Mn 和 Cd 较其他元素更为

富集.

以土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)^[27] 为评价标准, Hg、Cu 和 Cd 这 3 种元素均仅有 1 个样点超过风险筛选值, 均没有超过风险管制值, As、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Cd 这 6 种元素的单因子污染指数均值均小于 1, 污染等级为清洁, 6 种元素内梅罗综合污染指数均值为 0.43, 属于清洁级别, 整体上研究区农田土壤清洁.

表 2 土壤属性及重金属总量描述性统计 ($n=68$, 干重)

Table 2 Descriptive statistics of selected physico-chemical properties and heavy metal contents in soils ($n=68$, dry weight)

项目	最小值	最大值	算数 平均值	几何 平均值	标准差	广东省 背景值	风险 筛选值 ^[27]	风险 管制值	超过背景值 比例/%	超过筛选值 比例/%	超过管制值 比例/%	PI
pH	3.35	8.83	5.87	5.81	0.89	/	/	/	/	/	/	/
OM/%	0.12	3.54	1.31	1.13	0.67	/	/	/	/	/	/	/
As/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.3	83.1	12.0	9.9	10.60	8.90	40	150	52.9	1.47	0.0	0.30
Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	4.6	62.3	16.6	15.1	8.52	17.0	50	/	41.2	1.47	/	0.33
Hg/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.03	0.35	0.13	0.11	0.07	0.08	1.8	2.5	66.2	0.0	0.0	0.07
Mn/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	148	825	386	361	141	279	/	/	79.4	/	/	/
Ni/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	4.8	61.7	14.7	13.2	7.96	14.4	70	/	44.1	0.0	/	0.21
Pb/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	13.3	71.3	31.2	29.4	10.8	36.0	90	500	30.9	0.0	0.0	0.35
Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.03	0.38	0.12	0.11	0.04	0.097	0.3	2.0	73.5	1.47	0	0.42
$P_{\text{总}}$	0.13	1.51	0.43	0.39	0.13	/	/	/	/	/	/	/

1) “/” 表示无数据, 下同

2.1.2 土壤中重金属形态分析

重金属化学形态分析能够提供重金属的来源、存在形式以及生物可利用性的信息^[32]. 土壤重金属形态分级方法按照文献[26]中提出的 7 步法, 即: 水溶态(F_1)、离子交换态(F_2)、碳酸盐结合态(F_3)、腐植酸结合态(F_4)、铁锰氧化物结合态(F_5)、强有机质结合态(F_6)和残渣态(F_7)^[26]. 其中重金属元素的 F_1 、 F_2 和 F_3 为生物可利用态, 最容易被植被吸收; F_4 、 F_5 和 F_6 是潜在可利用态, 只有在较强的酸性介质及适当的环境条件下才可以转化为生物可利用态; F_7 即残渣态, 被认为是不可利用态^[32]. 一般来说, 重金属在未被污染的土壤中主要以不可利用态存在, 而在污染的土壤中重金属多与可利用态和潜在可利用态结合, 更易于迁移富集到植物体中^[32].

本研究中, 农田土壤中重金属形态分布如表 3 所示, 研究区土壤中 Cd 主要以生物可利用态存在(56.87%), 其次是 Mn (47.2%), Hg 的生物可利用态组分较低, 仅占 1.66%, 主要以潜在可利用态存在(62.3%). As、Cu、Ni 和 Pb 主要存在于残渣态中(F_7), 分别占比 74.0%、54.8%、74.2% 和 53.4%. 前人认为自然来源的重金属残渣态比例极高^[3], 表明研究区土壤 As、Cu、Ni 和 Pb 等重金属主要来源于地质作用母岩的自然风化过程. 由此可见, As、Cu、Ni 和 Pb 的生物活性较低, Hg 的生物活性一般

也较其他元素低, 而 Cd 的生物活性一般较其他元素高. 这与马宏宏等^[10]对广西碳酸盐岩区农田土壤的研究结果相似.

