

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林, 黄健敏 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险

祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉*

(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要: 蔬菜中重金属累积引发的健康风险逐渐被重视. 通过文献查阅与实地样品采集, 搭建了我国蔬菜-土壤系统重金属元素含量数据库, 系统地分析了我国蔬菜可食部位中7项重金属含量特征和不同种类蔬菜对重金属的生物累积能力. 此外, 采用蒙特卡罗模拟评估了通过摄入4种类型蔬菜导致的非致癌健康风险. 蔬菜可食部位 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为0.093、0.024、0.137、0.118、0.007、0.622和3.272 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中5种有害元素的超标率为: $\text{Pb}(18.5\%) > \text{Cd}(12.9\%) > \text{Hg}(11.5\%) > \text{Cr}(4.03\%) > \text{As}(0.21\%)$. 叶菜类蔬菜表现出较高的Cd富集能力, 根茎类蔬菜表现出较高的Pb富集能力, 其富集系数的平均值分别为0.264和0.262, 而豆类蔬菜和茄果类蔬菜表现出较低的重金属富集能力. 健康风险结果表明, 蔬菜摄入的单项元素非致癌风险在可接受范围, 其中儿童的健康风险高于成人. 单项元素非致癌风险HQ平均值表现为: $\text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cr}$. 4类蔬菜中多元素综合非致癌风险HI表现为: 叶菜类 > 根茎类 > 豆类 > 茄果类. 在重金属污染地区, 根据土壤污染程度选择性种植重金属低富集蔬菜可以有效降低重金属摄入的健康风险.

关键词: 蔬菜; 重金属; 生物富集系数; 蒙特卡罗模拟(MCS); 健康风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3600-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202207036

Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables

Qi Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, WANG Qi, WAN Ya-nan, LI Hua-fen*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The health risk caused by heavy metal accumulation in vegetables is of great concern. In this study, a database of heavy metal content in a vegetable-soil system in China was constructed through literature review and field sample collection. A systematic analysis of seven heavy metal contents in edible parts of vegetables and their bioaccumulation capacity among different vegetables was also performed. Additionally, the non-carcinogenic health risks of four types vegetables were assessed by using Monte Carlo simulation (MCS). The mean values of Cd, As, Pb, Cr, Hg, Cu, and Zn in the edible parts of the vegetables were 0.093, 0.024, 0.137, 0.118, 0.007, 0.622, and 3.272 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the exceedance rates of the five toxic elements were: $\text{Pb}(18.5\%) > \text{Cd}(12.9\%) > \text{Hg}(11.5\%) > \text{Cr}(4.03\%) > \text{As}(0.21\%)$. Leafy vegetables showed high Cd enrichment, and root vegetables showed high Pb enrichment, with mean bioconcentration factors of 0.264 and 0.262, respectively. Generally, legumes vegetables and solanaceous vegetables showed lower bioaccumulation for heavy metals. The health risk results indicated that the non-carcinogenic risk for single elements of vegetable intake was within the acceptable range, with the health risk for children being higher than that for adults. The mean non-carcinogenic risk for single elements were: $\text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cr}$. The multi-element combined non-carcinogenic risks of four types vegetables were: leafy vegetables > root vegetables > legume vegetables > solanaceous vegetables. Planting lower-heavy metal bioaccumulation vegetables in heavy metal-contaminated farmland is an effective method to minimize the health risk.

Key words: vegetables; heavy metal; bioconcentration factor; Monte Carlo simulation (MCS); health risk

重金属(如Cd、Pb、Cr和Hg)以及类金属(如As)被认为是对土壤质量和食品安全最危险的污染物之一^[1]. 重金属通过自然过程或人类活动进入食物链, 通过生物放大效应在人体和动物体内积累, 进而引发潜在的健康问题^[2]. 长期摄入高含量重金属的食物可能会导致人体肝脏、肾脏和骨骼中的重金属积累, 导致贫血、骨质疏松、肾结石和癌症等慢性疾病^[3~6].

蔬菜作为人类饮食的重要组成部分^[7], 可以提供丰富的微量营养素和膳食纤维^[8]. 随着饮食结构和社会的发展, 人们对于蔬菜的需求逐年增加, 据《2021年中国统计年鉴》显示^[9], 1995~2020年, 我国蔬菜的播种面积从951.5万 hm^2 增长至2148.5万 hm^2 , 蔬菜产量由25726.71万t增长至74912.90万t. 很多研究报道了蔬菜因施肥、灌溉和大气沉降

而产生的有毒重金属污染^[10~12]. Liang等^[13]分析了广东省4401个蔬菜样品中重金属含量, 发现Cd和Pb为蔬菜中的主要污染物, Cd的超标率为2.41%, Pb为1.61%, As为0.55%, Cr为0.48%; 陈志良等^[14]对广州市蔬菜中重金属进行分析与评价, 发现Cr、Pb和Cd的超标率分别达到91.67%、35.71%和3.25%; 杨剑洲等^[15]通过分析海南集约化种植园中6类农作物中7种重金属综合污染程度, 发现叶类蔬菜的综合污染程度最高, 并且其中Cr的风险系数最高. 不同类型蔬菜对重金属富集能力存在差

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2022-08-29

基金项目: 现代农业产业技术体系专项(CARS-23-B-15); 云南省重大科技专项(202202AE090029)

作者简介: 祁浩(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染与修复, E-mail: qihao_blake@163.com

* 通信作者, E-mail: lihuafen@cau.edu.cn

异^[16],同时受到环境条件的制约.因此,通过蔬菜摄入导致的重金属暴露健康风险受蔬菜种类和蔬菜产地的影响. Hu 等^[10]的研究结果表明,黄海沿岸 3 个典型的集约化温室蔬菜系统中蔬菜重金属的健康风险表现为:叶菜 > 根茎类蔬菜 > 果菜.在电子制造业密集的城市周边地区,蔬菜重金属的健康风险表现为:叶菜 > 果菜 > 豆类蔬菜 > 根茎类蔬菜^[17]. Wang 等^[18]研究表明,在铅锌矿区附近,叶菜的摄入是 Cd 和 Pb 暴露的主要来源,根茎类蔬菜的摄入是 Cr 暴露的主要来源.目前已经有研究采用确定性风险评价模型对通过食物摄入造成的重金属的健康风险进行评价^[19-21].而蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation, MCS)相比于确定性风险评价模型,在确定暴露参数先验分布下可生成随机数进行迭代运算,可提供污染风险超过阈值的概率,避免健康风险值出现较大评估偏差^[22],为实现精准的风险管控及修复措施提供科学依据.

