

2019—2020年我国南方六省荸荠农药残留和重金属污染特征调查与膳食暴露风险评估

郑丹^{1,2}, 崔文文^{1,2}, 夏珍珍^{1,2}, 彭西甜^{1,2*}, 周有祥^{1,2}

(1. 湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 武汉 430064;
2. 农产品营养品质与安全湖北省重点实验室, 武汉 430064)

摘要: **目的** 调查2019—2020年我国南方六省水生蔬菜荸荠的农药和重金属污染特征现状, 并进行膳食暴露风险评估。 **方法** 2019—2020年, 在我国南方六省荸荠主产区的生产基地抽取162个批次的样品, 进行7种重金属和38种农药残留的检测, 并采用食品安全指数(index of food safety, IFS)法对荸荠中检出的农药和重金属进行安全性评价。 **结果** 荸荠中农药残留和重金属污染整体合格率达到96.9%。其中, 38种农药中仅检出矮壮素, 且矮壮素的检出率为11.7%、超标率为3.1%。荸荠中重金属情况较好, 合格率达到100%。荸荠中铜和砷的检出率为100%, 镉、铬、铅、汞和镍的检出率也分别为58.6%、45.1%、17.9%、12.3%和3.1%。同时, 7种重金属的残留值均处于较低水平。从安全指数评价结果来看, 荸荠中农药和重金属的IFS和 \overline{IFS} 均远小于1, 暴露风险在可接受范围。 **结论** 我国南方六省荸荠主产区出产的荸荠质量安全情况较好, 农药残留和重金属风险在可接受范围内, 健康风险较小。

关键词: 水生蔬菜; 荸荠; 农药残留; 重金属; 污染特征; 膳食暴露风险评估

Investigation of pesticide residues and heavy metal contamination characteristics and dietary exposure risk assessment of *Eleocharis tuberosa* from 2019 to 2020 in six provinces of Southern China

ZHENG Dan^{1,2}, CUI Wen-Wen^{1,2}, XIA Zhen-Zhen^{1,2}, PENG Xi-Tian^{1,2*}, ZHOU You-Xiang^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2. Hubei Key Laboratory of Nutritional Quality and Safety of Agro-products, Wuhan 430064, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the situation of pesticide residues and heavy metal contamination in *Eleocharis tuberosa* from 2019 to 2020 in six provinces of Southern China, and conduct dietary exposure risk assessment. **Methods** A total of 162 batches of *Eleocharis tuberosa* samples were randomly collected from primary producing regions of six provinces Southern China in 2019—2020 to determine the content of 7 kinds of heavy metals and 38 kinds of pesticide residues. The safety status of pesticide residues and heavy metals detected in the samples was evaluated by the index of food safety (IFS) method. **Results** The total qualified rate of pesticide

基金项目: 国家自然科学基金项目(22004030)、湖北省重点研发计划项目(2020BBB078)、湖北省自然科学基金项目(2020CFB461)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (22004030), the Hubei Key Research and Development Program (2020BBB078), and the Natural Science Foundation of Hubei Province (2020CFB461)

*通信作者: 彭西甜, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农业环境与农产品质量安全。E-mail: pxitian@aliyun.com

*Corresponding author: PENG Xi-Tian, Ph.D, Associate Professor, Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research, Hubei Academy of Agricultural Sciences, No.11, Nanhu Road, Hongshan District, Wuhan 430064, China. E-mail: pxitian@aliyun.com

residues and heavy metal contamination in *Eleocharis tuberosa* was 96.9%. Among 38 kinds of pesticides, only chlormequat was detected in the samples, the detection rate of chlormequat was 11.7%, the overstandard rate was 3.1%. Heavy metal contamination in *Eleocharis tuberosa* was generally in good condition, the qualified rate was 100%, the most detected heavy metals were Cu and As, which had 100% detection rates, the detection rates of Cd, Cr, Pb, Hg and Ni were 58.6%, 45.1%, 17.9%, 12.3% and 3.1%, respectively. Meanwhile, the residual values of 7 kinds of heavy metal were at a low level. The index of food safety evaluation results showed that IFS and $\overline{\text{IFS}}$ were all less than 1, indicating that dietary exposure risk was at an acceptable level. **Conclusion** In general, the risk of pesticide residues and heavy metals in six provinces of Southern China in this study are within an acceptable range, indicating the quality and safety of *Eleocharis tuberosa* are relatively good.

