

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241106005

引用格式: 王一鸣, 刘丽萍, 张妮娜, 等. 华北平原某地区农产品重金属含量及膳食摄入风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 66-75

WANG YM, LIU LP, ZHANG NN, *et al.* Risk assessment of heavy metal content and dietary intake of agricultural products in a region of the North China Plain [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 66-75. (in Chinese with English abstract).

# 华北平原某地区农产品重金属含量及 膳食摄入风险评估

王一鸣<sup>1,2</sup>, 刘丽萍<sup>1,2\*</sup>, 张妮娜<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 陈绍占<sup>1</sup>, 李乾玉<sup>3</sup>, 闫章怡<sup>1,2</sup>

(1. 北京市疾病预防控制中心, 食物中毒诊断溯源技术北京市重点实验室, 北京 100013;  
2. 首都医科大学公共卫生学院, 北京 100069; 3. 石景山区疾病预防控制中心, 北京 100043)

**摘要:** **目的** 探究华北某市农村地区农产品中铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、锡(Sn)、镍(Ni)、铬(Cr)重金属含量, 并评价经膳食途径摄入的安全风险。**方法** 采用微波消解对样品进行前处理, 应用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对2022—2024年在该市农村地区采集的611份农产品中Pb、Cd、Hg、As、Sn、Ni、Cr 7种元素类污染物含量进行测定, 利用单因子污染指数法(single factor index,  $P_i$ )、内梅罗综合污染指数法(Nemero composite pollution index,  $P_N$ )和目标危害系数法(target hazard quotient/total target hazard quotient, THQ/TTHQ)对农产品中重金属的污染水平进行评估。**结果** 农产品中除Hg以外均有检出, 其中个别样品中Pb和Cr超出GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量标准》中规定的限量( $Pb \leq 0.2$  mg/kg,  $Cr \leq 0.5$  mg/kg), 7种元素含量水平总体较低, 其在农产品中排序为Ni (0.192 mg/kg) > Cr (0.040 mg/kg) > Pb (0.017 mg/kg) > Sn (0.011 mg/kg) > As (0.009 mg/kg) > Cd (0.005 mg/kg), 不同种类、不同地区的农产品重金属含量差异较大, 所有农产品的THQ/TTHQ均小于1, 单因子污染指数及内梅罗污染指数小于1。**结论** 研究地区农产品质量安全情况良好, 重金属污染水平较低, 但东南部的个别村镇可能存在潜在的重金属暴露风险, 儿童的膳食暴露风险大于成人。

**关键词:** 农产品; 重金属; 污染评价; 摄入风险评估

## Risk assessment of heavy metal content and dietary intake of agricultural products in a region of the North China Plain

WANG Yi-Ming<sup>1,2</sup>, LIU Li-Ping<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Ni-Na<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, CHEN Shao-Zhan<sup>1</sup>,  
LI Qian-Yu<sup>3</sup>, YAN Zhang-Yi<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Food Poisoning Diagnosis and Traceability Technology, Beijing Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100013, China; 2. School of Public Health, Capital Medical University, Beijing 100069, China; 3. Shijingshan District Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100043, China)

收稿日期: 2024-11-06

基金项目: 首都卫生发展科研专项项目首发课题项目(2022-2G-30113)

第一作者: 王一鸣(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为与健康相关的有害物质和营养成分分析。E-mail: wym05130524@163.com

\*通信作者: 刘丽萍(1965—), 女, 教授, 主要研究方向为与健康相关的有害物质和营养成分分析。E-mail: llp9312@163.com

**ABSTRACT: Objective** To explore the contents of 7 kinds of elements in agricultural products in a certain area in North China plain, including lead (Pb), cadmium (Cd), mercury (Hg), arsenic (As), tin (Sn), nickel (Ni) and chromium (Cr), and evaluate the safety risks of dietary ingestion. **Methods** The samples were pretreated by microwave digestion, and the contents of 7 kinds of heavy metals in 611 agricultural products collected in the certain area from 2022 to 2024 were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Index ( $P_i$ ), Nemero comprehensive pollutant index ( $P_N$ ) and target hazard quotient/total target hazard quota (THQ/TTHQ) were used to evaluate the pollution levels of heavy metals in agricultural products. **Results** All elements except Hg were detected in the agricultural products. Among them, the content of Pb and Cr in individual samples exceeded the limit values specified in GB 2762—2022 *National food safety standard-Limits of contaminants in foods* ( $Pb \leq 0.2$  mg/kg,  $Cr \leq 0.5$  mg/kg). The overall content levels of the 7 kinds of elements were relatively low, and their order in the agricultural products was Ni (0.192 mg/kg) > Cr (0.040 mg/kg) > Pb (0.017 mg/kg) > Sn (0.011 mg/kg) > As (0.009 mg/kg) > Cd (0.005 mg/kg), the heavy metal content of agricultural products in different types and regions was quite different, and the THQ/TTHQ of all agricultural products was less than 1, and the  $P_i$  and  $P_N$  were less than 1. **Conclusion** The quality and safety of agricultural products in the study area are in good condition, and the level of heavy metal pollution is relatively low. However, there may be potential heavy metal exposure risks in some individual villages and towns in the southeastern part, and the dietary exposure risks for children are greater than those for adults.

**KEY WORDS:** agricultural products; heavy metal; pollution assessment; ingestion risk assessment

## 0 引言

随着人们生活水平的提高和大众对食品安全的重视,食品中重金属污染问题越来越受到全球的关注,不同于有机污染物,重金属污染物不易降解,容易在食品中富集。农产品在种植过程中易受土壤、肥料、灌溉用水和空气中重金属的污染,从而造成食物中重金属的富集<sup>[1]</sup>。有研究表明,对于当地居民,食用受污染的农产品是人体暴露于重金属的主要途径。常见的重金属主要包括铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铬(Cr)等,类金属砷(As)的毒性较大,也一直受到关注<sup>[2]</sup>,其中As、Pb、Cd、Hg被美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)列入了前20种危险物质清单<sup>[3]</sup>,是联合国粮农组织和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)重点关注的重金属,对人体有明显的毒害作用。如长期处于Pb暴露,可诱发贫血,造成心血管疾病,甚至可导致儿童发育迟缓;长期Cd暴露,可造成人体肾脏损伤,引起全身骨质疏松、骨骼萎缩,例如日本的“痛痛病”; $Cr^{6+}$ 和As均具有致癌性,导致皮肤溃疡,形成“铬疮”和“砷斑”<sup>[4]</sup>;Cr、Ni浓度过高时则对人体有一定的毒害作用。

GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量标准》规定了Pb、Cd、Hg、As、Sn、Ni、Cr为7种元素类污染物,由于在环境污染方面,这些污染元素的生物毒性较为显著,也被归为重金属<sup>[5]</sup>,其中对农产品设置限量规定的有Pb、Cd、Hg、As、Cr 5种元素。通过分析Pb、

Cd、Hg、As、Sn、Ni、Cr等重金属的污染特征,对Pb、Cd、Hg、As、Cr 5种元素进行食品安全评价,对保障农产品质量和安全水平具有重要意义<sup>[6]</sup>。课题研究的华北某地区曾发现个别区域存在砷等重金属污染现象<sup>[7-9]</sup>,目前由于城市发展及土地利用类型的改变,该地区有些已发展为工业用地,有些以农作物种植为主,但近年来鲜有针对该地区农产品中重金属的风险研究,为了探究该地区的自产农作物中是否存在重金属污染情况,有必要对其农作物进行风险评估。

目前现有研究大多采用原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectroscopy, AFS)、石墨炉原子吸收光谱法(graphite furnace atomic absorption spectrometry, GFAAS)、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)等技术方法测定农作物中的重金属,如余飞等<sup>[10]</sup>采用AFS和ICP-MS方法检测了矿区周边种植区的谷类作物的As、Cd、Cr等重金属,白保勋等<sup>[11]</sup>用GFAAS和AFS测定了农作物籽类中Cd、Pb、Hg等重金属。由于AFS、GF-AAS测定的元素较少,分析效率较低;ICP-MS具有线性范围宽、灵敏度高、准确度好的优点,可实现多元素同时测定。因此,本研究采用微波消解-ICP-MS法测定农作物中的Pb、Cd、Hg、As、Sn、Ni、Cr元素含量,结合健康风险评估模型,通过食品安全风险评估对农产品中重金属的安全性进行评价,为食品安全及环境污染评价提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 研究区概况

研究区位于北纬 39°, 东经 116°, 属农业大区, 地处华北平原北部, 属于温带季风气候, 年降水量在 600~700 mm 之间, 年平均气温 25~26 °C。研究区位于市郊, 包括 TZ 区、PG 区、SY 区, SY 区和 PG 区位于该市东北部, TZ 区位于该市东南部, 3 个区的农村地区均有种植农产品的农田, 主要供给当地居民, 近年来随着土地利用类型的改变, 该区土壤重金属的含量水平也受到影响, 农产品也随之受到影响, 有必要对其进行分析研究。样品采样点位分布见图 1。

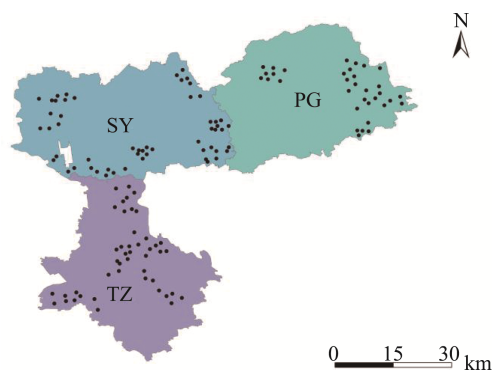


图 1 采样点位分布图  
Fig.1 Sampling point distribution map

#### 1.1.2 样品采集

2022—2024 年期间, 课题组于 TZ 区村镇采集了 302 份农产品, PG 区村镇采集了 160 份农产品, SY 区村镇采集了 149 份农产品, 共计 611 份不同类型的农产品, 包含瓜果类、叶菜类、谷物类、水果类及坚果类等。按要求经预处理后取可食部分粉碎均匀, 装入洁净的聚丙烯离心管中冷冻保存。

#### 1.1.3 仪器与试剂

7700x 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司); Milli-Q Integral 超纯水纯化系统(美国 Millipore 公司); AL204DU-IC 电子天平(感量 0.001 g, 瑞士 Mettler Toledo 公司); TOPEX+微波消解仪、聚四氟乙烯微波消解罐(上海屹尧仪器科技发展有限公司)。

多元素混合标准储备溶液(质量浓度 1000 mg/L, 美国 Agilent 公司); 高纯氩气(纯度大于 99.995%, 北京天海工业有限公司); 硝酸(优级纯, 德国 Merck 公司)。

## 1.2 方 法

### 1.2.1 实验方法

准确称取粉碎均匀的样品 0.5~2.0 g 左右(精确至 0.001 g)于微波消解罐中, 加入 6 mL HNO<sub>3</sub> 后, 按照优化

好的程序进行消解。消解程序: 先升温至 120 °C 后保温 5 min, 再升温至 160 °C 持续 10 min, 再升温至 200 °C, 保持 25 min。用超纯水将消解液转移定容至 25 mL, 同时做空白对照。参照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中的 ICP-MS 法进行 Pb、Cd、Hg、As、Sn、Ni、Cr 含量的测定。

### 1.2.2 仪器条件

ICP-MS 工作参数: 射频入射频率: 1550 W; 载气(高纯氩气)流速: 0.65 L/min; 补偿气流速: 0.45 L/min; 射频电压: 1.80 V; 采样深度: 8.0 mm; 泵速: 0.1 r/s。

### 1.2.3 重金属污染评价方法

#### (1) 单项污染指数

通过单因子污染指数法(single factor index,  $P_i$ )对农产品污染状况进行评价<sup>[12]</sup>。 $P_i=C_i/S_i$ 。 $C_i$  为重金属含量测定值,  $S_i$  为 GB 2762—2022 中的限量值。污染指数的评价等级为:  $P_i \leq 1.0$  为无污染;  $1.0 < P_i \leq 2.0$  为轻度污染;  $2.0 < P_i \leq 3.0$  为中度污染;  $P_i > 3.0$  为严重污染<sup>[13]</sup>。

