DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251210002
引用格式: 吕俊庆, 商蕾, 齐志彩, 等. 2018—2025 年邢台地区市售蔬菜中金属污染状况及其健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 290–298.
LV JQ, SHANG L, QI ZC, *et al*. Metal pollution status and health risk assessment of vegetables sold in Xingtai Area from 2018 to 2025 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 290–298. (in Chinese with English abstract).

2018—2025 年邢台地区市售蔬菜中金属污染状况及其健康风险评估

吕俊庆, 商　蕾*, 齐志彩, 范梦超, 戚义东, 李成成, 庞俊华
(邢台市疾病预防控制中心, 邢台　054000)

摘　要: 目的　了解邢台地区市售不同类别蔬菜中 6 种金属元素的污染状况, 评估其对人群产生的健康风险。**方法**　采用电感耦合等离子体质谱仪和原子荧光光度计, 对市售 296 份蔬菜进行微波消解和测定, 采用单因子污染指数和内梅罗指数法评价蔬菜中 6 种金属元素的污染程度, 以目标危害系数(target hazard quotient, THQ)、总目标危害系数(total target hazard quotient, TTHQ)法对居民膳食摄入的健康风险进行评估。**结果**　蔬菜中金属元素铬的检出率最高, 达到 85.1%, 平均含量 0.1090 mg/kg, 超标率为 1.7%; 不同类别蔬菜中水生类蔬菜金属铬含量最高, 均值达到 0.318 mg/kg, 超标率为 3.7%; 通过相关性分析研究发现, 铬、镍两种元素之间存在极显著正相关(r=0.629, P<0.01)。铬、铅(r=0.460), 镍、铅(r=0.435), 镉、铬(r=0.403)则存在两两伴生关系。内梅罗综合污染指数研究发现 8 类蔬菜中污染指数范围为 0.011~0.636, 金属污染等级为优良。水生蔬菜中多种重金属复合风险 TTHQ 较高, 儿童、青壮年、老年人分别为 1.4571、1.2359、0.9857。**结论**　邢台市售蔬菜中金属元素的检出率较高, 水生类蔬菜对人体健康具有一定暴露风险; 同时, 金属对儿童带来的健康风险要大大高于成人。

关键词: 蔬菜; 重金属; 污染风险; 健康风险评估

Metal pollution status and health risk assessment of vegetables sold in Xingtai Area from 2018 to 2025

LV Jun-Qing, SHANG Lei*, QI Zhi-Cai, FAN Meng-Chao, QI Yi-Dong, LI Cheng-Cheng, PANG Jun-Hua
(*Xingtai Center for Disease Prevention and Control*, *Xingtai* 054000, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the pollution status of 6 kinds of metal elements in different categories of vegetables sold in Xingtai Area, and assess the health risks to the population. **Methods**　Microwave digestion was performed on 296 vegetable samples purchased from local markets, and the samples were analyzed by inductively

收稿日期: 2025-12-10
基金项目: 河北省医学科学研究课题计划资助项目(20251400)
第一作者: 吕俊庆(1980—), 男, 主管技师, 主要研究方向为食品、饮用水与环境。E-mail: 93865572@qq.com
***通信作者:** 商蕾(1985—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品、饮用水与环境。E-mail: xts6011@163.com

coupled plasma mass spectrometry and atomic fluorescence spectrometry. The pollution levels of the 6 kinds of metal elements in the vegetables were evaluated using the single-factor pollution index and the Nemerow comprehensive pollution index. The health risks associated with residents' dietary intake of these metals were assessed by the target hazard quotient (THQ) and total target hazard quotient (TTHQ) methods. **Results** Chromium had the highest detection rate among the metal elements in vegetables, reaching 85.1%, with an average content of 0.1090 mg/kg and an exceedance rate of 1.7%. Among different categories of vegetables, aquatic vegetables showed the highest metal chromium content, with an average of 0.318 mg/kg and an exceedance rate of 3.7%. Correlation analysis revealed a highly significant positive correlation between chromium and nickel (r=0.629, P<0.01). In addition, pairwise associated relationships were observed between chromium and plumbum (r=0.460), nickel and plumbum (r=0.435), and cadmium and chromium (r=0.403). The Nemerow comprehensive pollution index ranged from 0.011 to 0.636 across the 8 vegetable categories, indicating an overall "excellent" level of metal pollution. Aquatic vegetables exhibited relatively high combined heavy metal risks, with TTHQ values of 1.4571, 1.2359 and 0.9857 for children, young and middle-aged adults and the elderly, respectively. **Conclusion** Metallic elements are detected at relatively high rates in vegetables sold in Xingtai, and aquatic vegetables may pose a certain exposure risk to human health. Meanwhile, children face significantly higher health risks from metal exposure compared with adults.

