

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023071301

CSTR:32061.14.hjhx.2023071301

许青阳, 肖凯琦, 张俊, 等. 土壤-猕猴桃系统重金属污染研究及猕猴桃健康风险评估[J]. 环境化学, 2024, 43(12): 4157-4166.

XU Qingyang, XIAO Kaiqi, ZHANG Jun, et al. Research of heavy metals pollution in soil-kiwifruit system and health risk evaluation of kiwifruit[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (12): 4157-4166.

土壤-猕猴桃系统重金属污染研究及猕猴桃健康风险评估*

许青阳 肖凯琦** 张俊 邓世民 胡向荣 樊旺东

(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 长沙, 410600)

摘要 为探究土壤-猕猴桃系统重金属污染情况以及食用猕猴桃摄入的重金属对人体产生的健康风险, 本研究运用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数评价土壤重金属污染程度, 依据猕猴桃重金属限量值的相关标准分析猕猴桃中重金属超标情况, 通过非致癌风险指数和致癌风险指数评估食用猕猴桃的健康风险, 基于相关性分析和元素生物富集系数讨论土壤-猕猴桃系统中重金属富集状况. 结果表明, 研究区猕猴桃园土壤仅存在轻微Cd污染, 整体污染情况较轻. 除4%的猕猴桃样品存在Pb超标外, 猕猴桃样品中Cd不超标. 食用猕猴桃摄入的As、Cd、Cr、Hg、Pb对人体造成健康风险的可能性较低, 其中, As、Cd、Cr、Pb是非致癌风险的主要贡献因子, Cd是致癌风险的主要贡献因子. 猕猴桃吸收重金属与土壤中重金属的含量无关, 且重金属在土壤-猕猴桃系统迁移、转化、富集能力较低.

关键词 猕猴桃, 土壤, 重金属, 污染, 健康风险.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

Research of heavy metals pollution in soil-kiwifruit system and health risk evaluation of kiwifruit

XU Qingyang XIAO Kaiqi** ZHANG Jun DENG Shimin
HU Xiangrong FAN Wangdong

(Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha, 410600, China)

Abstract In order to explore the heavy metal pollution in the soil-kiwifruit system and the health risk of heavy metals ingestion by eating kiwifruit, this study used the single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index to evaluate the degree of soil heavy metals pollution, and analyzed the excessive heavy metals in kiwifruit according to the relevant standards of the heavy metal limit value. The health risk of consumption of kiwifruit was assessed by the non-carcinogenic risk index and carcinogenic risk index, and the enrichment of heavy metals in soil-kiwifruit system was discussed based on correlation analysis and element bioconcentration factor. The results showed that there was only slight Cd pollution in the soil of kiwifruit orchard in the study area, and the overall pollution was light. Meanwhile, only 4% of the samples of kiwifruit had Pb exceeding the standard, and the Cd did not exceed the standard in kiwifruit. The As, Cd, Cr, Hg and Pb ingestion of kiwifruit had a low probability of causing human health risks in the study area. Among them, As, Cd, Cr and Pb were the main contributing factors of non-carcinogenic risk, while Cd was the main

2023年7月13日收稿(Received: July 13, 2023).

* 中国地质调查局项目(DD20211576, DD20230480)资助.

Supported by Project of China Geological Survey (DD20211576, DD20230480).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: 275965845@qq.com

contributing factor of carcinogenic risk. The absorption of heavy metals by kiwifruit had nothing to do with the content of heavy metals in soil, and the ability of heavy metals to migrate, transform and accumulate in soil-kiwifruit system was low.

Keywords kiwifruit, soil, heavy metal, pollution, health risk.

猕猴桃, 又称奇异果、羊桃、藤梨等, 是猕猴桃科猕猴桃属的一种木质藤本植物^[1]. 猕猴桃芳香多汁、营养丰富, 含有多种维生素、氨基酸和矿物质等营养成分, 具有良好的保健功能, 被誉为“水果之王”^[2-4], 主产于湖南、陕西、河南、贵州等地^[5]. 就湖南而言, 凤凰县是其猕猴桃主要的产区之一, 其猕猴桃种植面积近 10 万亩, 年产量达 9.3 万 t, 年产值达 4.16 亿元.

凤凰县优越的地理和气候条件使其种植猕猴桃具有得天独厚的优势, 然而, 前人研究表明, 凤凰县存在一定程度的土壤重金属污染^[6]. 由于土壤中的重金属元素可以被农作物吸收, 并通过食物链不断在人体内积累, 进而威胁人体造成危害^[7-11]. 因此, 凤凰县土壤重金属污染可能会对猕猴桃质量安全和人体健康产生影响.

随着人们生活条件的改善, 水果越来越成为人们日常饮食的一部分. 同时, 重金属污染物对人体的暴露途径主要有经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入, 但与经口摄入相比, 其他途径可忽略不计. 目前, 有诸多学者探讨了食用水果摄入的重金属对人体产生的健康风险, 涉及的水果包括: 香蕉^[12]、苹果^[13]、樱桃^[14]、葡萄^[15]等. 猕猴桃在水果消费总量中占有重要的比例, 但关于土壤-猕猴桃重金属方面的研究主要集中于猕猴桃园土壤重金属污染评价^[16-21]、重金属在土壤-猕猴桃系统中的富集迁移^[22-25], 其中部分研究对猕猴桃的重金属含量进行了分析和评价^[1, 23-26], 缺乏食用猕猴桃摄入的重金属对人体产生的健康风险^[27]的研究.