#### (2) 内梅罗综合污染指数

采用内梅罗综合污染指数法(Nemero comprehensive pollutant index,  $P_N$ )评价农产品的总体质量, 计算公式见(1):

$$P_N = \sqrt{(P_{i\text{avg}}^2 + P_{i\text{max}}^2) / 2} \quad (1)$$

式中:  $P_{i\text{avg}}$  为每种元素的平均  $P_i$  值;  $P_{i\text{max}}$  为每种元素的最大  $P_i$  值。 $P_N$  分级为: 无污染( $P_N \leq 0.7$ ); 污染警戒线( $0.7 < P_N \leq 1.0$ ); 低污染水平( $1.0 < P_N \leq 2.0$ ); 中等污染水平( $2.0 < P_N \leq 3.0$ )和高污染水平( $P_N > 3.0$ )。

$P_i$  仅反映某个重金属的环境质量状况,  $P_N$  引入了食品中高含量重金属的相应权重, 总体上能更加客观的分析其对环境质量的综合影响作用。

### 1.2.4 人体健康风险评价方法

采用美国国家环境保护局(Environmental Protection Agency, EPA)建议的目标危害系数法(target hazard quotient/total target hazard quotient, THQ/TTHQ)评价重金属对人体的健康风险<sup>[14]</sup>。单一重金属的健康风险  $\text{THQ} = (\text{EF} \times \text{ED} \times \text{FIR} \times C) / (\text{RFD} \times \text{WAB} \times \text{TA}) \times 10^{-3}$ 。TTHQ 为单一重金属 THQ 之和,  $\text{TTHQ} = \sum \text{THQ}$ 。若  $\text{THQ}$  ( $\text{TTHQ}$ )  $< 1$ , 表明没有明显的健康风险; 若  $\text{THQ}$  ( $\text{TTHQ}$ )  $\geq 1$ , 表示暴露人群存在健康风险。 $\text{THQ}$  ( $\text{TTHQ}$ ) 越大, 说明其对健康的负面影响越大<sup>[15]</sup>。计算参数见表 1。

## 1.3 质量控制

样品采集时充分考虑样品的代表性, 样品测定时采用相似基体的有证标准参考物质和平行样进行质量控制, 对含量超出限量标准的样品进行复测, 保证了检测结果的准确可靠。

表1 目标危害系数法计算参数

Table 1 Calculation parameters of the target hazard quotient

参数	名称	取值	参考来源
EF/(d/a)	暴露频率	365	[16]
ED/a	暴露时间	30(成人)	[17]
		7(儿童)	[14]
FIR/(g/d)	蔬菜摄入剂量	244.95(成人)	[18]
		186.8(儿童)	
C/(mg/kg)	蔬菜中重金属含量	测定值	本研究
TA/d	平均暴露时间	10950(成人)	[14]
		2555(儿童)	
WAB/kg	平均体重	63.45(成人)	[20]
		25.6(儿童)	
RFD/[mg/(kg·d)]	参考剂量	RFD(Pb)=0.0035	[21]
		RFD(Cd)=0.001	
		RFD(Cr)=0.001	
		RFD(As)=0.0003	
		RFD(Hg)=0.0003	

## 1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 29.0 对实验数据进行录入和分析,描述性分析包括数据范围、四分位数、平均数、标准差、变异系数,统计推断根据正态性检验和方差齐性检验,对结果进行非参数检验(Kruskal-Wallis),其中接受统计显著差异为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 农产品中重金属含量情况

统计 611 份农产品中 7 种元素类污染物的检测结果,见表 2。测定结果表明,Ni 平均含量最高,为 0.192 mg/kg,其次是 Cr (0.040 mg/kg),As、Pb、Cd、Sn 含量相对较低,平

均值处于 0.005~0.017 mg/kg 之间。Hg 在所有样品中均未检出,其余重金属均有不同程度的检出,其中检出率较高的为 Ni、Cd、Pb,均达到 90%以上,其余由高到低依次为 Cr (84.0%)>As (79.0%)>Sn (73.0%)。4 份样品 Cr 含量超标(超标率为 0.6%)、2 份样品 Pb 含量超标(超标率为 0.3%),所有样品中 As、Hg、Cd 含量均符合要求。

### 2.2 不同农产品类别中的重金属含量

将所有农产品按照不同类型分类统计。分别计算每种农产品类别中重金属的分布范围,在表 3 中列出。As 在所有类别农产品中均有检出,其中坚果类的检出率最高为 88.2%,其次是瓜果类(82.8%)>水果类(75.5%),As 在坚果类中的含量最高,为 0.23 mg/kg,其次是叶菜类(0.012 mg/kg)。Cr 在坚果类中均有检出,其中叶菜类、谷物类均达到 80%以上,其次是瓜果类、水果类。叶菜类和谷物类中 Cr 的含量分别是 0.075、0.050 mg/kg,水果类含量最低。Cd 在所有农产品类别中均有检出,叶菜类(95.6%)和瓜果类(93.0%)中较高,其次是谷物类和坚果类。坚果类中 Cd 的含量最高,为 0.025 mg/kg。Pb 均有检出,叶菜类最高,其次是瓜果类(91.2%)、谷物类和坚果类(82.4%);谷物类中 Pb 的含量最高 0.044 mg/kg,其次是叶菜类(0.028 mg/kg);Ni 在坚果类中均有检出,谷物类、瓜果类、水果类中的检出率均大于 90%,其中坚果类和谷物类中 Ni 的含量较高(大于 1.0 mg/kg),Sn 在各农产品类别中的检出率排序为:坚果类>谷物类>水果类>叶菜类>瓜果类,坚果类和谷物类中 Sn 的含量较高。

研究地区同一元素类污染物在不同农产品中富集特征差异较大,反映了不同农产品对土壤中重金属的选择性吸收和累积<sup>[22]</sup>。Hg 在所有类别农产品中均未检出,坚果类中 As、Cd、Ni 等元素含量较高,谷物类中 Pb、Sn 等元素含量较高,瓜果类和水果类的重金属含量都很低。叶菜类普遍比其他种类中重金属含量要高,可能与不同品种作物对土壤中重金属吸收能力有差异,也可能由于叶菜类蔬菜叶表面积较大,空气中的重金属颗粒污染物更易于沉降在叶菜表面,通过光合作用进入植物体内,增加了重金属的来源途径<sup>[23-24]</sup>。