KEY WORDS: vegetables; heavy metal; pollution risks; health risks assessment

0　引　言

蔬菜中富含多种维生素和各种矿物质元素, 是人们日常生活中必不可缺的食物, 同时也是我国重要的农产品, 居民膳食结构的重要组成部分[1]。随着我国社会经济的快速发展, 环境污染问题也日趋严重。植物在生长发育过程中, 不仅吸收土壤中各种矿物质元素, 可能还会富集铅、镉等有毒的金属元素, 可以通过食物链进入人体, 从而对人类的身体健康带来潜在的危害[2–3], 蔬菜中金属污染问题越来越受到公众的广泛关注。近年来, 国内外的专家学者对蔬菜中的金属元素污染状况及健康风险评估方面做了大量的研究[4–5]。有研究发现, 重金属元素更容易在叶菜类蔬菜中积累[6], 暴露量过高会对人类带来潜在的健康风险。比如, 铅、镉长期蓄积可能会导致骨骼、心血管系统、生殖系统等健康受到损害, 严重会致癌致畸[7–8]。国内已有很多此类研究如北京[9]、云南[10]、邯郸[11]等, 而邢台市鲜有此类报道。因此, 对邢台市蔬菜中重金属元素的含量监测及暴露健康风险评估对居民的身体健康有着重要意义。

邢台市位于河北省中南部, 蔬菜种植历史悠久, 蔬菜在居民膳食中占据重要地位。近年来随着城市建筑业的高速发展, 机动车数量激增, 工业生产迅猛发展, 环境污染问题变得尤为突出。蔬菜的种植、运输和保存也受到一定影响, 因此, 对邢台地区市售的蔬菜中金属污染状况和居民暴露健康风险评价就显得非常重要。目前, 针对类似的研究邢台市还鲜有报道。本研究对邢台地区不同类别蔬菜中 6 种金属元素的污染情况进行分析, 并对其产生的健康风险进行评价和评估, 拟为邢台市居民健康食用蔬菜提供安全保障和科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

2018—2025 年根据河北省食品污染物和有害因素风险监测计划和邢台市本地区专项监测计划覆盖整个邢台地区, 样品产地以本地为主, 还涉及周边地区。采样环节为邢台地区的商店超市、农贸市场等, 采样方式为随机, 种类包括叶菜类、根茎类、茄果类、水生类、鳞茎类、豆类、薯类等 8 大类别, 共计样品 296 份。

硝酸(优级纯, 德国默克公司); 多元素标准储备液(质量浓度 100 μg/mL, 铅、镉、砷、镍、铬等 26 种元素, 美国 PerkinElmer 公司); 汞标准溶液(质量浓度 1000 μg/mL, 中国计量科学院); 铑标准溶液(质量浓度 1000 μg/mL, 国家钢铁材料测试中心); 铋标准溶液(质量浓度 100 μg/mL)、钪标准溶液(质量浓度 1000 μg/mL)(国家有色金属及电子材料分析测试中心); 实验用水为蒸馏水(4.5 L, 香港屈臣氏集团)。

1.2　仪器与设备

Nex ION350X 电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)(美国 PerkinElmer 公司); FSA-933 原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司); MARS6 微波消解仪(美国 CEM 公司); GM 200 刀式研磨仪(德国 Retsch 公司); FA2003 电子天平(感量 0.001g), 上海精密科学仪器有限公司)。

1.3　实验条件

1.3.1　样品前处理

依据国家食品污染物和有害因素风险监测手册中《食

品中多元素分析的标准操作程序(ICP-MS 法)》《食品中总汞测定的标准操作程序》的标准操作程序要求，准确称取 1.000~3.000 g 于微波消解管中，加 10 mL 硝酸微波消解后，用蒸馏水定容至 50 mL，备检。

1.3.2 仪器方法与质谱条件

实验前处理过程中以定值升温程序和电感耦合等离子体质谱仪的主要参数详见表 1 和表 2。

表 1 微波消解工作程序

Table 1 Operating procedures for microwave digestion

步骤	控制温度/℃	升温时间/℃	恒温时间/min
1	120	15	10
2	160	10	20
3	180	10	20

表 2 电感耦合等离子体质谱仪主要参数

Table 2 Main parameters of the inductively coupled plasma mass spectrometer

仪器参数	数值	仪器参数	数值
射频功率/W	1550	雾化器	高盐/同心雾化器
载气流量/(L/min)	0.80	采样锥/截取锥	镍/铂锥
辅助气流量/(L/min)	0.3	每峰测定点数	3
等离子体气流量/(L/min)	15	采样深度/mm	8~10
雾化室温度/℃	2	采集模式	跳峰
样品提升速率/(r/s)	0.3	重复次数	3

1.4 金属污染评价及膳食暴露评估方法

1.4.1 蔬菜中金属污染评价方法

采用单因子污染指数分析法(P_i)和内梅罗综合污染指数法($P_{综合}$)对蔬菜重金属污染进行分级评价[12]，评价标准详见表 3。计算如公式(1)~(2):

$$P_i=\frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: P_i 为金属 i 元素污染指数; C_i 为蔬菜样品中金属元素 i 含量测定值, mg/kg; S_i 为金属元素 i 的评价标准, mg/kg。

$$P_{综合}=\sqrt{\frac{P^2\max+P^2\text{ave}}{2}} \tag{2}$$

式中: $P_{综合}$为内梅罗综合污染指数; $P_{\max}$ 为某种蔬菜的单因子指数(P_i)的最大值; P_{ave} 为某种蔬菜 P_i 的平均值。

1.4.2 健康风险评估

采用目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)评估摄入蔬菜中金属对不同年龄人群的健康风险[13]。该方法假定污染物吸收剂量等于摄入剂量，以测定的污染物人体摄入剂量与参考剂量的比值作为评价标准[14]。计算公式(3)如下:

$$\text{THQ}=\frac{\text{EFr}\times\text{ED}\times\text{FIR}\times C\times10^{-3}}{\text{RfD}\times\text{BW}\times\text{AT}} \tag{3}$$

