DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260116001
引用格式: 赵晨曦, 张维, 云鹏, 等. 2022—2024 年河北省蔬菜中多元素污染水平及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 270–277.
ZHAO CX, ZHANG W, YUN P, *et al*. Multi-element pollution levels and health risks assessment in vegetables in Hebei Province from 2022 to 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 270–277. (in Chinese with English abstract).

2022—2024 年河北省蔬菜中多元素污染水平及健康风险评估

赵晨曦[1], 张　维[2], 云　鹏[1], 陈　锐[1], 高月星[1], 刘长青[1], 陈福尊[1*]
(1. 河北省疾病预防控制中心, 石家庄　050021; 2. 保定市疾病预防控制中心, 保定　071000)

摘　要: 目的　对 2022—2024 年河北省市售蔬菜中铅、铬、汞、砷、镉、锌 6 种元素的污染状况进行调查分析并开展不同人群风险暴露评估。**方法**　采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)对 1330 份蔬菜样品(12 种)进行多元素检测, 将检测结果进行统计分析, 结合内梅罗污染指数法、目标危害系数法、综合目标危害系数法和致癌风险指数法对 2~3、4~6、7~10、11~17、18~29、30~44、45~59、60~69 岁及 70 岁及以上蔬菜消费人群中多元素进行暴露风险评估。**结果**　镉、铬、锌 3 种元素的检出率均在 50%以上, 锌元素的检出率最高为 95.1%, 汞元素的检出率最低为 11.6%; 所有检出样品中锌含量最高(15.5 mg/kg); 12 种蔬菜样品中韭菜的综合污染指数最高为 0.254; 铬的目标危害系数值和致癌风险均高于其他元素, 应予以持续关注。**结论**　蔬菜中多元素的污染状况为安全水平, 经蔬菜摄入多元素暴露量整体不高, 健康风险较低, 并未对身体健康构成威胁, 由于儿童体重对非致癌和致癌风险的影响都比成人大, 因此低年龄组(2~6 岁)的元素暴露量、综合目标危害系数值和致癌风险等评估结果与其他年龄段存在差异, 需重点关注。

关键词: 多元素; 蔬菜; 电感耦合等离子体质谱法; 暴露评估; 目标危害系数法

Multi-element pollution levels and health risks assessment in vegetables in Hebei Province from 2022 to 2024

ZHAO Chen-Xi[1], ZHANG Wei[2], YUN Peng[1], CHEN Rui[1], GAO Yue-Xing[1], LIU Chang-Qing[1], CHEN Fu-Zun[1*]
(1. *Hebei Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Shijiazhuang* 050021, *China*; 2. *Baoding Center for Disease Control and Prevention*, *Baoding* 071000, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate and analyze the pollution status of 6 kinds of elements (lead, chromium, mercury, arsenic, cadmium, zinc) in vegetables from markets in Hebei Province from 2022 to 2024, and to evaluate

收稿日期: 2026-01-16
基金项目: 河北省医学科学研究课题计划资助项目(20210101)
第一作者: 赵晨曦(1987—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 309468405@qq.com
***通信作者:** 陈福尊(1969—), 女, 硕士, 主任技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: chenfuzun@126.com

exposure risks for different populations. **Methods**　The 1330 vegetable samples (12 kinds of) were tested for multi-elements by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Test results were statistical analyzed. The risks of exposure of multi-elements for vegetable-consuming populations, including those aged 2 to 3, 4 to 6, 7 to 10, 11 to 17, 18 to 29, 30 to 44, 45 to 59, 60 to 69 and 70 above, were evaluated via methods combined with Nemerow pollution index method, target hazard quotient method, total target hazard quotient method and carcinogenic risk index method. **Results**　The detection rates of cadmium, chromium and zinc were all above 50%, with zinc having the highest detection rate of 95.1% and mercury the lowest of 11.6%; among all samples, the highest detected aoumut of zinc content was 15.5 mg/kg; among 12 kinds of vegetable samples, Chinese chives had the highest comprehensive pollution index of 0.254; chromium had highest target hazard quotient value and carcinogenic level, which should be continuously monitored. **Conclusion**　The pollution status of multi-elements in vegetables from markets is at a safe level. The overall exposure for multi-elements through vegetable intake is not high, with low health risks and no threats to physical health. However, since the weights of children affect the non-carcinogenic and carcinogenic risks more than the weights of adults, the assessment results such as element exposure levels, integrated target hazard quotient values, and carcinogenic risk for the younger age group (2–6 years) differ from those of other age groups, which should be focused on.

