

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

王玺, 罗亚翠, 张海君

台州市疾病预防控制中心, 浙江 台州 318000

摘要:目的 了解台州地区市售蔬菜中铅、镉、总汞、总砷、总铬、锰、镍、铝、铜的污染状况并进行人群健康风险评估。方法 按照国家相关标准要求对 2019—2023 年采集的四类市售蔬菜样品中金属及类金属进行含量检测, 采用单因子污染指数法(P_i)、内梅罗综合污染指数法(P_M)进行污染评价, 采用目标危害系数法(THQ)、总体目标危害系数法(TTHQ)进行人群健康风险评估。结果 共采集四类蔬菜 419 份, 铜与锰的检出率最高, 均为 100.0%, 其余由高到低依次为镍(89.17%) > 铝(87.26%) > 镉(85.20%) > 总砷(52.03%) > 铅(35.32%) > 铬(30.79%) > 总汞(2.39%)。镉总体超标率为 2.63%, 超标样本集中在根茎类蔬菜, 其余元素均未超标。不同类别蔬菜中铅、镉、总汞、总砷、总铬的 P_i 与 P_M 均 ≤ 0.7 ; 成人摄入四类蔬菜的 TTHQ 值均 < 1.0 , 儿童摄入根茎类、叶菜类蔬菜的 TTHQ 值均 > 1.0 。结论 台州市市售四类蔬菜中 9 种金属与类金属总体污染水平较低, 居民经蔬菜摄入这 9 种金属与类金属健康风险水平可接受, 但儿童摄入根茎类与叶菜类蔬菜可能会对人体健康产生负面影响。

关键词: 蔬菜 金属 类金属 健康风险评估

中图分类号: R155.5 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)14-2662-07

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202402189

Pollution status and health risk assessment of 9 metals and metalloids on sale vegetables in Taizhou City, 2019 – 2023

WANG Xi, LUO Ya-cui, ZHANG Hai-jun

Taizhou Center for Disease Control and Prevention, Taizhou, Zhejiang 318000, China

Abstract: Objective To investigate the pollution status of lead, cadmium, total mercury, total arsenic, total chromium, manganese, nickel, aluminum, copper on sale vegetables in Taizhou City, and to assess the health risks to people. **Methods** According to the requirements of relevant national standards, detect the contents of metals and metalloids in four types of commercial vegetable samples collected from 2019 to 2023. The pollution status evaluated by single factor pollution index (P_i) and Nemerow composite pollution index (P_M) method, the health risks were evaluated by both target hazard quotient (THQ) and total target hazard quotient (TTHQ). **Results** A total of 419 samples of four types of vegetables were collected, manganese and copper had the highest detection rate with both of 100.0%, the others from high to low were nickel (89.17%) > aluminum (87.26%) > cadmium (85.20%) > total arsenic (52.03%) > lead (35.32%) > total chromium (30.55%) > total mercury (2.39%). The overall cadmium exceeding rate was 2.63% and all concentrated in root vegetables, the other elements did not exceed the limit. The P_i and P_M of lead, cadmium, total mercury, total arsenic, total chromium in different types of vegetables were all did not exceed 0.7. The TTHQ of four types of vegetables for adults were all less than 1.0, but the TTHQ were more than 1.0 while children consumed root and leafy vegetables. **Conclusion** The overall pollution levels of nine metals and metalloids in four categories of vegetables in Taizhou city were low, and the health risk level of these metals and metalloids in residents was acceptable. However, intake of root and leafy vegetables may have negative effects on human health in children.

Keywords: Vegetables; Metals; Metalloids; Health risk assessment

随着我国城市化和工业化的迅速发展, 生活垃圾、工业废弃物以及肥料的大量使用严重污染了土壤、水质和空气环境, 导致环境中的重金属不断累

积^[1-3]。蔬菜作为我们重要的农产品之一, 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, 对重金属有一定的富集能力。有研究表明, 食用被重金属污染的食物是人体暴露于重金属的主要途径^[4]。有的重金属, 如铜(Cu)、锰(Mn)、铬(Cr)、镍

(Ni)等,微量存在时对人体的生长代谢起重要作用,但当浓度过高时则对人体有一定的毒害作用。铝(Al)虽然不属于重金属,但可在人体内蓄积,产生慢性毒性。而铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)与类金属砷(As),是联合国粮农组织和世界卫生组织(WHO)重点关注的四种重金属和类金属,对人体有明显的毒害作用^[5]。如长期暴露于Pb,可诱发贫血,造成心血管疾病,甚至可能导致儿童发育迟缓;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”;Cr⁶⁺和As均具有致癌性,能使人体皮肤出现溃疡,形成“铬疮”和“砷斑”。

