

# 茄果类蔬菜矿质元素特征分布与膳食风险评估

时鹏涛, 张莉娟, 李今朝, 韦璐阳, 张宇, 罗景文, 杨秀娟

(农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(南宁)·农业农村部亚热带果品蔬菜质量安全控制重点实验室·  
广西亚热带特色水果质量安全控制重点实验室·广西壮族自治区亚热带作物研究所 南宁 530001)

**摘要:** 为了探究广西省售茄果类蔬菜矿质元素含量特征和食用安全性, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定了150份茄果类蔬菜样品中7种矿质元素(Fe、Mn、Zn、Cu、Mo、Co、Ni)和5种常见有害重金属(Pb、Cd、As、Hg、Cr)含量并进行主成分分析及健康风险评估。结果表明, 茄果类蔬菜中7种矿质元素平均含量排序为Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Mo>Co, 变异系数介于44.7%(Fe)~247.8%(Ni), 不同样品之间矿质元素含量差异较大; 辣椒中6种矿质元素(Fe、Zn、Ni、Mn、Cu、Co)含量均最高。主成分分析结果显示, Fe、Mn、Zn、Cu、Co和Ni是广西省售茄果类蔬菜的特征无机元素, 提取了2个主成分, 累积方差贡献率为99.983%。茄果类蔬菜矿质元素综合得分排序为辣椒>番茄>茄子, 表明辣椒中的有益矿质元素含量相对较高。茄果类蔬菜中5种重金属含量均未超过国家标准限量值, 但存在Cd超标情况, 辣椒、番茄和茄子超标率分别为10.4%、10.3%和8.0%。5种重金属对不同人群的目标危害系数(Target Hazard Quotient, THQ)和综合目标危害系数(Total Target Hazard Quotient, TTHQ)均远小于1。总体而言, 儿童或成人食用广西省售茄果类蔬菜的膳食健康风险较低, 处于安全级; 但Cd是今后茄果类蔬菜需要重点监控的重金属污染因子。

**关键词:** 茄果类蔬菜; 矿质元素; 重金属; 主成分分析; 风险评估

中图分类号: S641

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)11-114-08

## Distribution of mineral elements characteristics and dietary risk assessment in solanaceous vegetables

SHI Pengtao, ZHANG Lijuan, LI Jinzhao, WEI Luyang, ZHANG Yu, LUO Jingwen, YANG Xiujuan

(Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agricultural Product(Nanning), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruit and Vegetable, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangxi Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruits/Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, Guangxi, China)

**Abstract:** To investigate the mineral element content characteristics and food safety of solanaceous vegetables sold in Guangxi, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) was used to determine the content of 7 mineral elements (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Co, Ni) and 5 common harmful heavy metals (Pb, Cd, As, Hg, Cr) in 150 samples of solanaceous vegetables, and principal component analysis and health risk assessment were conducted. The results showed that the average content of seven mineral elements in solanaceous vegetables was ranked as follows: Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Mo>Co, with a coefficient of variation ranging from 44.7%(Fe) to 247.8%(Ni). There are significant difference in the mineral element content of different solanaceous vegetables samples. The content of six mineral elements (Fe, Zn, Ni, Mn, Cu, Co) in chilli pepper is the highest. The results of principal component analysis showed that Fe, Mn, Zn, Cu, Co and Ni are characteristic inorganic elements of solanaceous vegetables sold in Guangxi. Two principal components were extracted, with a cumulative variance contribution rate of 99.983%. The comprehensive score ranking of mineral elements in solanaceous vegetables is: chili pepper > tomato > eggplant. It indicated that the content of beneficial mineral elements in chili pepper is relatively high. The average content of five heavy metals in solanaceous vegetables did not exceed the national standard limit, but there were cases of Cd exceeding the standard, with an overall exceeding rate of 10.0%. Among them, the exceeding rates of chilli pepper, tomato, and eggplant were 10.4%, 10.3%, and 8.0%, respectively. The ranking of the

收稿日期: 2024-08-03; 修回日期: 2024-08-31

基金项目: 国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP20230604)

作者简介: 时鹏涛, 男, 高级工程师, 研究方向为农产品品质、质量安全及风险评估。E-mail: 307979494@qq.com

通信作者: 杨秀娟, 女, 高级农艺师, 研究方向为农产品品质、质量安全及风险评估。E-mail: 108856406@qq.com

target hazard quotient (THQ) and total target hazard quotient (TTHQ) of the five heavy metals for different populations are far less than 1. Overall, the dietary health risks of children or adults consuming solanaceous vegetables sold in Guangxi are relatively low and at a safe level. But Cd is a heavy metal pollution factor that needs to be closely monitored in solanaceous vegetable in the future.