KEY WORDS: multi-elements; vegetables; inductively coupled plasma-mass spectrometry; exposure assessment; target hazard quotient method;

0　引　言

蔬菜作为人类膳食结构中核心组成部分, 其具有丰富的维生素、矿物质、膳食纤维及生物活性物质[1–2], 在维持人体营养均衡、增强免疫力、预防慢性疾病等方面发挥着重要的作用。《中国居民膳食指南》建议中国居民每天蔬菜食用量为 300~500 g[3]。随着人民生活水平的提高, 对蔬菜的消费需求和品质要求持续增长, 同时对其食用安全性的关注度也日益提高。然而, 随着工业化快速发展, 污水排放、药物滥用导致自然生态环境受重金属污染影响日益严重[4–5]。土壤、水体、大气中的各类元素通过根系吸收、叶面吸附、灌溉渗透等多种途径进入蔬菜体内并累积[6–9], 给蔬菜质量安全带来潜在隐患。

锌作为人体必需微量元素参与到身体代谢、免疫调节等生理过程中, 对于维持机体正常生理机能不可或缺, 但是摄入剂量超过人体耐受阈值时, 可能引发氧化应激、代谢紊乱等不良效应[10]; 而铅、镉、汞、砷、铬等有害重金属元素具有强蓄积性[11]、生物放大性与慢性毒性, 对人体神经系统、肾脏、肝脏等重要器官造成不可逆损伤[12–16]。更值得关注的是, 蔬菜中往往存在多种元素联合暴露的情况, 不同元素之间可能存在协同、拮抗或相加的毒性效应, 其复合危害机制更为复杂, 单一元素的风险评价已无法全面、客观地反映蔬菜食用的综合安全水平。

当前, 各国已逐步意识到蔬菜中多元素联合暴露的健康风险, 纷纷开展相关研究并制定严格的食品安全标准。然而, 现有研究仍存在诸多不足: 部分研究聚焦于单一元素检测与风险评价, 缺乏对多元素复合污染的系统分析; 针对不同年龄段、不同膳食结构人群的暴露风险差异研究较为薄弱, 难以满足精准化风险防控的需求。本研究采用内梅罗污染指数法、目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)、综合目标危害系数法(total target hazard quotient, TTHQ)和致癌风险指数法(carcinogenic risk, CR)对不同性别、不同年龄段人群经蔬菜摄入多元素进行健康风险评估, 结合成分分析, 直观地反映市售蔬菜中各元素的污染情况, 为食品安全标准的修订完善、公众膳食结构的科学指导提供坚实的科学依据。

1　材料与方法

1.1　仪器与试剂

iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); 5000CN 微波消解仪(安东帕商贸有限公司); GM20 高效搅碎混匀机(德国 Retsch 公司); BHW-09A45 赶酸仪(上海博通化学科技有限公司); BAS2223S 千分之一天平(德国赛多利斯公司)。

硝酸(分析纯, 德国默克公司); 多元素标液(GNM-M259904-2013, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 汞元素标液[GBW(E)084892, 中国计量科学研究院]; 混合内标(S240619032, 铂金埃尔默股份有限公司); 屈臣氏蒸馏水[屈臣氏集团(香港)有限公司]。

1.2　样品采集与分类

2022—2024 年, 于农贸市场、超市或农户随机抽取 1330 份蔬菜样品, 其中包括叶菜类、鲜豆类、甘蓝类、芸薹类、瓜

菜类(葫芦科)、茎类、鳞茎类、块根和块茎类、茄果类等 12 种。

1.3 样品前处理

取样品可食用部分, 样品量需大于 500 g, 用高效搅碎混匀机进行混匀, 取混匀样品 1~2 g 于干燥微波消解管内, 加入 7 mL 硝酸, 静置过夜, 进行预消化。次日, 进行微波消解, 消解程序见表 1, 消解完全后取出, 放入赶酸仪中, 在 90 ℃条件下赶酸 1 h, 置于室温, 用蒸馏水定容至 25 mL, 备用。

表 1 微波消解程序

Table 1 Microwave digestion procedure

功率/W	上升时间/min	保持温度/℃	保持时间/min
1600	10	100	20
1600	10	150	20
1600	10	180	40

1.4 样品的测定

消解后的样品用电感耦合等离子体质谱仪进行铅、镉、汞、砷、铬、锌 6 种元素的测定。仪器参数设置如下: 采样深度 5 mm; 泵速 40 r/s; 雾化器流量 0.985 L/min; 辅助气流量 0.8 L/min; 冷却气流量 14 L/min; 射频功率 1550 W。仪器经过调谐后, 其灵敏度、氧化物、分辨率、双电荷等指标符合检测要求, 即可上机检测。

1.5 质量保证与质量控制

实验整体过程中均采用塑料器皿, 以防止玻璃用具对实验背景干扰, 并用高速搅碎混匀机将样品混匀处理, 保证样品的均一性, 每份样品搅碎混匀后都用蒸馏水洗涤干净并烘干, 防止样品交叉污染。实验中同时进行空白样品、平行样品、加标样品及质控样品的检测, 为降低基质对质谱分析的影响, 本研究通过加入内标改进剂、选择碰撞模式等方式, 保证检测结果更准确。