目前,国内外的学者对蔬菜中金属的含量、污染来源及风险评估做了大量研究^[6-9]。但少有关于台州市区市售蔬菜中重金属污染状况的报道,为深入了解台州市市民膳食结构中蔬菜的金属污染状况,本文利用2019—2023年台州市市售蔬菜样品中元素监测数据,分析各类蔬菜中铅、镉、总汞、总砷、总铬、铜、锰、铝、镍的污染情况,并进行人群健康风险评估。为居民合理膳食提供一定的指导意见。

1 材料与方法

1.1 样品 按照随机抽样原则,2019—2023年在台州市各区县采样,采样点包括超市、农贸市场以及流动摊贩等流通环节,采集叶菜类、果菜类、根茎类和花菜类等四类蔬菜,共计419份蔬菜样品。其中叶菜类蔬菜82份,果菜类蔬菜109份,根茎类蔬菜179份,花菜类蔬菜49份。

1.2 仪器 TOPEX微波消解仪(上海,屹尧);NEXION 300D电感耦合等离子体质谱仪(美国,Perkin Elmer)。

1.3 检测方法 将采集的蔬菜样品清洗干净,取可食用部位采用四分法取样后,用匀浆机打碎,采用微波消解法对样品进行前处理。根据GB 5009.268-2019《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[10]中电感耦合等离子体质谱法进行检测。铅的检出限为0.004 mg/kg,镉的检出限为0.001 mg/kg,总汞的检出限为0.001 mg/kg,总砷的检出限为0.002 mg/kg,总铬的检出限为0.01 mg/kg,铝的检出限为0.1 mg/kg,镍的检出限为0.01 mg/kg,铜的检出限为0.01 mg/kg;锰的检出限为0.01 mg/kg。

1.4 综合评估

1.4.1 样品合格评价 参照GB 2762-2022《食品安全国家标准 食品污染物限量》^[11]标准进行。

1.4.2 重金属污染程度评价 采用单因子污染指数(P_i)法对蔬菜中重金属污染状况进行单项评价,采用内梅罗综合污染指数(P_M)法对蔬菜中的重金属污染

状况进行综合评价^[12]。公式如下:

$$P_i = C_i/S_i$$

C_i 为蔬菜中重金属的实测浓度值(mg/kg), S_i 为重金属的限量值(mg/kg)。

$$P_M = \sqrt{(P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2)/2}$$

P_{ave} 为各蔬菜各单项污染指数 P_i 的平均值, P_{\max} 为各蔬菜中各 P_i 中的最大值。 P_i 与 P_M 的划分标准如表1所示:

表1 重金属污染等级划分标准

Table 1 Classification standard of heavy metal pollution levels

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	$P_i \leq 0.7$	优良	$P_M \leq 0.7$	安全
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	安全	$0.7 < P_M \leq 1.0$	警戒线
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	$1.0 < P_M \leq 2.0$	轻度污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	$2.0 < P_M \leq 3.0$	中度污染
5	$3.0 < P_i$	重污染	$3.0 < P_M$	重污染

1.4.3 健康风险评估 采用美国环保局(United States Environmental Protection Agency, USEPA)推荐的目标危害系数法(Target hazard quotients, THQ)来评价蔬菜中金属对人群的健康风险^[13]。本方法假定污染物的吸收量等于摄入量,以测定的污染物人体摄入量与各金属元素的口服参考剂量(R_{D_i})的比值作为评价标准。当 $THQ \leq 1.0$ 时,说明暴露人群没有显著的健康风险,反之则存在健康风险,THQ值越大表明该污染物对人体健康风险越大。计算公式如下:

$$THQ_i = \frac{E_{Fi} \times E_{Di} \times F_{IR} \times C_i}{R_{Di} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3}$$

式中: E_{Fi} 为第*i*元素的暴露频率,取365 d/y; E_{Di} 为*i*元素的暴露年限(y); F_{IR} 为日均蔬菜的摄入量(g/d); C_i 为蔬菜中*i*元素的含量(mg/kg), R_{Di} 为*i*元素的口服参考剂量(mg/kg·d), W_{AB} 为人群的平均体重(kg); T_A 为暴露的平均时间(d), $T_A = E_D \times 365$ 。

台州市近五年人均期望寿命取81.5岁;根据《中国居民膳食结构与营养状况变迁的追踪研究》^[14],成人、儿童的 F_{IR} 分别按照223.4 g/d、355.0 g/d来计算, W_{AB} 分别按照60.3 kg、24.5 kg计算;由美国环境保护局(US EPA)或联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)制定的经口摄入参考剂量:Pb、Cd、Hg、As、Cr、Cu、Mn、Al、Ni的 R_{D_i} 分别取0.003 5、0.001 0、0.000 3、0.000 3、0.003 0、0.04、0.14、0.29、0.02 mg/kg·d。