**Key words:** Solanaceous vegetables; Mineral element; Heavy metal; Principal component analysis; Risk assessment

茄果类蔬菜是指茄科以浆果作为食用部分的蔬菜作物,包括番茄、茄子、辣椒等。茄果类蔬菜是我国蔬菜生产中最重要的一类,其果实富含矿物质元素、维生素、膳食纤维等营养物质,具有较高的食用价值;茄果类蔬菜在我国居民膳食消费中占有较大比重;在国内蔬菜消费中占据重要的位置<sup>[1-4]</sup>。蔬菜是人体所必需矿质元素的重要来源之一,对人体健康至关重要。金宁等<sup>[5]</sup>对9个番茄品种中8种矿质元素进行差异分析,8种矿质元素含量的情况为  $K > P > Mg > Ca > Fe > Zn > Mn > Cu$ ,不同品种番茄之间矿质元素含量差异较大,并采用聚类分析依据矿质元素含量的高低分为3个类别,即高、中、低矿质元素品种。时佳琦等<sup>[6]</sup>对太原市市售蔬菜营养成分进行了分析,其中茄果类蔬菜中矿质元素含量表现为  $Ca > Mg > Fe > Zn > Mn > Cu$ ,不同类型之间存在一定差异。张建等<sup>[7]</sup>研究遵义地区辣椒矿质元素含量与品质相关性时指出,辣椒中12种矿质元素含量排序为  $K > P > S > Mg > Ca > Fe > Zn > Mn > Cu > Ni > Mo > Co$ ,矿质元素含量与辣椒品质(辣椒碱、维生素C、蛋白质、干物质含量)存在一定的相关性。乔亚丽等<sup>[8]</sup>研究表明,番茄中8种(K、P、Mg、Ca、Fe、Zn、Mn、Cu)矿质元素含量在不同采收时间有显著差异,不同元素表现出不同的变化趋势。以上研究表明,不同类型茄果类蔬菜中矿质元素含量存在差异,同种茄果类蔬菜中矿质元素含量亦存在差异,在不同采收期也可能存在一定的差异。

随着工业化发展进程的不断推进,我国耕地土壤面临重金属污染的问题越来越严重。土壤中重金属经植物吸收富集后,随食物链在人体内累积,从而对人体产生危害<sup>[9]</sup>。重金属污染长期以来影响着我国农产品质量和安全,严重制约了我国农产品出口贸易<sup>[10-11]</sup>。近几年,全国各省、区、市的市场监督管理局对市售茄果类蔬菜抽检结果显示,金属超标情况频发。李志敏<sup>[12]</sup>研究表明,北京市房山区茄果类蔬菜中以Pb污染为主,Pb超标率为5.8%,Cd超标率0.97%,健康风险分析结果显示,房山区茄果类蔬菜不存在健康风险。童磊等<sup>[13]</sup>研究表明,重庆市万州区市售辣椒主要受重金属Cd污染严重,辣

椒Cd超标率高达85%。罗红霞等<sup>[14]</sup>研究北京市茄果类蔬菜重金属含量及安全性时,结果显示北京市茄果类蔬菜以Pb污染为主,番茄、黄瓜、青椒和茄子Pb超标率分别为9.26%、1.85%、3.70%和8.89%;Cd只在茄子中超标,超标率为6.67%。王浩等<sup>[15]</sup>研究广西典型铝矿区复垦地蔬菜中重金属情况,研究结果显示,茄子中Pb、Cd为主要超标元素。罗沐欣键等<sup>[16]</sup>在研究辣椒中Cd、As、Pb、Cr、Zn的迁移累积特性时发现,辣椒中重金属分布为根部>茎部>果实,Cd超标严重。以上研究表明,茄果类蔬菜对重金属Pb、Cd等具有较强的吸收和累积能力;如长期摄入重金属超标的茄果类蔬菜,会对人体产生较大的危害。近几年,广西各市场监督管理局对茄果类蔬菜抽检时发现,Cd超标的情况经常出现,说明广西市售茄果类蔬菜面临一定的重金属污染风险。另外,随着居民生活条件不断改善,对食物的要求也越来越高,不仅要吃得营养,更要吃得安全。广西有色金属储量丰富,土壤中重金属天然背景值含量相对较高<sup>[17]</sup>,且广西是重要的“南菜北运”生产基地,广西蔬菜质量安全显得尤为重要。因此,有必要及时开展广西市售茄果类矿质元素和重金属含量分布及膳食风险评估相关研究,确保质量和安全,保障人民健康。

目前,对广西市售茄果类蔬菜矿质元素及重金属污染情况的研究鲜有报道。因此,笔者选取广西壮族自治区内批发市场、商超和农贸市场等售卖的茄果类蔬菜主要品种为研究对象,运用主成分分析、超标率和膳食风险评估对广西市售茄果类蔬菜矿质元素和有害重金属元素含量分布及膳食风险进行分析评估,以期为茄果类蔬菜营养品质的后续研究、居民膳食风险和科学监管提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