目前对于蔬菜污染评价的研究大多局限于某一区域,但对于调查获取全国蔬菜-土壤系统的重金属点对点的数据,分析不同种类蔬菜吸收重金属特征及其人类健康风险的数据分析研究尚需深入.因此,本研究通过文献查阅和实地样品采集,获取全国范围内 7 项重金属在蔬菜可食部位中的含量,评估不同种类蔬菜对重金属的富集差异和人类膳食暴露风险,以期评价实际生产中蔬菜的重金属累积风险以及蔬菜种植结构和人体健康风险管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据库的建立

本研究数据由文献查阅和实地样品采集测定两部分组成.文献查阅通过中国知网、万方、维普和 Web of Science 数据库以“蔬菜”、“重金属”、“土壤”、“vegetable”、“heavy metal”或“metal”等关键词,检索了 2000~2018 年间已发表的中英文文献,并对其进行了筛选,筛选标准如下:①文献中样本应为田间采样获取,采样点远离工矿区和污灌区;②文献中明确报道了蔬菜的名称或种类;③文献中具有蔬菜可食部位重金属含量(鲜重);④具有明显数据分析错误的不予录入.同时收集文献中蔬菜对于重金属的生物富集系数(BCF),对于富集系数没有描述的研究,通过蔬菜样品对应土壤的重金属含量进行计算.实地调研采样数据遵循土壤与蔬菜点位一一对应原则,测定的蔬菜重金属含量以鲜重计,所有涉及的重金属含量数据为全量态.通过以上方法建立的数据库包含 81 篇文献(包括期刊和学位

论文),259 组实地调研采样数据,共 1 302 个样本组(一个样本组代表 N 个样本的平均值,即代表了 N 个样本的重金属含量水平),采样点(实地采样点和文献中采样点)涉及全国 104 个区域(以省、自治区和直辖市计),具体的采样点数量和样本组分布情况如表 1 所示.

表 1 不同区域的不同种类蔬菜的样本组数量

区域	总样本组数/采样点数量	叶菜	根茎	茄果	豆类
华北	407/18	244	57	91	15
东北	38/3	18	16	2	2
华东	268/31	142	27	85	14
中南	220/30	138	16	50	16
西南	216/15	90	26	71	29
西北	122/7	70	12	40	0

1.2 样品采集及测定

样品采集方法:遵循土壤与蔬菜点位一一对应,蔬菜成熟时同时采集土壤和蔬菜样品,每种样品随机采集 3~5 份进行混合作为一个样本,蔬菜样品自来水冲洗干净后,再用蒸馏水冲洗,吸水纸擦干表面的水分,打浆机进行匀浆;土壤样品剔除植物根系以及砂砾后,置于室内自然风干,过筛,装入封袋后保存待测定.

土壤和蔬菜样品重金属全量的测定:称取过 0.15 mm 筛的土壤样品 0.250 0 g 于微波消煮管中,加入 8 mL 王水(HCl:HNO₃ = 3:1),冷消化过夜,微波消解仪(MARS-5)进行微波消煮^[23].称取新鲜蔬菜匀浆样品 0.500 0 g 于微波消煮管中,加入 8 mL HNO₃ 冷消化过夜,微波消解仪(MARS-5)进行微波消煮^[24].消解液转移至 50 mL 容量瓶中定容,电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 7700, Agilent Technologies, 美国)测定样品中 Cd、As、Pb、Cr、Cu 和 Zn 的含量, Hg 用原子荧光仪(AFS-8220, 北京吉天, 中国)测定.测定过程采用标准物质(GBW 07456 张家港长江沉积物; GBW 10049 大葱)和空白样品进行质量控制,样品回收率在 85%~115% 之间.

1.3 生物富集系数

生物富集系数(BCF):蔬菜样品可食用部位重金属含量与土壤样品重金属含量比值,计算公式如下:

$$BCF = C_{veg} / C_{soil}$$

式中, C_{veg} 为蔬菜可食用部位重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$, C_{soil} 为土壤中重金属含量, $mg \cdot kg^{-1}$.

1.4 基于 MCS 的健康风险评价

本研究采用美国国家环保署(USEPA)推荐的

人类健康风险评估方法, 单项元素的非致癌风险和多元素综合非致癌风险分别通过危害商 (HQ) 和危害指数 (HI) 来评估, 当 $HQ \leq 1$ 和 $HI \leq 1$ 时, 表明没有非致癌风险, 当 $HQ > 1$ 或 $HI > 1$ 时, 表明存在非致癌风险. HQ 和 HI 通过以下公式计算:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} = \frac{C_{veg} \times IR_{veg} \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD} \times 10^{-3}$$

$$HI = \sum HQ_i$$

表 2 蒙特卡罗模拟健康风险评估中使用的暴露参数¹⁾

Table 2 Exposure parameters used in Monte Carlo simulation for health risk assessment

参数	单位	概率分布和取值		文献
		成人	儿童	
IR_{veg}	$g \cdot d^{-1}$	对数正态分布 (346.12, 37.39)	对数正态分布 (179.29, 14.64)	[25]
EF	$d \cdot a^{-1}$	三角分布 (180, 345, 365)	三角分布 (180, 345, 365)	[26]
ED	a	24	6	[27]
BW	kg	正态分布 (57.03, 1.18)	正态分布 (16.68, 1.48)	[28]
AT	d	$365 \times ED$	$365 \times ED$	[27]
RfD	$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	0.001 (Cd)、0.05 (As)、0.004 (Pb)、1.5 (Cr) 和 0.0003 (Hg)		[29]

1) 对数正态分布和正态分布的数值表述为 (均值, 标准偏差); 三角分布的数值表述为 (最小值, 最可能值, 最大值)

1.5 数据分析

使用 Oracle Crystal Ball 11.1 进行 MCS 分析, 设定随机模拟迭代次数为 10 000 次, SPSS 25.0 进行数据分析, 作图软件为 Origin 2021 和 R 4.1.2.