重金属对人体健康影响一般是多种元素共同作用的结果,因此,采用总体目标危害系数(Total Target hazard quotients, TTHQ)值来计算多种重金属的总体

风险。当 $TTHQ \leq 1.0$, 表明对人体健康没有显著的负面影响; 而 $TTHQ > 1.0$, 表明对人体健康产生负面影响的可能性很大; $TTHQ > 10.0$, 表明存在慢性毒性效应^[15]。计算公式如下:

$$TTHQ = \sum THQ_i$$

1.5 质量控制 采样严格按国家标准采样技术规范要求执行, 充分考虑样品的代表性, 每批样本均进行平行样测定、空白测定、质控样同时测定, 超标样品及时复测, 保证检测结果准确可靠。实验室每年参加权威机构组织的能力验证/比对项目。

1.6 统计学分析 数据采用 Excel 2010 软件进行整理汇总, 采用 SPSS 24.0 软件进行统计分析, 计数资料组间比较用 χ^2 检验, 检验水准 $\alpha = 0.05$ 。对于低于检出限 (Limit of detection, LOD) 的数据, 采用世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 推荐的替代法来处理, 在少于 60% 的检测值为未检出时, 将未检出值用 1/2 LOD 值进行替换; 大于 60% 的检测值为

未检出时, 将未检出值用 LOD 值进行替换。

2 结果

2.1 蔬菜中金属及类金属含量情况分析 统计 419 份蔬菜样本中 9 种金属及类金属的含量检测结果, Mn 含量最高, 为 4.398 mg/kg, 其次是 Al (3.958 mg/kg), Pb、Cd 等其余几种元素含量相对较低, 处于 0.001 0 ~ 0.071 8 mg/kg 之间。9 种金属及类金属中, 检出率最高的为 Cu 与 Mn, 均为 100.0%, 其余由高到底依次为 Ni (89.17%) > Al (87.26%) > Cd (85.20%) > As (52.03%) > Pb (35.32%) > Cr (30.79%) > Hg (2.39%), 比较 9 种金属及类金属的检出率, 差异有统计学意义 ($\chi^2 = 444.511, P < 0.05$)。9 种金属及类金属中仅有 Cd 超标, 超标样品主要为百合、芋头等根茎类蔬菜, Cd 的超标率为 2.63%, Pb、Hg、As、Cr 均无样品超标。具体见表 2。

表 2 蔬菜中金属及类金属的含量情况

Table 2 Contents of Metals and Metalloids in Vegetables

元素	份数(份)	含量范围 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	检出份数 (份)	检出率 %	超标份数 (份)	超标率 (%)
Pb	419	ND ~ 0.191 1	0.007 9	148	35.32	0	0.00
Cd	419	ND ~ 1.008 9	0.020 6	357	85.20	11	2.63
Hg	419	ND ~ 0.010 9	0.001 1	10	2.39	0	0.00
As	419	ND ~ 0.047 8	0.004 2	218	52.03	0	0.00
Cr	419	ND ~ 0.369 1	0.026 1	122	30.79	0	0.00
Cu	419	0.080 1 ~ 5.248 0	0.466 2	419	100.00	-	-
Mn	314	0.296 0 ~ 113.120 4	4.398 0	314	100.00	-	-
Al	314	ND ~ 98.422 2	3.958 0	274	87.26	-	-
Ni	314	ND ~ 1.251 5	0.071 8	280	89.17	-	-

注: ND 表述未检出; 因 GB 2762 - 2022 未对 Cu、Mn、Al、Ni 制定限量标准, 故不予统计, 用“-”表示。

2.2 不同类别蔬菜中金属及类金属含量情况分析 比较不同种类蔬菜中 9 种金属及类金属的含量, Pb、Cd、As、Cu 和 Mn 在根茎类蔬菜中含量最高, 平均含量分别为 0.014 5 mg/kg、0.044 1 mg/kg、0.005 5 mg/kg、0.859 3 mg/kg、8.574 0 mg/kg, 在花菜类和果菜

类中含量相对较低; Ni 也在根菜中含量最高 (0.157 9 mg/kg), 但在叶菜中含量最低 (0.021 5 mg/kg); 而 Cr 在果菜中含量最高, 为 0.035 2 mg/kg; Al 则在叶菜中含量最高, 为 8.794 2 mg/kg。具体见表 3。