式中: EFr 为暴露频率(expoure frequency), 365 d/年; ED 为暴露年限(exposure duration), 70 年[15]; FIR 为蔬菜摄入率(food intake frequency), g/d, 223.4(儿童)、355.0(青壮年)、366.4(老年)[16]; C 为蔬菜中金属含量(concentration), mg/kg; RfD 为口服参考剂量(reference dose), mg kg^{-1} d^{-1}, RfD(铬)=3×10^{-3}、RfD(镍)=2×10^{-2}[17], RfD(砷)=3.0×10^{-4}、RfD(镉)=1.0×10^{-3}、RfD(汞)=3.0×10^{-4}、RfD(铅)=3.5×10^{-3}[18–19]; BW 为人体平均体重(body weight), kg, 24.5(儿童)、60.3(青壮年)、59.4(中老年)[20]; AT 暴露的平均时间(averaging time), d, 365 d/年×70 年=25550 d[15]。

表 3 金属污染评价标准

Table 3 Evaluation standards for metal pollution

等级	单因子污染指数分级标准		综合污染指数分级标准	
	污染指数	污染等级	污染指数	污染等级
1	$P_i\leqslant0.7$	清洁	$P_{综合}\leqslant0.7$	清洁安全
2	$0.7<P_i\leqslant1.0$	尚清洁	$0.7<P_{综合}\leqslant1.0$	警戒级、尚清洁
3	$1.0<P_i\leqslant2.0$	开始受到污染	$1.0<P_{综合}\leqslant2.0$	轻度污染
4	$2.0<P_i\leqslant3.0$	受到中度污染	$2.0<P_{综合}\leqslant3.0$	中度污染
5	$P_i>3.0$	受到重度污染	$P_{综合}\geqslant3.0$	重度污染

当 THQ<1，表示暴露人群没有明显的健康风险，反之，则表明相关暴露人群会有健康风险，THQ 值越大表明该污染物对人体健康风险越大[12]。金属元素对人体健康的影响一般是由多种元素共同作用的结果，因此，常用多种金属复合风险 (total target hazard quotient, TTHQ)表示多种金属复合风险，TTHQ 为蔬菜中各个金属 THQ 的总和[17]。计算公式(4)如下:

$$\text{TTHQ}=\sum\text{THQ} \tag{4}$$

式中: 当 TTHQ≤1，表示对人体健康没有显著的负面影响; 当 TTHQ>1，表示对人体健康产生负面影响的可能性较大; 当 TTHQ>10 时，则表明对人体健康存在慢性毒性效应[21]。

1.5 质量控制与结果评判

所有实验过程中均带有试剂空白、加标回收、平行样和有证标准物质等多项质量控制措施，确保实验过程中检测数据的准确性。参考 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和陈同斌等[9]对蔬菜金属的检测结果进行是否超标进行判定。

1.6 数据处理

采用统计学软件 SPSS 23.0 进行差异显著性分析，采用 Spearman 进行相关性分析。对蔬菜中重金属含量的实验数据进行处理和分析，检验水准 α=0.05。对未检出数据处理原则未检出数据比例高于 60%时，未检出数据用检出限(limit of detection, LOD)替代；未检出数据比例低于 60%时，

未检出数据用 1/2LOD 替代[22]。

2　结果与分析

2.1　蔬菜中金属元素的检测情况

本研究 6 种元素标准曲线相关系数(r)均大于 0.999; 加标水平高、中、低回收率在 80%~120%之间; 平行样相对标准偏差小于 13%。采集的 296 份蔬菜样品, 分别测定铬、镍、镉、铅、汞、砷 6 种金属元素, 所有元素均有不同程度的检出(表 4)。其中, 铬的检出率最高, 达到 85.1%, 超标率为 1.7%, 检出的平均值为 0.1090 mg/kg, 最大值为 0.770 mg/kg; 其次为镍、镉、砷、铅, 检出率依次为 80.4%、63.5%、46.3%、40.5%, 汞的检出最低, 仅为 1.0%; 从样品超标情况看, 铬、镍、铅均有检出超标的样品, 其中铬、镍的超标率均达到了 1.7%; 镉、砷虽有检出, 但检出值均在限量要求之内。

2.2　不同类别蔬菜中金属元素的检出情况

通过研究发现, 在豆类、茄果类、芸苔类、茎类 4 种类别的蔬菜中, 铅、镉、砷、铬、镍有不同程度的检出, 检出值均在限量范围之内; 金属汞在 4 类蔬菜中均未检出, 说明汞在这 4 类蔬菜中污染风险较低。薯类和水生类蔬菜除金属汞之外, 5 种金属元素均有不同程度的检出, 其中金属铬有 4 份, 超出国家的限量标准, 超标率分别达到 10.7%、3.7%。鳞茎类蔬菜 5 种金属元素有的检出(金属汞未检出), 其中铅有 2 份超出国家限量标准, 超标率为 3.3%。叶菜类蔬菜中 6 中重金属元素均有检出, 其中铬、镍各有 1 份超出国家的限量标准, 超标率为 3.6%。具体检出情况, 见表 5。