1.6 蔬菜中重金属污染评价方法

本研究中重金属污染情况评价采用单因子污染指数评价和内梅罗综合因子污染指数评价两种评价方法[17–19], 计算公式如(1)~(2)所示, 评价标准如表 2 所示。

单因子污染指数评价见公式(1):

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

式中: P_i 为污染物 i 的单因子污染指数; C_i 为污染物 i 的实际测量浓度, mg/kg; S_i 为污染物 i 的评价标准值, mg/kg。

内梅罗综合因子污染指数($P_{综}$)评价见公式(2):

$$P_{综}=\sqrt{\frac{P_{ave}^2+P_{max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中: P_{ave} 为单因子污染指数的平均值; P_{max} 为单因子污染指数的最大值。

表 2 污染指数分级标准

Table 2 Grading standards for pollution index

评价等级	污染指数	污染程度	污染水平
I	$P_i\leqslant 0.7$	安全	清洁
II	$0.7<P_i\leqslant 1.0$	警戒	尚清洁
III	$1.0<P_i\leqslant 2.0$	轻度污染	开始受污染
IV	$2.0<P_i\leqslant 3.0$	中度污染	受到中度污染
V	$P_i>3.0$	重度污染	污染严重

1.7 暴露评估方法

1.7.1 健康风险评估

本研究采用美国环保署(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)发布的 THQ 和 TTHQ 评估通过蔬菜摄入的重金属导致的健康风险, 结合点评估法, 依据蔬菜中重金属平均含量计算平均暴露量, 评估一般情况下的暴露量。其计算公式如下(3)~(5):

$$\mathrm{CDI}=\frac{C\times \mathrm{IR}}{\mathrm{BW}} \tag{3}$$

$$\mathrm{THQ}=\frac{\mathrm{CDI}}{\mathrm{RfD}} \tag{4}$$

$$\mathrm{TTHQ}=\sum \mathrm{THQ_I} \tag{5}$$

式中: CDI 为因使用蔬菜导致重金属 i 的个体日暴露量(chronic daily intake), μg/(kg • d); C 为蔬菜中重金属 i 的浓度, mg/kg; IR 为蔬菜日均摄入量(daily intake rates), g/d; BW 为个体体重(body weight), kg; RfD 为重金属的参比剂量(oral reference dose), mg/(kg • d), 依据 USEPA 发布的参比剂量[20–21], 镉为 0.001 mg/(kg • d)、铅为 0.0035 mg/(kg • d)、汞为 0.0003 mg/(kg • d)、砷为 0.0003 mg/(kg • d)、铬为 0.003 mg/(kg • d)、锌为 0.3 mg/(kg • d)。一般说来, 危害系数 THQ 和 TTHQ 与风险程度成正比, 数值越高, 风险越高。当重金属暴露风险 THQ 和 TTHQ<1.0 时, 表明不存在非致癌健康风险; 长期摄入此类蔬菜的健康风险较低; THQ≥1.0 时, 表明存在非致癌风险, 长期摄入此类蔬菜对人体具有潜在健康风险。

1.7.2 致癌风险评估

采用 R_i 来评估致癌因子的致癌风险, 其计算见公式(6):

$$R_i=\mathrm{CDI}\times \mathrm{CSF_0} \tag{6}$$

式中: R_i 为化学物质 i 对个人造成的致癌风险; $\mathrm{CSF_0}$ 为致癌斜率因子(oral carcinogenic slopefactor)[22], 依据 USEPA 发布各元素的致癌斜率因子[23]分别为: 砷 1.5 $[\mathrm{mg/(kg\cdot d)}]^{-1}$(无机砷); 镉 6.1 $[\mathrm{mg/(kg\cdot d)}]^{-1}$; 铬 41 $[\mathrm{mg/(kg\cdot d)}]^{-1}$。一般认为, $R_i>1\times10^{-4}$ 时, 化学物质 i 对人体有较高致癌风险; $1\times10^{-6}<R_i<1\times10^{-4}$, 化学物质 i 对人体存在潜在风险; $R_i<1\times10^{-6}$, 化学物质 i 对人体无致癌风险或风险较低[24]。

1.8 数据处理

按照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)

食品污染监测数据处理指南中推荐, 当样品中污染物未检出率均小于 60%, 未检出数据用方法检出限(limit of detection, LOD)的 1/2 进行统计; 当检出率大于 60%, 未检出数据用 LOD 进行统计[25]。本研究利用 Excel 2021 软件、R 软件(4.5.2)、Rtools 软件(4.5)和 Rstudio 软件(4.4.3)进行数据计算统计分析。

2　结果与分析

2.1　质量控制

为了确保实验的准确性, 在实验过程中同时进行平行样品、加标样品的检测, 其回收率在 82%~117%之间, 平行样品相对标准偏差(relative standard deviation, RSDs)为 0.41%~14.70%, 标准曲线相关系数(r)在 0.9993~1.0000 之间, 检出限与 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法一致; 实验过程中质控物质与实际样品同时测定, 质控物质(GBW10015a)测定结果见表 3, 测定值为 3 次检测的平均值, 均在质控物定值范围内。