2 结果与讨论

2.1 蔬菜可食部位的重金属含量特征

蔬菜可食部位重金属元素含量的统计分析结果如表 3 所示, 7 种重金属元素含量分布均呈对数正态分布, 数据分布较离散, 除 Cu 和 Zn 之外, 其余元素变异系数均大于 1. 蔬菜可食部位重金属元素含量变化范围较大, $\omega(Cd)$ 、 $\omega(As)$ 、 $\omega(Pb)$ 、 $\omega(Cr)$ 、 $\omega(Hg)$ 、 $\omega(Cu)$ 和 $\omega(Zn)$ 的最大值分别达到了 5.30、0.56、2.20、1.38、0.24、6.31 和 21.9 $mg \cdot kg^{-1}$, 各重金属元素含量的算术均值大小排序为: $Zn > Cu > Pb > Cr > Cd > As > Hg$. 依据 GB 2762-2017 中相应的限量标准^[30], 5 种重金属元素的超标率为: $Pb(18.5\%) > Cd(12.9\%) > Hg(11.5\%) > Cr(4.03\%) > As(0.21\%)$. 综上, 本研究收集的蔬菜可食部位各个重金属元素含量差异较大, 说明蔬菜可食部位重金属含量可能受蔬菜品种、采样区域面积大小和采样区域种植环境的影响波动较大^[31]. 有研究表明, 有机肥和磷肥中可能含有较高水平的 Cd、Cr、Cu 和 Zn^[10,32,33], 蔬菜种植过程中长期施肥可能增加蔬菜中重金属累积风险. 此外, 部分农用制剂产品如杀虫剂和除草剂等中通常含有 Hg 和 As 等元素^[34], 农艺措施能导致 Hg 和 As 在蔬菜中累积; 蔬菜生产基地多在城郊, 靠近高速公路, 含铅汽

油中, ADD 为每天摄入重金属量的估计值; RfD 为健康风险的最大摄入量; C_{veg} 为蔬菜可食部位重金属的含量 (鲜重); IR_{veg} 为人均每日食用蔬菜量; EF 为暴露频率; ED 为暴露持续时间; BW 为人体重量; AT 为平均暴露时间. 为了解决风险评估中的不确定性, 通过考虑重金属浓度和人类暴露因素的可变性, 采用 MCS 计算健康风险的概率分布, 每个参数的概率分布类型和关键统计信息如表 2 所示.

油的燃烧导致一些铅尘落入菜田土壤或蔬菜叶片被蔬菜所吸收^[35,36].

通过各重金属元素的频数分布和累积频率可以整体了解各重金属元素的分布离散情况 (图 1), 各个重金属元素表现出相似的分布特征, 但集中分布在较低水平. 其中 Cd、As 和 Hg 含量平均值处于较低水平, $\omega(Cd)$ 主要集中在 0 ~ 0.1 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间, 占样本总数的 83.1%; $\omega(As)$ 主要集中在 0 ~ 0.03 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间, 占样本总数的 79.5%; $\omega(Hg)$ 主要集中在 0 ~ 0.005 $mg \cdot kg^{-1}$, 占样本总数的 81.3%. $\omega(Pb)$ 主要分布在 0 ~ 0.20 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间, 占样本总数的 78.8%; $\omega(Cr)$ 主要分布在 0 ~ 0.3 $mg \cdot kg^{-1}$, 占样本总数的 82.7%. Cu 和 Zn 的分布范围最广, 总体含量水平高于其他元素, $\omega(Cu)$ 主要分布在 0 ~ 1.0 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间, 占样本总数的 82.3%; $\omega(Zn)$ 主要分布在 0 ~ 4.0 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间, 占样本总数的 75.3%.

Zhong 等^[7] 收集了 2007 ~ 2016 年已发表文献中的数据, 发现全国蔬菜中 $\omega(Cd)$ 、 $\omega(Pb)$ 和 $\omega(Hg)$ 平均值分别为 0.04、0.11 和 0.01 $mg \cdot kg^{-1}$, 而本研究中 Cd 含量平均值较高, Pb 和 Hg 含量平均值接近. 与 Zhang 等^[37] 从全国 31 个省份实地采集的 7 214 份新鲜蔬菜样品中重金属含量结果相比, 本研究中 Cd、Pb 和 Hg 含量平均值分别高出 5.2、2.5 和 1.3 倍, Cr 和 As 含量平均值接近. 本研究对有确定污染源影响区的研究数据进行了剔除, 但可能存在农业区与工业区界限模糊的问题, 导致部分元素的评价结果存在偏差. 而无论是文献荟萃分析还是实地采样分