表 4　蔬菜中金属元素的检出情况

Table 4　Detection status of metal elements in vegetables

检测项目	样品数量/份	检出数量/份	检出率/%	超标数量/份	超标率/%	平均值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)
铬	296	252	85.1	5	1.7	0.1090	0.770
镍		238	80.4	5	1.7	0.1067	1.310
砷		137	46.3	0	0.0	0.0099	0.060
镉		188	63.5	0	0.0	0.0062	0.086
汞		3	1.0	0	0.0	0.0030	0.008
铅		120	40.5	2	0.7	0.0134	0.120

表 5　不同类别蔬菜中金属元素含量的检出情况

Table 5　Detection status of metal element content in different categories of vegetables

蔬菜类别	检测项目	样品份数/份	检出数量/份	检出率/%	超标数量/份	超标率/%	平均值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)
豆类蔬菜	铬	24	24	100.0	0	0.0	0.0701	0.185
	镍		24	100.0	0	0.0	0.1761	0.545
	砷		18	75.0	0	0.0	0.0095	0.022
	镉		16	66.7	0	0.0	0.0041	0.014
	汞		0	0.0	0	0.0	0.0030	0.003
	铅		11	45.8	0	0.0	0.0058	0.024
叶菜类蔬菜	铬	55	38	69.1	1	1.8	0.0772	0.770
	镍		40	72.7	1	1.8	0.0912	1.000
	砷		25	45.5	0	0.0	0.0113	0.060
	镉		44	80.0	0	0.0	0.0084	0.047
	汞		3	5.5	0	0.0	0.0031	0.008
	铅		27	49.1	0	0.0	0.0193	0.111
薯类蔬菜	铬	28	27	96.4	3	10.7	0.1952	0.690
	镍		18	64.3	1	3.6	0.1903	1.120
	砷		14	50.0	0	0.0	0.0121	0.055
	镉		28	100.0	0	0.0	0.0130	0.048
	汞		0	0.0	0	0.0	0.0030	0.003
	铅		20	71.4	0	0.0	0.0126	0.094

表 5(续)

蔬菜类别	检测项目	样品份数/份	检出数量/份	检出率/%	超标数量/份	超标率/%	平均值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)
鳞茎类蔬菜	铬	60	36	60.0	0	0.0	0.0965	0.293
	镍		37	61.7	0	0.0	0.0673	0.553
	砷		39	65.0	0	0.0	0.0142	0.046
	镉		44	73.3	0	0.0	0.0069	0.086
	汞		0	0.0	0	0.0	0.0030	0.003
	铅		29	48.3	2	3.3	0.0243	0.120
茄果类蔬菜	铬	56	54	96.4	0	0.0	0.0457	0.174
	镍		47	83.9	0	0.0	0.0333	0.159
	砷		19	33.9	0	0.0	0.0063	0.018
	镉		8	14.3	0	0.0	0.0025	0.004
	汞		0	0.0	0	0.0	0.0030	0.003
	铅		13	23.2	0	0.0	0.0049	0.015
芸苔类蔬菜	铬	28	28	100.0	0	0.0	0.1126	0.330
	镍		28	100.0	0	0.0	0.0683	0.192
	砷		18	64.3	0	0.0	0.0116	0.033
	镉		20	71.4	0	0.0	0.0052	0.016
	汞		0	0.0	0	0.0	0.0030	0.003
	铅		4	14.3	0	0.0	0.0033	0.019
水生类蔬菜	铬	27	27	100.0	1	3.7	0.3181	0.770
	镍		27	100.0	3	11.1	0.3057	1.310
	砷		2	7.4	0	0.0	0.0054	0.028
	镉		10	37.0	0	0.0	0.0049	0.038
	汞		0	0.0	0	0.0	0.0030	0.003
	铅		7	25.9	0	0.0	0.0195	0.086
茎类蔬菜	铬	18	18	100.0	0	0.0	0.0386	0.075
	镍		17	94.4	0	0.0	0.0523	0.184
	砷		2	11.1	0	0.0	0.0044	0.010
	镉		18	100.0	0	0.0	0.0053	0.018
	汞		0	0.0	0	0.0	0.0030	0.003
	铅		9	50.0	0	0.0	0.0041	0.009

2.3 不同类别蔬菜中金属元素污染指数评价

从单因子污染指数研究中可以看出，豆类、叶菜类、薯类、鳞茎类、茄果类、芸苔类、茎类等 7 类蔬菜中 6 种金属元素的污染指数均在正常值以下(P_i 均小于 0.70)，属于无污染水平。水生类蔬菜中的金属铬的污染指数 P_i 为 0.636 接近 0.70，代表着水生类蔬菜中金属铬有一定的残留。但是，金属污染等级划分标准均为优良；同时，依据内梅罗综合污染指数研究发现，$P_{综合}$为 0.475，相比与其他类别蔬菜的综合污染指数来说相对较高，总体来说综合污染指数等级为优。详见表 6。