2024年1—5月在广西批发市场、商超、农贸市场、生产基地等地随机抽取茄果类蔬菜样品共计150份,其中辣椒96份、番茄29份和茄子25份;每份样品3.0 kg。抽样区域覆盖南宁市金桥农产品批发市场、南宁市望州南路沃尔玛超市、钦州市浦北

县金浦综合市场、钦州市浦北县张黄镇东方农场等12个县区。

### 1.2 方法

1.2.1 样品制备 茄果类蔬菜样品采集回来后,先将样品表面灰尘、泥土及其他异物清洗干净,再用去离子水冲洗1次,晾干。用匀浆机充分打碎后装入样品袋,标记后冷冻贮存备用。

1.2.2 样品处理与测定 参考国家标准《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)<sup>[18]</sup>使用 ICP-MS(NexION 2000, PE 公司)对茄果类蔬菜中7种矿质元素和5种重金属进行测定,ICP-MS 仪器参数条件见表1。使用电子天平(ME204E/02,梅特勒-托利多)准确称取1.000 g 样品于微波消解管中,加入5.0 mL 进口HNO<sub>3</sub>并放置过夜,然后再加入2.0 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>;使用微波消解仪进行样品消解,消解程序为15 min 升温至150 °C,保持10 min,10 min 升温至200 °C,保持30 min。消解完成并冷却后,转移至电热板150 °C赶酸,赶酸至黄豆粒大小时停止加热,并用去离子水定容至50.0 mL,此消解液可直接用于ICP-MS 上机测试,测试时间为2024年6月。在本研究中,Fe、Mn、Zn、Cu、Mo、Co、Ni、Pb、Cd、As、Cr 和 Hg 检出限分别为0.5、0.05、0.2、0.02、0.005、0.000 5、0.02、0.01、0.001、0.001、0.02和0.000 5 mg·kg<sup>-1</sup>。

表1 ICP-MS 仪器条件参数

Table 1 ICP-MS instrument condition parameter

仪器条件 Instrument conditions	参数 Parameter
雾化器 Atomizer	石英同心雾化器 Quartz concentric atomizer
RF 功率 RF power/W	1600
脉冲电压 Pulse stage voltage/V	900
模拟阶段电压 Analog stage voltage/V	-1618
泵流速 Pump speed/(r·min <sup>-1</sup> )	35
等离子体气体流速 Plasma gas flow/(L·min <sup>-1</sup> )	15.0
辅助气流速 Auxiliary gas flow/(L·min <sup>-1</sup> )	1.2
雾化器流量 Nebulizer gas flow/(L·min <sup>-1</sup> )	0.94
氦气流速 Helium flow/(mL·min <sup>-1</sup> )	3.5
扫描 Scan/(次 Time)	20
重复 Repeat/(次 Time)	3
反应模式 Response pattern	Helium KED

### 1.3 重金属超标率计算方法

国家标准《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)<sup>[19]</sup>中新鲜蔬菜 Pb、Cd、Cr、

As 和 Hg 的限量值分别为0.1、0.05、0.5、0.5和0.01 mg·kg<sup>-1</sup>。超标率是超标样本数与总检测样本数的比值,用以从整体上反映农产品的受重金属污染程度,计算公式如下:

$$W_i/\% = n_i/N_i \times 100。$$

式中:W<sub>i</sub>为某一重金属污染物在辣椒中的超标率;n<sub>i</sub>为某一重金属污染物检测超标的样本数;N<sub>i</sub>为检测样本总数。

### 1.4 茄果类蔬菜膳食暴露风险评估方法

采用基于膳食暴露评估的目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)和综合目标危害系数法(total target hazard quotient, TTHQ)<sup>[20]</sup>对茄果类蔬菜中常见危害重金属的健康风险进行评估。危害系数 THQ 值和 TTHQ 值越大,表明潜在风险越高。当单一重金属暴露风险 THQ 值<1.0 时,表明此重金属不存在非致癌健康风险;THQ 值≥1.0 时,表明此重金属存在非致癌风险。当多种重金属联合暴露风险 TTHQ 值<1.0 时,表明长期摄入此类食用茄果类蔬菜的健康风险较低;当 TTHQ 值≥1.0 时,表明长期摄入此类茄果类蔬菜对人体具有潜在健康风险。THQ 值和 TTHQ 值计算公式<sup>[21]</sup>如下:

$$THQ = EDI/RfD = EF \times ED \times FIR \times C_i / (RfD \times BW \times AT);$$

$$TTHQ = \sum THQ_i。$$

式中,EDI 为人体每日摄入量;EF 为暴露频率;FIR 为日均每日蔬菜摄入量;C<sub>i</sub> 为危害物含量;ED 为暴露年限;AT 为平均暴露时间;BW 为中国成人和儿童的平均体重;RfD 为污染物每日口服参考剂量。THQ 法计算参数取值见表2。