表 3　质控物中 6 种元素测定结果(n=3)

Table 3　Determination results of 6 kinds of elements in quality controlled samples (n=3)

质控物编号	元素	测定值/(mg/kg)	标准认定值/(mg/kg)
GBW10015a	铅	1.12	1.07 (0.98~1.16)
	镉	0.187	0.190 (0.170~0.210)
	汞	0.023	0.021 (0.016~0.026)
	砷	0.522	0.540 (0.480~0.600)
	铬	7.94	9.00 (7.70~10.30)
	锌	44.3	42.0 (38.0~46.0)

2.2　不同种蔬菜中各元素的污染水平

2.2.1　蔬菜中不同元素的污染水平

市售的 1330 份蔬菜中, 6 种元素的含量情况如表 4 所示, 其中镉、铬、锌 3 种元素的检出率均在 50%以上, 锌元素的检出率最高为 95.1%, 汞元素的检出率最低为 11.6%; 所有检出样品中锌含量最高(15.5000 mg/kg), 并且 6 种元素检出值均未超过 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中要求的限量值。

表 4　蔬菜中各元素含量情况

Table 4　Content of various elements in vegetables

种类	平均值/(mg/kg)	P_{25}/(mg/kg)	P_{50}/(mg/kg)	P_{75}/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	检出率/%
镉	0.00903	0.00100	0.00417	0.0120	0.0340	0.1390	63.8
砷	0.00807	0.0020	0.00200	0.00860	0.0320	0.2550	39.7
铅	0.0163	0.00200	0.00200	0.0200	0.072	0.2730	48.3
铬	0.0396	0.00200	0.0166	0.0426	0.177	0.4980	60.4
汞	0.00113	0.00100	0.00100	0.00100	0.00200	0.0091	11.6
锌	1.60	0.727	1.24	2.02	4.20	15.5000	95.1

2.2.2　不同种类蔬菜中元素的污染水平

本研究共采用 12 种不同蔬菜进行研究, 综合来看, 菠菜中各元素的检出率最高, 其次是韭菜, 圆白菜和西红柿整体检出率比较低; 6 种元素在不同蔬菜中的检出率也有差别, 镉在马铃薯中检出率最高, 砷、铬、铅在菠菜中检出率最高, 汞和锌在韭菜中检出率最高, 具体情况见图 1。

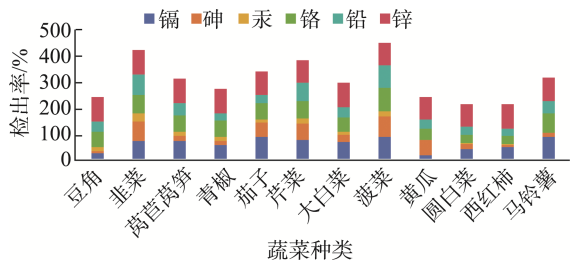


图 1　12 种蔬菜中元素的污染水平

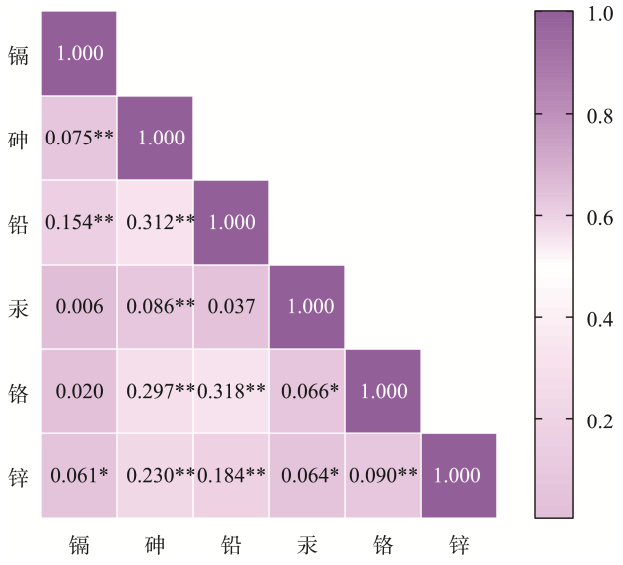
Fig.1　Pollution levels of elements in 12 kinds of vegetable species

2.3　蔬菜中各因素相关性分析

本研究以 6 种金属元素的含量为核心指标, 借助 R 软件(4.5.2)、Rtools 软件(4.5)和 Rstudio 软件(4.4.3)对 1330 份蔬菜样品展开相关性分析。依据金属含量的分布特征, 最终选定 Spearman 秩相关分析方法。结果显示, 元素间相关性差异明显: 结果显示 As 与 Cr、Pb 与 Cr、As 与 Pb 呈显著弱相关, 表明 As、Pb、Cr 3 种重金属具有同源污染特征; Cd、Hg 与其他金属协同富集程度很低, 污染来源相对独立, 具体结果详见图 2。