表2 农产品中重金属含量情况  
Table 2 Heavy metal content in crops

元素	样品数/份	含量范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	检出数/份	检出率/%	超标数/份	超标率/%	限量值/(mg/kg)
As	611	ND~0.23	0.009	485	79.0	0	0	0.5
Cr		ND~0.97	0.040	516	84.0	4	0.6	0.5
Cd		ND~0.14	0.005	570	92.8	0	0	0.2
Pb		ND~0.74	0.017	567	92.3	2	0.3	0.2
Hg		ND	ND	0	0	0	0	0.01
Ni		ND~4.47	0.192	572	93.2	—	—	—
Sn		ND~0.43	0.011	448	73.0	—	—	—

注:ND 表示未检出;因 GB 2762—2022 未对农产品中 Sn、Ni 制定限量标准,故不予统计,用—表示。

表 3 不同种类农产品的重金属检出率及超标率(%)  
Table 3 Detection rates of heavy metals in different types of agricultural products (%)

种类	份数	As		Cr		Cd		Pb		Hg		Ni		Sn	
		检出率	超标率	检出率	超标率	检出率	超标率	检出率	超标率	检出率	超标率	检出率	超标率	检出率	超标率
叶菜类	228	71.2		86.9	4 (1.8)	95.6		95.6		0		76.4		65.1	
瓜果类	284	82.8		77.5		93		91.2	/	0		95.8		64.6	
水果类	49	75.5	/	71.4	/	71.4	/	81.6		0	/	93.9	/	67.3	/
谷物类	33	61.8		82.4		88.2		82.4	2 (6.0)	0		97.1		79.4	
坚果类	17	88.2		100		88.2		82.4	/	0		100		88.2	

注: /表示为零。

图 2 为不同种类农产品中重金属含量分布的柱状图, 由图 2 可知, 对于 GB 2762—2022 作出限量规定的 5 种元素类污染物, 所有农产品中的含量均低于限量标准; 在所研究的各类农产品类别中, Ni 的含量最高, 其中坚果类的 Ni 含量接近 2 mg/kg, Cr、As、Cd、Pb 含量较低, Hg 含量低于检出限, 不同农产品类别中重金属含量有较大差异。

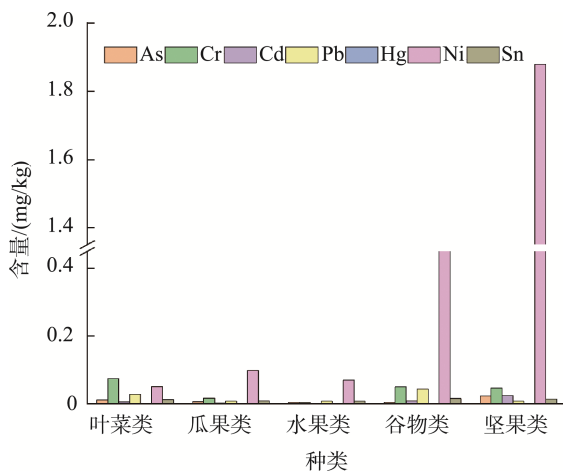


图 2 不同农产品类别中重金属含量分布柱状图

Fig.2 Histogram of heavy metal content distribution in different types of agricultural products

### 2.3 不同地区农产品重金属含量分析

比较 TZ 区、PG 区、SY 区 3 个区农产品中重金属的含量, 由于重金属含量分布均不符合正态分布, 选用非参数检验方法。经统计分析, TZ 区 3 类农产品中 As、Cr、Cd、Pb、Ni、Sn 的含量差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。SY 区 3 类农产品中除 Ni 之外其他重金属含量差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。PG 区 3 类农产品中 6 种元素类污染物含量差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。

参考 GB 2762—2022 的限量标准规定, 3 个区农产品的重金属含量均符合限量标准, 但 TZ 区中有个别样品中 Cr、Pb 的测定值超标, 包括 4 份叶菜类的 Cr 含量超标 ( $> 0.5$  mg/kg), 2 份谷物类的 Pb 含量超标 ( $> 0.2$  mg/kg), PG 区、SY 区样品均低于限量标准。如表 4, TZ 区农产品的

As、Cr、Pb、Sn 的含量均最高, 分别是 0.011、0.058、0.026 和 0.017 mg/kg, PG 区农产品的 Cd、Ni 的含量最高, 分别是 0.008、0.591 mg/kg, 说明 TZ 区农产品中存在 As、Cr、Pb、Sn 污染, PG 区谷物类农产品中主要存在 Ni 污染。

表 4 不同地区农产品重金属含量(mg/kg)

Table 4 Results of heavy metals in agricultural products in different regions (mg/kg)

金属	项目	TZ 区	PG 区	SY 区
As	平均值	0.011	0.007	0.008
	最大值	0.234	0.172	0.059
	$P_{25}$	0.002	/	/
	$P_{75}$	0.015	0.013	0.011
Cr	平均值	0.058	0.029	0.017
	最大值	0.969	0.476	0.157
	$P_{25}$	0.001	0.002	/
	$P_{75}$	0.061	0.025	0.022
Cd	平均值	0.004	0.008	0.005
	最大值	0.026	0.14	0.033
	$P_{25}$	0.001	/	/
	$P_{75}$	0.005	0.008	0.006
Hg	平均值			
	最大值		/	
	$P_{25}$			
Pb	平均值	0.026	0.011	0.006
	最大值	0.736	0.284	0.06
	$P_{25}$	0.002	/	/
	$P_{75}$	0.03	0.01	0.009
Ni	平均值	0.06	0.591	0.033
	最大值	0.516	4.47	0.239
	$P_{25}$	0.019	0.008	0.01
	$P_{75}$	0.07	0.171	0.04
Sn	平均值	0.017	0.008	0.002
	最大值	0.428	0.079	0.046
	$P_{25}$	/	0.001	/
	$P_{75}$	0.015	0.009	0.001