KEY WORDS: aquatic vegetables; *Eleocharis tuberosa*; pesticide residues; heavy metal; pollution characteristic; dietary exposure risk assessment

0 引言

荸荠(*Eleocharis tuberosa*), 又名马蹄、地栗等, 莎草科荸荠属宿根性浅水草本植物, 是我国的特色水生蔬菜, 至今已有三千多年的栽培历史^[1]。荸荠肉质细嫩、脆甜多汁, 亦果亦蔬, 是我国出口量最大的水生蔬菜品种, 深受国内外消费者的喜爱^[1-3]。目前, 我国荸荠种植面积约 100 万亩, 主要分布在广西、湖北、安徽、江苏、浙江、湖南和江西等南方各省, 其中, 广西是我国荸荠的第一大产区, 主要集中在桂林市, 约占全国种植面积的 30%。此外, 安徽无为荸荠、湖北孝感荸荠、蔡甸荸荠和团风荸荠在全国也享有较高的知名度。随着产业的发展, 在荸荠的种植过程中使用了大量的农药和化肥, 给荸荠的质量安全带来了严重威胁^[4]。然而, 荸荠属小品种作物, 在我国并没有开展农药登记和相关的风险评估工作。荸荠种植过程中, 病、虫和草害的防治均参照其他作物进行, 农药使用处于无标准可依的状态, 滥用、错用现象频出^[4-6]。同时, 由于生长在水中, 相较于陆地蔬菜更易于从水体、淤泥沉积层及大气环境中吸收或转移重金属^[7-8]。国内外对荸荠的研究, 主要集中在栽培措施、保鲜加工、部分重金属吸收特性和检测技术等^[9-15]上, 对荸荠的农药残留和重金属污染现状缺乏全面调查和整体评估。因此, 开展生产基地的荸荠中农药残留和重金属特征调查及其膳食暴露风险评估, 是掌握我国南方六省荸荠质量安全现状的一项极其重要的工作。

本研究通过在 2019—2020 间采集我国南方六省荸荠主产区生产基地的 162 个批次的样品, 通过对前期调查中检出率较高的 7 种重金属及生产中使用较多的 38 种农药残留情况进行监测^[11], 并采用食品安全指数(index of food safety, IFS)法对荸荠中检出的农药和重金属进行安全性评价, 以期对水生蔬菜荸荠的科学监管提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

根据荸荠种植地区及种植面积设置采样地点和数量, 参照 NY/T 789—2004《农药残留分析样本的采样方法》进行抽样。于 2019—2020 年选择有代表性的主产区进行取样, 包括浙江、湖北、江苏、湖南、广西和安徽 6 个省份。在各省份荸荠生产基地共抽取 162 个批次的样品, 其中, 广西 52 个、湖北 40 个、浙江 20 个、安徽 20 个、江苏 15 个、湖南 15 个。样品全部处于成熟期, 每个采样点按照五点取样法随机挖取荸荠 2.5 kg, 洗净泥土后取整个荸荠果实, 去皮匀浆, 暂存于 -18 °C 冰箱中待测。

38 种农药标准品[1000 μg/mL, 农业农村部环境质量监督检验测试中心(天津)]; 铅、铬、镍、镉、铜、汞、砷单元元素标准溶液(1000 μg/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 乙腈、无水硫酸镁、氯化钠、柠檬酸钠二水合物、柠檬酸氢二钠、硫酸镁、N-丙基乙二胺(primary secondary amine, PSA)、硝酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 乙腈、甲醇(色谱纯, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 0.22 μm 尼龙有机滤膜(天津津腾公司)。