表 3 不同类别蔬菜中金属及类金属含量情况

Table 3 Contents of metals and metalloids in different types of vegetables

蔬菜类型	检测份数 (份)	元素	含量范围 (mg/kg)	中位值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	检出率 (%)	超标率 (%)
叶菜类	82	Pb	ND ~ 0.043 1	0.005 5	0.009 5	54.88 (45/82)	0.00 (0/82)
	82	Cd	ND ~ 0.119 9	0.009 6	0.017 7	97.56 (80/82)	0.00 (0/82)
	82	Hg	ND	ND	ND	0.00 (0/82)	0.00 (0/82)
	82	As	ND ~ 0.017 0	0.002 6	0.003 9	68.29 (56/82)	0.00 (0/82)
	82	Cr	ND ~ 0.080 8	0.005 7	0.016 9	56.10 (46/82)	0.00 (0/82)
	82	Cu	0.090 1 ~ 1.020 0	0.259 1	0.342 5	100.0 (82/82)	0.00 (0/82)
	58	Mn	0.731 8 ~ 44.41	2.184 5	4.142 0	100.0 (58/58)	0.00 (0/58)

(续表)

蔬菜类型	检测份数 (份)	元素	含量范围 (mg/kg)	中位值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	检出率 (%)	超标率 (%)
果菜类	58	Al	ND ~ 98.422 2	3.145 2	8.794 2	91.38(53/58)	0.00(0/58)
	58	Ni	ND ~ 0.392 8	0.021 5	0.021 5	86.21(50/58)	0.00(0/58)
	109	Pb	ND ~ 0.032 2	ND	0.004 8	7.34(8/109)	0.00(0/109)
	109	Cd	ND ~ 0.062 9	0.003 6	0.010 4	76.15(83/109)	0.00(0/109)
	109	Hg	ND	ND	ND	0.00(0/100)	0.00(0/109)
	109	As	ND ~ 0.028 1	ND	0.003 7	37.61(41/109)	0.00(0/109)
	109	Cr	ND ~ 0.369 1	ND	0.035 2	26.61(29/109)	0.00(0/109)
	109	Cu	0.132 8 ~ 0.741 1	0.320 9	0.341 5	100.0(109/109)	0.00(0/109)
	78	Mn	0.296 1 ~ 8.022 1	0.879 1	1.370 6	100.0(109/109)	0.00(0/78)
	78	Al	ND ~ 2.391 1	0.172 2	0.328 2	79.64(59/78)	0.00(0/78)
根茎类	78	Ni	ND ~ 0.463 0	0.052 7	0.052 7	82.05(64/78)	0.00(0/78)
	179	Pb	ND ~ 0.191 1	ND	0.014 5	39.11(70/179)	0.00(0/179)
	179	Cd	ND ~ 1.008 9	0.010 1	0.044 1	86.36(151/179)	6.15(11/179)
	179	Hg	ND ~ 0.010 9	ND	0.001 2	5.59(10/179)	0.00(0/179)
	179	As	ND ~ 0.047 8	0.003 3	0.005 5	57.54(103/179)	0.00(0/179)
	179	Cr	ND ~ 0.310 4	ND	0.016 0	22.91(41/179)	0.00(0/179)
	179	Cu	0.080 2 ~ 5.248 0	0.705 0	0.859 3	100.0(179/179)	0.00(0/179)
	129	Mn	0.376 1 ~ 113.120 4	2.331 1	8.574 0	100.0(129/129)	0.00(0/129)
	129	Al	ND ~ 44.112 1	0.964 2	3.593 0	92.5(119/129)	0.00(0/129)
	129	Ni	ND ~ 1.251 5	0.158 1	0.157 9	94.57(122/129)	0.00(0/129)
花菜类	49	Pb	ND ~ 0.023 9	0.004 0	0.005 9	51.02(25/49)	0.00(0/49)
	49	Cd	ND ~ 0.031 1	0.006 1	0.010 3	87.76(43/49)	0.00(0/49)
	49	Hg	ND	ND	ND	0.00(0/49)	0.00(0/49)
	49	As	ND ~ 0.010 1	ND	0.003 5	36.73(18/49)	0.00(0/49)
	49	Cr	ND ~ 0.024 2	ND	0.010 4	26.53(13/49)	0.00(0/49)
	49	Cu	0.156 1 ~ 0.434 9	0.304 5	0.321 5	100.00(49/49)	0.00(0/49)
	49	Mn	1.581 0 ~ 11.501	2.269 2	3.506 0	100.00(49/49)	0.00(0/49)
	49	Al	0.602 2 ~ 13.782	1.561 2	3.114 9	87.76(43/49)	0.00(0/49)
	49	Ni	0.018 1 ~ 0.154 2	0.055 1	0.055 1	89.90(44/49)	0.00(0/49)

注:ND 表示未检出。

2.3 不同种类蔬菜中铅、镉、总汞、总砷与总铬的污染状况评价 统计不同种类蔬菜中 Pb、Cd、Hg、As 与 Cr 的污染状况,这五种元素的 P_i 值在 0.007 ~ 0.441 之间,均处于安全水平;其中 Pb、Cd、Hg、As 的单因子

污染指数(P_i) 在根茎类蔬菜均为最高,Cr 的 P_i 值在果菜中最高。不同种类蔬菜的综合污染指数 P_M 在 0.3 ~ 0.7 之间,均处于安全水平。具体见表 4。