2.4 蔬菜中膳食暴露风险评估

本研究针对不同类别蔬菜中金属元素对不同人群的膳食暴露风险进行评估发现，水生类蔬菜中铬对儿童 THQ 最大，为 0.9669, TTHQ 为 1.4571, THQ 接近 1.0, TTHQ 高于 1.0；水生类蔬菜中铬对青壮年 THQ 为 0.6242, TTHQ 为 1.2359, TTHQ 高于 1.0；水生类蔬菜中铬对老年人 THQ 为 0.6451, TTHQ 为 0.9857, TTHQ 接近 1.0。说明邢台市市售蔬菜中水生类蔬菜中的金属铬对暴露人群有一定的健康风险，儿童和青壮年的 TTHQ 均高于 1.0，复合健康风险值较高。此外，6 种金属元素的 THQ 平均值和 TTHQ 在 3 类人群中儿童是最高的，说明金属污染对儿童造成的暴露健康风险高于青壮年和老年人。详见表 7。

2.5 金属元素的相关性分析

金属元素间的相关性分析是推测其来源是否一致的重要依据。本研究结果表明，不同类别蔬菜中铬、镍、砷、镉、铅之间均呈正相关(P<0.01, P<0.05)，铬、镍两种金属元素之间存在极显著正相关(r=0.629, P<0.01)；铬、铅(r=0.460)，镍、铅(r=0.435)，镉、铬(r=0.403)存在两两伴生关系，详见表 8。

表 6　不同类别蔬菜中金属污染指数评价

Table 6　Evaluation of metal pollution indices in different categories of vegetables

蔬菜类别	铬		镍		砷		镉		汞		铅		$P_{综合}$	等级
	P_i平均值	等级	P_i平均值	等级	P_i平均值	等级	P_i平均值	等级	P_i平均值	等级	P_i平均值	等级		
豆类蔬菜	0.140	清洁	0.235	清洁	0.019	清洁	0.041	清洁	0.300	清洁	0.029	清洁	0.230	清洁安全
叶菜类蔬菜	0.154	清洁	0.122	清洁	0.023	清洁	0.042	清洁	0.311	清洁	0.064	清洁	0.235	清洁安全
薯类蔬菜	0.390	清洁	0.254	清洁	0.024	清洁	0.130	清洁	0.300	清洁	0.063	清洁	0.308	清洁安全
鳞茎类蔬菜	0.193	清洁	0.090	清洁	0.028	清洁	0.069	清洁	0.300	清洁	0.243	清洁	0.238	清洁安全
茄果类蔬菜	0.091	清洁	0.044	清洁	0.013	清洁	0.050	清洁	0.300	清洁	0.049	清洁	0.222	清洁安全
芸苔类蔬菜	0.225	清洁	0.091	清洁	0.023	清洁	0.104	清洁	0.300	清洁	0.016	清洁	0.230	清洁安全
水生类蔬菜	0.636	清洁	0.408	清洁	0.011	清洁	0.049	清洁	0.030	清洁	0.097	清洁	0.475	清洁安全
茎类蔬菜	0.077	清洁	0.070	清洁	0.009	清洁	0.053	清洁	0.300	清洁	0.041	清洁	0.222	清洁安全

表 7　不同类别蔬菜金属元素对不同人群的健康风险评估

Table 7　Health risk assessment of metal elements in different categories of vegetables for different populations

人群	蔬菜类别	THQ						TTHQ
		铬	镍	砷	镉	汞	铅	
儿童	豆类蔬菜	0.2131	0.0803	0.2796	0.0374	0.0912	0.0151	0.7166
	叶菜类蔬菜	0.2346	0.0416	0.3435	0.0766	0.0283	0.1760	0.9006
	薯类蔬菜	0.5933	0.0868	0.3678	0.1185	0.0912	0.0328	1.2904
	鳞茎类蔬菜	0.2933	0.0321	0.4316	0.0629	0.0912	0.0633	0.9744
	茄果类蔬菜	0.1389	0.0152	0.1915	0.0228	0.0912	0.0127	0.4723
	芸苔类蔬菜	0.3422	0.0311	0.3526	0.0474	0.0912	0.0086	0.8731
	水生类蔬菜	0.9669	0.1394	0.1641	0.0447	0.0912	0.0508	1.4571
	茎类蔬菜	0.1173	0.0238	0.1337	0.0483	0.0912	0.0107	0.4250
	平均值	0.3624	0.0563	0.2831	0.0573	0.0833	0.0463	0.8887
青壮年	豆类蔬菜	0.1376	0.0518	0.1864	0.0243	0.0589	0.0098	0.4688
	叶菜类蔬菜	0.1515	0.0268	0.2218	0.0495	0.0183	0.1136	0.5815
	薯类蔬菜	0.3831	0.0560	0.2375	0.0765	0.0589	0.0212	0.8332
	鳞茎类蔬菜	0.1894	0.0198	0.2787	0.0406	0.0589	0.0409	0.6283
	茄果类蔬菜	0.0897	0.0098	0.1236	0.0147	0.0589	0.0082	0.3049
	芸苔类蔬菜	0.2210	0.0201	0.2276	0.0306	0.0589	0.0056	0.5638
	水生类蔬菜	0.6242	0.0900	0.1060	0.0288	0.0589	0.3280	1.2359
	茎类蔬菜	0.0757	0.0154	0.0863	0.0312	0.0589	0.0070	0.2745
	平均值	0.2340	0.0362	0.1835	0.0370	0.0538	0.0668	0.6114
老年人	豆类蔬菜	0.1441	0.0543	0.1953	0.0254	0.0617	0.0102	0.4911
	叶菜类蔬菜	0.1587	0.0281	0.2323	0.0518	0.0191	0.1190	0.6090
	薯类蔬菜	0.4014	0.0587	0.2488	0.0802	0.0617	0.0222	0.8730
	鳞茎类蔬菜	0.1984	0.0208	0.2920	0.0426	0.0617	0.0428	0.6583
	茄果类蔬菜	0.0940	0.0103	0.1295	0.0154	0.0617	0.0086	0.3195
	芸苔类蔬菜	0.2315	0.0211	0.2385	0.0321	0.0617	0.0058	0.5907
	水生类蔬菜	0.6541	0.0943	0.1110	0.0302	0.0617	0.0344	0.9857
	茎类蔬菜	0.0794	0.0161	0.0905	0.0327	0.0617	0.0072	0.2876
	均值	0.2452	0.0380	0.1922	0.0388	0.0564	0.0313	0.6019