本研究在猕猴桃主产区凤凰县某镇采集了 50 件猕猴桃样品(配套根际土壤样品), 通过原子荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱法等方法测定了土壤及猕猴桃中 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的含量, 采用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数评价了猕猴桃园土壤重金属污染程度, 根据猕猴桃重金属限量值的相关标准对猕猴桃中重金属超标情况进行了分析, 通过非致癌风险指数和致癌风险指数评估了猕猴桃健康风险, 基于相关性分析和元素生物富集系数讨论了土壤-猕猴桃系统中重金属富集状况, 以期为保障土壤环境质量、猕猴桃质量安全和人体健康提供科学依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

研究区隶属湖南省湘西州凤凰县某镇, 区内四季分明, 气候温和, 年平均气温 15.9 °C, 年平均降雨量 1308.1 mm^[28]. 其地层以寒武系上统车夫组和比条组、白垩系下统栏垅组和神篁山组为主; 岩石类型以灰岩、白云岩、砂岩和砾岩为主; 土壤类型以石灰土和水稻土为主; 土地利用类型以林地、园地和耕地为主.

1.2 样品采集与分析测试

1.2.1 样品采集

样品采集时间为 2022 年 8 月, 结合研究区内猕猴桃园空间分布特征对土壤和猕猴桃样品进行采集, 研究区面积约为 125 km², 按照 5 km×5 km 的网格规格在每个网格中均匀布设 10 个采样点, 共布设 50 个采样点, 采集土壤样品 50 件, 并配套采集猕猴桃样品 50 件. 土壤样品在采样点周围 3—5 处采用梅花形法、交叉点法等方法进行采样, 取距猕猴桃树根系约 2 mm 的土壤样品于自封袋. 同时, 对采集了土壤样品的猕猴桃树采集猕猴桃果实(猕猴桃树树冠顶部成熟果实), 组成一个混合猕猴桃样品, 装入自封袋中, 鲜重约 1 kg. 采样点具体位置如图 1 所示.

土壤样品采回后置于通风干燥的场地自然风干, 剔除土壤以外的杂草、碎石等杂物, 碾压、研磨、过 2 mm 尼龙筛, 确保无污染后装入自封袋, 密封备用.

猕猴桃样品采回后用超纯水洗净晾干, 剥去表皮, 果肉打浆, 确保无污染后装瓶, 密封备用.

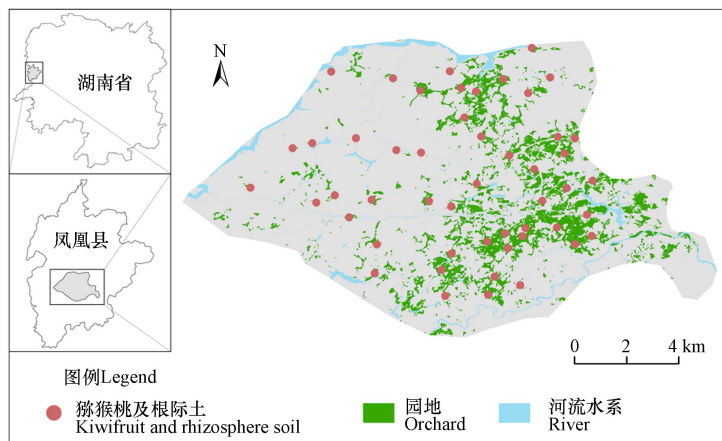


图 1 研究区土地利用类型与采样点分布图

Fig.1 Distribution of land use types and sampling sites in study area

1.2.2 分析测试

样品分析测试由湖北省地质试验测试中心完成. 土壤样品采用原子荧光光谱法(AFS)测定 As、Hg; 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Cd、Pb; X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Cr; 离子体选择性电极法(ISE)测定 pH. 猕猴桃样品采用原子荧光光谱法(AFS)测定 As、Hg; 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Cd、Cr、Pb.

样品的分析测试采用国家一级标准物质(GBW10014、GBW10015、GBW07407、GBW07447、GBW07449、GBW07451、GBW07452、GBW07453、GBW07455、GBW07431~GBW07435)和重复分析方法控制准确度和精密度. 准确度控制方法为: 每一分析批(50 件样品)插入同类型标准物质 1—2 件, 与样品同时分析, 计算单个样品单次测定值与标准物质推荐值的相对误差, 要求相对误差小于 10%. 精密度控制方法为: 采用重复分析方法控制样品分析的精密度, 每件样品进行 100% 的重复分析, 计算双份分析结果的相对双差, 要求相对双差小于 5%. 所有样品的准确度和精密度合格率均为 100%. 所有分析测试结果均符合《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T0258-2014)、《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD2005-03)等相关技术标准要求, 数据可靠.

1.3 数据分析与图件绘制

采用 Excel 2016、IBM SPSS Statistics 25 等软件进行数据处理分析, 用 ArcGIS 10.7、Origin 2021 进行图形绘制.