注: /表示小于零, 下同。

### 2.4 不同地区农产品重金属污染程度评价

用 As、Pb、Cr、Cd 的  $P_i$  值来评价不同地区农产品污染情况, 结果见表 5。所有样品的  $P_i$  均低于 1, 说明该地区农产品的整体污染水平较低。3 类农产品的  $P_N$  依次为: 谷物类>叶菜类>瓜果类, 总体而言, TZ 区农产品均表现为无污染, 其中叶菜类中的污染指数排序为 Cr>Pb>As>Cd, 瓜果类和谷物类农产品中的污染指数排序为 Pb>Cr>Cd>As, 说明叶菜类中更易累积 Cr, 这与相关研究结果<sup>[25-26]</sup>一致。

PG、SY 区 3 类农产品的  $P_i$  均低于 1, 表明农产品中

As、Pb、Cr、Cd 处于安全水平。其中 PG 区水果类的  $P_N$  最低, 为 0.019, 谷物类的  $P_N$  最高, 为 0.139; 瓜果类和叶菜类均低于谷物类。叶菜类中  $P_i$  值的排序为: Cr>Cd>Pb>As, 瓜果类中  $P_i$  值的排序为: Cd>Cr>Pb>As。SY 区瓜果类中  $P_i$  值的排序为: Cd>Cr>As>Pb, 叶菜类的  $P_i$  值排序为: Cd>Cr>Pb>As, 在不同种类的农产品中, 叶菜类中重金属的  $P_i$  值最高, 水果类中各元素的  $P_i$  值最低, 与其他两区中农产品污染指数排序相同, 可能与水果类中水分含量较高有关。

表 5 不同地区农产品重金属的  $P_i$  和  $P_N$  值  
Table 5  $P_i$  and  $P_N$  of heavy metals in agricultural products in different regions

地区	种类	$P_i$				$P_N$	级别
		As	Cr	Cd	Pb		
TZ 区	叶菜类	0.038	0.248	0.036	0.154	0.275	无污染
	瓜果类	0.016	0.049	0.023	0.066	0.076	无污染
	谷物类	0.009	0.044	0.018	0.369	0.385	无污染
PG 区	叶菜类	0.011	0.093	0.091	0.082	0.082	无污染
	瓜果类	0.009	0.029	0.134	0.012	0.100	无污染
	水果类	/	/	0.007	0.024	0.019	无污染
	谷物类	0.010	0.117	0.179	0.021	0.139	无污染
SY 区	坚果类	/	/	/	0.040	0.040	无污染
	瓜果类	0.012	0.015	0.049	0.008	0.038	无污染
	叶菜类	0.021	0.066	0.162	0.041	0.125	无污染
	水果类	/	/	0.024	0.003	0.019	无污染

### 2.5 不同食物类别对重金属的贡献

计算通过食物摄入的不同重金属的总摄入量, 见表 6。将不同类别食物中的相应浓度乘以个体平均消耗的食物重量得到重金属的每日膳食摄入量<sup>[27]</sup>。对研究地区的居民来说, 谷物类的日消费率为 366 g/d, 蔬菜类为 252 g/d, 水果类为 69 g/d<sup>[28]</sup>。如表 6 所示, 通过食物摄入重金属的估计每日摄入量排序为: Cr>Pb>As>Cd。Cr 的摄入量是 42.00  $\mu\text{g/d}$ , Pb 的摄入量是 25.9  $\mu\text{g/d}$ , As 的摄入量是 6.76  $\mu\text{g/d}$ , Cd 的摄入量是 5.63  $\mu\text{g/d}$ 。

此外, 为了更好分析不同食物类别中重金属的来源差异, 还分析了食物类别对重金属的贡献率。如图 3, 不同

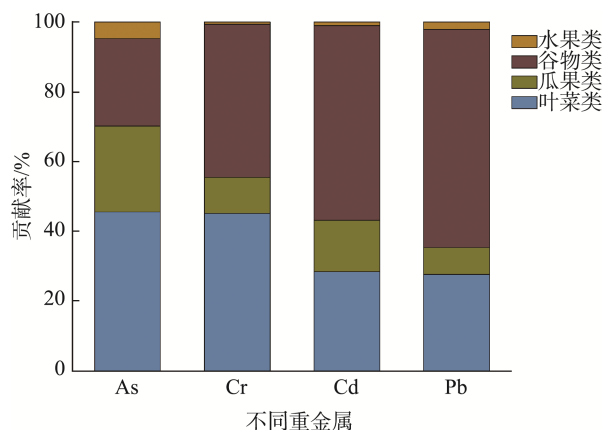


图 3 不同重金属经膳食途径摄入的贡献百分比  
Fig.3 Percentage contribution analysis of different heavy metals ingested through the diet

表 6 经膳食途径摄入的重金属含量( $\mu\text{g/d}$ )  
Table 6 Content of heavy metals ingested through the diet ( $\mu\text{g/d}$ )

元素	叶菜类	瓜果类	谷物类	水果类	总摄入量
As	3.08	1.68	1.68	0.32	6.76
Cr	18.90	4.35	18.40	0.29	42.00
Cd	1.61	0.82	3.15	0.06	5.63
Pb	7.18	1.97	16.20	0.56	25.90

重金属对食物的贡献率差异较大。重金属的主要贡献者是蔬菜及谷类, 其中 As 的主要贡献食物为叶菜类(45.6%), 其次是瓜果类和谷物类(24.8%), Cr 的贡献食物是叶菜和谷物类(45%), 其次是瓜果类(10.4%), Cd 的贡献食物是谷物类(56%), 其次是叶菜类(28.5%)和瓜果类(14.5%), Pb 的贡

献食物是谷物类(62.5%)和叶菜类(27.7%)。以上结果表明,叶菜类对 As、Cr 的摄入贡献最大,谷物类对 Cd、Pb 的摄入贡献最大。该研究结果与李俐<sup>[29]</sup>的研究一致。因此叶菜类和谷物类可能是通过食用进入人体的重金属主要来源,还需进一步研究验证。

## 2.6 经膳食途径摄入的食品安全评估

采用目标危害系数法对农产品中 As、Cr、Cd、Pb 进行食品安全评估,计算成人和儿童通过农产品摄入重金属的 THQ 和 TTHQ 值,不同地区农产品中单一重金属健康风险评估结果见表 7。复合健康风险贡献率见图 4。

表 7 经膳食途径摄入的 THQ 及 TTHQ 值  
Table 7 THQ and TTHQ values ingested through the dietary route