表 4 不同种类蔬菜中铅、镉、总汞、总砷与总铬的污染状况评价

Table 4 Evaluation of pollution status of lead, cadmium, total mercury, total arsenic and total chromium in different types of vegetables

蔬菜类别	单因子污染指数(P_i)					综合污染指数(P_M)	污染等级
	Pb	Cd	Hg	As	Cr		
叶菜类	0.032	0.089	0.100	0.008	0.034	0.3	安全
果菜类	0.048	0.208	0.100	0.007	0.070	0.4	安全
根茎类	0.135	0.441	0.120	0.011	0.032	0.7	安全
花菜类	0.059	0.206	0.100	0.007	0.021	0.4	安全

2.4 健康风险评价 对于不同人群,四类蔬菜的 TTHQ 值从大到小依次均为:根茎类 > 叶菜类 > 花菜类 > 果菜类,其中儿童摄入根茎类与叶菜类蔬菜的 TTHQ 值均 > 1.0,分别为 1.7、1.1,说明儿童摄入根茎类与叶菜类蔬菜可能对人体健康产生一定的负面影响;果菜类与花菜类蔬菜的 TTHQ 值均 < 1.0,表明摄入这些蔬菜对儿童健康不会产生负面影响。成人

摄入蔬菜的 TTHQ 的值均 ≤ 1.0,表明成人摄入这四类蔬菜对人体健康没有显著的负面影响。具体见表 5。

不同元素对不同类蔬菜的 TTHQ 值贡献率有很大差异,叶菜类中 Mn、Al、Cd 贡献率较高,Pb、Hg、Ni、Cr 贡献率较低;根茎类中 Mn、Cd、Cu 贡献较高,Pb、Hg、Cr、Ni 贡献率较低;果菜中贡献较高的是 As,花菜中贡

献较高的是 Mn。总体而言,蔬菜中 Mn、Al、Cd、Cu 和 As 在这几类蔬菜中的贡献率较高。具体见图 1。

表 5 蔬菜中金属与非金属元素对儿童及成人的单一健康风险 (THQ) 与总体健康风险 (TTHQ) 评价

Table 5 Evaluation of THQ and TTHQ of metals and metalloids in vegetables for children and adults

分组	蔬菜类别	THQ 值									TTHQ 值
		Pb	Cd	Hg	As	Cr	Cu	Mn	Al	Ni	
儿童	叶菜类	0.026	0.169	0.032	0.124	0.054	0.082	0.282	0.289	0.010	1.1
	果菜类	0.013	0.099	0.032	0.117	0.112	0.081	0.093	0.011	0.025	0.6
	根茎类	0.037	0.420	0.038	0.175	0.051	0.202	0.583	0.118	0.075	1.7
	花菜类	0.016	0.098	0.032	0.111	0.033	0.077	0.239	0.102	0.026	0.7
成人	叶菜类	0.016	0.104	0.020	0.077	0.033	0.050	0.174	0.179	0.006	0.7
	果菜类	0.008	0.061	0.020	0.073	0.069	0.050	0.058	0.007	0.016	0.4
	根茎类	0.023	0.260	0.024	0.108	0.031	0.125	0.360	0.073	0.046	1.0
	花菜类	0.010	0.061	0.020	0.069	0.020	0.047	0.147	0.063	0.016	0.5

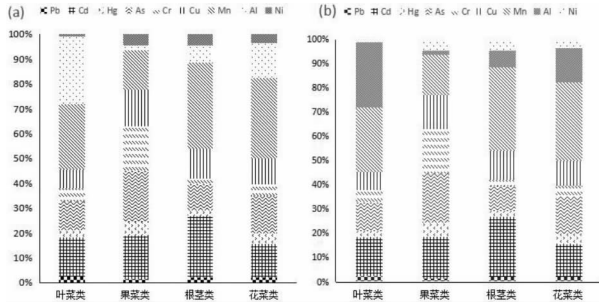


图 1 蔬菜中金属与非金属元素对儿童(a)和成人(b)的总体健康风险(TTHQ)贡献率比较

Fig. 1 Comparison of the contribution rates of metals and metalloids in vegetables to TTHQ of children (a) and adults (b)

3 讨论

通过分析本市近 5 年市售蔬菜中 9 种金属与类金属的含量可知,这 9 种元素均有不同程度的检出, Mn、Al 含量相对较高。不同类别蔬菜中各元素含量也不同,除 Cr、Al 外,其余几种元素在根茎类蔬菜中含量相对较高,表明多数金属更易在根茎类蔬菜中富集。本研究发现蔬菜中只有 Cd 含量存在少量超标,超标率为 2.63%,接近成都市平原地区的蔬菜镉超标率^[16](3.0%);高于山东菏泽市蔬菜中镉超标率^[17](1.32%)。Cd 超标样品集中在根茎类蔬菜中的百合、芋头样品中,姜健等人^[18]的研究也发现芋头中 Cd 超标率达 35.7%。镉在根茎类蔬菜易超标,这与蔬菜生长环境中镉含量高、蔬菜本身的品种特征容易富集镉元素以及镉在环境中有着相对较高的迁移特性有关。有研究表明,当土壤 pH 在弱酸性时,土壤中游离态镉增加^[19],镉容易被植物吸收富集在体内。