2.4　蔬菜中不同元素污染指数评价

本研究对 1330 份蔬菜样品进行污染指数评价, 12 种蔬菜中 6 种元素的污染状况如表 5 所示, 根据 GB 2762—2022 和 GB 13106—91《食品中锌限量卫生标准》中规定的卫生标准限值(表 6), 将其作为内梅罗指数法中评价标准值, 计算出 P_i 和 $P_{综}$, 结果显示 12 种蔬菜中 6 种元素的污染状况均为安全水平, 对人体膳食不构成威胁, 其中韭菜的 $P_{综}$最高为 0.254, 洋白菜的 $P_{综}$最低为 0.044; 从 P_i 来看, 各元素均为清洁水平, 其中韭菜中铅元素数值最高为 0.312。



注: *表示差异显著, $P \leq 0.05$; **表示差异极显著, $P \leq 0.01$。

图 2 蔬菜中各元素相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of elements in vegetables

2.5 健康风险评估分析

依据最新的官方调查报告《2010—2013 年中国居民营养与健康状况调查报告》[26–29], 将人群按性别、年龄分组, 将不同人群的蔬菜摄入量、体重、CDI 进行计算, 并对各元素健康风险评价[30], 见表 7。由数据看出, 居民通过蔬菜摄入多元素暴露量整体不高, 健康风险较低, 并未对身体健康构成威胁。其中, 低年龄组(2~6 岁)TTHQ 相对较高, 说明低年龄人群通过蔬菜摄入更容易引发健康风险, 需给予关注。通过各元素的 THQ 可看出, 铬、砷的 THQ 比较高, 分别为 0.177 和 0.120, 因此居民经蔬菜食用摄入的砷和铬对人体的潜在风险相对比较大。

2.6 致癌风险评估分析

根据国际癌症研究机构(International Agency Forresearch on Cancer, IARC)致癌物分类, 砷、镉和铬属于一类致癌物, 所以仅对这 3 种元素进行致癌风险评价。通过公式(6)计算得出不同年龄阶段、不同性别的居民经蔬菜摄入的多元素致癌因子, 见表 8, 可看出 $R_{铬} > R_{镉} > R_{砷}$, 说明蔬菜

表 5 不同蔬菜中 6 种元素污染状况

Table 5 Pollution status of 6 kinds ofelements in different vegetables

蔬菜	P_i						$P_{综}$	污染程度
	镉	砷	铅	汞	铬	锌		
豆角类	0.033	0.009	0.065	0.109	0.082	0.106	0.091	安全
韭菜	0.277	0.039	0.312	0.137	0.168	0.127	0.254	安全
莴苣、莴笋	0.060	0.006	0.134	0.116	0.052	0.042	0.107	安全
青椒类	0.105	0.010	0.101	0.105	0.084	0.056	0.066	安全
茄子	0.115	0.018	0.108	0.114	0.092	0.064	0.101	安全
芹菜	0.044	0.019	0.170	0.119	0.062	0.064	0.133	安全
大白菜	0.035	0.036	0.114	0.026	0.085	0.034	0.091	安全
菠菜	0.136	0.048	0.152	0.120	0.217	0.177	0.183	安全
黄瓜	0.030	0.018	0.110	0.102	0.033	0.054	0.088	安全
洋白菜	0.041	0.005	0.067	0.104	0.026	0.048	0.044	安全
西红柿	0.087	0.005	0.112	0.104	0.028	0.051	0.091	安全
马铃薯	0.228	0.009	0.059	0.113	0.086	0.090	0.175	安全

表 6 蔬菜中各元素食品卫生标准限值

Table 6 Food hygiene standard limits of various elements in vegetables

元素	种类	限量标准/(mg/kg)	标准来源
镉	其他蔬菜	0.05	GB 2762—2022
	叶菜蔬菜	0.2	
	豆类蔬菜、块根和块茎蔬菜、茎类蔬菜	0.1	
	芹菜、黄花菜	0.2	
砷	蔬菜	0.5	
铅	其他蔬菜	0.1	
	叶菜蔬菜	0.3	
	芸薹类蔬菜、豆类蔬菜、生姜、薯类	0.2	
汞	蔬菜	0.01	
铬	蔬菜	0.5	
锌	蔬菜	20	GB 13106—91

表 7　2022—2024 年居民经蔬菜摄入多元素暴露量水平、THQ 及 TTHQ

Table 7　Exposure levels of multi-elements, THQ and TTHQ from vegetable intake among residents (2022—2024)