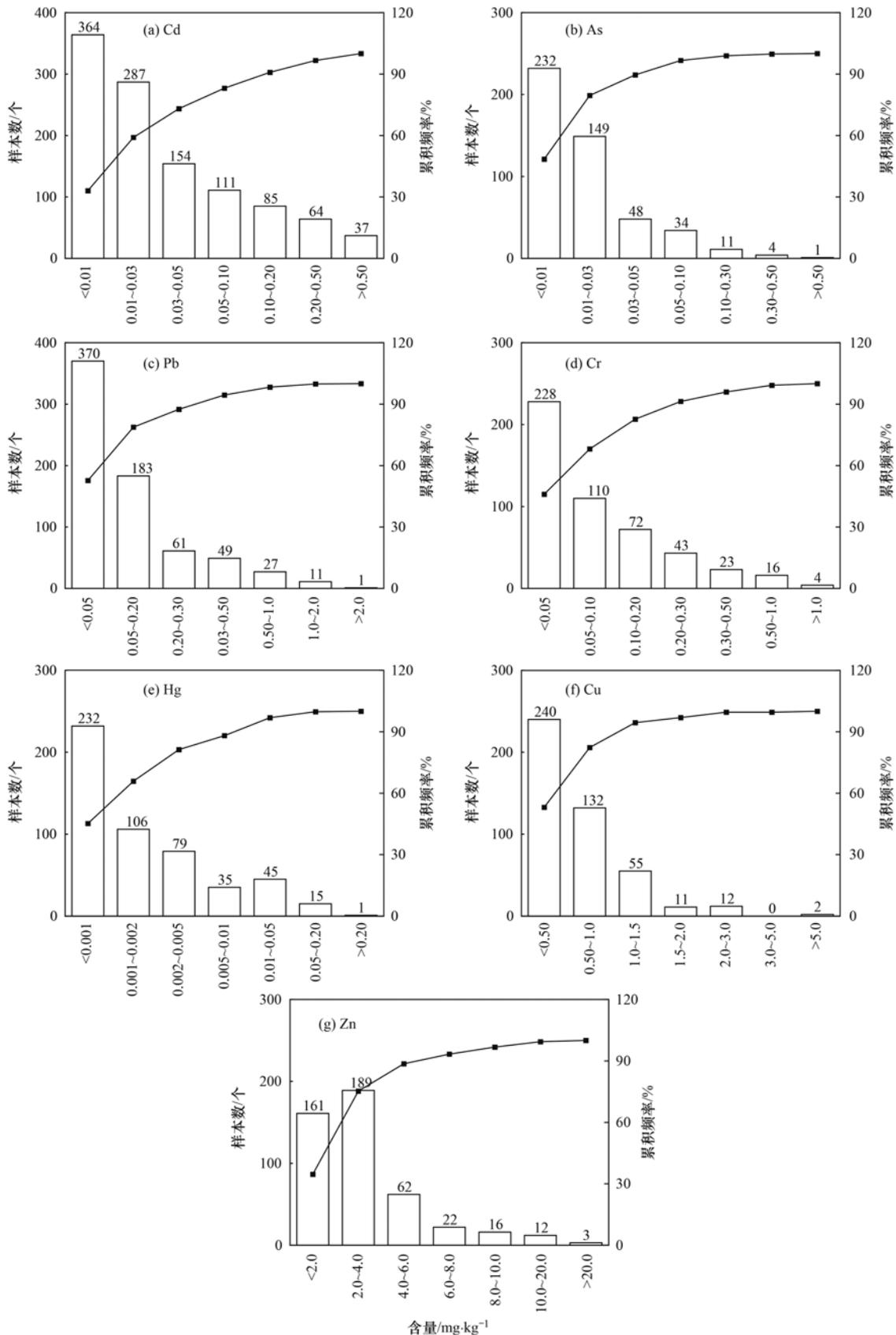


图1 蔬菜可食部位重金属含量频数分布与累积频率

Fig. 1 Frequency distribution and cumulative frequency of heavy metals in edible parts of vegetables

析,采样原则、采样区域大小和采样数量的不同都可能造成蔬菜重金属含量评价结果的差异.此外,目前已发表文章多倾向于在污染风险较大的区域开展研

究^[17,18],而在蔬菜重金属含量评价中,为了避免出现以个别样点的平均值代表整个区域的问题,建议应该在污染风险较小的区域同样展开有效的监测与评价,

表 3 蔬菜可食部位重金属含量统计¹⁾

Table 3 Statistics on heavy metal contents in edible parts of vegetables

元素	样本组数	分布范围	顺序统计量			算术均值	标准差	变异系数	超标率
			25% 值	50% 值	75% 值				
Cd	1102	ND ~ 5.30	0.007	0.021	0.059	0.093	0.315	341	12.9
As	479	ND ~ 0.56	0.000	0.010	0.025	0.024	0.053	222	0.21
Pb	702	ND ~ 2.20	0.012	0.043	0.165	0.137	0.249	182	18.5
Cr	496	ND ~ 1.38	0.025	0.057	0.138	0.118	0.178	151	4.03
Hg	513	ND ~ 0.24	0.000	0.001	0.003	0.007	0.021	302	11.5
Cu	452	ND ~ 6.31	0.273	0.464	0.796	0.622	0.608	98.0	—
Zn	465	ND ~ 21.9	1.518	2.520	3.960	3.272	3.071	94.0	—

1) ND 表示低于检测限值; 样本组数单位为个, 变异系数和超标率单位为%, 其余为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以鲜重计); “—”表示 GB 2762-2017 中不存在相应的限量标准

为全面了解我国蔬菜重金属的实际污染状况以及实现精准的风险管控提供基础资料。

2.2 不同种类蔬菜可食部位的重金属含量及富集特征

将数据库中的蔬菜划分为叶菜类、根茎类、茄果类和豆类这 4 种类型, 为了比较其中重金属元素含量的差异, 对 4 种类型蔬菜分别进行了统计分析, 结果见表 4。除根茎类蔬菜 Pb 含量平均值外, 其余元素含量平均值均未超过 GB 2762-2017^[30] 中相应

的限量标准。通过分析不同类型蔬菜可食部位重金属含量, 发现 4 种不同类型蔬菜中的重金属含量差异明显, Zn 和 Cu 含量明显高于其他重金属元素, 叶菜类蔬菜可食用部位中 Cd 含量明显高于其他 3 种类型蔬菜, Pb 和 Cr 在根茎类蔬菜中的含量最高, 微量元素 As 和 Hg 在不同类型蔬菜中分布相对均匀, 这些差异可能是由于不同蔬菜的不同组织吸收和运输有毒元素的能力不同^[17]。

蔬菜对重金属的吸收能力通过富集系数 (BCF)