将可利用态和潜在可利用态加和, 研究区土壤中重金属元素最易于迁移的顺序为 Cd (88.2%) > Hg (64%) > Mn (61.5%) > Pb (46.6%) > Cu (45.2%) > As (36.0%) > Ni (35.8%). Mn 的总含量($386 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和潜在生物可利用态占比均较高, 表明 Mn 元素更易于富集在农作物中. 尽管 Cd 和 Hg 的可利用态和潜在可利用态比例最高, 但由于土壤中 Cd 和 Hg 的总含量较低(分别为 0.12 和 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 土壤 Cd 和 Hg 迁移到农作物的污染风险较低. 可见, 在对土壤进行污染评价时, 不仅要考虑重金属的总量, 重金属的生物可利用性亦不可忽视.

2.1.3 农作物中重金属的含量及污染评价

研究区农作物(油麦菜和稻米)中可食用部分重金属含量如表 4 可见. 稻米中重金属含量显著高于油麦菜中重金属含量, 油麦菜和稻米中 Mn 和 Cu 含量显著高于其他 5 种重金属元素, 这是由于 Mn 和 Cu 是植物生长的必需元素^[33], 也与前面述及的 Mn 主要以生物可以利用态存在这一结论相吻合. 鉴于食品安全国家标准(GB 2762-2017)未给出稻米和蔬菜中 Cu、Mn 和 Ni 等 3 种元素的限量标准, 因此本研究仅对农作物中 As、Hg、Pb 和 Cd 元素的污

表 3 土壤重金属形态分布 ($n=68$, 干重)Table 3 Metal concentrations in the sequential extraction fractions of soil samples ($n=68$, dry weight)

重金属	水溶态 (F_1)		离子交换态 (F_2)		碳酸盐结合态 (F_3)		腐植酸结合态 (F_4)	
	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	质量分数/%						
As	0.03 ± 0.01	0.35	0.01 ± 0.00	0.12	0.06 ± 0.02	0.70	1.31 ± 1.31	15.2
Cu	0.06 ± 0.04	0.35	0.22 ± 0.23	1.17	0.81 ± 5.36	4.42	3.32 ± 7.28	18.0
Hg	0.000 82 ± 0.000 12	0.65	0.000 58 ± 0.000 18	0.46	0.000 68 ± 0.000 07	0.54	0.005 63 ± 0.003 69	4.49
Mn	5.94 ± 5.42	1.71	128 ± 55.3	36.8	36.0 ± 36.6	10.4	10.2 ± 11.1	2.93
Ni	0.03 ± 0.04	0.21	0.55 ± 0.34	3.80	0.54 ± 0.36	3.76	0.45 ± 0.30	3.13
Pb	0.01 ± 0.01	0.02	1.04 ± 1.87	3.05	3.53 ± 2.79	10.2	2.47 ± 1.30	7.13
Cd	0.002 ± 0.001	1.47	0.044 ± 0.027	32.5	0.031 ± 0.018	22.9	0.018 ± 0.008	13.4
重金属	铁锰氧化物结合态 (F_5)		强有机质结合态 (F_6)		残渣态 (F_7)			
	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	质量分数/%						
As	0.77 ± 0.54	8.93	0.06 ± 0.05	0.70	6.38 ± 4.33	74.0		
Cu	3.08 ± 6.08	16.7	0.84 ± 0.83	4.56	10.1 ± 5.23	54.8		
Hg	0.001 32 ± 0.001 45	1.05	0.071 2 ± 0.053 1	56.8	0.045 2 ± 0.051 2	36.0		
Mn	26.9 ± 24.2	7.74	6.54 ± 5.38	1.88	134 ± 82.8	38.5		
Ni	1.16 ± 0.71	8.07	0.54 ± 0.31	3.76	11.1 ± 8.11	74.2		
Pb	8.48 ± 4.02	24.5	0.59 ± 0.32	1.7	18.5 ± 7.78	53.4		
Cd	0.018 ± 0.009	13.2	0.008 ± 0.002	6.00	0.016 ± 0.006	11.8		

1) 含量表述为平均值 ± SD

表 4 农作物中重金属含量 (鲜重) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 4 Heavy metal contents in vegetables and rice (fresh weight) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