1.4 土壤重金属污染评价方法

评价土壤中某一重金属元素的单一污染情况采用单因子污染指数法, 计算公式为^[29]:

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

式中, P_i 为土壤重金属元素 i 的单因子污染指数; C_i 为土壤重金属元素 i 的实测值; S_i 为土壤重金属元素 i 的参考标准值, 参考标准值选用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中的农用地土壤污染风险筛选值, 如表 1 所示. 土壤重金属元素 i 污染等级可根据 P_i 划分为五个等级^[30], 详见表 2.

表 1 农用地土壤污染风险筛选值

Table 1 Soil pollution risk screening value for agricultural land

项目 Item	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
As/(mg·kg ⁻¹)	40	40	30	25
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.3	0.3	0.3	0.6
Cr/(mg·kg ⁻¹)	150	150	200	250
Hg/(mg·kg ⁻¹)	1.3	1.8	2.4	3.4
Pb/(mg·kg ⁻¹)	70	90	120	170

表 2 土壤重金属污染等级分类标准

Table 2 Classification standard of contamination grades of soil heavy metals

单因子污染指数 P_i	污染等级 Contamination grade	内梅罗综合污染指数 P_N	污染等级 Contamination grade
$P_i \leq 1$	无污染	$P_N \leq 0.7$	安全
$1 < P_i \leq 2$	轻微污染	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
$3 < P_i \leq 5$	中度污染	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
$P_i > 5$	重度污染	$P_N > 3.0$	重度污染

评价土壤中多种重金属元素的综合污染情况采用内梅罗综合污染指数法, 计算公式为^[31]:

$$P_N = \sqrt{(P_{ave}^2 + P_{max}^2)/2} \quad (2)$$

式中, P_N 为土壤多种重金属元素的内梅罗综合污染指数; P_{ave} 为土壤多种重金属元素的单因子污染指数的平均值; P_{max} 为土壤多种重金属元素的单因子污染指数的最大值. 土壤多种重金属元素综合污染等级可根据 P_N 划分为五个等级^[32], 详见表 2.

1.5 猕猴桃健康风险评估方法

猕猴桃中重金属元素经口摄入后的健康风险分别采用单项重金属元素非致癌健康风险指数 (HQ_i)、多项重金属元素非致癌健康风险指数 (HI) 和单项重金属元素致癌风险指数 (CR_i)、多项重金属元素致癌风险指数 (TCR) 评价, 计算公式为^[33-37]:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i} = \frac{C_i \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{RfD}_i} \quad (3)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i \quad (4)$$

$$CR_i = ADD_i \times SF_i = \frac{C_i \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times SF_i}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (5)$$

$$\text{TCR} = \sum_{i=1}^n CR_i \quad (6)$$

式中, ADD_i 为经口摄入重金属元素 i 的日均暴露量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; C_i 为猕猴桃可食用部分重金属元素 i 的含量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; IngR 为人均每日猕猴桃摄入量, 依据《中国居民膳食指南(2022)》2000 kcal 能量需求水平中推荐的水果类 200 g^[38], 取 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率, 猕猴桃作为应季水果, 每年可食用 3 个月(9—11 月), 取 $90 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露时间, 取 24 a^[39]; BW 为平均体重, 取 60.5 kg ^[39]; AT 为平均暴露时间, 重金属非致癌平均暴露时间取 9125 d ($\text{ED} \times 365 \text{ d}$), 重金属致癌平均暴露时间取 27667 d ($75.8 \times 365 \text{ d}$)^[39]; RfD_i 为经口摄入重金属元素 i 的暴露参考剂量, As、Cd、Cr、Hg、Pb 的 RfD ^[33-37] 分别为 $0.0003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.0010 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.0030 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.0003 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.0035 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; SF_i 为经口摄入重金属元素 i 的致癌斜率系数, As、Cd、Cr、Pb 的 SF ^[33-37, 40-41] 分别为 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ 、 $6.1 \text{ kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.0085 \text{ kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$. 当 HQ_i 或 $HI < 1$, 表示非致癌风险可以忽略; 当 HQ_i 或 $HI > 1$, 表示存在非致癌风险; HQ_i 或 HI 数值越大, 非致癌风险越高. 当 CR_i 或 $\text{TCR} < 1 \times 10^{-6}$, 表示不存在显著的致癌风险; 当 CR_i 或 TCR 介于 1×10^{-6} — 1×10^{-4} , 表示致癌风险在可以接受范围之内; CR_i 或 $\text{TCR} > 1 \times 10^{-4}$, 表明存在显著的致癌风险; CR_i 或 TCR 数值越大, 致癌风险越高.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 土壤重金属含量

猕猴桃园土壤重金属含量及 pH 值统计结果见表 3. 土壤 pH 范围介于 3.98—7.48, 其中有 76% 采样点的土壤 $\text{pH} \leq 5.14$, 表明猕猴桃园土壤以偏酸性为主. 土壤 As、Cd、Cr、Hg、Pb 平均含量分别为

9.85、0.22、62.37、0.12、32.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, 土壤 As、Cr、Hg、Pb 平均含量均低于湖南省土壤背景值^[42]或与其相当, 分别是湖南省土壤背景值的 0.63、0.87、1.07、1.09、0.89 倍; 土壤 Cd 平均含量明显高于背景值, 为湖南省土壤背景值的 1.75 倍, 表明猕猴桃园土壤中 Cd 存在一定程度的富集。