地区	取样量	元素	THQ(成人)			THQ(儿童)		
			$\bar{X} \pm S$	最大值	$N$ (THQ>1)	$\bar{X} \pm S$	最大值	$N$ (THQ>1)
TZ 区	n=302	As	0.138±0.220	3.01	3 (1.0)	0.260±0.416	5.69	6 (2.0)
		Cr	0.079±0.173	1.25	3 (1.0)	0.150±0.327	2.36	5 (1.7)
		Cd	0.015±0.017	0.10	0	0.028±0.032	0.19	0
		Pb	0.031±0.073	0.81	0	0.059±0.139	1.53	1 (0.3)
PG 区	n=160	As	0.052±0.088	0.52	0	0.099±0.167	1.83	3 (1.9)
		Cr	0.037±0.079	0.61	0	0.071±0.149	1.16	1 (0.6)
		Cd	0.031±0.071	0.54	0	0.059±0.134	0.69	0
		Pb	0.013±0.030	0.31	0	0.024±0.057	0.59	0
SY 区	n=149	As	0.102±0.120	0.76	0	0.193±0.227	1.44	2 (1.3)
		Cr	0.022±0.031	0.20	0	0.041±0.058	0.38	0
		Cd	0.022±0.057	0.66	0	0.041±0.109	0.24	0
		Pb	0.007±0.010	0.07	0	0.013±0.019	0.13	0

注:  $\bar{X} \pm S$  表示均值±标准偏差,  $N$  表示样品份数。

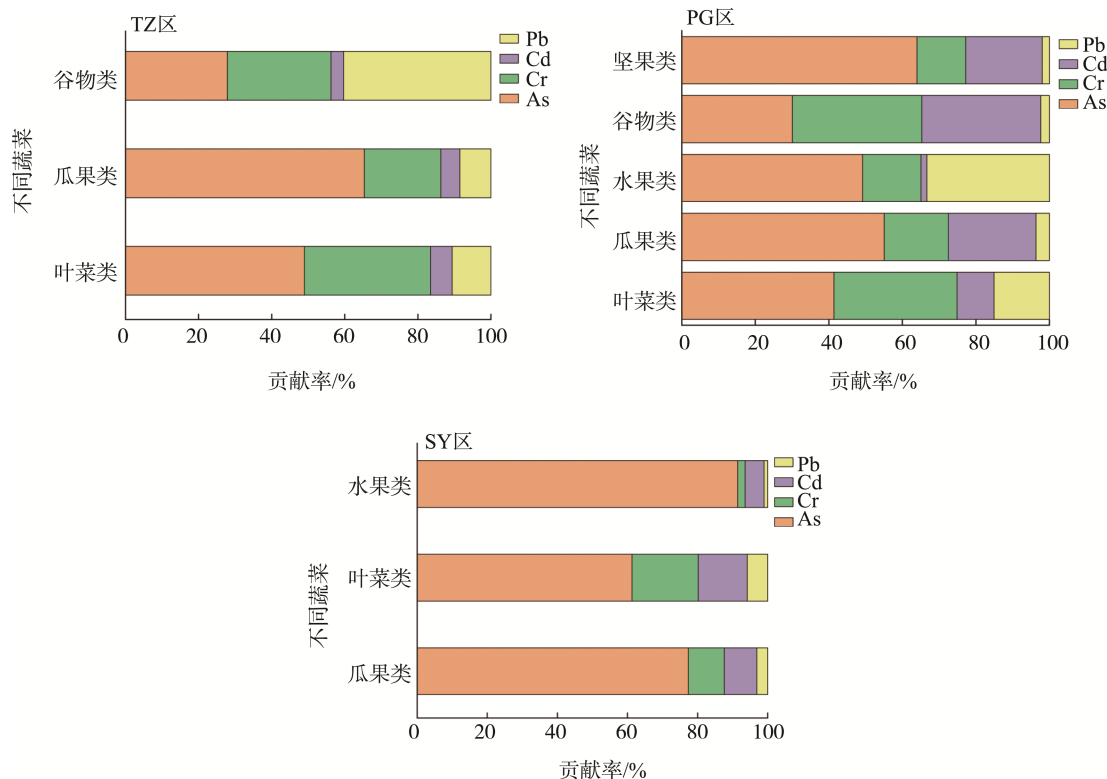


图 4 农产品重金属 TTHQ 贡献率条形图

Fig.4 Bar graph of the contribution rate of TTHQ of heavy metals in crops

在TZ区,As、Cr、Cd、Pb在成人及儿童中的 $\bar{X}_{THQ}$ 均 $<1$ ;对于成人共有6份农产品的 $THQ>1$ ,分别是叶菜类中的As和Cr,对于儿童共有12份农产品样品的 $THQ>1$ ,分别是5份叶菜类、1份瓜果类的砷、5份叶菜类的Cr和1份谷物类的Pb。儿童摄入As的 $\bar{X}_{THQ}$ 最高,其次是Cr,测定结果发现叶菜类中更易赋存Cr,但是Cr的毒性和其价态有很大关联<sup>[30]</sup>,研究表明 $Cr^{3+}$ 毒性低,而 $Cr^{6+}$ 是一种剧毒污染物,它通过食物链在人体内富集,易被人体吸收<sup>[31]</sup>,因此总Cr含量超标,还需要进一步对Cr的赋存形式进行研究。虽然TZ区的农产品中As含量均符合要求,但是经过THQ评估发现存在As的潜在暴露风险,还有1份谷物类农产品中Pb的 $THQ>1$ ,与Pb含量超标样品一致。

对PG区和SY区的农产品进行食品安全评估,As、Cr、Cd、Pb在成人及儿童中的 $\bar{X}_{THQ}$ 均 $<1$ ;成人的THQ值均 $<1$ ,PG区儿童中存在4份农产品的THQ值 $>1$ ,其中有2份叶菜类的As、1份叶菜类的Cr、1份瓜果类的As,水果类、谷物类中的 $THQ<1$ ,SY区儿童而言,存在2份叶菜类农产品的 $As_{THQ}>1$ ,叶菜类中的As的 $\bar{X}_{THQ}$ 最高,谷物类中Cr的 $\bar{X}_{THQ}$ 最高,叶菜类中Pb的 $\bar{X}_{THQ}$ 最高。