从蔬菜的污染评价结果来看,这四类蔬菜的五种重金属与类金属综合污染指数均在安全范围内,表明本市近 5 年这四类市售蔬菜总体污染水平较低。对

这四类蔬菜进行人群健康风险评价,本市居民成人通过蔬菜摄入的这 9 种金属与非金属基本处于可接受水平,但是儿童摄入叶菜类与根茎类蔬菜可能存在一定的健康风险,需要引起警示。大量研究表明,在同等重金属污染暴露条件下,重金属对儿童带来的健康风险要大大高于成人。这与儿童自身组织器官还不完善,肝肾等代谢排毒器官的功能较成人偏低有关。建议儿童在选择蔬菜类别时适当减少叶菜与根茎类蔬菜摄入的频率。

食品中 Al 的人体健康风险评价研究主要集中在含铝食品添加剂的食品中,针对其他食品研究相对较少。蒋皓等人^[20]开展了杭州市居民膳食中铝的暴露风险评估,结果显示铝膳食暴露量总体风险可接受,但儿童组部分年龄段超过每周可耐受摄入量(2mg/kg·BW),应引起关注。食品中 Mn 的人体健康风险评价研究报道更少,研究对象主要集中在水质、茶叶中。谭昊言等人^[21]对水质中的 Mn 含量及人体健康风险影响进行研究,邱香等人^[22]对茶叶中包括 Mn 在内的多元素对人体健康风险进行评估。本研究结果表明,蔬菜中除 Cd 外, Mn、Al 对 TTHQ 值结果贡献率也较大,应当对蔬菜中这几种金属元素的人体的健康风险引起关注。