种类	元素	最小值	最大值	算术平均值	几何平均值	标准差	食品安全标准	超标比例/%	PI
油麦菜 ($n=35$)	As	0.01	0.19	0.04	0.03	0.05	0.5	0	0.09
	Cu	0.29	1.28	0.52	0.50	0.18	/	/	/
	Hg	0.000 40	0.001 83	0.000 94	0.000 90	0.000 27	0.01	0	0.09
	Mn	0.84	27.17	5.03	3.41	5.97	/	/	/
	Ni	0.06	0.27	0.12	0.12	0.04	/	/	/
	Pb	0.09	0.43	0.20	0.18	0.08	0.3	14.3	0.65
	Cd	0.004	0.04	0.02	0.02	0.01	0.2	0	0.09
$P_{\text{综}}$	0.21	1.06	0.48	0.45	0.15				
稻米 ($n=31$)	As	0.05	0.20	0.09	0.08	0.04	0.2	0	0.45
	Cu	1.71	3.60	2.53	2.49	0.50	/	/	/
	Hg	0.001 31	0.018 33	0.003 32	0.002 53	0.003 38	0.02	0	0.17
	Mn	5.59	24.35	10.04	9.63	3.36	/	/	/
	Ni	0.08	0.77	0.26	0.20	0.21	/	/	/
	Pb	0.03	26.09	2.05	0.52	4.67	0.2	64.5	10.25
	Cd	0.041	1.17	0.18	0.14	0.20	0.2	29.0	0.91
$P_{\text{综}}$	0.28	95.4	7.66	2.63	7.99	/	/	/	

染状况进行评价。与食品安全国家标准 GB 2762-2017^[28]相比,油麦菜中超标元素主要为 Pb,超标率为 14.3%,明显高于土壤中 Pb 的超标率。油麦菜中 As、Hg、Pb 和 Cd 的单因子污染指数均值都小于 1,与前面重金属的形态分析结果相符合,内梅罗综合污染指数均值为 0.48,总体来说,研究区油麦菜基本安全。稻米中超标元素主要为 Pb 和 Cd,超标率分别为 64.5% 和 29%,亦显著高于土壤中两种元素的超标率。稻米中 Pb 的平均单因子污染指数均值为 10.25,其他几种重金属元素的单因子污染指数均值都小于 1,稻米内梅罗综合污染指数均值为 7.66,稻米污染指数高于油麦菜,受到一定程度的污染,主要污染元素是 Pb (PI = 10.25)。

四会市是一个农业城市,工业发展程度较低,采样点周边未见明显工矿企业或遗留工业企业,结合重金属形态分析结果,土壤中 Pb 主要以残渣态存在,来源于地质作用母岩的自然风化过程,不易于迁移富集到农作物中。而研究区稻米 Pb 污染程度明显高于土壤 Pb,一方面反映了国家土壤环境质量标准中 Pb 的标准相对宽松,另一方面也反映了研究区非土壤 Pb 来源对稻米 Pb 的富集有较大的贡献,其中大气沉降的 Pb 对稻米 Pb 的输入可能性很大。先前已经报道了类似的结果^[34,35]。四会稻米 Pb 污染严重与我国稻米普遍存在 Pb 污染相符,我国稻米中 Pb 含量一直高于其他国家,全国范围内的稻米卫生品质调查的结果显示,稻米 Pb 污染超标现象最为严

重^[36]. 1999年广州市不同区域水稻质量状况的调查显示,糙米样本中的铅含量以100%超标,最高超标倍数为6.38倍,我国优质稻米主产区沈阳的调查情况相似^[36]. 谭周磁等^[37]对湖南省的稻米安全品质进行调查发现,所选的82份大米样品的Pb平均含量为 $0.288 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于无公害稻米要求的最低限度. 吴在铁在对福建省稻米铅污染状况的调查评价时发现23.3%的样品铅含量超过了国家标准中稻谷铅的限量值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[35]. 马宏宏等^[10]对广西碳酸盐岩区水稻籽实中重金属含量研究显示,相较其他重金属元素,水稻籽实中Pb超标率最高,达23.5%.

研究区土壤污染评价结果与作物污染评价结果并不完全一致,可能由于土壤中重金属具有隐蔽性和滞后性等特点,土壤中重金属总量与作物中的累积量不具有正相关性所致,这与Zhang等的研究结论相一致^[33]. 如果仅以土壤中重金属的风险等级划分污染风险区和污染管控区,可能无法与农作物的污染风险区精准对应,说明仅依靠土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)去开展农田土壤-作物系统的污染评价可能存在偏差,应当结合重金属生物可利用性和农作物效应做关联评价.