年龄/岁	性别	个体日暴露量/[μg/(kg·d)]						THQ						TTHQ
		镉	砷	铅	汞	铬	锌	镉	砷	铅	汞	铬	锌	
2~3	男	0.053	0.047	0.095	0.007	0.231	9.343	0.018	0.157	0.027	0.022	0.231	0.031	0.486
	女	0.055	0.049	0.100	0.007	0.243	9.795	0.018	0.165	0.029	0.023	0.243	0.033	0.511
4~6	男	0.053	0.048	0.097	0.007	0.234	9.467	0.018	0.159	0.028	0.022	0.234	0.032	0.493
	女	0.053	0.047	0.095	0.007	0.231	9.339	0.018	0.157	0.027	0.022	0.231	0.031	0.486
7~10	男	0.049	0.044	0.088	0.006	0.214	8.626	0.016	0.145	0.025	0.020	0.214	0.029	0.449
	女	0.048	0.043	0.087	0.006	0.212	8.559	0.016	0.144	0.025	0.020	0.212	0.029	0.446
11~13	男	0.040	0.035	0.072	0.005	0.174	7.031	0.013	0.118	0.021	0.017	0.174	0.023	0.366
	女	0.040	0.035	0.072	0.005	0.174	7.032	0.013	0.118	0.021	0.017	0.174	0.023	0.366
14~17	男	0.035	0.031	0.063	0.004	0.152	6.126	0.012	0.103	0.018	0.014	0.152	0.020	0.319
	女	0.037	0.033	0.067	0.005	0.163	6.601	0.012	0.111	0.019	0.016	0.163	0.022	0.343
18~29	男	0.031	0.027	0.055	0.004	0.134	5.430	0.010	0.091	0.016	0.013	0.134	0.018	0.282
	女	0.036	0.033	0.066	0.005	0.160	6.457	0.160	0.109	0.019	0.015	0.160	0.022	0.337
30~44	男	0.032	0.028	0.057	0.004	0.139	5.626	0.139	0.095	0.016	0.013	0.139	0.019	0.293
	女	0.037	0.033	0.067	0.005	0.163	6.577	0.163	0.111	0.019	0.015	0.163	0.022	0.342
45~59	男	0.036	0.032	0.066	0.005	0.159	6.424	0.159	0.108	0.019	0.015	0.159	0.021	0.334
	女	0.038	0.034	0.068	0.005	0.166	6.709	0.166	0.113	0.020	0.016	0.166	0.022	0.350
60~69	男	0.035	0.031	0.062	0.004	0.151	6.115	0.151	0.103	0.018	0.014	0.151	0.020	0.318
	女	0.036	0.032	0.066	0.005	0.159	6.427	0.159	0.108	0.019	0.015	0.159	0.021	0.334
≥70	男	0.033	0.030	0.060	0.004	0.145	5.853	0.145	0.098	0.017	0.014	0.145	0.020	0.305
	女	0.032	0.029	0.059	0.004	0.142	5.745	0.142	0.097	0.017	0.014	0.142	0.019	0.300
THQ 和 TTHQ 平均值								0.177	0.120	0.021	0.017	0.177	0.024	0.372

表 8　2022—2024 年居民经蔬菜摄入多元素致癌因子

Table 8　Carcinogenic factors of multi-elements intaken via vegetables by residents (2022—2024)

年龄/岁	性别	$R_i\times10^{-4}$		
		$R_{镉}$	$R_{砷}$	$R_{铬}$
2~3	男	3.2	0.71	95
	女	3.4	0.74	99
4~6	男	3.3	0.72	96
	女	3.2	0.71	95
7~10	男	3.0	0.65	88
	女	2.9	0.65	87
11~13	男	2.4	0.53	71
	女	2.4	0.53	71
14~17	男	2.1	0.46	62
	女	2.3	0.50	67
18~29	男	1.9	0.41	55
	女	2.2	0.49	66
30~44	男	1.9	0.43	57
	女	2.3	0.50	67
45~59	男	2.2	0.49	65
	女	2.3	0.51	68
60~69	男	2.1	0.46	62
	女	2.2	0.49	65
≥70	男	2.0	0.44	59
	女	2.0	0.43	58

中致癌风险由铬贡献较多, 并且 $R_{铬}$和 $R_{镉}$的值均大于 1×10^{-4}, 说明元素铬和镉具有较高的致癌风险, 需予以关注; $1\times10^{-6}<R_{砷}<1\times10^{-4}$说明砷元素会对人体存在潜在致癌风险。数据显示, 低年龄组(2~6 岁)3 种元素的致癌因子数值, 整体呈现出区别于其他年龄段的特征, 需予以持续关注续关注。考虑到目前二类致癌物质铅和汞毒性资料缺乏, 尚未建立致癌斜率因子, 因此在本研究中暂不评估人群经食用蔬菜摄入铅和汞的致癌风险。

3　结　论

本研究建立了蔬菜中多元素的检测方法, 其标准曲线相关系数(r)在 0.9993~1.0000 之间, 线性良好, 回收率在 82%~117%之间, 平行样品 RSDs 在 0.41%~14.70%之间, 回收率和准确率高, 标准物质均在确值范围内, 可适用于蔬菜中多元素的检测。在河北地区市售的 1330 份蔬菜中, 镉、铬、锌 3 种元素的检出率均在 50%以上, 锌元素的检出率最高为 95.1%, 汞元素的检出率最低为 11.6%; 所有检出样品中锌含量最高(15.5 mg/kg), 并且 6 种元素检出值均未超过 GB 2762—2022 中要求的限量值。12 种蔬菜中, 菠菜的检出率最高。