变异系数是表征数据之间离散程度的重要统计量^[43], 变异系数越大, 离散程度就越大^[44], 表明其受到人为干扰越大^[45]。一般地, 变异系数小于 10% 为弱变异, 变异系数介于 10%—100% 之间的为中等变异, 变异系数大于 100% 为强变异^[46-47]。由表 3 可知, 5 种重金属元素变异程度为: $\text{Hg}>\text{Cd}>\text{As}>\text{Pb}>\text{Cr}$, 除 Pb 和 Cr 含量的变异系数临界于 10% 外, 其余 3 种重金属元素含量变异系数均显著高于 10%, 属中等变异, 说明 Hg、Cd、As 受到相当程度人类活动的影响。

表 3 猕猴桃园土壤重金属含量描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of soil heavy metals of kiwifruit orchards

项目 Item	最大值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Maximum value	最小值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Minimum value	中值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Median value	平均值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Mean value	标准差/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Standard deviation	变异系数/ $(\%)$ Variation coefficient	湖南省土壤背景值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ Hunan Province soil background value
As	20.50	6.50	9.03	9.85	2.99	30.37	15.70
Cd	0.43	0.09	0.22	0.22	0.07	33.53	0.13
Cr	75.30	53.00	62.25	62.37	5.89	9.45	71.40
Hg	0.39	0.06	0.11	0.12	0.06	45.02	0.12
Pb	40.70	25.60	32.20	32.47	3.62	11.16	29.70
pH	7.48	3.98	4.75	—	—	—	5.60

注: pH无量纲; “—”表示无数据。Note: pH is dimensionless; “—” means no data.

2.2 土壤重金属污染评价

利用式(1)和(2)计算猕猴桃园土壤重金属污染指数, 由计算结果可得, P_{As} 、 P_{Cd} 、 P_{Cr} 、 P_{Hg} 、 P_{Pb} 、 P_{N} 分别介于 0.16—0.51、0.29—1.43、0.30—0.50、0.05—0.22、0.23—0.58、0.34—1.08 之间。由图 2 可知, 猕猴桃园土壤 5 种重金属单因子污染指数中位值依次为 $\text{Cd}>\text{Pb}>\text{Cr}>\text{As}>\text{Hg}$ 。由图 3 可知, 除 Cd 外, 各采样点的土壤 As、Cr、Hg、Pb 均为无污染($P_i \leq 1$); 有 12% 采样点的土壤 Cd 为轻度污染($1 < P_{\text{Cd}} \leq 2$), 其余采样点的土壤 Cd 均为无污染($P_{\text{Cd}} \leq 1$)。从内梅罗综合污染指数 P_{N} 来看, 有 72% 的采样点处于安全($P_{\text{N}} \leq 0.7$); 有 26% 的采样点处于警戒线($P_{\text{N}} \leq 1$); 有 2% 的采样点处于轻度污染($1 < P_{\text{N}} \leq 2$)。总的来看, 猕猴桃园土壤重金属污染以 Cd 为主, 整体污染情况较轻。

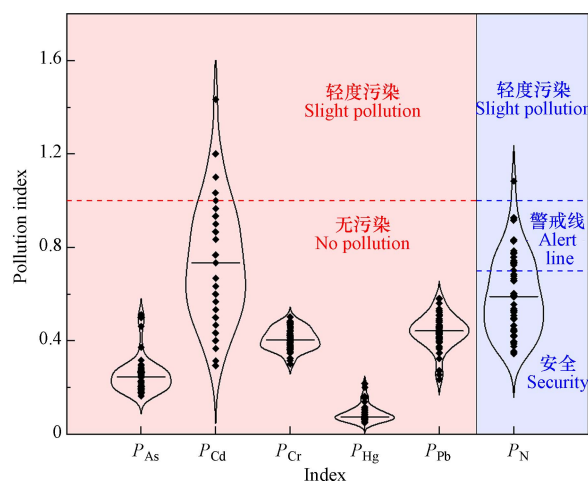


图 2 猕猴桃园土壤重金属单因子污染指数(P_i)和内梅罗综合污染指数(P_{N})

Fig.2 The single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index of soil heavy metals of kiwifruit orchards

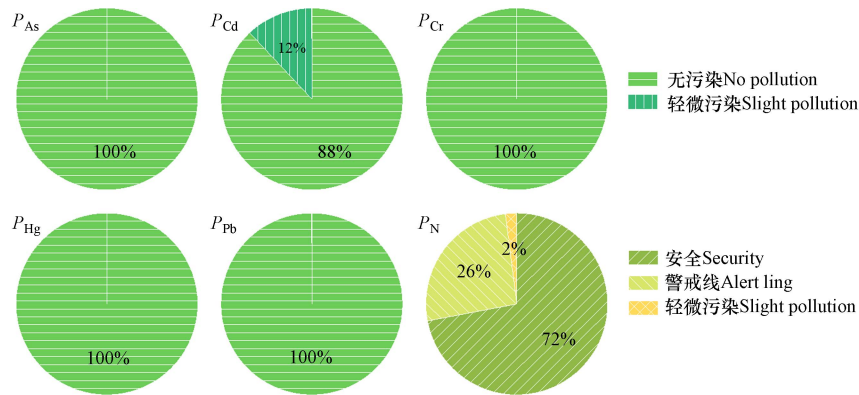


图3 猕猴桃园土壤重金属污染等级分布情况

Fig.3 Distribution of contamination grades of soil heavy metals of kiwifruit orchards