2.1.4 重金属在土壤-农作物系统间的迁移特征

土壤-农作物系统间的迁移系数(TF)是衡量重金属在土壤-农作物系统间迁移的有效指标,也是反映农作物从土壤中吸收重金属的能力以及进一步评估重金属通过食物链对人类暴露量的重要指标,一般来说,迁移系数越高,土壤中重金属越容易被农作物吸收富集^[3]. 分别对研究区土壤-稻米和土壤-油麦菜中As、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb和Cd这7种重金属元素的迁移系数(TF)进行了计算,计算结果如图2所示. 油麦菜对重金属的吸收富集强度顺序为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Ni} \geq \text{Hg} > \text{Pb} > \text{As}$, 平均迁移系数分别为 0.158 ± 0.078 、 0.042 ± 0.019 、 0.014 ± 0.016 、 0.011 ± 0.005 、 0.011 ± 0.008 、 0.008 ± 0.003 和 0.005 ± 0.004 , 稻米对土壤中重金属的吸收富集强度顺序为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Mn} > \text{Ni}$, 平均迁移系数分别为 1.863 ± 1.170 、 0.182 ± 0.053 、 0.010 ± 0.003 、 0.065 ± 0.070 、 0.038 ± 0.032 、 0.029 ± 0.009 和 0.019 ± 0.010 . 可见7种重金属元素的迁移系数是稻米大于油麦菜, 稻米中更容易富集重金属元素, 与本文稻米污染程度大于油麦菜的结论相符. Cd和Cu更容易被油麦菜吸收富集, Cd、Cu和As更容易被稻米吸收富集, 对于稻米和油麦菜, Cd的迁移系数均最高, 这是由于Cd在土壤中主要以生物可利用态为主, 最易于被迁移富集到农作

物中, 其次为Cu, 这可能源于在一定的条件下, Cd和Cu具有协同作用^[38]. 油麦菜和稻米中Hg、Pb的迁移系数相对较低, 这可能与植物中Hg和Pb的来源有关, 已有研究表明, 大气Hg和Pb是植物吸收的主要来源, 土壤中的Hg和Pb可能不是农作物的主要来源^[39]. 油麦菜中As的迁移系数最低, 这是由于As在土壤中以残渣态为主(74%). 因此农田土壤重金属污染防治工作应特别关注Cd和Cu污染, 对于稻田应同时关注As的污染.

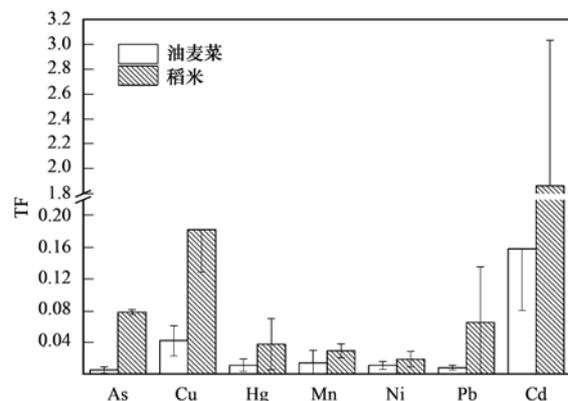


图2 重金属在土壤-作物系统的迁移系数TF

Fig. 2 Transfer factors (TF) of heavy metals in a soil-plant system

2.2 摄入稻米和蔬菜的健康风险评价

2.2.1 非致癌风险评价

研究区成人和儿童摄入稻米和蔬菜的重金属健康风险评价如表5和图3所示,成人和儿童非致癌风险指数(HI)均为稻米高于油麦菜,稻米和油麦菜中重金属的非致癌风险均为成人高于儿童,这可能源于成人比儿童具有更长的暴露持续时间. 研究区成人和儿童摄入油麦菜的平均HI指数均小于1,分别为0.34和0.27,表明食用当地油麦菜在人体非致癌风险可接受范围内. 研究区成人和儿童摄入稻米的平均HI指数均大于1,分别为2.89和2.24,这表明当地成人和儿童每日从稻米中摄取的重金属含量为美国环保署规定的人均单位体重日允许摄入量的2.89倍和2.24倍. 重金属Pb对稻米非致癌风险作用最明显,占比47.4%,可见Pb是当地稻米中非致癌风险最主要的元素. 根据成人和儿童两个人群的累积暴露概率,93.6%和87.1%的采样点成人和儿童的HI值大于1(图3),值得注意的是,成人和儿童摄入稻米的HI最高值分别高达21.2和16.4,表明食用该区稻米对当地人群具有一定的非致癌健康风险,且对成人威胁大于儿童. Pb的毒性作用是损害器官,主要是骨髓造血系统和神经系统^[40],还对儿童的智力发育和行为产生不良影响^[41],因此需要特别关注当地人群摄入稻米Pb可能导致的非致癌健康危害.