2022—2024 年市售蔬菜中多元素的污染状况为安全水平, 对人体膳食不构成威胁, 其中韭菜的 $P_{综}$最高为

0.254, 洋白菜的综合污染水平最低为 0.044,; 从 P_i 来看, 各元素均为清洁水平, 其中韭菜中铅元素数值最高为 0.312。居民通过蔬菜摄入多元素露量整体不高, 健康风险较低, 并未对身体健康构成威胁。其中, 低年龄组(2~6 岁)相对较高, 说明低年龄人群通过蔬菜摄入更容易引发健康风险, 需给予关注。通过各元素的 THQ 值可看出, 铬、砷的 THQ 比较高, 分别为 0.177 和 0.120, 因此居民经蔬菜食用摄入的砷和铬对人体的潜在风险相对比较大。铬、镉和砷 3 种元素致癌程度依次递减, 元素铬和镉具有较高的致癌风险, 砷会对人体存在潜在致癌风险。通过对不同年龄和性别的人群暴露评估发现, 低年龄组(2~6 岁)TTHQ 和致癌因子数值均高于其他年龄段, 年龄越小暴露风险越高。

本研究采用 2010—2013 年中国居民营养与健康状况调查数据, 对于现在实际情况代表性有所降低; 并且采用点评估方法, 不如概率评估准确; 最后, 本研究基于假设蔬菜中元素均被完全吸收, 并没有评估食物摄入后微量元素的吸收程度, 通过饮食摄入的多元素不会被人体全部吸收, 因此实际摄入量低于评估值。建议今后研究, 采用更权威的数据支持, 分析多种类的元素风险评估, 细化不同生活区域人群蔬菜摄入量, 建立完善的蔬菜种各元素风险数据库, 为制定相应标准及元素摄入的风险管理提供数据支持。

参考文献

[1] 王义国, 白延波. 常见蔬菜的营养价值及生长要求[J]. 中国蔬菜, 2019, 39(7): 73–76.
WANG YG, BAI YB. Nutritional value and growth requirements of common vegetables [J]. China Fruit & Vegetable, 2019, 39(7): 73–76.

[2] 杨文斌. 浅析北方蔬菜营养价值与栽培模式的发展[J]. 农业与技术, 2018, 38(6): 50–51.
YANG WB. Preliminary study on nutritional properties and cultivation mode evolution of vegetables in northern china [J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(6): 50–51.

[3] 钟松艺, 肖远辉, 白法璋, 等. 基于《中国居民膳食指南(2022)》的中国农产品消费缺口测算[J]. 南方园艺, 2023, 34(5): 52–56.
ZHONG SY, XIAO YH, BAI FZ, *et al*. Calculation of China's agricultural product consumption gap based on the dietary guidelines for chinese residents (2022) [J]. Southern Horticulture, 2023, 34(5): 52–56.

[4] 王丽慧. 蔬菜重金属污染及其防治措施研究[J]. 现代化农业, 2023(1): 37–39.
WANG LH. Research on heavy metal pollution in vegetables and its prevention and control measures [J]. Modern Agriculture, 2023(1): 37–39.

[5] FENG JJ, LIAO JX, JIANG QW, *et al*. Heavy metal contamination of vegetables in China-status causes and impacts [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 32(2): 1–10.

[6] HUANG ML, ZHOU SL, SUN B, *et al*. Heavy metals in wheat grain: Assessmentof potential health risk for inhabitants in Kunshan, China [J]. Science of the Total Environment, 2008, 405: 54–61.

[7] ZHAO H, XIA B, FAN C, *et al*. Human health risk from soil heavy metalcontamination under different land uses nealr Dabaoshan Mine, Southem China [J]. Science of the Total Environment, 2012, 417–418: 45–54.

[8] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5628–5638.
LI CF, CAO JF, LV JS, *et al*. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5628–5638.

[9] 曹柳, 孟晓飞, 杨俊兴, 等. 河南省大气重金属沉降高风险区蔬菜重金属含量及健康风险评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2170–2183.
CAO L, MENG XF, YANG JX, *et al*. Heavy metal concentrations and health risk assessment of vegetables in the high-risk area of atmospheric deposition in Henan Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(12): 2170–2183.

[10] BHATTACHARYA S. The role of probiotics in the amelioration of cadmium toxicity [J]. Biological Trace Element Research, 2020, 197(2): 440–444.

[11] TAHIR MA, SHAHEEN H, RATHINASABAPAHTI B. Herlth risk associated with heavy metal contamination of vegetables grown in agricultural soil of Siran valley, Mansehra, Pakistan-a case study [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(8): 551.