表2 目标危害系数法参数取值

Table 2 Parameter values of target hazard coefficient method

参数 Parameter	单位 Unit	参考值 Reference value	参考文献 Reference
EF	d·a <sup>-1</sup>	365	[21]
ED	a	70(成人 Adult); 6(儿童 Child)	
FIR	kg·d <sup>-1</sup>	0.301(成人 Adult); 0.232(儿童 Child)	[15]
RfD	mg·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	Pb=0.003 5 Cd=0.001 Cr=0.003 As=0.000 3 Hg=0.000 3	[22]
BW	kg	60.0(成人 Adult); 32.7(儿童 Child)	[23]
AT	d	365×70	[24]

## 1.5 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2007 进行数据统计处理及作图,并用 SPSS 24.0 进行主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 茄果类蔬菜中微量元素含量分析

对 150 个茄果类蔬菜样品中 7 种矿质元素含量均值、范围和变异系数进行了统计分析,结果如表 3 所示。茄果类蔬菜中 Fe 平均含量( $w$ ,后同)为  $4.899(1.116\sim 10.696)$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [平均值(范围),下同]; Mn 含量为  $2.397(0.426\sim 9.840)$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Zn 含量为  $1.982(0.674\sim 5.458)$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Cu 含量为  $0.632(0.187\sim 2.113)$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Co 含量为  $0.0174(0.0009\sim 0.2462)$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Mo 含量为  $0.0175(\text{ND}\sim 0.0807)$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Ni 含量为  $0.046(\text{ND}\sim 0.775)$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;排序为:Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Mo>Co。茄果类蔬菜中各矿质元素变异系数介于 44.7%~247.8%,按大小排序为 Ni>Co>Mo>Mn>Cu>Zn>Fe,表明茄果类蔬菜样品中各矿质元素含量存在较大差异,元素含量越高,变异系数越小。

不同类型茄果类蔬菜中各矿质元素含量同样存在较大的差异,Fe、Zn、Ni 元素表现为辣椒>番茄>茄子;Mn、Cu、Co 表现为辣椒>茄子>番茄;Mo 表现为番茄>辣椒>茄子。在 3 类茄果类蔬菜中,辣椒中有 6 种矿质元素(Fe、Zn、Ni、Mn、Cu、Co)含量均最高。由此可知,辣椒比番茄、茄子含有更为丰富的有益矿质元素。

### 2.2 茄果类蔬菜矿质元素含量的主成分分析

对 3 个最常见茄果类蔬菜类型(辣椒、番茄、茄子)的 7 种矿质元素进行主成分分析(表 4),以期用更少的变量尽可能多地反映原来变量的信息。以特征值 $\geq 1$ 及累积方差贡献率 $>85\%$ 为筛选原则,主成分分析碎石图(图 1)显示存在明显拐点,提取 2 个主成分较为合理,将茄果类蔬菜矿质元素含量评价的指标由 7 个降为 2 个,2 个主成分的累积方差贡献率为 99.983%。第一、第二主成分特征值分别为 5.353 和 1.646,方差贡献率分别为 76.468%和 23.515%,分别可代表茄果类蔬菜 7 个矿质元素含量的 76.468%和 23.515%信息。分析结果表明,这 2 个主成分可以代表原始变量的绝大部分信息。如

表 3 茄果类蔬菜中矿质元素含量  
Table 3 Mineral element content in solanaceous vegetables

元素 Element	类别 Type	辣椒 Chilli pepper	番茄 Tomato	茄子 Eggplant	总体 Total
Fe	均值 Mean value/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	5.826±1.997	4.080±1.322	2.292±0.799	4.899±2.191
	范围 Range/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2.432~10.696	2.182~7.941	1.116~4.657	1.116~10.696
	变异系数 CV/%	34.3	32.4	34.9	44.7
Mn	均值 Mean value/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2.738±1.986	1.469±1.067	2.162±1.079	2.397±1.780
	范围 Range/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.426~9.840	0.481~6.440	0.945~5.695	0.426~9.840
	变异系数 CV/%	72.5	72.6	49.9	74.3
Zn	均值 Mean value/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2.391±1.128	1.445±0.313	1.036±0.201	1.982±1.072
	范围 Range/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.870~5.458	0.754~2.269	0.674~1.343	0.674~5.458
	变异系数 CV/%	47.2	21.7	19.4	54.1
Cu	均值 Mean value/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.751±0.483	0.419±0.114	0.423±0.120	0.632±0.423
	范围 Range/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.187~2.113	0.268~0.728	0.202~0.592	0.187~2.113
	变异系数 CV/%	64.3	27.2	28.7	66.9
Co	均值 Mean value/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.0229±0.0371	0.0047±0.0033	0.0110±0.0171	0.0174±0.0313
	范围 Range/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.0009~0.2462	0.0010~0.0139	0.0015~0.0847	0.0009~0.2462
	变异系数 CV/%	162.0	70.2	155.5	179.9
Mo	均值 Mean value/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.0175±0.0171	0.0177±0.0151	0.0171±0.0154	0.0175±0.0164
	范围 Range/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	ND~0.0807	ND~0.0730	ND~0.0739	ND~0.0807
	变异系数 CV/%	97.7	85.3	90.1	93.7
Ni	均值 Mean value/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.069±0.137	0.009±0.333	ND	0.046±0.114
	范围 Range/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	ND~0.775	ND~0.140	ND	ND~0.775
	变异系数 CV/%	198.6	3700		247.8

注:“ND”表示未检出。下同。

Note:“ND” indicates not detected. The same below.