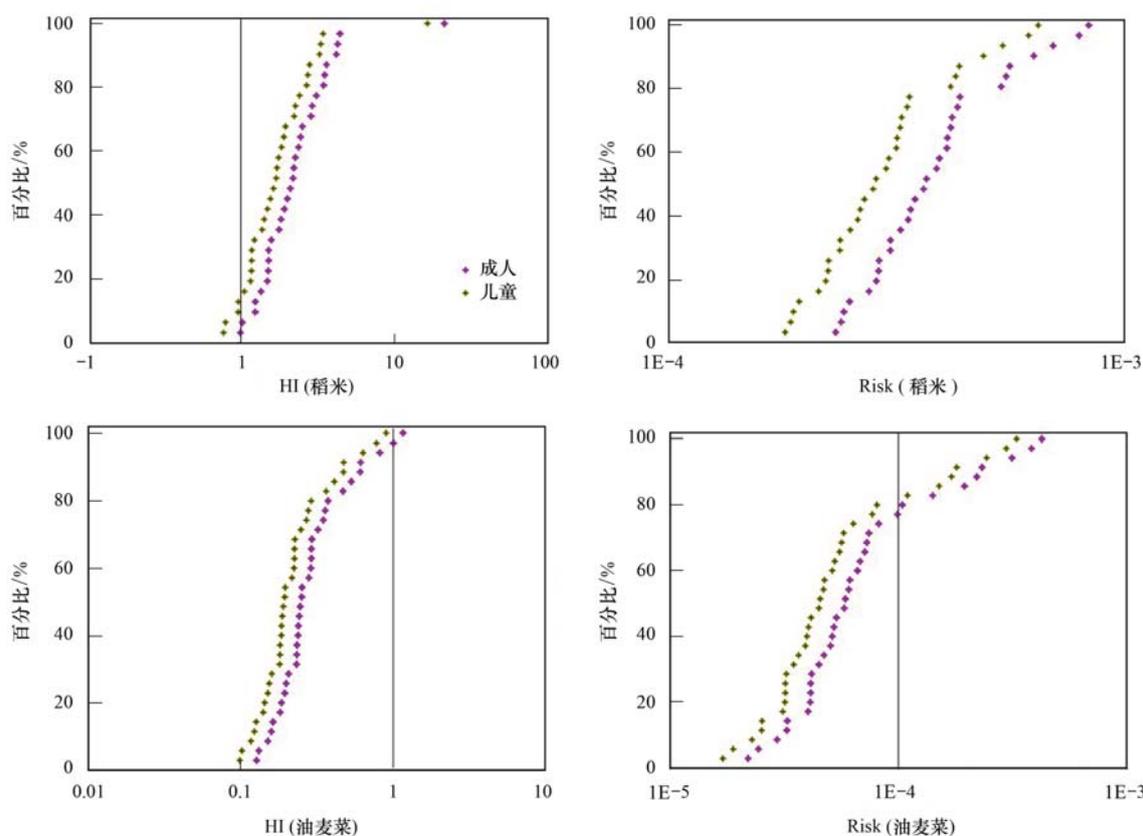


图3 研究区人群摄入稻米和油麦菜的健康风险累积概率

Fig. 3 Cumulative probabilities of human health risk from rice and vegetable exposure in the study areas