2.3 猕猴桃重金属含量

对猕猴桃样品中重金属含量进行统计,元素含量以鲜重表示,结果见表4。由表4可知,除Hg外,猕猴桃样品中其他重金属的检出率为100%,Hg检出率仅为12%。猕猴桃样品中As、Cd、Cr、Hg、Pb含量最大值分别为0.0020、0.0081、0.0152、0.0004、0.1550 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022)中规定的猕猴桃重金属限量值对照可知,猕猴桃样品中Cd含量低于猕猴桃重金属含量限值,Pb的超标率仅为4%,说明猕猴桃样品中重金属污染程度较轻微。

表4 猕猴桃重金属含量描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of kiwifruit heavy metals

项目 Item	检出率/% Detection ratio	最大值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Maximum value	最小值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Minimum value	限量值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Limit value	超标率/% Exceed ratio
As	100	0.0020	0.0011	—	—
Cd	100	0.0081	0.0009	0.05	0
Cr	100	0.0152	0.0072	—	—
Hg	12	0.0004	<0.0003	—	—
Pb	100	0.1550	0.0023	0.1	4

注:“—”表示无数据。Note:“—” means no data.

2.4 猕猴桃健康风险评价

猕猴桃中重金属经口摄入后的非致癌风险和致癌风险评价结果图4所示。猕猴桃样品中As、Cd、Cr、Hg、Pb的HQ最大值为 5.47×10^{-3} 、 6.63×10^{-3} 、 4.12×10^{-3} 、 9.77×10^{-4} 、 3.61×10^{-2} ,HI最大值为 4.59×10^{-2} ,远小于1,表明食用猕猴桃摄入的5种重金属不太可能对人体造成非致癌风险。猕猴桃样品中As、Cd、Cr、Pb的CR最大值为 7.79×10^{-7} 、 1.28×10^{-5} 、 1.05×10^{-6} 、 1.78×10^{-8} ,TCR最大值为 1.44×10^{-5} ,小于 10^{-4} ,表明食用猕猴桃摄入的4种重金属对人体造成的致癌风险属于可接受范围。

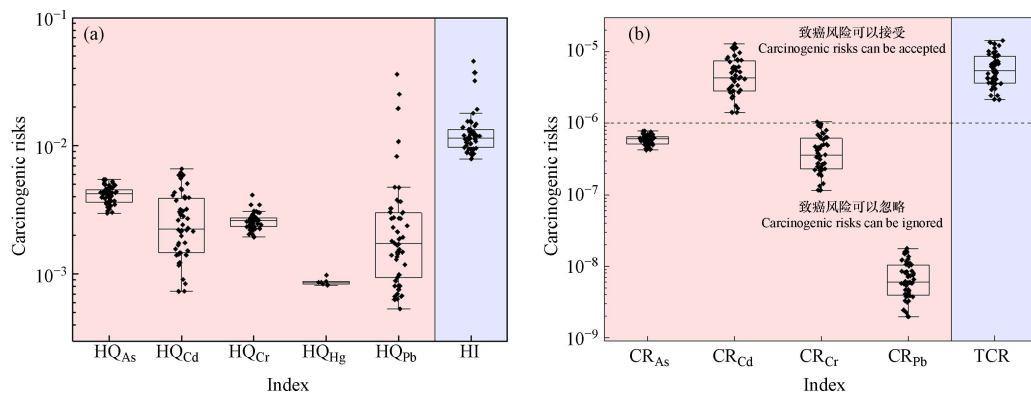


图4 食用猕猴桃摄入重金属的非致癌风险指数(a)与致癌风险指数(b)

Fig.4 The non-carcinogenic risk index (a) and carcinogenic risk index (b) of heavy metals ingestion by eating kiwifruit

猕猴桃中重金属经口摄入后对非致癌风险和致癌风险的贡献率平均值结果图 5 所示, 其中, 个别猕猴桃样品中 Hg 含量低于检出限的, 按 Hg 检出限的 50% 赋值, 计算其对健康风险的贡献率平均值。由图 5 可知, 5 种重金属对人体的非致癌风险贡献由高到低为 As>Cd>Cr>Pb>Hg, 其中, As、Cd、Cr、Pb 是造成非致癌风险的主要重金属元素。4 种重金属对人体的致癌风险贡献由高到低为 Cd>As>Cr>Pb, 其中, Cd 是造成致癌风险的主要重金属元素。

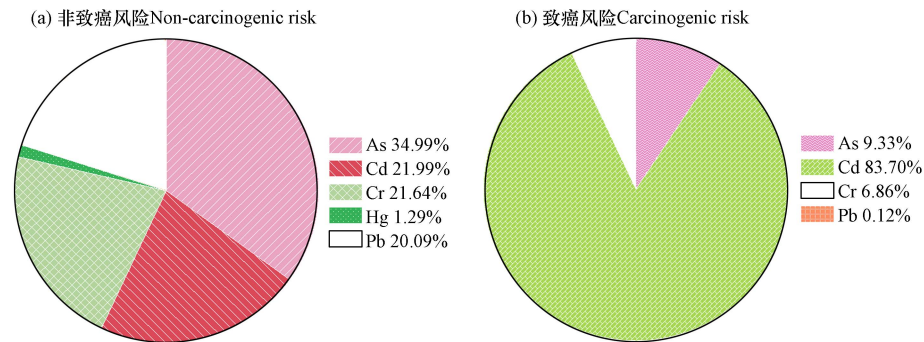


图 5 重金属对非致癌风险指数(a)与致癌风险指数(b)的贡献率平均值

Fig.5 Mean values of contribution rates of heavy metals to non-carcinogenic risk index (a) and carcinogenic risk index (b)