本研究中,金属与类金属对人体健康风险的评估存在一定不确定性:(1)居民蔬菜消费量来源于《中国居民膳食结构与营养状况变迁的追踪研究》,与本市居民实际蔬菜消费量可能存在差异。(2)不同物质对人体的风险受物质本身特性不同,风险不能简单叠加,可能存在一定的协调或拮抗效应。(3)除了食用蔬菜以外,其他途径包括粮食、饮水、海产品等也可能摄入大量的重金属,从而进一步增加本地区居民的健康风险。在今后研究中,将完善相关参数,以提高健康风险评估的准确性。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] 杨富华, 杨乐, 徐晓枫, 等. 2017 - 2019 年内蒙古地区地产谷物与蔬菜中铅、镉、总汞和总砷污染状况[J]. 卫生研究, 2021, 50(5): 846 - 848.
Yang FH, Yang L, Xu XF, et al. Pollution status of Lead, Cadmium, total Mercury and total Arsenic in cereals and vegetables in Inner Mongolia from 2017 to 2019 [J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(5): 846 - 848.
- [2] 唐玉莹, 王保珍, 肖培瑞, 等. 山东省莲藕中重金属污染状况及健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2024, 51(2): 245 - 249, 321.
Tang YY, Wang BZ, Xiao PR, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of lotus root, Shandong [J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(2): 245 - 249, 321.
- [3] 郭思宇, 黄运湘. 重金属在典型蔬菜可食部位的污染特征及其健康风险评估[J]. 湖南农业科学, 2023, (9): 39 - 45.
Guo SY, Huang YX. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in edible parts of typical vegetables [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2023, (9): 39 - 45.
- [4] Liang G, Gong WW, Li BR, 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, 16(6): 909.
- [5] 魏军晓. 北京市售食品重金属含量特征与健康风险评估[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
Wei JX. Assessment of human health risk based on characteristics of heavy metal contents in foods sold in Beijing, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [6] 常通, 魏滨, 王韬, 等. 淄博市蔬菜重金属污染状况及暴露风险评估[J]. 职业与健康, 2020, 36(22): 3056 - 3060.
Chang T, Wei B, Wang T, et al. Pollution status and exposure risk assessment of heavy metals in vegetables in Zibo City [J]. Occupation and Health, 2020, 36(22): 3056 - 3060.
- [7] Proshad R, Idris AM. Evaluation of heavy metals contamination in cereals, vegetables and fruits with probabilistic health hazard in a highly polluted megacity [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(32): 79525 - 79550.
- [8] Su CH, Wang JW, Chen ZW, et al. Sources and health risks of heavy metals in soils and vegetables from intensive human intervention areas in South China [J]. The Science of the Total Environment, 2023, 857(Pt 1): 159389.
- [9] Mao YB, Wang MM, Wei HW, et al. Heavy metal pollution and risk assessment of vegetables and Soil in Jinhua city of China [J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4241.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009. 268 - 2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, the China Food and Drug Administration. GB 5009. 268 - 2016 National standard for food safety determination of multi - elements in food [S]. Beijing: China Standard Press, 2016.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762 - 2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, the China Food and Drug Administration. National standard for food safety: Limit the amount of contaminants in food [S]. Beijing: China Standard Press, 2022.
- [12] 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估[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 five heavy metals in vegetables in Wuhu City [J]. Practical Preventive Medicine, 2023, 30(7): 828 - 832.
- [13] 陈亮, 姜莘红, 陈灿. 不同类型蔬菜中 7 种重金属含量差异及人体健康风险[J]. 环境科学技术, 2021, 44(S2): 366 - 375.
Chen L, Jiang PH, Chen C. The concentration and accumulation of potentially toxic elements in different vegetable types and health risk for vegetable consumption [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(S2): 366 - 375.
- [14] 翟凤英. 中国居民膳食结构与营养状况变迁的追踪研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Zhai FY. A follow - up study on changes of dietary structure and nutritional status of Chinese residents [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [15] 施姜丹, 史可欣, 黄雨佳, 等. 中国大米和蔬菜重金属/类金属污染及其健康风险[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(7): 479 - 487.
Shi JD, Shi KX, Huang YJ, et al. Heavy metal and metalloid contamination of rice and vegetables and their health risk in China [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(7): 479 - 487.
- [16] 杨文, 高琴, 王恋琪, 等. 成都平原地区蔬菜重金属污染风险评估[J]. 四川农业科技, 2020(10): 40 - 42.
Yang W, Gao Q, Wang LQ, et al. Risk assessment of heavy metal contamination of vegetables in Chengdu Plain [J]. Science and Technology of Sichuan Agriculture, 2020(10): 40 - 42.
- [17] 张慧, 张翠霞, 张惠珠, 等. 2017—2021 年菏泽市售蔬菜中铅、镉污染状况及健康风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(24): 3058 - 3062, 3066.
Zhang H, Zhang CX, Zhang HZ, et al. Pollution status and health risk assessment of Lead and Cadmium in market vegetables in Heze City, 2017 - 2021 [J]. Chinese Journal of Health Inspection, 2022, 32(24): 3058 - 3062, 3066.
- [18] 姜健, 王晓玮, 刘柏林, 等. 安徽省四种市售水生蔬菜中铅、镉、总铬和总砷污染状况[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(6): 469 - 473.
Jiang J, Wang XW, Liu BL, et al. Lead, Cadmium, total Chromium and total Arsenic pollution in four commercially available aquatic vegetables in Anhui Province, China [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(6): 469 - 473.
- [19] 宋江菊, 卢旺彪, 张珍, 等. 贵州部分水稻主产区土壤和大米 Cd 污染特征研究[J]. 地球与环境, 2023, 51(1): 67 - 75.
Song JJ, Lu WB, Zhang Z, et al. Cd pollution characteristics of Soil and rice in Some main rice producing areas of Guizhou province [J]. Earth and Environment, 2023, 51(1): 67 - 75.
- [20] 蒋皓, 黄利明, 王玲莉, 等. 杭州市居民膳食铝暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(2): 224 - 229.
Jiang H, Huang LM, Wang LL, et al. Risk - assessment of dietary exposure of aluminium in residents of Hangzhou [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(2): 224 - 229.

- [21] 谭昊言,张彩香,李佳森,等. 鄱阳湖流域天然劣质地下水中锰富集特征及其健康风险评估[J]. 生态毒理学报,2023,18(5): 227-235.
Tan HY, Zhang CX, Li JS, et al. Enrichment of Manganese in natural inferior groundwater and its health risk assessment in Poyang Lake Basin[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(5): 227-235.
- [22] 邱香,沈建红,费加艺,等. 上海市松江区市售苦丁茶及茶汤中8种元素监测结果[J]. 职业与健康,2019,35(12):1633-1637.
Qiu X, Shen JH, Fei JY, et al. Monitoring results of eight elements in commercially available Kuding tea leaves and infusion in Songjiang District of Shanghai [J]. Occupation and Health, 2019, 35(12): 1633-1637.