表 4 4 类蔬菜可食部位重金属含量统计¹⁾

Table 4 Statistics on heavy metal contents in edible parts of four types of vegetables

蔬菜类型	元素	样本组数	分布范围	顺序统计量			算术均值	标准差
				25% 值	50% 值	75% 值		
叶菜类	Cd	600	ND ~ 5.30	0.011	0.030	0.091	0.140	0.416
	As	276	ND ~ 0.38	0.001	0.013	0.028	0.025	0.045
	Pb	385	ND ~ 2.19	0.024	0.070	0.218	0.171	0.274
	Cr	289	ND ~ 1.38	0.036	0.080	0.155	0.127	0.168
	Hg	298	ND ~ 0.13	0.001	0.001	0.003	0.005	0.016
	Cu	262	ND ~ 2.76	0.275	0.460	0.801	0.600	0.470
	Zn	269	ND ~ 21.9	2.053	2.969	4.511	3.725	3.305
根茎类	Cd	105	ND ~ 0.57	0.004	0.013	0.073	0.061	0.108
	As	58	ND ~ 0.48	0.001	0.003	0.010	0.017	0.064
	Pb	74	ND ~ 1.70	0.007	0.034	0.173	0.187	0.367
	Cr	59	ND ~ 1.31	0.014	0.048	0.090	0.145	0.270
	Hg	60	ND ~ 0.14	0.001	0.001	0.001	0.008	0.025
	Cu	53	ND ~ 2.90	0.211	0.412	0.772	0.671	0.710
	Zn	57	ND ~ 15.7	1.443	2.290	3.695	3.358	3.211
茄果类	Cd	324	ND ~ 0.82	0.003	0.012	0.034	0.031	0.065
	As	117	ND ~ 0.56	0.001	0.006	0.021	0.019	0.056
	Pb	202	ND ~ 0.66	0.004	0.017	0.071	0.058	0.096
	Cr	122	ND ~ 0.82	0.012	0.026	0.077	0.083	0.145
	Hg	128	ND ~ 0.24	0.000	0.001	0.003	0.009	0.029
	Cu	122	ND ~ 2.07	0.288	0.449	0.775	0.546	0.438
	Zn	123	ND ~ 13.2	0.619	1.600	2.830	2.101	2.146
豆类	Cd	73	ND ~ 0.31	0.003	0.006	0.025	0.025	0.048
	As	28	ND ~ 0.38	0.007	0.021	0.033	0.042	0.075
	Pb	41	ND ~ 0.64	0.015	0.038	0.149	0.117	0.175
	Cr	26	ND ~ 0.67	0.018	0.060	0.151	0.120	0.153
	Hg	27	ND ~ 0.13	0.001	0.002	0.022	0.013	0.026
	Cu	15	ND ~ 6.31	0.600	0.759	1.170	1.466	1.855
	Zn	16	ND ~ 9.79	2.892	3.858	5.282	4.363	2.100

1) ND 表示低于检测限值; 样本组数单位为个, 其余为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以鲜重计)

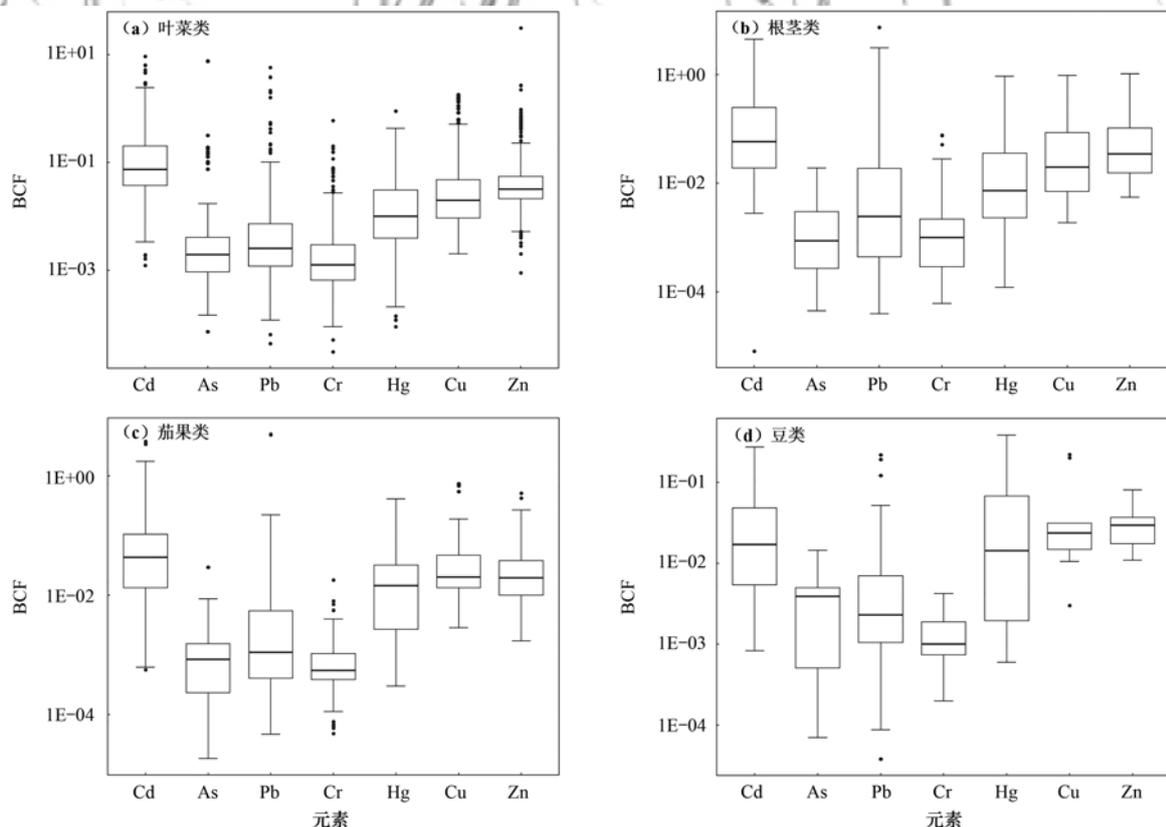
量化表现, 通过从数据库中筛选同时含有蔬菜、土壤中重金属含量或具有蔬菜对于重金属 BCF 的样本组进行统计分析, 4 类蔬菜对 Cd、Zn 和 Cu 富集系数的中位值大于 Pb、Cr、Hg 和 As. 结果表明, 不同种类蔬菜对于 Cd、Zn 和 Cu 的富集能力整体上高于 Pb、Cr、Hg 和 As (图 2). Chang 等^[38]研究发现, 5 种重金属 Cd、Pb、Cr、As 和 Hg 中, Cd 从土壤转移到蔬菜中的能力最强, Cd 的高迁移率和水溶性使其更容易通过皮层组织被根吸收^[39], 与本研究结果一致.