表5 研究区人群摄入稻米和油麦菜健康风险评价

Table 5 Health risk assessment of rice and vegetable intake in the study areas

项目	HQ							HI	Risk			Risk(总)	
	As	Cu	Hg	Ni	Pb	Cd	As		Pb	Cd			
稻米 (n=31)	成人	最小值	0.416	0.114	0.012	0.010	0.020	0.110	0.970	1.87E-04	4.17E-07	6.80E-07	1.88E-04
		最大值	1.759	0.240	0.163	0.103	17.404	3.117	21.186	7.92E-04	1.18E-05	5.92E-04	1.40E-03
		平均值	0.801	0.169	0.030	0.035	1.368	0.486	2.888	3.61E-04	1.85E-06	4.65E-05	4.09E-04
	儿童	最小值	0.323	0.088	0.009	0.008	0.016	0.085	0.752	1.45E-04	3.23E-07	5.27E-07	1.46E-04
		最大值	1.363	0.186	0.126	0.080	13.488	2.415	16.419	6.14E-04	9.18E-06	4.59E-04	1.08E-03
		平均值	0.621	0.131	0.023	0.027	1.060	0.376	2.238	2.80E-04	1.43E-06	3.60E-05	3.17E-04
油麦菜 (n=35)	成人	最小值	0.045	0.010	0.002	0.005	0.031	0.006	0.127	2.05E-05	2.40E-08	1.05E-06	2.15E-05
		最大值	0.932	0.047	0.009	0.020	0.155	0.059	1.169	4.19E-04	2.22E-07	5.28E-06	4.25E-04
		平均值	0.212	0.019	0.005	0.009	0.071	0.026	0.342	9.55E-05	9.98E-08	2.42E-06	9.80E-05
	儿童	最小值	0.035	0.008	0.002	0.004	0.024	0.005	0.099	1.59E-05	1.86E-08	8.15E-07	1.67E-05
		最大值	0.722	0.036	0.007	0.015	0.120	0.045	0.906	3.25E-04	1.72E-07	4.09E-06	3.29E-04
		平均值	0.164	0.015	0.004	0.007	0.055	0.020	0.265	7.40E-05	7.73E-08	1.87E-06	7.60E-05

2.2.2 致癌风险评价

研究区成人和儿童的致癌风险指数(Risk)均为稻米高于油麦菜,稻米和蔬菜中重金属的致癌风险均为成人高于儿童.由稻米和蔬菜摄入重金属中单项致癌危害指数排序为As>Cd>Pb,其中在稻米和油麦菜中As是最主要的致癌元素,分别占比88.3%和97.4%.稻米和油麦菜中总致癌危害指数均大于USEPA推荐的最大可接受水平(1×10^{-6})

(表5).根据成人和儿童两个人群的累积暴露概率(图3),100%的采样点成人和儿童摄入稻米的总致癌危害指数高于 1×10^{-4} ,22.9%和20%的采样点成人和儿童摄入油麦菜的致癌危害指数大于 10^{-4} ,77.1%和80.0%的采样点成人和儿童摄入油麦菜的致癌危害指数处于 10^{-6} 与 10^{-4} 之间,摄入油麦菜的总致癌危害指数均值小于 1×10^{-4} ,可见成人和儿童食用当地油麦菜的致癌风险在可接受范围

内,当地稻米摄入具有一定的致癌风险,主要致癌因子是 As 元素,且对成人威胁大于儿童。慢性 As 中毒常伴随着致癌、致畸和致突变作用^[42],因此,稻米中的 As 可能与当地鼻咽癌高发有关。尽管美国环保署提出的重金属致癌风险指数泛指总的致癌风险,但根据流行病学调查,鼻咽癌发病数占该区癌症发病总数的 20.53% (1997~2001 年)^[43]。因此,本文计算的重金属致癌风险指数仍然能够指示该区鼻咽癌发病的风险程度。值得注意的是,由于日常生活中消费人群的膳食结构较复杂,如小麦、蔬菜、水果和饮水中重金属也是膳食暴露风险的贡献者,同时,空气和土壤中重金属亦可经口摄入、经呼吸和皮肤进入人体内产生健康威胁,研究区人群真实的健康风险可能较本次评估更高。因此,建议定期监测和评估该区农作物,特别是稻米中的重金属含量及健康风险,当地政府应加强对农田土壤重金属修复治理的力度或严禁居民种植及食用当地水稻等具有较大健康风险的农作物,有利于规避、减缓和预防农作物重金属中毒和当地居民健康危害。

3 结论

(1) 研究区农田土壤基本清洁 ($P_{\text{综}} = 0.43$); 土壤中 Cd 和 Mn 主要以生物可利用态存在, Hg 主要以潜在可利用态存在, As、Cu、Ni 和 Pb 主要存在于残渣态中。