[12] 吴文勇, 许翠平, 刘洪禄, 等. 再生水灌溉对果菜类蔬菜产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 36–40.
WU WY, XU CP, LIU HL, *et al*. Effect of reclaimed water irrigation on yield and quality of fruity vegetables [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 36–40.

[13] GUPTA N, KHAN DK, SANTRA SC. An assesslnent of heavy metal contamination in vegetables grown in wastewater irrigated areas of Titagarh, West Bengal [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 80: 115–118.

[14] RAJAGANAPATHY V, XAVIER F, SREEKUMAR D. Heavy metal contamination in soil, water and fodder and their presence in livestock and products: A review [J]. Journal of Environmental Science and Technology, 2011, 4(3): 234–249.

[15] SORIANO-DISLA JM, GOMEZ I, NAVARRO-PEDREFIO J, *et al*. The transfer of heavy metals to barley plants from soils amended with sewage sludge with different heavy metal burdens [J]. Journal Soils Sediments, 2014, 14: 687–696.

[16] ASGARI K, CORNELIS WM. Heavy metal accumulation in soils and grains, and health risks associated with use of treated municipal wastewater in subsurface drip irrigation [J]. Environmtal Monitoring Assessment, 2015, 187: 410–423.

[17] 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.
ZHAGN M, ZHAGN 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.

[18] 郭绍义, 王红新, 盛雪, 等. 升金湖湿地蔬菜重金属污染及健康风险评价[J]. 长春师范大学学报, 2023, 42(8): 113–119.
GUO SY, WANG HX, SHENG X, *et al*. Evaluation of heavy metal

pollution and health risks in wetland vegetables of Shengjin Lake [J]. Journal of Changchun Normal University, 2023, 42(8): 113–119.

[19] 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 ofcommon vegetables in Handan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 84–92.

[20] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk based screening table composite table summary tab 0615 [Z]. 2015. http: /www2.epa.gov/risk/riskbasedscreeningtablegenerictables

[21] 王国玲, 王晓琳, 杨路平, 等. 山东省胶东半岛养殖海带部分元素含量水平分析及健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2021, 48(23): 4397─4402.
WANG GL, WANG XL, YANG LP, *et al*. Metal content analysis ang health risk assessment of kelp cultured Jiaodong Peninsula, Shandong Province [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(23): 4397─4402.

[22] 吴梅, 陈祝军, 陈蓉, 等. 茶叶、袋装茶以及茶粉中 15 种金属及类金属含量及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 98–106.
WU M, CHEN ZJ, CHEN R, *et al*. Content of 15 kinds of metal andmetalloid in tea, tea bag and tea powder and their health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 98–106.

[23] 李海燕, 尹盼盼, 彭腾腾, 等. 甘草中 20 种无机元素的测定及对有害元素的健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(8): 281–291.
LI HY, YIN PP, PENG TT, *et al*. Determination of 20 kinds of inorganic elements in *Glycyrrhizae radix* et rhizoma and their health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(8): 281–291.

[24] 常越亚, 常磊, 刘艳芝, 等. 不同蔬菜类型中铅、镉、铬、砷富集特征及健康风险评价[J]. 上海农业学报, 2025, 41(1): 66–71
CHANG YY, CHANG L, LIU YZ, *et al*. Characteristics and health risk assessment of lead, cadmium, chromium and arsenic in different vegetable type [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2025, 41(1): 66–71.

[25] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中国预防医学杂志, 2002, 36(4): 278–279.
WANG XQ, WU YN, CHEN JS. Food contamination monitoring low-level data processing issues [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278–279.

[26] 时彭涛, 张莉娟, 李金朝, 等. 茄果类蔬菜矿物质元素特征分布与膳食风险评估[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(11): 114–121.
SHI PT, ZHANG LJ, LI JZ, *et al*. Distribution of mineral elements characteristics and dietary risk assessment in solanaceous vegetables [J]. Chinese Cucurbits and Vegetables. 2024, 37(11): 114–121.

[27] 连莹莹, 方彦飞, 韩永红, 等. 邯郸市谷物制品中 26 种金属多元素监测与健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 157–166.
LIAN YY, FANG YF, HAN YH, *et al*. Monitoring and health risk assessment of 26 kinds of metal multi-elements in cereals in Handan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 157–166.

[28] 李敬光, 张磊, 吕冰, 等. 中国总膳食研究化学检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
LI JG, ZHANG L, LV B, *et al*. Chemical detection technology of total dietary studies in China [M]. Beijing: Science Press, 2023.

[29] FANG Y, LIAN Y, LIU M, *et al*. Exposure and risk assessment of heavy metals via food consumption from Handan city, North China [J] Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 140: 107287.

[30] 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]. 农业质量与安全, 2025(3): 77–83.
LI XH, LU H, YAO LX, *et al*. Analysis of heavy metal accumulation in common wild vegetables in Guangxi and risk assessment of residents' dietary intake [J]. Agricultural Quality and Safety, 2025(3): 77–83.

(责任编辑: 蔡世佳　安香玉)