从单一重金属风险来看,成人和儿童经膳食途径摄入3个地区农产品是安全的。不同种类的农产品对重金属的蓄积能力不同,其中叶菜类和瓜果类中均表现为As的 $\bar{X}_{THQ}$ 最高,但在谷物类中Pb的 $\bar{X}_{THQ}$ 最高。该研究结果与杨洋等<sup>[32]</sup>的研究结果一致,通过监测2013—2016年安徽省六安市食品,对Pb、Cd的平均值、检出率、超标率等进行分析,发现各类食品中重金属Pb、Cd的健康风险为谷物类最高,水果类最低。

图4为3个区的农产品中重金属的TTHQ贡献率。TZ区叶菜类的TTHQ相对较高,尤其是儿童的TTHQ接近1,说明在TZ区儿童经膳食途径引起的潜在风险较高,应受到关注,其余种类农产品中,儿童的TTHQ均在0.5左右,成人的TTHQ在0.2左右,成人的TTHQ普遍低于儿童,农产品中重金属对成人不构成健康风险;儿童由于摄入频率和体重的差异,TTHQ相对较高,在所有种类的农产品中,PG和SY区水果类的TTHQ值最低,叶劲松等<sup>[33]</sup>的研究也证明了这一点,由于儿童身体尚未发育完全,特别是肝、肾等器官的排泄、解毒功能较弱,他们对重金属污染更敏感。

由图4可知,3个区农产品中As对TTHQ的贡献率较高,尤其是SY区表现明显,TZ区Cd占比最低,SY区和PG区Pb的贡献率占比最低,说明农产品中As的潜在风险相对较高,Pb的贡献率相对较低;整体而言,在该市农村地区的农产品中,As是该地区居民TTHQ的主要风险贡献因子。

### 3 结论与讨论

食物是人体摄入重金属的主要途径,而土壤是大气、水圈和生物中重金属的主要来源<sup>[34]</sup>,土壤中重金属累积对食品安全造成潜在威胁,并对人类健康产生有害影响,城市郊区土壤重金属污染源较其他地区复杂,主要来源于农业生产中的灌溉、周边工业矿区和人为活动等。因此,研究城郊农产品重金属污染状况,开展风险评估,可为制定污染控制措施提供依据。

本研究采集了研究区共611份农产品进行重金属含量测定及风险评估,结果表明,采集样品的华北某地区农产品质量安全情况良好,重金属的 $P_i$ 和THQ均 $<1$ ,其中儿童经口摄入As、Cr、Pb的风险较成人高,不同重金属的污染程度存在一定差异,SAWUT等<sup>[35]</sup>的研究表明我国北方农业区表层土壤易受到来自Cr、Pb、As的不同程度污染。所有农产品中均未检出Hg、Ni和Sn的含量水平较高,As、Cr、Cd、Pb含量水平较低,污染主要集中在TZ区的个别村镇,可能与灌溉水质有关,PG区农产品整体情况良好。

#### 参考文献

- [1] 龙新宪,刘文晶,仇荣亮.中国农田土壤重金属污染的人体健康风险评估:研究进展与展望[J].土壤学报,2024,61(5):1188-1200.  
LONG XX, LIU WJ, QIU RL. Research progress and prospects of human health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5): 1188-1200.
- [2] 李悦清,尤帅,张嘉坤,等.京津冀产区梨农药残留膳食摄入风险评估[J].食品安全质量检测学报,2024,15(19):28-35.  
LI YQ, YOU S, ZHANG JK, et al. Risk assessment of dietary intake of pesticide residues in Pyrus in the Beijing-Tianjin-Hebei production area [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(19): 28-35.
- [3] 孙淳浩,余丹,王冬艳,等.吉林中部黑土区重金属元素生态地球化学特征[J].世界地质,2018,37(4):1301-1308.  
SUN CH, YU D, WANG DY, et al. Accumulation characteristics and influencing factors of heavy metal elements in crops from the black soil areas of Lishu County, Jilin [J]. World Geology, 2018, 37(4): 1301-1308.
- [4] RAI PK, LEE SS, ZHANG M, et al. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management [J]. Environment International, 2019, 125: 365-385.
- [5] 王玺,罗亚翠,张海君.2019—2023年台州市市售蔬菜中9种金属与类金属污染状况及健康风险评估[J].现代预防医学,2024,51(14):2662-2668.  
WANG X, LUO YC, ZHANG HJ. Pollution status and health risk assessment of 9 metals and metalloids on sale vegetables in Taizhou City, 2019—2023 [J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(14): 2662-2668.
- [6] 张翼飞,马培振,牟明杰,等.斑纹小贻贝和翡翠贻贝软体部重金属