(2) 研究区油麦菜基本安全 ($P_{\text{综}} = 0.48$), 但 14.3% 的样品存在 Pb 超标; 稻米的污染风险高于油麦菜, 稻米 $P_{\text{综}} = 7.66$, 主要污染元素为 Pb ($PI = 10.25$)。

(3) 研究区土壤中 Cd 和 Cu 更容易被油麦菜吸收富集, Cd、Cu 和 As 更容易被稻米吸收富集, 农田土壤重金属污染防治工作应特别关注 Cd 和 Cu 污染, 对于稻田应同时关注 As 的污染。

(4) 研究区成人和儿童食用油麦菜的非致癌风险指数(HI)值均小于 1, 食用油麦菜的总致癌危害指数(Risk)均值小于 1×10^{-4} , 食用当地油麦菜的人体健康风险在可接受范围内。成人和儿童食用稻米的平均 HI 指数大于 1, 其中 Pb 是主要非致癌因子, 食用稻米的 Risk 指数均高于 1×10^{-4} , 其中 As 是最主要的致癌因子, 研究区人群食用当地稻米具有一定的健康风险, 且对成人的威胁大于儿童。稻米中的 As 可能与当地鼻咽癌高发有关。

参考文献:

[1] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
[2] O'Connell D W, Birkinshaw C, O'Dwyer T F. Heavy metal

adsorbents prepared from the modification of cellulose: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(15): 6709-6724.

- [3] Adamo P, Iavazzo P, Albanese S, *et al.* Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **500-501**: 11-22.
[4] Luo C L, Liu C P, Wang Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(1): 481-490.
[5] Yalcin M R, Battaloglu R, Ilhan S. Heavy metal sources in Sultan Marsh and its neighborhood, Kayseri, Turkey [J]. *Environmental Geology*, 2007, **53**(2): 399-415.
[6] Blanco A, Salazar M J, Cid C V, *et al.* Multidisciplinary study of chemical and biological factors related to Pb accumulation in sorghum crops grown in contaminated soils and their toxicological implications [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **166**: 18-26.
[7] Wang X, Nan Z R, Ding W G, *et al.* Chemical fraction of heavy metals in an oasis soil and their bioavailability to cole crops [J]. *Arid Land Research and Management*, 2012, **26**(2): 166-180.
[8] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, *et al.* Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(5): 1551-1561.
[9] 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 等. 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5629-5639.
Chen J Y, Liu G B, Cui J L, *et al.* Mobilization of heavy metals in a soil-plant system and risk assessment in the Dabaoshan mine area, Guangdong province, China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5629-5639.
[10] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
[11] 刘白林. 甘肃白银东大沟流域农田土壤重金属污染现状及其在土壤-作物-人体系统中的迁移转化规律 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
Liu B L. Heavy metal contamination in farmland soils and its transfer in the soil-crop-human system within the Dongdagou watershed, Baiyin, Gansu [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
[12] 张浩, 王辉, 汤红妍, 等. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 1085-1094.
Zhang H, Wang H, Tang H Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil and vegetables in various functional areas of lead-zinc tailings pond [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1085-1094.
[13] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2919-2926.
Tian M L, Zhong X M, Zhang Y X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2919-2926.
[14] 秦越华, 强承魁, 曹丹, 等. 徐州市典型稻区土壤和稻米重金属含量及健康风险评估 [J]. *生态环境学报*, 2016, **25**