1.2 仪器与设备

ME204 电子天平(0.1 mg, 瑞士 Mettler-Toledo 仪器有限公司); TQ-48C 微波消解仪(美国 CIF 公司); iCAP-Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国 PE 公司); AFS-8220 原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司); GCMS-TQ8030 三重四极杆气相色谱-质谱联用仪(日本岛津公司); AB SCIEX TRIPLE QUAD 4000 型液相色谱-三重四极杆质谱联用仪(美国 AB SCIEX 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 调查项目

农药残留: 根据前期调研结果, 选择荸荠种植过程中

使用较多的农药品种, 主要包括 20 种杀虫剂、16 种杀菌剂和 2 种植物生长调节剂共计 38 种: 氧乐果、噻嗪酮、联苯菊酯、氯氰菊酯、阿维菌素、虫螨腈、甲维盐、吡虫啉、啉虫脒、三唑磷、毒死蜱、噻虫嗪、氯虫苯甲酰胺、乐果、吡蚜酮、甲胺磷、水胺硫磷、克百威、甲氰菊酯、溴氰菊酯、霜霉威、苯醚甲环唑、氟硅唑、烯酰吗啉、百菌清、三唑酮、多菌灵、甲霜灵、腐霉利、丙环唑、咪鲜胺、三环唑、戊唑醇、烯唑醇、噻呋酰胺、萎锈灵、多效唑、矮壮素(chlormequat, CCC)。

重金属: 根据前期的调研结果, 以检出率较高的铅、铬、镍、镉、铜、汞和砷共计 7 项作为调查对象。

1.3.2 农药残留测定

提取: 称取解冻 4 h 且混匀的荸荠样品 10.0 g, 加 10 mL 乙腈及一颗陶瓷均质子, 2500 r/min 振荡提取 5 min, 加入 4 g 无水硫酸镁、1 g 氯化钠、1 g 柠檬酸钠二水合物、0.5 g 柠檬酸氢二钠, 剧烈振荡 5 min, 4200 r/min 离心 5 min, 待净化。

净化: 定量吸取 6 mL 上清液至装有 900 mg 硫酸镁和 150 mg PSA 的 15 mL 离心管中, 涡旋混匀 2 min, 4200 r/min 离心 5 min, 吸取 2 mL 上清液过 0.22 μm 微孔滤膜, 1 mL 用于气相色谱-串联质谱法(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)测定, 1 mL 用于液相色谱-串联质谱(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)测定。

1.3.3 重金属含量测定

称取解冻 4 h 且混匀的荸荠样品 0.5 g 于消解罐中, 加入 5 mL 硝酸, 加盖放置过夜后置于微波消解仪中消解, 冷却后取出, 在电热板上 100 °C 加热 30 min, 用水定容至 50 mL 待测定。采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定铅、铬、镍、镉、铜和砷, 原子荧光分光光度计法测定汞。

在上述前处理及仪器条件下, 38 种农药和 7 种重金属在荸荠中的定量限、标准曲线、精密度和准确度均满足实验要求。

1.3.4 评价依据

重金属铅、铬、镍、镉、汞和砷参照 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》、铜参照 NY/T 861—2004《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》进行判定。

农药残留参照 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》进行判定。

1.3.5 膳食风险评估方法

采用食品安全指数(IFS)来评价荸荠中某种化学物质对消费者健康是否存在危害及危害程度, 用食品安全指数均值(\overline{IFS})评估荸荠中的各种化学物质对消费者健康的总体危害程度^[16]。