整体而言, 食用猕猴桃摄入的 5 种重金属对人体造成非致癌风险和致癌风险的可能性较低。然而, 谷类、蔬菜类和水产品在居民的饮食中经常含有高浓度的重金属^[48-53], 因此, 仍需重视重金属可能对人体构成的健康风险。

2.5 土壤-猕猴桃系统重金属富集状况

分析猕猴桃及其相应土壤中的重金属含量之间相关性, 结果如表 5 所示。As、Cd、Cr、Hg、Pb 在土壤重金属含量与猕猴桃重金属含量之间均表现出无显著相关性 ($P>0.05$), 表明猕猴桃吸收 As、Cd、Cr、Hg、Pb 元素的量与土壤中重金属元素的量无关。

表 5 土壤-猕猴桃系统重金属相关性分析

Table 5 Correction analysis of heavy metals in soil-kiwifruit system

项目 Item	As	Cd	Cr	Hg	Pb
相关系数 r	-0.012	0.108	-0.117	-0.267	-0.025
显著性 P	0.937	0.456	0.417	0.609	0.863

元素生物富集系数是元素在生物中含量与在土壤中含量的比值^[54], 可以反映生物对土壤中元素的吸收和富集能力^[55-56], 元素生物富集系数值越大, 表明生物对土壤中该元素的富集能力越强。计算 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的生物富集系数, 结果如表 6 所示。猕猴桃对土壤 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的生物富集系数最大值分别为 2.51×10^{-4} 、 7.07×10^{-2} 、 2.38×10^{-4} 、 3.64×10^{-3} 、 4.60×10^{-3} , 均小于 1, 说明这 5 种重金属元素均不易从土壤迁移、转化、富集到猕猴桃中。

表 6 重金属生物富集系数

Table 6 Bioconcentration factors of heavy metals

项目 Item	As	Cd	Cr	Hg	Pb
最大值	2.51×10^{-4}	7.07×10^{-2}	2.38×10^{-4}	3.64×10^{-3}	4.60×10^{-3}
最小值	7.78×10^{-5}	3.84×10^{-3}	1.06×10^{-4}	—	6.46×10^{-5}

注: “—”表示无数据。Note: “—” means no data.

3 结论(Conclusion)

1) 猕猴桃园土壤重金属单因子污染指数 P_i 表明, 除 12% 采样点的土壤 Cd 为轻微污染外, 各采样点的土壤重金属均无污染; 内梅罗综合污染指数 P_N 表明, 有 28% 采样点的土壤重金属综合污染程度

处于警戒线及以上污染程度,其中,26%处于警戒线,2%处于轻度污染.总的来看,猕猴桃园土壤有轻微Cd污染,整体污染情况较轻.

2)根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022)中规定的猕猴桃重金属限量值,猕猴桃样品中仅存在4%的Pb超标的样品,即猕猴桃样品中重金属污染程度较轻微.

3)食用猕猴桃摄入的As、Cd、Cr、Hg、Pb不太可能对人体造成非致癌风险,其中,As、Cd、Cr、Pb是非致癌风险的主要贡献因子;食用猕猴桃摄入的As、Cd、Cr、Pb对人体造成致癌风险属于可接受范围,其中,Cd是致癌风险的主要贡献因子.

4)猕猴桃重金属含量与土壤重金属含量之间无显著相关性,表明猕猴桃吸收重金属与土壤中重金属的含量无关.猕猴桃对土壤重金属的生物富集系数均小于1,说明重金属在土壤-猕猴桃系统迁移、转化、富集能力较低.

参考文献 (References)