此外, 不同类型的蔬菜表现出不同的重金属富集能力. 根据富集系数的算术均值, 本研究发现叶菜类蔬菜表现出对 Cd 的富集能力较强 (0.264), 根茎类蔬菜表现出较强的 Pb 富集能力 (0.262), 与之前研究的结果相同^[37,40,41]. 本研究发现豆类蔬菜和茄果类蔬菜表现出对各种重金属的低富集, 相比于叶菜与根茎类蔬菜, 茄果类蔬菜和豆类蔬菜果实中的重金属除了受到土壤-根系-茎叶界面的阻隔影响, 还会受到茎叶-果实界面的阻隔^[42]. 相同重金属元素在同一类型蔬菜中的 BCF 也存在较大的差异性, 例如在叶菜类蔬菜中 Cd 元素的 BCF 的最小值为 0.001 2, 最大值高达 9.23, 虽然同属于叶菜类蔬菜, 但是不同品种的叶菜对于重金属的累积能力也会存

在较大差异^[43]. 重金属在蔬菜中的积累取决于各种土壤 (土壤 pH、土壤质地、有机质和阳离子交换量等) 和植物相关因素^[44,45], 而本研究中蔬菜数据来源于不同的地区, 调查地区分布较广, 同时受到研究方法的制约, 导致研究结果不总是符合叶菜类 > 根茎类 > 果菜类的重金属积累规律^[16]. 因此, 建议根据蔬菜种植地土壤污染特征和土壤性质, 种植适当种类的低富集能力蔬菜.

2.3 基于 MCS 的健康风险评估

使用 MCS 评估与蔬菜摄入相关的健康风险的概率分布, 单项元素非致癌风险 HQ 结果表明 (表 5), 儿童的健康风险高于成人. 5 种有害元素对成人和儿童的 HQ 平均值和 75% 值均小于 1, HQ 平均值表现为: Pb > Hg > Cd > As > Cr. 因此, 5 种有害重金属元素对成人和儿童所造成的潜在风险概率较小, 风险都在可接受范围内. 宋勇进等^[46]基于已有数据对我国大部分省市蔬菜中重金属进行健康风险评估, 发现 HQ 值从大到小为: As > Cd > Pb > Cr > Hg; 冯宇佳等^[47]发现华北地区蔬菜单一重金属的健康风险表现为: Cr > Cd > Cu > Pb > Zn > Ni > As, 尽管不同研究区的蔬菜重金属健康风险有一定的差异, 但是儿童的健康风险往往高于成人, 与本研究的结果一致.



箱内上线、中线和下线分别表示 75%、50% 和 25% 值 (分位值), 外部上线和下线分别表示最大值和最小值, 线以外为离群值

图 2 4 类蔬菜对重金属元素的 BCF 箱式图

Fig. 2 BCF box plots of four types vegetables for heavy metal elements

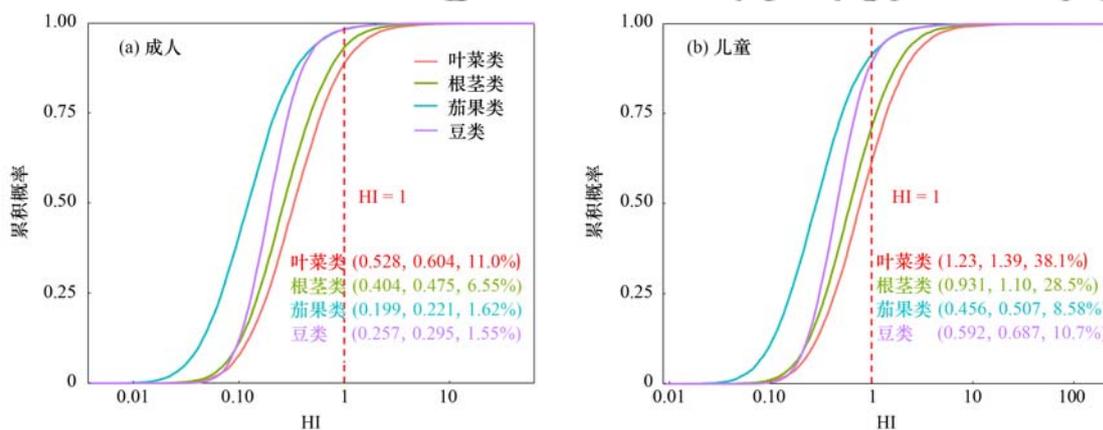
由于不同类型蔬菜对重金属的吸收转移能力和人们摄食行为的差异,不同类型蔬菜造成的健康风险可能不同^[17].多元素综合非致癌风险 HI 结果表明(图 3),摄入 4 类蔬菜的健康风险表现为:叶菜类 > 根茎类 > 豆类 > 茄果类.成人食用 4 类蔬菜的 HI 平均值和 75% 值均小于 1,风险在可接受范围内.值得关注的是,儿童食用叶菜的 HI 平均值为 1.23,超过非致癌风险控制值 1 的概率为

38.1%,食用根茎类蔬菜的 HI 平均值为 0.931,接近于可接受水平,超过非致癌风险控制值 1 的概率为 28.5%.已经有研究表明,叶菜类蔬菜是人们摄食蔬菜造成健康风险的主要风险种类^[10,17,48],与本研究的结论一致.因此,应警惕各种重金属元素造成的累积健康风险,特别是叶菜类蔬菜,有必要在综合考虑污染特征的基础上选择低富集蔬菜,将健康风险降至最低.