表4 茄果类蔬菜矿质元素主成分提取结果  
Table 4 Extraction results of principal components of mineral elements in solanaceae vegetables

元素 Element	主成分 Principal component	
	1	2
Fe	0.391	0.331
Mn	0.351	-0.455
Zn	0.422	0.167
Cu	0.431	-0.062
Co	0.398	-0.305
Mo	0.124	0.747
Ni	0.432	0.035
特征值 Eigenvalue	5.353	1.646
方差贡献率 Variance contribution rate/%	76.468	23.515
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	76.468	99.983

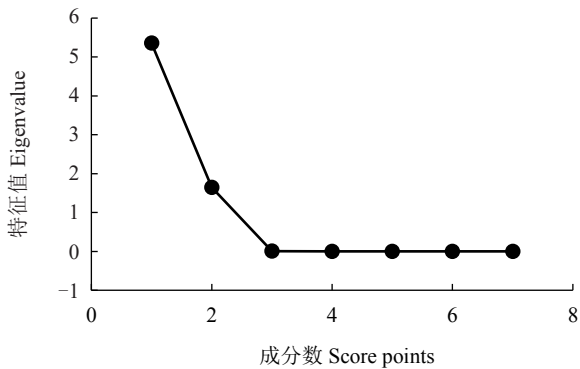


图1 主成分分析碎石图

Fig. 1 Principal component analysis gravel chart

表5所示,第一主成分综合矿质元素 Fe(因子载荷 0.905)、Mn(因子载荷 0.811)、Zn(因子载荷 0.977)、Cu(因子载荷 0.997)、Co(因子载荷 0.921)和 Ni(因子载荷 0.999)的信息;第二主成分主要与 Mo(因子载荷 0.958)相关。因为方差贡献率超过 75%来自

表5 茄果类蔬菜矿质元素主成分载荷值和特征向量

Table 5 Load value and eigenvectors of principal components of mineral elements in solanaceae vegetables

元素 Element	主成分 1 Principal component 1		主成分 2 Principal component 2	
	载荷值 Load value	特征向量 Eigenvector	载荷值 Load value	特征向量 Eigenvector
	Fe	0.905	0.391	0.425
Mn	0.811	0.351	-0.584	-0.455
Zn	0.977	0.422	0.214	0.167
Cu	0.997	0.431	-0.079	-0.062
Co	0.921	0.398	-0.391	-0.305
Mo	0.286	0.124	0.958	0.747
Ni	0.999	0.432	0.045	0.035

第一主成分,因此可以认为 Fe、Mn、Zn、Cu、Co 和 Ni 是广西市售茄果类蔬菜的特征无机元素。

用主成分分析得分和对应的方差贡献率相乘求和,构建综合得分评价函数,公式为:综合得分=0.765Y<sub>1</sub>+0.235Y<sub>2</sub>。根据综合评价函数计算得出茄果类蔬菜 7 种元素的综合得分和排序(表 6),综合得分排序依次为:辣椒(2.058)>总体(0.840)>番茄(-0.932)>茄子(-1.966);辣椒的综合得分远高于番茄和茄子,表明辣椒中的有益矿质元素含量相对较高,与 2.1 中结果一致。

表6 茄果类蔬菜矿质元素的综合得分和排序  
Table 6 Comprehensive score and ranking of mineral elements in solanaceae vegetables

类别 Category	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	综合得分 Comprehensive score	排序 Rank
辣椒 Chilli pepper	2.739	-0.160	2.058	1
番茄 Tomato	-1.717	1.625	-0.932	3
茄子 Eggplant	-2.107	-1.508	-1.966	4
总体 Total	1.085	0.043	0.840	2

### 2.3 茄果类蔬菜中 5 种常见危害重金属含量分析

对茄果类蔬菜(辣椒、番茄、茄子)中 5 种常见危害重金属元素含量进行分析的结果如表 7 所示。5 种重金属元素在茄果类蔬菜中总体平均含量均表现为 Cd>Cr>Pb>As>Hg;在辣椒、番茄中的表现与茄果类蔬菜整体情况保持一致;在茄子中表现为 Pb>Cd>Cr>As>Hg。表明不同茄果类蔬菜表现出对不同重金属吸收累积能力存在差异。茄果类蔬菜样品中 5 种重金属平均值整体上处于安全水平,但是也存在超标情况。茄果类蔬菜中仅出现 Cd 超标的情况,超标个数为 10 个,超标率为 10.0%;其中辣椒、番茄和茄子中 Cd 超标率表现为辣椒(10.4%)>番茄(10.3%)>茄子(8.0%)。表明广西市售茄果类蔬菜重金属超标以 Cd 为主,存在 Cd 污染风险,应加强对茄果类蔬菜中 Cd 的监测,并进行膳食健康风险评估。