$$IFS=(EDI_C \times f)/(SI_C \times m_b) \quad (1)$$

$$EDI_C=R \times F \times E \times P \quad (2)$$

$$\overline{IFS}=\sum_{i=1}^n IFS_{C_i}/n \quad (3)$$

式中: EDI_C 为化学物质 C 的实际日摄入量估算值, mg/(kg·d); SI_C 为安全摄入量, 根据不同的化学物质采用不同的数据, 农药残留采用每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI), 重金属残留采用暂定每周摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI), 铅取 0.025 mg/kg、镉取 0.007 mg/kg^[17]、铬取 0.0233 mg/kg、镍取 0.035 mg/kg、铜取 3.5 mg/kg、汞取 0.004 mg/kg、砷取 0.015 mg/kg^[18]; f 为安全摄入量的校正因子, 如果 SI_C 采用 ADI 值等日摄入量数据, f 取 1, 如果采用 PTWI 值等周摄入量数据, f 取 7; m_b 为人体平均质量, kg, 中国人均体质量按 63 kg^[19]计算; R 为农产品中化学物质 C 的残留水平, mg/kg; F 为农产品的估计日摄入量, kg/d, 参照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)统计数据中国居民每人每天番茄的消费量计算, 为 34.92 g^[20]; E 为农产品的可食用部分因子, $E=1$; P 为农产品的加工处理因子, $P=1$; IFS_{C_i} 指农产品 i 中化学物质 C 的食品安全指数, n 指化学物质的种类。

当 \overline{IFS} 或 $IFS < 1$ 时, 表明整体状态安全或化学物质 C 对农产品安全没有影响; 当 \overline{IFS} 或 $IFS = 1$ 时, 表明整体状态可接受或化学物质 C 对农产品安全影响的风险可接受; 当 \overline{IFS} 或 $IFS > 1$ 时, 表明整体状态不可接受或化学物质 C 对农产品安全影响的风险超过了可接受的限度。

1.3.6 数据处理

采用 Excel 2010 软件对数据进行处理和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 荸荠中农药残留现状分析与安全性评价

2.1.1 荸荠中农药残留现状

农药的使用在农作物病虫害防治、保产稳产上起到了至关重要的作用, 然而其过量或超范围使用会对农产品质量安全产生较大的威胁。肥料和农药的使用是决定农产品质量安全的关键, 而蔬菜种植户作为行为主体, 蔬菜的“第一”生产者, 其种植习惯, 包括肥料和农药的选择与购买, 施用量、频率和方式及农药安全间隔期等种植习惯从源头上影响着农产品的质量安全^[21]。影响种植户种植习惯的因素较多, 有农户个体特征、家庭经营特征、施用信息特征和认知特征等^[22]。本次调查结果发现, 荸荠中农药残留检出情况较好, 整体合格率达到 96.9%, 38 种监测的农药中仅检出矮壮素, 其余 37 种农药均未检出。2019—2020 年各省份水生蔬菜荸荠中矮壮素残留情况见表 1, 通过对比 2019 与 2020 年矮壮素的检出情况发现: 两年矮壮素总检出率为 11.7%, 总超标率为 3.1%, 且两年里各省份矮壮素检出率总体持平。从样品来源上看, 各省区的检出率和超标率差异较大。各省份两

年间矮壮素检出率由大到小依次为: 湖南>湖北>浙江>广西, 安徽和江苏两省均未检出矮壮素, 所有的矮壮素超标样品均来自广西, 且广西 2019 年与 2020 年的矮壮素超标率也基本一致。由此可见, 当地荸荠种植户使用矮壮素的习惯相对稳定, 矮壮素的使用具有一定的地域特点^[22], 在安徽和江苏两省没有矮壮素的不当使用问题, 在湖南、湖北和浙江省有少量的使用情况, 在荸荠出产量最大的广西有少量不当使用并致超标的情况。

2.1.2 荸荠中农药残留膳食暴露风险评估

农药的毒害作用与其进入人体的绝对量有关, 因此

评价食品安全以人体对农药的实际摄入量与其安全摄入量进行比较更为合理。本研究采用 IFS 法来评价荸荠中农药残留对消费者是否存在危害及危害程度, 从而评价荸荠的安全状态。本次监测的 38 种农药中有 37 种未检出, 因此不计算 IFS, 各省份检出矮壮素的 IFS 见表 2。从表 2 可以看出, 六省份生产基地出产的荸荠中矮壮素残留 IFS 值在 0~0.0284, \overline{IFS} 为 0.0062, 均远<1, 这表明南方六省主产区生产基地出产的荸荠中矮壮素对产品安全没有影响, 荸荠中的农药残留整体状态安全。