表 5 MCS 单项元素非致癌风险 HQ 统计

Table 5 Statistics on single element non-carcinogenic risks by MCS

项目	成人					儿童					
	Cd	As	Pb	Cr	Hg	Cd	As	Pb	Cr	Hg	
平均值	0.150	0.0019	0.173	0.0004	0.163	0.437	0.0055	0.490	0.0011	0.462	
标准差	0.518	0.0058	0.290	0.0006	0.340	1.79	0.0157	0.797	0.0017	0.939	
HQ > 1 概率/%	2.39	0	1.99	0	1.98	8.97	0.01	1.18	0	1.05	
顺序统计量	25% 值	0.0134	0.0003	0.0366	0.0001	0.0302	0.0394	0.0008	0.107	0.0003	0.0891
	50% 值	0.0398	0.0007	0.0824	0.0002	0.0721	0.117	0.0021	0.239	0.0006	0.207
	75% 值	0.118	0.0019	0.193	0.0005	0.168	0.336	0.0053	0.555	0.0013	0.480



红色虚线表示风险控制值 1; 图例表示: 蔬菜类型 (HI 平均值, HI 75% 值, HI 超过风险控制值 1 的比例)

图 3 多元素综合非致癌风险 HI 累积概率分布

Fig. 3 Cumulative probability distribution of multi-element combined non-carcinogenic risk

3 结论

(1) 蔬菜可食部位各重金属元素含量均集中在较低水平,5 种有害重金属元素的超标率大小为: Pb (18.5%) > Cd (12.9%) > Hg (11.5%) > Cr (4.03%) > As (0.21%),除根茎类蔬菜 Pb 含量平均值外,其余元素含量平均值均未超过 GB 2762-2017 中相应的限量标准.

(2) 不同种类蔬菜对 Cd、Zn 和 Cu 的富集能力整体上高于 Pb、Cr、Hg 和 As,叶菜类蔬菜表现出较强的 Cd 富集能力,根茎类蔬菜表现出较强的 Pb 富集能力,豆类蔬菜和茄果类蔬菜表现出对各种重金属的低富集.

(3) 单项元素对成人和儿童所造成的潜在风险概率较小,风险都在可接受范围内.4 类蔬菜中有害

元素的累积健康风险表现为:叶菜类 > 根茎类 > 豆类 > 茄果类,成人食用 4 类蔬菜的非致癌健康风险在可接受范围内,儿童食用叶菜的健康风险略高于可接受水平.应特别关注有毒金属的累积健康风险,在考虑污染特征的基础上选择低富集蔬菜,将健康风险降至最低.

参考文献:

[1] Liu J, Wang Y N, Liu X M, *et al.* Occurrence and health risks of heavy metals in plastic-shed soils and vegetables across China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **321**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107632.

[2] Chen Z K, Muhammad I, Zhang Y X, *et al.* Transfer of heavy metals in fruits and vegetables grown in greenhouse cultivation systems and their health risks in Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **766**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142663.

[3] Li X Y, Li Z G, Lin C J, *et al.* Health risks of heavy metal exposure through vegetable consumption near a large-scale Pb/Zn

- smelter in central China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **161**: 99-110.
- [4] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1888-1900.
Song B, Yang Z J, Zhang Y X, *et al.* Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River drainage basin in Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1888-1900.
- [5] Toplan S, Özcelik D, Gulyasar T, *et al.* Changes in hemorheological parameters due to lead exposure in female rats [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2004, **18**(2): 179-182.
- [6] Bao Z Y, Han Z B, Zhang B, *et al.* Arsenic trioxide blocked proliferation and cardiomyocyte differentiation of human induced pluripotent stem cells: Implication in cardiac developmental toxicity [J]. *Toxicology Letters*, 2019, **309**: 51-58.
- [7] Zhong T Y, Xue D W, Zhao L M, *et al.* Concentration of heavy metals in vegetables and potential health risk assessment in China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(1): 313-322.
- [8] Vannice G, Rasmussen H. Position of the academy of nutrition and dietetics; dietary fatty acids for healthy adults [J]. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2014, **114**(1): 136-153.
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [10] Hu W Y, Huang B, Tian K, *et al.* Heavy metals in intensive greenhouse vegetable production systems along Yellow Sea of China: levels, transfer and health risk [J]. *Chemosphere*, 2017, **167**: 82-90.
- [11] Liu X M, Gu S B, Yang S Y, *et al.* Heavy metals in soil-vegetable system around E-waste site and the health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **779**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146438.
- [12] Panhwar A, Faryal K, Kandhro A, *et al.* Utilization of treated industrial wastewater and accumulation of heavy metals in soil and okra vegetable [J]. *Environmental Challenges*, 2022, **6**, doi: 10.1016/j.envc.2022.100447.
- [13] Liang H, Wu W L, Zhang Y H, *et al.* Levels, temporal trend and health risk assessment of five heavy metals in fresh vegetables marketed in Guangdong Province of China during 2014-2017 [J]. *Food Control*, 2018, **92**: 107-120.
- [14] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 389-398.
Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 389-398.
- [15] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4916-4924.
Yang J Z, Wang Z L, Gao J W, *et al.* Accumulation and health risk of heavy metals in cereals, vegetables, and fruits of intensive plantations in Hainan Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4916-4924.
- [16] 冯英, 马璐瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(11): 2359-2370.
Feng Y, Ma L Y, Wang Q, *et al.* Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2359-2370.
- [17] Wang B B, Gao F, Qin N, *et al.* A comprehensive analysis on source-distribution-bioaccumulation-exposure risk of metal (loid)s in various vegetables in peri-urban areas of Shenzhen, China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **293**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118613.
- [18] Wang Y R, Wang R M, Fan L Y, *et al.* Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China [J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 613-627.
- [19] 周艳, 王金忠, 李群, 等. 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
Zhou Y, Wan J Z, Li Q, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of corn grains from a Pb-Zn mining area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- [20] Liu Y M, Liu D Y, Zhang W, *et al.* Health risk assessment of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, As and Cr) in wheat grain receiving repeated Zn fertilizers [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113581.
- [21] 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 481-489.
Dong J W, Gao P P, Sun H X, *et al.* Characteristics and health risk assessment of cadmium, lead, and arsenic accumulation in leafy vegetables planted in a greenhouse [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 481-489.
- [22] 杨焜焜, 刘杏梅, 徐建明. 土壤重金属污染健康风险评估新视角——概率风险评估的源起及展望 [J]. *土壤学报*, 2022, **59**(1): 28-37.
Yang S Y, Liu X M, Xu J M. New perspectives about health risk assessment of soil heavy metal pollution—origin and prospects of probabilistic risk analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(1): 28-37.
- [23] HJ 803-2016, 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法 [S].
- [24] Zhen H Y, Jia L, Huang C D, *et al.* Long-term effects of intensive application of manure on heavy metal pollution risk in protected-field vegetable production [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114552.
- [25] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of trace metals in surface soils of Beijing metropolitan, China [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 1002-1011.
- [26] Smith R L. Use of Monte Carlo simulation for human exposure assessment at a superfund site [J]. *Risk Analysis*, 1994, **14**(4): 433-439.
- [27] US Environmental Protection Agency (USEPA). Exposure factors handbook: 2011 edition [R]. Washington, DC: Office of Research and Development, 2011.
- [28] Zhang L E, Huang D Z, Yang J, *et al.* Probabilistic risk assessment of Chinese residents' exposure to fluoride in improved drinking water in endemic fluorosis areas [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 118-125.
- [29] US Environmental Protection Agency (USEPA). Regional screening levels (RSLs)-generic tables [EB/OL]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-Tables>, 2017-01-19.
- [30] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量 [S].
- [31] 李洋, 张乃明, 魏复盛. 滇东镉高背景区菜地土壤健康风险评估与基准 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4522-4530.
Li Y, Zhang N M, Wei F S. A benchmark study on soil health