### 2.4 茄果类蔬菜膳食暴露风险评估

茄果类蔬菜中 5 种重金属的 THQ 和 TTHQ 值的分析结果如表 8 所示。茄果类蔬菜中单一重金属元素非致癌风险 THQ 值在成人和儿童中均<1.0。5 种重金属在儿童中的 THQ 值均大于或等于成人,表明儿童的健康风险高于成人。因此,茄果类蔬菜中 5 种危害重金属的潜在健康风险较小,在允许的可接受范围内。不同茄果类蔬菜对不同重金属富集能力存在差异,会导致茄果类蔬菜中多种重金属复合风险 TTHQ 值的差异;多种重金属复合风

表 7 茄果类蔬菜中 5 种危害重金属含量  
Table 7 Content of 5 harmful heavy metals in solanaceae vegetables

元素 Element	辣椒 Chilli pepper			番茄 Tomato			茄子 Eggplant			总体 Total		
	均值 Mean value/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	范围 Range/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	超标率 Over- standard rate/%	均值 Mean value/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	范围 Range/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	超标率 Over-stan- dard rate/%	均值 Mean value/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	范围 Range/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	超标率 Over- standard rate/%	均值 Mean value/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	范围 Range/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	超标率 Over- standard rate/%
Pb	0.012 2± 0.016 7	ND~ 0.094 4	0.0	0.016 9± 0.023 8	ND~ 0.088 2	0.0	0.017 8± 0.038 5	ND~ 0.039 0	0.0	0.014 0± 0.023 0	ND~ 0.094 4	0.0
Cr	0.017 3± 0.033 5	ND~ 0.273 7	0.0	0.020 6± 0.057 9	ND~ 0.272 6	0.0	0.012 1± 0.024 6	ND~ 0.110 8	0.0	0.017 1± 0.038 1	ND~ 0.273 7	0.0
As	0.001 4± 0.001 5	ND~ 0.006 5	0.0	0.001 2± 0.002 4	ND~ 0.010 8	0.0	0.001 2± 0.001 5	ND~ 0.004 4	0.0	0.001 3± 0.001 7	ND~ 0.010 8	0.0
Cd	0.020 7± 0.036 9	ND~ 0.335 6	10.4	0.024 7± 0.023 3	ND~ 0.115 2	10.3	0.014 5± 0.016 5	ND~ 0.060 0	8.0	0.020 4± 0.032 0	ND~ 0.335 6	10.0
Hg	0.000 1± 0.000 3	ND~ 0.001 2	0.0	0.000 1± 0.000 3	ND~ 0.001 1	0.0	0.000 1± 0.000 3	ND~ 0.001 0	0.0	0.000 1± 0.000 3	ND~ 0.001 2	0.0

险 TTHQ 值在成人和儿童中均表现为:茄子>辣椒>番茄;且多种重金属联合暴露的危害系数 TTHQ 值较低,均小于 1.0,表明成人或儿童正常摄入广西省售茄果类蔬菜的膳食健康风险较低,处于安全级。

表 8 THQ 值和 TTHQ 值统计  
Table 8 THQ and TTHQ value statistics

指标 Index	元素 Element	目标人群 Target audience	辣椒 Chilli pepper	番茄 Tomato	茄子 Eggplant	整体 Total
THQ	Pb	成人 Adult	0.025	0.024	0.024	0.025
		儿童 Child	0.036	0.034	0.034	0.036
	Cd	成人 Adult	0.146	0.131	0.190	0.149
		儿童 Child	0.210	0.190	0.274	0.215
	As	成人 Adult	0.036	0.020	0.026	0.031
		儿童 Child	0.052	0.029	0.038	0.045
	Cr	成人 Adult	0.034	0.027	0.019	0.031
		儿童 Child	0.049	0.038	0.027	0.044
	Hg	成人 Adult	0.002	0.002	0.002	0.002
		儿童 Child	0.002	0.002	0.002	0.002
TTHQ		成人 Adult	0.243	0.204	0.261	0.238
		儿童 Child	0.349	0.293	0.375	0.342

### 3 讨论与结论

在本研究中,茄果类蔬菜中各矿质元素含量存在较大差异,且相同元素在同类型茄果类蔬菜中也表现出较大的差异。各矿质元素在茄果类蔬菜中平均含量排序为 Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Mo>Co。Fe、Zn、Ni 元素平均含量在 3 类茄果类蔬菜中表现为辣椒>番茄>茄子;Mn、Cu、Co 平均含量在 3 类茄果类蔬菜中表现为辣椒>茄子>番茄;Mo 平