表 1 各省份 2019—2020 年荸荠中矮壮素残留情况表
Table 1 Table of the residues of CCC in *Eleocharis tuberosa* in each province from 2019 to 2020

省份	年份	样品数量	检出矮壮素样品数	检出率/%	矮壮素超标样品数	超标率/%
安徽	2019	5	ND	ND	ND	ND
	2020	15	ND	ND	ND	ND
湖北	2019	15	3	20.0	ND	ND
	2020	25	4	16.0	ND	ND
湖南	2019	5	1	20.0	ND	ND
	2020	10	2	20.0	ND	ND
浙江	2019	9	1	11.1	ND	ND
	2020	11	2	18.2	ND	ND
江苏	2019	5	ND	ND	ND	ND
	2020	10	ND	ND	ND	ND
广西	2019	20	2	10.0	2	10.0
	2020	32	4	12.5	3	9.4
合计	2019	59	7	11.9	2	3.4
	2020	103	12	11.7	3	2.9
	2019—2020	162	19	11.7	5	3.1

注: ND 代表未检出, 下同。

表 2 各省份 2019—2020 年荸荠中矮壮素残留安全指数
Table 2 Safety indexes of CCC residues *Eleocharis tuberosa* in each province from 2019 to 2020

省份	检出矮壮素个数	残留水平/(mg/kg)	EDI/[mg/(kg·d)]	IFS	\overline{IFS}
广西	6	0.086~2.560	0.0894	0.0010~0.0284	0.0062
浙江	3	0.090~0.110	0.0038	0.0031~0.0038	
湖北	7	0.015~0.044	0.0015	0.0005~0.0015	
湖南	3	0.019~0.022	0.0008	0.0007~0.0008	
江苏	ND	ND	0	0	
安徽	ND	ND	0	0	

2.2 荸荠中重金属现状分析与安全性评价

2.2.1 荸荠中重金属现状

不同种类的蔬菜对重金属的吸收累积特性不同, 研究发现, 各类蔬菜品种对重金属的吸收能力大小顺序为: 叶菜类>根茎类>瓜果类>豆类^[23-24]。重金属主要通过根系进入蔬菜体内, 随后通过木质部和韧皮部组织转运到其他部位^[25]。荸荠作为以地地球茎为主要收获器官的蔬菜, 重金属污染风险较高。荸荠中重金属检出情况见表 3。由表 3 可知, 南方六省出产的荸荠中重金属情况较好, 合格率达到 100%。铜和砷的检出率为 100%, 其余重金属的检出率由大到小依次为: 镉>铬>铅>汞>镍, 可见荸荠中重金属呈复合型特征, 这与黄飞飞等^[7]、王方园等^[26]和周敏楠^[27]的研究结论基本一致。同时, 各重金属的残留中值均处于较低水平, 砷、镉、汞和铜的残留中值仅为最大残留限量的十分之一, 镍的残留中值仅为最大残留限量的五分之一, 铬和铅的残留中值仅为蔬菜中最大残留限量的三分之一。

荸荠中重金属污染来源多样, 可分为自然来源和人为

来源, 自然来源主要有成土母质和大气沉降等, 人为来源主要包括污灌、肥料、农药、冶炼、固体废弃物利用和汽车尾气等^[28-30]。各省份荸荠中重金属检出情况见表 4。由表 4 可知, 各省份生产的荸荠中重金属检出情况差异较大, 荸荠中检出重金属种类由多到少分别为: 广西>江苏、湖北、浙江和安徽>湖南。同时, 汞的检出在安徽, 镍的检出在广西, 镉的检出在湖南、江苏和湖北三省较多, 这可能与各地土壤背景值差异较大及重金属来源复杂等因素有关。