- risks of vegetable fields in a high-cadmium background area in eastern Yunnan [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40** (10): 4522-4530.
- [32] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (2): 986-996.
- Mu H Y, Zhuang Z, Li Y M, *et al.* Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (2): 986-996.
- [33] 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.
- [34] 花陈玉. 基于食品安全的蔬菜和水稻砷吸收阻控研究 [D]. 南京: 南京大学, 2020.
- [35] Zhang X Y, Wang Z, Liu L, *et al.* Assessment of the risks from dietary lead exposure in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **418**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126134.
- [36] 仲维科, 樊耀波, 王敏健. 我国农作物的重金属污染及其防止对策 [J]. *农业环境保护*, 2001, **20** (4): 270-272.
- Zhong W K, Fan Y B, Wang M J. Pollution of heavy metals on crops and its countermeasures in China [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, **20** (4): 270-272.
- [37] Zhang X, Wang X L, Gao X B, *et al.* Heavy element contents of vegetables and health-risk assessment in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **828**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154552.
- [38] Chang C Y, Yu H Y, Chen J J, *et al.* Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186** (3): 1547-1560.
- [39] Ismael M A, Elyamine A M, Moussa M G, *et al.* Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers [J]. *Metallomics*, 2019, **11** (2): 255-277.
- [40] Liu H W, Zhang Y, Yang J S, *et al.* Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **767**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144879.
- [41] Gupta N, Yadav K K, Kumar V, *et al.* Evaluating heavy metals contamination in soil and vegetables in the region of North India: Levels, transfer and potential human health risk analysis [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2021, **82**, doi: 10.1016/j.etap.2020.103563.
- [42] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23** (4): 52-56.
- Li F L, Liu C Q, Yang Y G, *et al.* Characteristics of heavy metal transportation in vegetables soil and capsicum (*Capsicum frutescens* L. var. *longum* Bailey) system in Guiyang, Southwest China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, **23** (4): 52-56.
- [43] 杜俊杰, 李娜, 吴永宁, 等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38** (6): 1193-1201.
- Du J J, Li N, Wu Y N, *et al.* Variation in accumulation of heavy metals in vegetables and low accumulation vegetable varieties: a review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38** (6): 1193-1201.
- [44] Zhuang Z, Niño-Savala A G, Mi Z D, *et al.* Cadmium accumulation in wheat and maize grains from China: Interaction of soil properties, novel enrichment models and soil thresholds [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **275**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116623.
- [45] Huang L K, Wang Q, Zhou Q Y, *et al.* Cadmium uptake from soil and transport by leafy vegetables: a meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114677.
- [46] 宋勇进, 张新英, 韦业川. 基于文献数据的我国大部分省市蔬菜中重金属含量分布与健康风险评价 [J]. *环保科技*, 2018, **24** (3): 6-11, 20.
- Song Y J, Zhang X Y, Wei Y C. Distribution of heavy metal contents and health risk assessment in vegetables of most provinces and cities in China based on literature data [J]. *Environmental Protection and Technology*, 2018, **24** (3): 6-11, 20.
- [47] 冯宇佳, 赵全利, 孙洪欣, 等. 华北地区菜田土壤-蔬菜重金属污染状况和健康风险评价 [J]. *河北农业大学学报*, 2017, **40** (1): 1-7.
- Feng Y J, Zhao Q L, Sun H X, *et al.* Assessment of soil-vegetable contamination and health risk of heavy metals in vegetables around North China [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2017, **40** (1): 1-7.
- [48] Yang L Q, Huang B, Hu W Y, *et al.* The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in eastern China [J]. *Chemosphere*, 2014, **103**: 121-130.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)