均含量在 3 类茄果类蔬菜中表现为番茄>辣椒>茄子;辣椒中的有益矿质元素含量高于番茄、茄子。许多学者在研究不同的番茄品种、番茄的不同采收期、辣椒及市售不同种类茄果类蔬菜矿质元素含量及与品质的相关性时均发现,各矿质元素含量之间存在较大差异,同时矿质元素含量与品质存在着一定的相关性<sup>[5-8]</sup>,与本研究结果类似。植物中矿质元素含量差异是产地环境(土壤和灌溉水矿质元素含量)、农业投入品差异、不同茄果类蔬菜对元素富集能力差异等综合因素影响的结果,这可能是茄果类蔬菜中矿质元素差异的主要原因。

茄果类蔬菜中 5 种常见危害重金属的含量也存在一定差异,平均含量排序为 Cd>Cr>Pb>As>Hg;平均值均未超标。茄果类蔬菜中以 Cd 超标为主,超标率为 10.0%;其中辣椒、番茄和茄子中 Cd 超标率表现为辣椒(10.4%)>番茄(10.3%)>茄子(8.0%)。国内外许多研究表明,茄果类蔬菜对有害重金属 Cd、As、Pb、Cr 等具有较强的吸收和富集能力,易导致重金属超标,产生潜在的安全风险;尤其是辣椒中重金属超标最为常见,需引起重视,加强监管<sup>[25-30]</sup>。茄果类蔬菜中重金属超标情况在不同产区呈现出不一样的情况,具有一定的地域特征。张述敏等<sup>[31]</sup>研究浙江省蔬菜重金属污染风险时发现,瓜果类蔬菜中仅出现重金属 Cd 超标,超标率为 8.7%。许多研究结果表明,辣椒比较容易吸收富集重金属 Cd,导致辣椒 Cd 含量严重超标,引起农产品质量安全风险<sup>[13,16]</sup>。茄果类蔬菜对重金属 Pb、Cd 表现出较强的吸收、富集能力,易出现重金属超标情况,以 Pb 和 Cd 超标为主<sup>[14,32-33]</sup>。王浩等<sup>[15]</sup>研究了

广西典型铝矿区复垦地蔬菜中的重金属情况,结果显示茄子中 Pb、Cd 为主要的超标元素。儿童食用蔬菜面临的潜在风险往往高于成年人,需要重点关注<sup>[34-36]</sup>。以上文献报道结果显示,茄果类蔬菜以 Pb、Cd 超标为主,儿童风险高于成年人,与本研究结果基本一致。

(1)茄果类蔬菜中各矿质元素含量变异系数介于 44.7%(Fe)~247.8%(Ni),7 种矿质元素平均含量排序为 Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Mo>Co,表明茄果类蔬菜中矿质元素含量差异较大;辣椒中 6 种矿质元素(Fe、Zn、Ni、Mn、Cu、Co)含量均最高。

(2)主成分分析结果显示,Fe、Mn、Zn、Cu、Co 和 Ni 是广西市售茄果类蔬菜的特征无机元素,提取了 2 个主成分,累积方差贡献率为 99.983%,茄果类蔬菜矿质元素综合得分依次为辣椒>番茄>茄子,表明辣椒中的有益矿质元素含量相对较高;单从矿质元素含量方面看,辣椒的营养价值要高于番茄和茄子。

(3)茄果类蔬菜中 Pb、Cd、As、Cr 和 Hg 平均含量排序为 Cd>Cr>Pb>As>Hg;平均值均未超过限量值。茄果类蔬菜中仅出现 Cd 超标的情况,超标率为 10.0%;其中,辣椒、番茄和茄子中 Cd 超标率表现为辣椒(10.4%)>番茄(10.3%)>茄子(8.0%)。综上可知,广西市售茄果类蔬菜重金属超标以 Cd 为主,Cd 是今后广西市售茄果类蔬菜需要重点监控的重金属污染因子。

(4)重金属元素对不同成人和儿童的 THQ 值和 TTHQ 值均小于 1,说明儿童或成人食用广西市售茄果类蔬菜的膳食健康风险较低,处于安全级,在可接受范围内。3 类茄果类蔬菜中重金属的累积健康风险表现为茄子>辣椒>番茄。儿童正常食用茄果类蔬菜的风险略高于成人。研究结果可为茄果类蔬菜营养品质的后续研究、居民膳食风险评估和科学监管提供参考依据。