- 和食用安全比较研究[J]. 海洋通报: 1-11. [2024-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1076.P.20241104.1523.002.html>
- ZHANG YF, MA PZ, MOU MJ, *et al.* A comparative study on the soft body heavy metals and food safety of spotted mussels and jade mussels [J]. *Marine Science Bulletin*, 1-11. [2024-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1076.P.20241104.1523.002.html>
- [7] 周少磊, 刘波, 王鹏, 等. 北京市通州区农村饮用水砷暴露健康风险评估[J]. 预防医学, 2022, 34(7): 705-709.
- ZHOU SL, LIU B, WANG P, *et al.* Health risk assessment of arsenic exposure in rural drinking water in Tongzhou District, Beijing Municipality [J]. *China Preventive Medicine Journal*, 2022, 34(7): 705-709.
- [8] CAO WG, GUO HM, ZHANG YL, *et al.* Controls of paleochannels on groundwater arsenic distribution in shallow aquifers of alluvial plain in the Hetao Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 958-968.
- [9] 张娟, 王明君, 郭掌珍. 朔州东部农田土壤-农作物重金属富集及健康风险评估[J]. 环境化学, 2024, 43(4): 1315-1329.
- ZHANG J, WANG MJ, GUO ZZ. Evaluation of heavy metal enrichment and health risks in agricultural soils-crops in eastern Shuozhou, Shanxi Province, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(4): 1315-1329.
- [10] 余飞, 王锐, 周皎, 等. 典型汞矿区周边耕地土壤重金属来源解析与农作物健康风险评估[J]. 物探与化探, 2024, 48(3): 847-857.
- YU F, WANG R, ZHOU J, *et al.* Sources of soil heavy metals and health risk assessment of crops in arable land at the periphery of a typical mercury mining area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2024, 48(3): 847-857.
- [11] 白保勋, 徐婷婷, 陈东海, 等. 农田土壤和作物籽粒常见重金属含量影响因素分析[J]. 上海农业学报, 2023, 39(6): 76-81.
- BAI BX, XU TT, CHEN DH, *et al.* Analysis of factors influencing the content of common heavy metals in farmland soil and crop grains [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2023, 39(6): 76-81.
- [12] 郑钦月, 辜世伟, 胡云均, 等. 烧烤蘸料中重金属污染情况及膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 309-316.
- ZHENG QY, GU SW, HU YJ, *et al.* Analysis of heavy metal contamination and dietary risk assessment in barbecue condiment [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(14): 309-316.
- [13] 沈登辉, 林超, 席煜, 等. 2018—2019年芜湖市蔬菜中重金属污染状况及健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2021, 48(3): 554-558.
- SHEN DH, LIN C, XI Y, *et al.* Pollution status and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Wuhu City, 2018—2019 [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2021, 48(3): 554-558.
- [14] CHANG CY, YU HY, CHEN JJ, *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]. *Springer International Publishing*, 2014, 186(3): 1547-1560.
- [15] 张小红, 赵青, 路兴乐. 滨州市谷物及蔬菜中铅、镉、总砷暴露量及风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(7): 877-879, 883.
- ZHANG XH, ZHAO Q, LU XL. The exposure and risk assessment of lead, cadmium and arsenic in cereals and vegetables in Binzhou City [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2021, 31(7): 877-879, 883.
- [16] WATER U. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories-volume 1: Fish sampling and analysis; third edition [Z]. United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [17] SONG B, LEI M, CHEN TB, *et al.* Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(12): 1702-1709.
- [18] 金水高. 中国居民营养与健康状况调查报告[Z]. 2002 营养与健康状况数据集, 2008.
- JIN SG. Survey report on nutrition and health status of Chinese residents [Z]. 2002 Nutrition and Health Status Dataset, 2008.
- [19] CHANG CY, YU HY, CHEN JJ, *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.
- [20] 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. Handbook of Chinese population exposure parameters, adult volume [M]. Beijing: China Environment Press, 2013.
- [21] 杨梦昕, 关红艳, 付晶晶. 邕江南宁段农家自种蔬菜富集特征及居民膳食暴露评估[J]. 环境与健康杂志, 2024, 41(1): 40-43.
- YANG MX, GUAN HY, FU JJ. Enrichment characteristics of farm-grown vegetables in the Nanning section of the Yongjiang River and assessment of dietary exposure of the population [J]. *Journal of Environment and Health*, 2024, 41(1): 40-43.
- [22] 查燕, 汤婕, 牛天新. 叶菜类蔬菜对重金属富集特征研究[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 773-782.
- ZHA Y, TANG J, NIU TX. Study on enrichment characteristics of heavy metals in leafy vegetables [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(3): 773-782.
- [23] 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 等. 兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1620-1635.
- KANG L, PENG XB, MA YL, *et al.* Accumulation characteristics and influencing factors of heavy metals in cultivated land surface soil in Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1620-1635.
- [24] 朱臻, 杨相东, 徐章倩, 等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 332-345.
- ZHU Z, YANG XD, XU ZQ, *et al.* Foliar uptake, translocation and

- accumulation of heavy metals from atmospheric deposition in crops [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 332–345.
- [25] 夏凤英, 李政一, 杨阳. 南京市郊设施蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(2): 183–187.
- XIA FY, LI ZY, YANG Y. Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in greenhouse vegetables of Nanjing suburb [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(2): 183–187.
- [26] 马瑾, 万洪富, 杨国义, 等. 东莞市蔬菜重金属污染状况研究[J]. *生态环境*, 2006(2): 319–322.
- MA J, WAN HF, YANG GY, *et al.* Assessment of pollution of heavy metals on vegetables in Dongguan City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2006(2): 319–322.
- [27] LIANG G, GONG W, LI B, *et al.* Analysis of heavy metals in foodstuffs and an assessment of the health risks to the general public via consumption in Beijing, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16060909
- [28] HE Y, GUO W, PEI M, *et al.* Study on the current status and trend of food consumption among Chinese population [J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2005, 26(7): 485.
- [29] 李俐. 恩施地区市售硒食品重金属含量特征及健康风险评估[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- LI L. Characteristics of heavy metal content and health risk assessment of selenium foods marketed in Enshi Area [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2023.
- [30] 陈俊茹, 沈亚婷, 刘菲. 土壤中铬价态转化的影响因素与作用机制研究进展[J]. *岩矿测试*, 2025, 44(1): 35–50.
- CHEN JR, SHEN YT, LIU F. Research progress on the influencing factors and mechanism of valence transformation of chromium in soil [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2025, 44(1): 35–50.
- [31] 杨文娟, 朱桂华, 何宾宾, 等. 不同价态铬的定量分析综述[J]. *云南化工*, 2024, 51(6): 9–13.
- YANG WJ, ZHU GH, HE BB, *et al.* Summary of quantitative analysis of different valence chromium [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2024, 51(6): 9–13.
- [32] 杨洋, 操基玉, 陈栋, 等. 安徽省六安市 2013—2016 年各类食品中重金属铅镉暴露量及风险评估[J]. *中国热带医学*, 2019, 19(7): 671–674.
- YANG Y, CAO JY, CHEN D, *et al.* The exposure and risk assessment of heavy metals lead and cadmium in all kinds of food, Lu'an, Anhui, 2013–2016 [J]. *China Tropical Medicine*, 2019, 19(7): 671–674.
- [33] 叶劲松, 吴克, 俞志敏, 等. 合肥市售蔬菜 Pb 和 Cd 含量调查及健康风险预警评价[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 85–90.
- YE JS, WU K, YU ZM, *et al.* Investigation on the Pb and Cd contents in Hefei vegetables and the evaluation of the health risk alert [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(2): 85–90.
- [34] CAO H, CHEN J, ZHANG J, *et al.* Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(11): 1792–1799.
- [35] SAWUT R, KASIM N, MAIHEMUTI B, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the vegetable bases of northwest China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 642: 864–878.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)