各省份荸荠监测样品中重金属浓度分布情况见图 1。由图 1 可知, 各省份出产的荸荠中各种重金属的检出浓度差异较大。汞的残留只在安徽有检出, 镍的残留只在广西有检出。砷和铜虽然全部检出, 但数值也都较低。荸荠中铬超过最大残留限量中位值的产地在广西, 镉超过最大残留限量中位值的产地在江苏, 铅超过最大残留限量中位值的产地分别在江苏和广西。鉴于此, 对于出产的荸荠样品中有超过最大残留限量中位值的广西和江苏省, 应加强铅、镉和铬的质量控制与风险评估。

表 3 水生蔬菜荸荠中重金属检出情况表

Table 3 Sample list with the detectable situation of heavy metal contamination in *Eleocharis tuberosa*

重金属	检出率/%	残留水平/(mg/kg)	中值/(mg/kg)	最大残留限量/(mg/kg)	超标批次	超标率/%
铜	100	0.1355~2.3301	0.6482	6.0	0	0
砷	100	0.0049~0.1594	0.0622	0.5	0	0
镉	58.6	0.0020~0.0277	0.0045	0.05	0	0
铬	45.1	0.0511~0.4183	0.1295	0.5	0	0
铅	17.9	0.0206~0.0578	0.0310	0.1	0	0
汞	12.3	0.0010~0.0031	0.0015	0.01	0	0
镍	3.1	0.2018~0.2205	0.2112	1.0	0	0

表 4 各省份荸荠中重金属检出情况表

Table 4 Table of detection of heavy metal in *Eleocharis tuberosa* in each province

省份	检出率/%						
	铜	砷	镉	铬	汞	铅	镍
安徽	100	100	40.0	—	100	20.0	—
湖北	100	100	70.0	45.0	—	10.0	—
湖南	100	100	100	—	—	—	—
浙江	100	100	35.0	10.0	—	45.0	—
江苏	100	100	73.3	26.6	—	26.6	—
广西	100	100	50.0	94.2	—	15.4	9.6
合计	100	100	58.6	45.1	12.3	17.9	3.1