### 参考文献

- TIEMAN D, ZHU G T, RESENDE M F R, et al. Plant science a chemical genetic roadmap to improved tomato flavor[J]. Science, 2017, 355(6323): 391-394.
- NACCARATO A, FURIA E, SINDONA G, et al. Multivariate class modeling techniques applied to multi-element analysis for the verification of the geographical origin of chili pepper[J]. Food Chemistry, 2016, 206: 217-222.
- 乔立娟,赵帮宏,宗义湘,等.我国辣椒产业发展现状、趋势及对策[J].中国蔬菜,2023(11):9-15.
- 李君明,项朝阳,王孝宣,等.“十三五”我国番茄产业现状及展望[J].中国蔬菜,2021(2):13-20.
- 金宁,肖雪梅,郁继华,等.不同品种番茄果实矿质元素含量评价[J].甘肃农业大学学报,2020,55(4):76-84.
- 时佳琦,赵瑞芬,程滨,等.太原市市售蔬菜营养成分分析与品质评价[J].中国瓜菜,2022,35(11):73-79.
- 张建,杨瑞东,陈蓉,等.贵州遵义辣椒矿质元素含量与其品质相关性分析[J].食品科学,2018,39(10):215-221.
- 乔亚丽,郁继华,李旺雄,等.番茄果实不同采收时间矿质元素变化分析[J].浙江农业学报,2020,32(3):430-436.
- ZHANG H W, ZHANG F, SONG J, et al. Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China[J]. Environmental Research, 2021, 202: 111702.
- 刘道银.中国食品中重金属危害现状及检测技术研究[J].中国农学通报,2016,32(19):194-198.
- 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.
- 李志敏.北京房山区茄果类蔬菜 Pb、Cd 的检测及健康风险分析[D].太原:山西农业大学,2016.
- 童磊,范明月,程永红,等.重庆市万州区市售鲜辣椒中镉和铬污染现状评价[J].食品安全质量检测学报,2019,10(18):6398-6401.
- 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.
- 王浩,叶丽丽,陈永山,等.广西典型铝矿区复垦地蔬菜中重金属含量特征及健康风险评估[J].西南农业学报,2020,33(11):2655-2661.
- 罗沐欣键,柴冠群,刘桂华,等.贵州中低海拔黄壤区土壤-辣椒系统重金属迁移累积特征研究[J].河南农业科学,2022,51(6):85-93.
- 石航源,王鹏,郑家桐,等.中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策[J].环境科学,2023,44(8):4706-4716.
- 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.食品安全国家标准 食品中多元素的测定:GB 5009.268—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局.食品安全国家标准 食品中污染物限量:GB 2762—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
- 韩术鑫,王利红,赵长盛.内梅罗指数法在环境质量评价中的适用性与修正原则[J].农业环境科学学报,2017,36(10):2153-2160.
- 田稳,汪洁,岳志强,等.西南典型种植区蔬菜重金属健康风险评估[J].中国食品学报,2023,23(2):319-329.
- 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.
- 李洋,张乃明,魏复盛.滇东镉高背景区菜地土壤健康风险评估与基准[J].中国环境科学,2020,40(10):4522-4530.
- 彭礼洪,孟范平,刘群群,等.东营市北部海域文蛤重金属污染特征与食用风险评估[J].中国环境科学,2020,40(4):1800-1808.
- 蔚青,李巧玲,李冰茹,等.北京市典型有机设施蔬菜基地重金

- 属污染特征及风险评估[J].生态毒理学报,2019,14(3):258-271.
- [26] 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].环境科学与技术,2021,44(增刊2):366-375.
- [27] MAKANJUOLA, MOSES O, OSINFADE, et al. Evaluation of heavy metals in peppers sold along papaabeokuta highways, ogun state, southwest, nigeria[J]. International Journal of Research, 2016, 4(10): 1-3.
- [28] IBRAHIM H, SELIM N. Soil pollution enhances the accumulation of heavy metals in plants[J]. Asian Journal of Advances in Agricultural, 2018, 6(2): 1-8.
- [29] KAYEE P, SEKSITKAN S, PATTHARADECHAPAIBUL K. Heavy metals residues in soil and vegetables from agricultural area in wangkanai district, kanchanaburi province, thailand[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2018, 13(1): 177-180.
- [30] DAI H, SONG X, HUANG B. Health risk assessment of heavy metals via consumption of vegetables collected from vegetable markets in hengyang, China[J]. Revista de la Facultad de Ingenieria, 2017, 32(5): 95-102.
- [31] 张述敏,刘翠玲,杨桂玲,等.浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险[J].环境科学,2023,44(7):4151-4161.
- [32] 李志敏,罗红霞,王晓闻,等.顺义区四种蔬菜重金属残留健康风险分析[J].食品工业,2016,37(8):261-264.
- [33] 张永发,邝继云,谢茵,等.海南省农产品重金属污染评价与特征分析[J].中国土壤与肥料,2018(5):169-176.
- [34] 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.
- [35] 祁浩,庄坚,庄重,等.不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险[J].环境科学,2023,44(6):3600-3608.
- [36] YUAN Y Q, XIANG M, LIU C Q, et al. Chronic impact of an accidental wastewater spill from a smelter, China: A study of health risk of heavy metal (loid) s via vegetable intake[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 182: 109401.