另外, 通过主成分分析(principal component analysis, PCA)结果显示, PC1、PC2、PC3 的总方差贡献率约为 76.076%, 且 PC1、PC2 的特征值(2.408、1.163)均大于 1.0, PC3 的特征值(0.994)接近 1.0, 表明 PC1、PC2、PC3(总特征值: 4.565)代表初始数据的绝大部分信息。其中, PC1 对总方差的贡献率为 40.129%, 其特征因子变量在铬、铅、镍和镉金属元素上具有较高的负载; PC2 对总方差的贡献率为 19.381%, 其特征因子变量在砷元素上具有较高的负载; 推测 PC1 代表的是与铬、镍相关的环境因素, 同时也表明铬和镍具有相同的来源, 这与前期金属元素的相关性分析结果相一致, 见表 9。

表 8 不同类别蔬菜中金属元素之间相关性分析
Table 8 Correlation analysis between metal elements in different categories of vegetables

元素	铬	镍	砷	镉	汞	铅
铬	1.000					
镍	0.629**	1.000				
砷	0.367**	0.258**	1.000			
镉	0.403*	0.167*	0.367**	1.000		
汞	0.006	0.071	0.098	0.078	1.000	
铅	0.460**	0.435**	0.386**	0.238**	0.073	1.000

注: **表示极显著相关, $P<0.01$; *表示显著相关, $P<0.05$。

表 9 蔬菜中金属 PCA 结果
Table 9 Results of PCA for metals in vegetables

成分	初始特征值			金属	各项的负载		
	特征值	解释比列/%	累计比列/%		PC1	PC2	PC3
PC1	2.408	40.129	40.129	铬	0.807	–0.372	0.027
PC2	1.163	19.381	59.509	镍	0.660	–0.604	0.180
PC3	0.994	16.567	76.076	砷	0.577	0.685	–0.168
PC4	0.736	12.265	88.341	镉	0.617	0.084	0.083
PC5	0.383	6.390	94.372	汞	0.043	0.297	0.946
PC6	0.316	5.268	100.000	铅	0.778	0.308	–0.175

3 讨论与讨论

本研究对邢台地区 296 份市售的新鲜蔬菜中金属元素的污染状况进行了全面的测定和评价, 对居民的膳食暴露的健康风险进行了评估。研究表明, 在 8 类常见的蔬菜中金属元素铬的检出率最高, 达到 85.1%, 检出超标率为 1.7%; 各类蔬菜中除汞检出率较低外, 其余 5 种金属均有不同程度的检出, 这与王盼盼等[23]、程家丽等[24]研究结果相同, 说明这些金属元素在各类蔬菜中均有一定的累积和富集。

通过相关性分析研究发现, 铬、镍两种元素之间存在极显著正相关(0.629, $P<0.01$), 铬、铅、镍、铅, 镉、铬则存在两两伴生关系, 表明铬、镍、铅可能有相同的来源。河北省 A 层土壤背景[25]分别为铬 68.3 mg/kg、镍 30.8 mg/kg、铅 21.5 mg/kg、砷 13.6 mg/kg、镉 0.094 mg/kg、汞 0.036 mg/kg, 与蔬菜中检出浓度值值排序基本一致, 可推测土壤是蔬菜中金属主要来源之一。此外, 灌溉用水、化肥农药的使用、工业污染、环境空气也是蔬菜中金属的重要来源。与李晓敏等[26]研究结果相符; 通过内梅罗综合污染指数研究, 发现蔬菜中污染指数范围为在 0.011~0.636, 金属污染等级为优良, 研究表明邢台市蔬菜种植环节受污染程度较低, 与郭海全等[27]研究相一致。因此, 对于水生类蔬菜: 铬和镍含量相对较高, 建议加强种植环境监测; 对于薯类蔬菜: 镍和镉含量相对较高, 需注意土壤重金属污染控制要重视土壤金属污染的问题, 防止土壤金属污染进一步加重。