- [1] 李轶,鲁兵,杨静玥,等.湘西产猕猴桃重金属含量分析及矿物质营养价值评价[J].食品安全质量检测学报,2021,12(4): 1380-1385.
LI Y, LU B, YANG J Y, et al. Analysis of heavy metals and nutritive assessment of minerals in kiwifruits produced in western Hunan Province[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(4): 1380-1385 (in Chinese).
- [2] 马建岗,杨水云,林淑萍,等.猕猴桃籽有机成分的初步研究[J].西北植物学报,2003,23(12): 2172-2175.
MA J G, YANG S Y, LIN S P, et al. Purification of active components from kiwifruit seeds by HPLC[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(12): 2172-2175 (in Chinese).
- [3] 李洁维,毛世忠,梁木源,等.猕猴桃属植物果实营养成分的研究[J].广西植物,1995,15(4): 377-382.
LI J W, MAO S Z, LIANG M Y, et al. Studies on the contents of nutritive component of fruits of genus actinidia[J]. Guihaia, 1995, 15(4): 377-382 (in Chinese).
- [4] 栾霞,李秀娟,郭咪咪.湘西猕猴桃籽成分分析及猕猴桃籽油的特性研究[J].中国油脂,2017,42(8): 136-139.
LUAN X, LI X J, GUO M M. Xiangxi kiwifruit seed component and characteristics of kiwifruit seed oil[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(8): 136-139 (in Chinese).
- [5] 黄诚,周长春,李伟.猕猴桃的营养保健功能与开发利用研究[J].食品科技,2007,32(4): 51-55.
HUANG C, ZHOU C C, LI W. Nutrition and health care function of kiwi fruit and its processing technique[J]. Food Science and Technology, 2007, 32(4): 51-55 (in Chinese).
- [6] 肖凯琦,徐宏根,甘杰,等.湘西南部地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价[J].环境科学,2024,45(3): 1760-1768.
XIAO K Q, XU H G, GAN J, et al. Traceability analysis and environmental quality assessment of soil heavy metal pollution in southwest Hunan Province[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1760-1768(in Chinese).
- [7] TIMOFEEV I, KOSHELEVA N, KASIMOV N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 242: 279-289.
- [8] LIM H S, LEE J S, CHON H T, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag Mine in Korea[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, 96(2/3): 223-230.
- [9] 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: 142663.
- [10] 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.
- [11] 王伟全,徐冬莹,黄青青,等.污灌区土壤:小麦系统中重金属富集特征及其对人体健康风险评价[J].环境化学,2022,41(10): 3231-3243.
WANG W Q, XU D Y, HUANG Q Q, et al. Characteristics of heavy metals in the soil-wheat system of sewage irrigation area and its health risk assessment[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(10): 3231-3243 (in Chinese).
- [12] ROMERO-ESTÉVEZ D, YÁNEZ-JÁCOME G S, SIMBAÑA-FARINANGO K, et al. Distribution, contents, and health risk assessment of cadmium, lead, and nickel in bananas produced in Ecuador[J]. Foods, 2019, 8(8): 330.
- [13] WANG Q Y, LIU J S, CHENG S. Heavy metals in apple orchard soils and fruits and their health risks in Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(1): 4178.
- [14] 刘强,呼丽萍,鱼潮水.土壤—樱桃系统重金属累积和樱桃食用健康风险评价[J].中国土壤与肥料,2018(2): 161-169.
LIU Q, HU L P, YU C S. Accumulation of heavy metals in the soil-cherry system and health risk assessment—a case study in Qin Zhou area, Tianshui city[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(2): 161-169 (in Chinese).
- [15] LI X M, DONG S J, SU X O. Copper and other heavy metals in grapes: A pilot study tracing influential factors and evaluating potential risks in China[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 17407.
- [16] 杜启露,程志飞,刘品桢,等.贵州省修文县猕猴桃生态园区土壤重金属污染现状评价[J].水土保持通报,2019,39(1): 264-270.
DU Q L, CHENG Z F, LIU P Z, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution in kiwi fruit base of modern ecological park in Xiufen

- County, Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 264-270 (in Chinese).
- [17] 蔡娜, 谢静, 党华美, 等. 贵州省主要猕猴桃果园土壤重金属安全评价 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(1): 255-260.
CAI N, XIE J, DANG H M, et al. Safety evaluation of heavy metal in soils of main kiwifruit orchards in Guizhou Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(1): 255-260 (in Chinese).
- [18] 李晓彤, 岳田利, 胡仲秋, 等. 陕西省猕猴桃园土壤重金属含量及污染风险评价 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(2): 173-178.
LI X T, YUE T L, HU Z Q, et al. Concentrations of soil heavy metals in kiwi fruit orchards in Shaanxi and risk evaluation[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(2): 173-178 (in Chinese).
- [19] 张翼飞, 王洋, 任丹, 等. 无公害猕猴桃生产基地土壤中重金属累积状况研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(3): 219-223.
ZHANG Y F, WANG Y, REN D, et al. Research on heavy metal accumulation in soil in an organic kiwi fruit production base[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(3): 219-223 (in Chinese).
- [20] 党华美. 土壤—猕猴桃重金属含量特征及质量评价: 以水城、修文基地为例 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
DANG H M. Characteristics and quality assessment of heavy metal content in soil-kiwi[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016 (in Chinese).
- [21] 栗婷, 任晓姣, 齐高旺, 等. 猕猴桃产区土壤重金属分布特征及生态环境污染风险评价: 以西安市周至县为例 [J]. *土壤与作物*, 2022, 11(3): 307-319.
LI T, REN X J, QI G W, et al. Distribution characteristics of soil heavy metals and ecological environment pollution risk assessment in the kiwifruit production area of Zhouzhi in Xi'an[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(3): 307-319 (in Chinese).
- [22] 徐浩龙. 猕猴桃根、叶、果与土壤中 6 种金属元素的分布特征及其相关性 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 946-951.
XU H L. Distribution characteristics and correlation of six metal elements in kiwifruit root, leaf, fruit and soil[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(3): 946-951 (in Chinese).
- [23] 贺灵, 孙彬彬, 吴超, 等. 浙江省江山市猕猴桃果园土壤环境质量与生态风险评价 [J]. *岩矿测试*, 2019, 38(5): 524-533.
HE L, SUN B B, WU C, et al. Assessment of soil environment quality and ecological risk for kiwifruit orchards in Jiangshan city, Zhejiang Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(5): 524-533 (in Chinese).
- [24] 杨玉, 童雄才, 王仁才, 等. 湖南猕猴桃园土壤重金属含量分析及污染评价 [J]. *农业现代化研究*, 2017, 38(6): 1097-1105.
YANG Y, TONG X C, WANG R C, et al. Analysis and safety evaluation of heavy metal contamination in kiwifruit orchard soils in Hunan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, 38(6): 1097-1105 (in Chinese).
- [25] 王仁才, 石浩, 庞立, 等. 湘西猕猴桃种植基地土壤和猕猴桃中重金属积累状况研究 [J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(3): 280-285.
WANG R C, SHI H, PANG L, et al. Accumulation of heavy metals in soil and kiwifruit of planting base in western Hunan Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3): 280-285 (in Chinese).
- [26] 赵金梅, 段爱莉, 高贵田, 等. 陕西省主产区主栽品种猕猴桃果实中 Cu、Zn、Mn、Pb、Cd 含量检测 [J]. *食品工业科技*, 2012, 33(21): 309-311,348.
ZHAO J M, DUAN A L, GAO G T, et al. Determination of Cu, Zn, Mn, Pb and Cd content of kiwifruit fruit of the main cultivars in the major kiwifruit production area of Shaanxi Province[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(21): 309-311,348 (in Chinese).
- [27] GUO J, YUE T L, LI X T, et al. Heavy metal levels in kiwifruit orchard soils and trees and its potential health risk assessment in Shaanxi, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(14): 14560-14566.
- [28] 湖南省民政厅. 湖南省行政区划大典 [M]. 长沙: 湖南地图出版社, 2015.
Hunan Provincial Civil Affairs Department. Important books of administrative division of Hunan Province[M]. Changsha: Hunan Map Press, 2015 (in Chinese).
- [29] CHAI L, WANG Y H, WANG X, et al. Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107507.
- [30] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2022, 43(9): 4756-4766.
WANG Y, XIN C L, YU S, et al. Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4756-4766 (in Chinese).
- [31] NEMEROW N L. Scientific stream pollution analysis[M]. Washington: Scripta Book Co., 1974.
- [32] 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 等. 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2023, 44(4): 2192-2203.
MA J, SHEN Z J, ZHANG P P, et al. Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in farmland soils around the gangue heap of coal mine based on APCS-MLR and PMF receptor model[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2192-2203 (in Chinese).
- [33] US EPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1989.
- [34] US EPA. Guidelines for exposure assessment[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1992.
- [35] US EPA. Handbook for non-cancer health effects evaluation[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [36] US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[R]. Washington D C: United States