注: —代表未检出。

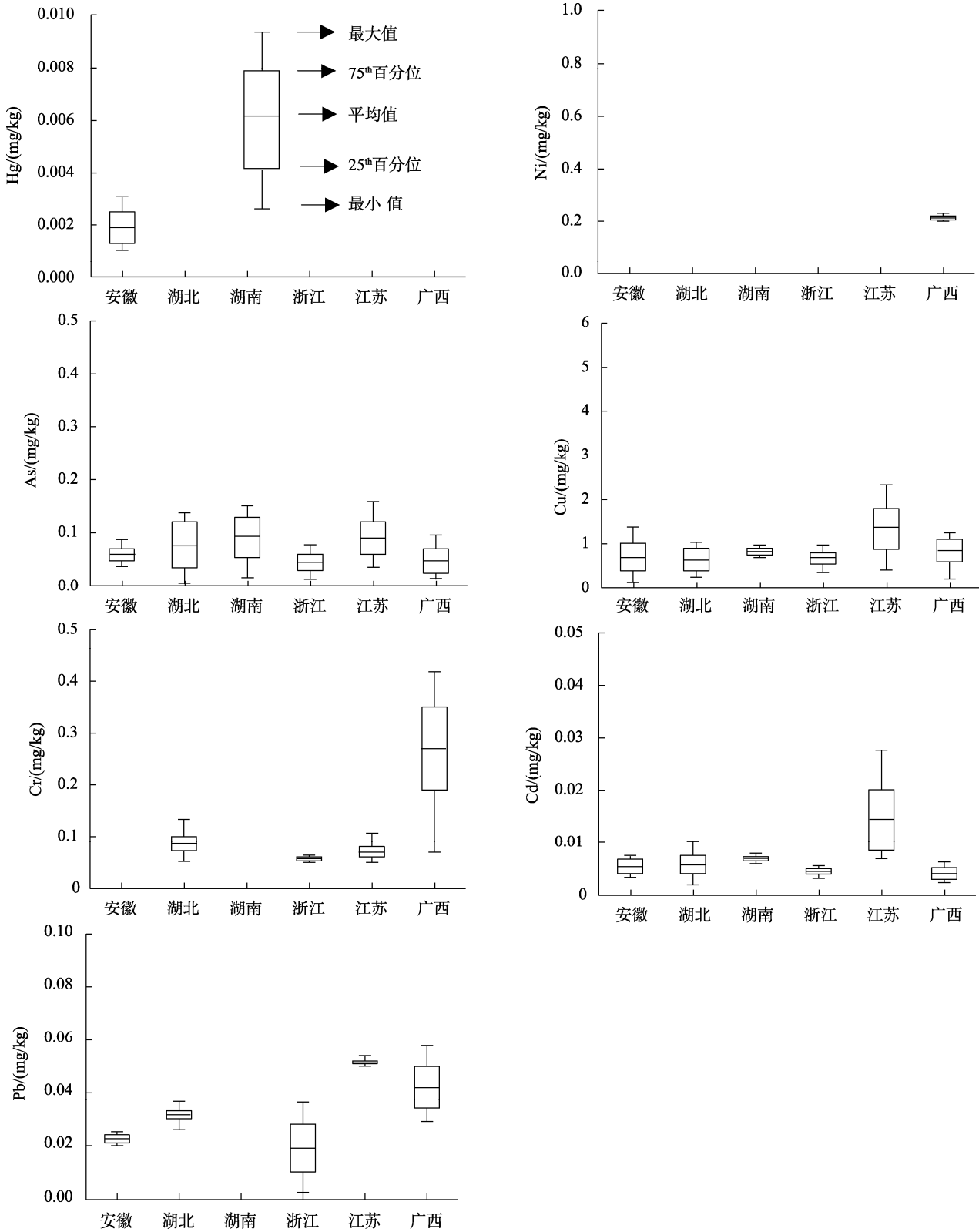


图 1 各省份荸荠监测样品重金属浓度分布情况

Fig.1 Distribution of heavy metal content in different provinces

2.2.2 荸荠中 7 项重金属的安全评价

对荸荠样品中 7 种重金属按食品安全指数法对安全

性进行了测算, 结果见表 5。由表 5 可知, 本次风险评估监测的 7 种重金属的 IFS 从大到小依次为: 铬>砷>镍>镉>

铅>汞和铜,7种重金属的IFS值在0.0004~0.0100, $\overline{\text{IFS}}$ 为0.0034,均远<1,这表明所监测的162份荸荠样品中7种重金属残留风险较低,整体状态处于安全水平。

3 结论与讨论

对采自2019—2020年南方六省区生产基地的162个批次荸荠样品进行农药残留和重金属污染情况调查,结果表明:六省区出产的荸荠中农药残留整体情况较好,合格率达到96.9%,根据前期调查确定的38种重点监测的农药中仅检出矮壮素,其余37种农药均未检出,矮壮素的超标率为3.1%。荸荠中重金属情况也较好,产品合格率达到100%。荸荠中重金属呈现复合型特征,且浓度均处于较低水平。通过IFS法来评价荸荠中矮壮素与7种重金属的安全性,结果发现荸荠中矮壮素残留的 $\overline{\text{IFS}}$ 为0.0062,7种重金属的 $\overline{\text{IFS}}$ 为0.0034,均远<1,本次监测的南方六省区生产基地出产的荸荠中农药残留和7种重金属残留的总体风险较低,整体状态处于安全水平。

荸荠属于小品种作物,在我国并没有登记在该作物上的农药,各生产基地用药的选择也主要是参照其他作物,随意性较大^[5]。本研究通过两年的调查发现,在荸荠种植过程中虽然也会使用农药,但经过140~200 d的生长期至成熟收获时,除矮壮素外其余农药均未检出。矮壮素作为植物生长调节剂中最重要的一类,主要通过调控植物内源激素平衡和生物代谢酶活性等调节作物生长发育,能够显著提高作物产