收稿日期:2024-02-23

(上接第 2608 页)

参考文献

- [1] 种聪,岳希明. 经济增长为什么没有带来幸福感提高? ——对主观幸福感影响因素的综述[J]. 南开经济研究,2020,(4):24-45.
Chong C, Yue XM. Does economic growth improve human happiness? a review of the influencing factors of SWB[J]. Nankai Economic Studies, 2020, (4): 24-45.
- [2] 白长虹. 开展幸福产业交叉研究[J]. 南开管理评论,2021,24(2):封2,前插1.
Bai CH. Crossing research on the happiness industr[J]. Nankai Business Review, 2021, 24(2): Seal 2, insert 1 before.
- [3] 张铮,陈雪薇. 文化消费在收入与主观幸福感关系中的中介作用及边界条件探究[J]. 南京社会科学,2018,(8):149-156.
Zhang Z, Chen XW. The conditional mediating effect of cultural consumption in the relationship between income and subjective well-being[J]. Social Sciences inNanjing, 2018, (8): 149-156.
- [4] 田馨霖,张晓娟. 收入、文化服务与农村老年人幸福感的实证研究[J]. 调研世界,2018,(7):56-61.
Tian XL, Zhang XJ. An empirical study on income, cultural services and well-being of the elderly in rural areas [J]. The World of Survey and Research, 2018, (7): 56-61.
- [5] 李小文,陈冬雪. 有序概率回归模型下的城乡居民文化消费与幸福感关系研究 ——基于 2013 年 CGSS 调查数据[J]. 广西社会科学,2016,(9):165-168.
Li XW, Chen DX. Research on the relationship between cultural consumption and well-being of urban and rural residents under the ordered probability regression model - - Based on the CGSS2013 [J]. Guangxi Social Sciences, 2016, (9): 165-168.
- [6] 李光明,徐冬柠. 文化消费对新市民主观幸福感的影响机理研究 ——基于 CGSS2015 的数据分析[J]. 兰州学刊,2018,(12):158-168.
Li GM, Xu DN. Study on the influence mechanism of cultural consumption on the subjective well-being of new citizens:based on the analysis of CGSS2015 data [J]. Lanzhou Academic Journal, 2018, (12): 158-168.
- [7] 范红丽,杨嘉乐,张晓慧. 社会文化组织对农村居民幸福感的影响 ——基于中国劳动力动态调查数据的分析[J]. 中国农村观察,2022,(4):170-184.
Fan HL, Yang JL, Zhang XH. The impact of social cultural organizations on rural residents' happiness: an analysis based on data analysis from CLDS survey [J]. China Rural Survey, 2022, (4): 170-184.
- [8] 白宇飞,杨松,王盼. 数字技术使用、体育参与和居民幸福感 ——提升体育产业“幸福”属性的微观视角[J]. 北京体育大学学报,2023,46(3):25-35.
Bai YF, Yang S, Wang P. Use of digital technology, engagement in sports and residents' well-being: a micro perspective on enhancing the "happiness" attribute of sports industry [J]. Journal of Beijing Sport University, 2023, 46(3): 25-35.
- [9] 李艳玲,张瑞丽,李慧娟,等. 社区老年人身体活动、身体功能与心理幸福感的研究[J]. 现代预防医学,2013,40(11):2086-2088.
Li YL, Zhang RL, Li HJ, et al. Research on physical activity and physical function and psychological well-being in elderly people of community [J]. Modern Preventive Medicine, 2013, 40(11): 2086-2088.
- [10] 雷鸣. 体育锻炼如何提升幸福感 ——论社会资本的中介作用[J]. 上海体育学院学报,2020,44(4):23-30.
Lei M. How does Physical exercise improve happiness: The mediation effect of social capital [J]. Journal of Shanghai University of Sport, 2020, 44(4): 23-30.
- [11] 张勇,李凌. 体育参与对主观幸福感的影响 ——基于社会学实证研究[J]. 沈阳体育学院学报,2021,40(2):92-102, 117.
Zhang Y, Li L. Influence of sports participation on subjective well-being: based on sociological empirical research [J]. Journal of Shenyang Sport University, 2021, 40(2): 92-102, 117.
- [12] 杨凡,黄映娇,王富百慧. 中国老年人的体育锻炼和社会参与:健康促进与网络拓展[J]. 人口研究,2021,45(3):97-113.
Yang F, Huang YJ. Physical exercises of Chinese older adults and social participation: health promotion and network expansion [J]. Population Research, 2021, 45(3): 97-113.
- [13] 苏钟萍,张应良. 收入水平、社会公平认知与农村居民主观幸福感[J]. 统计与决策,2021,37(9):71-74.
Su ZP, Zhang YL. Income level, social justice cognition and subjective well-being of rural residents [J]. Statistics and Decision, 2021, 37(9): 71-74.
- [14] 周晶晶. 基于 CGSS 数据的社会保险与老年人幸福指数关系研究[J]. 统计与决策,2021,37(10):142-146.
Zhou JJ. Research on the relationship between social insurance and happiness index of the elderly based on CGSS data [J]. Statistics and Decision, 2021, 37(10): 142-146.

收稿日期:2024-04-07