此外, 从儿童、青壮年、老年人 3 类人群中对蔬菜中金属元素污染的膳食暴露风险评估进行研究, 发现蔬菜中金属元素的 THQ 皆小于 1, 方迎春等[28]相关研究也得出了类似结论, 说明蔬菜中单一金属元素污染对人群暴露健康风险不明显, 金属含量在安全范围内。各类蔬菜中铬、镍、砷、镉、铅和汞的 THQ 均值由高到低依次为儿童>老年>青壮年, 说明儿童的膳食暴露风险最高, 可能与儿童自身发育不完善, 肝肾等代谢排毒器官的功能较成人偏低有关[29]。水生类蔬菜金属元素铬的儿童 THQ 为 0.9669 需要引起关注, 在多种金属复合风险 TTHQ 研究中, 发现水生蔬菜中多种金属复合风险 TTHQ 最高, 儿童、青壮年、老年人分别为 1.4571、1.2359、0.9857。当 TTHQ>1, 表示对人体健康产生负面影响的可能性较大; 不同蔬菜对相同金属元素的富集能力会存在一定差异, 相同蔬菜对不同种金属富集也存在一定差异[30]。

大量研究表明[9–11], 在相同金属污染暴露条件下, 其对儿童带来的健康风险要远高于青壮年和老年人。综上所述, 应重点关注水生蔬菜中金属含量对人体健康的影响; 蔬菜富集不同金属元素的差异; 蔬菜对不同群体的膳食暴露健康风险评估。因此, 需要继续加强监测, 进一步深入探究因金属元素在蔬菜中的富集引起的健康风险。

参考文献

[1] 罗红霞, 李志敏, 王晓闻, 等. 北京市茄果类蔬菜重金属含量与安全性分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 112–115.

LUO HX, LI ZM, WANG XW, *et al*. Heavy metal content and safety analysis of solanaceous vegetables in Beijing [J]. Food Research and Development, 2017, 38(6): 112–115.

[2] 王洋, 刘建祥. 重金属暴露与神经系统变性疾病帕金森病的相关性[J]. 吉林医学, 2015, 36(14): 3021–3022.
WANG Y, LIU JX. Correlation between heavy metal exposure and Parkinson's disease, a neurodegenerative disease [J]. Jilin Medical Journal, 2015, 36(14): 3021–3022.

[3] SHAHEEN N, IRFANN M, KHANI N, *et al*. presence of heavy metals in fruits and vegetables: Health risk implications in Bangla-desh [J]. Chemosphere, 2016, 152(2): 431–438.

[4] 李心昊, 卢海, 姚李祥, 等. 广西常见野生蔬菜重金属累积分析及居民膳食风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2025(3): 77–83.
LI XH, LU H, YAO LX, *et al*. Analysis of heavy metal accumulation in common wild vegetables in Guangxi and dietary exposure risk assessment for residents [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2025(3): 77–83.

[5] QING Y, ZHENG J, TANG T, *et al*. Risk assessment of combined exposure to lead, cadmium, and total mercury among the elderly in Shanghai, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 256: 114874.

[6] ARORA M, KIRAN B, RANI S, *et al*. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources [J]. Food Chemistry, 2008, 111(4): 811–815.

[7] 乔增运, 李昌泽, 周正, 等. 铅毒性危害及其治疗药物应用的研究进展[J]. 毒理学杂志, 2020, 34(5): 416–420.
QIAO ZY, LI CZ, ZHOU Z, *et al*. Research progress on the hazards of lead toxicity and the application of its therapeutic drugs [J]. Journal of Toxicology, 2020, 34(5): 416–420.

[8] 方圆, 孙家正, 孙明玉, 等. 镉毒性危害及其防治措施研究进展[J]. 毒理学杂志, 2022, 36(6): 517–520.
FANG Y, SUN JZ, SUN MY, *et al*. Research progress on the hazards of cadmium toxicity and its prevention and control measures [J]. Journal of Toxicology, 2022, 36(6): 517–520.

[9] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镍含量及其健康风险[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 349–361.
CHEN TB, SONG B, ZHENG YM, *et al*. Nickel content in vegetable soils and vegetables in Beijing and its health risks [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 349–361.

[10] 张萌, 张银烽, 赵晓慧, 等. 云南省水生蔬菜中 5 种典型重金属含量特征及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3710–3718.
ZHANG M, ZHANG YF, ZHAO XH, *et al*. Content characteristics and health risk assessment of 5 kinds of typical heavy metals in aquatic vegetables of Yunnan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(11): 3710–3718.

[11] 连莹莹, 丁国涛, 方彦飞, 等. 邯郸市 6 种常见蔬菜中农药与重金属残留检测及其健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 84–92.
LIAN YY, DING GT, FANG YF, *et al*. Detection and health risk assessment of pesticides and heavy metal residues in 6 kinds of common vegetables in Handan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 84–92.