- (9): 1546-1554.
- Qin Y H, Qiang C K, Cao D, *et al.* Contents and health risk assessment of heavy metals in soils and rice grains from typical rice-growing region of Xuzhou city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(9): 1546-1554.
- [15] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans; some naturally occurring substances; food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins [M]. Lyon, France: IARC, 1993. 56.
- [16] 闵华庆, 潘甜美. 鼻咽癌在广东分布与发病的特点[J]. *新医学*, 1978, (12): 580-583.
- [17] Cairns J. The cancer problem[J]. *Scientific American*, 1975, **233**(5): 64-72, 77-78.
- [18] Smerq J, Sharma M. The risk factor; Nasopharyngeal carcinoma [J]. *International Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 2011, **3**(3): 48-51.
- [19] Chen K, Liao Q L, Ma Z W, *et al.* Association of soil arsenic and nickel exposure with cancer mortality rates, a town-scale ecological study in Suzhou, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(7): 5395-5404.
- [20] Liu X L, Cen K, Zhao L S, *et al.* N-nitrodimethylamine in natural and drinking water of high cancer incidence regions of Guangdong, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, **74**: 157-164.
- [21] 陈媛. 珠江三角洲地区性肿瘤发病生态地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Chen Y. Ecological geochemical investigation and study of regional cancers in the Pearl River Delta [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [22] 刘秀丽. 珠江三角洲地区性癌症生态地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Liu X L. Study on ecological geochemistry of regional cancer in the Pearl River Delta area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [23] 刘安世. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [24] 肇庆市统计局. 肇庆统计年鉴[M]. 肇庆: 肇庆市统计局, 2019.
- Zhaoqing Municipal Bureau of Statistics. Statistical yearbook of Zhaoqing [M]. Zhaoqing: Zhaoqing Municipal Bureau of Statistics, 2019.
- [25] DD2005-01, 多目标区域地球化学调查规范(1:250000) [S].
- [26] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行) [S].
- [27] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- [28] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [29] EPA/600/R-09/052F, Exposure factors handbook[S].
- [30] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评估中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- Duan X L. Research methods of exposure factors and its application in environmental health risk assessment [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [31] 赖飞, 张宝林, 杨清, 等. 凤冈县茶园土壤 pH 值变异特征及调控对策[J]. *农技服务*, 2012, **29**(5): 570-571, 587.
- [32] Sungur A, Soylak M, Ozcan H. Investigation of heavy metal mobility and availability by the BCR sequential extraction procedure; relationship between soil properties and heavy metals availability [J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2014, **26**(4): 219-230.
- [33] Zhang J R, Li H Z, Zhou Y Z, *et al.* Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: a case study in the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 710-719.
- [34] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [35] 吴在铁. 福建省稻米铅污染状况的调查与评价[J]. *福建热作科技*, 2017, **42**(3): 1-8.
- [36] 朱海江, 程方民, 朱智伟. 土壤-水稻体系中的铅及其污染效应研究[J]. *中国粮油学报*, 2004, **19**(5): 4-7.
- Zhu H J, Cheng F M, Zhu Z W. Lead pollution in soil-rice system [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2004, **19**(5): 4-7.
- [37] 谭周磁, 陈嘉勤, 薛海霞. 硒(Se)对降低水稻重金属 Pb, Cd, Cr 污染的研究[J]. *湖南师范大学学报自然科学版*, 2000, **23**(3): 80-83.
- Tan Z C, Chen J Q, Xue H X. Studies on the role of selenium (Se) in decreasing Pb, Cd and Cr pollution to rice [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Normalis Hunanensis*, 2000, **23**(3): 80-83.
- [38] 季冬雪, 华璐, 王学东, 等. Cu-Cd/Zn-Cd/Cu-Zn 复合污染对水稻毒性和重金属吸收的影响[J]. *环境污染与防治*, 2018, **40**(10): 1141-1146.
- Ji D X, Hua L, Wang X D, *et al.* The effects of combined heavy metals (Cu-Cd, Zn-Cd, Cu-Zn) on the toxicity and uptake of metal elements in rice [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, **40**(10): 1141-1146.
- [39] 丁爱芳, 潘根兴. 南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. *生态环境*, 2003, **12**(4): 409-411.
- Ding A F, Pan G X. Contents of heavy metals in soils and Chinese cabbages (*Brassica chinensis*) from some urban vegetable fields around Nanjing and the Human health risks [J]. *Ecology and Environment*, 2003, **12**(4): 409-411.
- [40] 孟紫强. 环境毒理学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [41] Kaczala F, Marques M, Hogland W. Lead and vanadium removal from a real industrial wastewater by gravitational settling/sedimentation and sorption onto *Pinus sylvestris* sawdust [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(1): 235-243.
- [42] 花日茂. 环境毒理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [43] 黄启洪, 凌启南, 李艳华, 等. 四会市恶性肿瘤发病动态分析[J]. *中国肿瘤*, 2005, **14**(4): 241-243.
- Huang Q H, Ling Q N, Li Y H, *et al.* An analysis of cancer incidence in Sihui city [J]. *Bulletin of Chinese Cancer*, 2005, **14**(4): 241-243.

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forss.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)