- Environmental Protection Agency, 2002.
- [37] US EPA. Exposure factor handbook[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 2011.
- [38] 中国营养学会. 中国居民膳食指南-2022[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.
Chinese Nutrition Society. Dietary guide for China residents-2022[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022 (in Chinese).
- [39] 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.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (Adults)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013 (in Chinese).
- [40] WANG F F, GUAN Q Y, TIAN J, et al. Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor[J]. *CATENA*, 2020, 191: 104573.
- [41] KHARAZI A, LEILI M, KHAZAEI M, et al. Human health risk assessment of heavy metals in agricultural soil and food crops in Hamadan, Iran[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 100: 103890.
- [42] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
China National Environmental Monitoring Centre. The background concentrations of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990 (in Chinese).
- [43] 王乔林, 宋云涛, 王成文, 等. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3693-3703.
WANG Q L, SONG Y T, WANG C W, et al. Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in Western Yunnan[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3693-3703 (in Chinese).
- [44] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 3919-3929.
CHAI L, WANG X, MA L, et al. Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(9): 3919-3929 (in Chinese).
- [45] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 768-774.
XIE X J, KANG J C, LI W J, et al. Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 768-774 (in Chinese).
- [46] FENG J X, ZHU X S, WU H, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of a typical restored mangrove-aquaculture wetland in Shenzhen, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(2): 1033-1039.
- [47] 刘继龙, 刘璐, 马孝义, 等. 不同尺度不同土层土壤盐分的空间变异性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(2): 305-312.
LIU J L, LIU L, MA X Y, et al. Spatial variability of soil salt in different soil layers at different scales[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(2): 305-312 (in Chinese).
- [48] 李浩杰, 钞锦龙, 姚万程, 等. 小麦籽粒重金属含量特征及人体健康风险评价: 以河南省北部某县为例[J]. *环境化学*, 2022, 41(4): 1158-1167.
LI H J, CHAO J L, YAO W C, et al. Characteristics of heavy metal content in wheat grains and human health risk assessment—a County in northern Henan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(4): 1158-1167 (in Chinese).
- [49] CHIEN L C, HUNG T C, CHOANG K Y, et al. Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 285(1/2/3): 177-185.
- [50] HUANG M L, ZHOU S L, SUN B, et al. Heavy metals in wheat grain: Assessment of potential health risk for inhabitants in Kunshan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1/2/3): 54-61.
- [51] WANG X L, SATO T, XING B S, et al. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 350(1/2/3): 28-37.
- [52] ZHENG N, WANG Q C, ZHENG D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 383(1/2/3): 81-89.
- [53] 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 (in Chinese).
- [54] 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 等. 江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 331-340.
LIAO Q L, LIU C, CAI Y M, et al. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 331-340 (in Chinese).
- [55] GU Q B, YU T, YANG Z F, et al. Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: A case study of Guangxi, China[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, 70: 103199.
- [56] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1864-1870.
WANG R, HU X L, ZHANG Y W, et al. Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4): 1864-1870 (in Chinese).