[12] 龚梦丹, 顾燕青, 王小雨, 等. 杭州市菜地蔬菜重金属污染评价及其健康风险分析[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(6): 1024–1031.
GONG MD, GU YQ, WANG XY, *et al*. Evaluation of heavy metal pollution and health risk of vegetables in farmland of Hangzhou City [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(6): 1024–1031.

[13] 朱建胜, 沈登辉, 席煜, 等. 芜湖市蔬菜中 5 种重金属污染特征及健康风险评价[J]. 实用预防医学, 2023, 30(7): 828–832.
ZHU JS, SHEN DH, XI Y, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of 5 heavy metals in vegetables in Wuhu City [J]. Practical Preventive Medicine, 2023, 30(7): 828–832.

[14] 朱琼仙, 郭元, 陶红霞, 等. 攀枝花市蔬菜中重金属污染状况及健康风险评价[J]. 中国热带医学, 2018, 18(5): 473–476.
ZHU QX, GUO Y, TAO HX, *et al*. Pollution status and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Panzhihua City [J]. China Tropical Medicine, 2018, 18(5): 473–476.

[15] 王佳, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆城区市售蔬菜重金属污染评价与健康风险评估[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 942–949.
WANG J, LIU B, XIAO BL, *et al*. Pollution assessment and health risk evaluation of heavy metals in vegetables sold in urban areas of Chongqing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(5): 942–949.

[16] 王旭. 广东省蔬菜重金属风险评估研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
WANG X. Study on heavy metal risk assessment of vegetables in Guangdong Province [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.

[17] 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(1): 1–7.
FENG YJ, ZHAO QL, SUN HX, *et al*. Assessment of soil-vegetable contamination and health risk of heavymetals in vegetables around north China [J]. Journal of Agriculture University of Hebei, 2017(1): 1–7.

[18] ISLAM MA, ROMI D, AKBER MA, *et al*. Trace metals accumulation in soil irrigated with polluted water and assessment of human health risk from vegetable consumption in Bangladesh [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, 40(1): 59–85.

[19] World Health Organization. Evaluation of certain food additives and contaminants [EB/OL]. (2007-04-14) [2020-05-06]. https://www.who.int/ipcs/publications/jecfa/reports/trs940.pdf

[20] 翟凤英, 葛可佑, 金水高, 等. 中国居民膳食结构与营养状况变迁的追踪研究[C]//预防医学学科发展蓝皮书(2006 卷). 中国营养学会, 2006: 158.
ZHAI FY, GE KY, JIN SG, *et al*. A follow-up study on the changes of dietary structure and nutritional status of Chinese residents [C]//Blue Book of Preventive Medicine Discipline Development (2006 Volume). Chinese Nutrition Society, 2006: 158.

[21] PAUSTENBACH DJ. Human and ecological risk assessment: Theory and practice [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International

Journal, 2003, 9(4): 1089–1090.

[22] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染物监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志, 2002, 36(4): 278–279.
WANG XQ, WU YN, CHEN JS. Low-level data processing problems in food contaminant monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278–279.

[23] 王盼盼, 李会会, 何靖蕾, 等. 2013—2019 年枣庄市部分市售蔬菜重金属污染状况及其健康风险评估[J]. 预防医学论坛, 2022, 28(3): 233–236.
WANG PP, LI HH, HE JL, *et al*. Pollution status and health risk assessment of heavy metals in some commercially available vegetables in Zaozhuang City from 2013 to 2019 [J]. Preventive Medicine Tribune, 2022, 28(3): 233–236.

[24] 程家丽, 张贤辉, 卓勤, 等. 我国海洋食用贝类重金属污染特征及其健康风险[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(2): 175–181.
CHENG JL, ZHANG XH, ZHUO Q, *et al*. Pollution characteristics and health risks of heavy metals in marine edible shellfish in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28(2): 175–181.

[25] 国家环境保护局主持中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
State Environmental Protection Administration, ed. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[26] 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 等. 太原市蔬菜中重金属污染特征及健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 327–336.
LI XM, YAN JX, DU ZQ, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Taiyuan City [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(2): 327–336.

[27] 郭海全, 郝俊杰, 李天刚, 等. 河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 786–791.
GUO HQ, HAO JJ, LI TG, *et al*. Analysis of enrichment factors of anthropogenic heavy metal pollution in soils of the Hebei plain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4): 786–791.

[28] 方迎春, 谢小雪, 杜庆波. 宿州市售蔬菜样品中重金属总砷、总汞含量分析及健康风险评估[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2022, 40(3): 122–124, 128.
FANG YC, XIE XX, DU QB. Analysis of total arsenic and total mercury contents and health risk assessment in vegetable samples sold in Suzhou City [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2022, 40(3): 122–124, 128.

[29] 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 Pb and Cd contents in vegetables sold in Hefei and health risk early warning evaluation [J]. Journal of Safety and Environmental Sciences, 2013, 13(2): 85–90.

[30] 熊春晖, 卢永恩, 欧阳波, 等. 水生蔬菜重金属污染与防治研究进展[J]. 长江蔬菜, 2012(16): 1–6.
XIONG CH, LU YEN, OUYANG B, *et al*. Research progress on pollutionand prevention of heavy metals in aquatic vegetables [J]. Changjiang Vegetables, 2012(16): 1–6.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)