量、品质和抗逆性,同时还能增强作物的肥料利用效率^[31-32]。因此,虽然矮壮素并没有在荸荠上登记,然而在生产实际中应用较为广泛。同时在调研中还发现,有部分种植户并没有喷施矮壮素,但荸荠中却检出了矮壮素残留,造成这种局面的原因是种植户使用了含有矮壮素隐性添加的叶面肥。因此,建议监管部门加紧开展对小品种作物中的矮壮素消解规律和限量标准研究,同时注意区分重点、因地制宜地开展宣传教育和监督检查工作,营造良好的种植环境。

重金属普遍存在于人们生活的周围环境中,其污染具有隐蔽性、长期性及不可逆性等^[33-35]。因此,虽然荸荠中重金属检出浓度较低,但仍需引起重视。对于出产的荸荠中有超过最大残留限量中位值的广西和江苏省,在荸荠的种植过程中依然存在潜在的重金属污染风险,建议加强铅、镉和铬的风险评估与质量控制。

本研究样品的来源是各生产基地,故监测结果只能代表生产基地的生产种植过程,不能代表储运和加工过程。IFS法计算过程中的农产品的日摄入量、可食用部分因子、加工处理因子和成年人体重数据等均是估测值,且计算时假定居民的日平均摄入量不发生巨大变化,各种污染物对人体的危害不存在相互作用,因此,该风险评估方法只能在总体上评估荸荠中矮壮素和重金属残留对成人(18~59周岁)安全状态的影响。同时,本研究对荸荠中7种重金属的情况只做了摸底调查,其中各重金属来源及防控措施等有待进一步研究。

表5 荸荠中7种重金属污染检测结果与食品安全指数
Table 5 Detection results of 7 kinds of heavy metal pollution and food safety indexes in *Eleocharis tuberosa*

重金属	PTWI/[mg/(kg·w)]	最大值/(mg/kg)	EDI/[mg/(kg·d)]	IFS	$\overline{\text{IFS}}$
铜	3.5000	2.3301	0.0814	0.0004	
砷	0.0150	0.1594	0.0056	0.0060	
镉	0.0070	0.0277	0.0010	0.0022	
铬	0.0233	0.4183	0.0146	0.0100	0.0034
汞	0.0040	0.0031	0.0001	0.0004	
铅	0.0250	0.0578	0.0020	0.0013	
镍	0.0350	0.2205	0.0077	0.0035	

参考文献

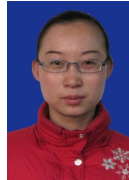
- [1] 何凤平,潘永贵,张伟敏.鲜切荸荠类黄酮3'-羟化酶分离纯化及其动力学性质[J].食品科学,2017,38(8):17-23.
HE FP, PAN YG, ZHANG WM. Isolation, purification and characterization of flavonoid 3'-hydroxylase from fresh-cut Chinese water chestnut [J]. Food Sci, 2017, 38(8): 17-23.
- [2] 王娟娟,杨莎,张曦.我国特色蔬菜产业形势与思考[J].中国蔬菜,2020,6:1-5.
WANG JJ, YANG S, ZHANG X. Analysis on the development situation of characteristics of vegetable industry and countermeasures in China [J]. China Veget, 2020, 6: 1-5.
- [3] 赖小芳,王伯诚,陈伟强,等.不同有机肥对荸荠产量、品质、口感的影响[J].中国农学通报,2017,33(27):76-81.
LAI XF, WANG BC, CHEN WQ, et al. Effect of different organic fertilizers on yield, quality and taste of *Eleocharis dulcis* [J]. Chin Agric Sci Bull, 2017, 33(27): 76-81.
- [4] 聂荣荣,古勉辉,董文静,等.梅州金柚中金属元素分析及膳食风险评估

- 估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(12): 4742-4749.
- NIE RR, GU MH, DONG WJ, *et al.* Metallic element analysis and dietary risk assessment of Meizhou golden pomelo [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(12): 4742-4749.
- [5] 陈岩, 郑锦锦, 杨慧, 等. 我国蔬菜合理用药情况调查分析[J]. *农药*, 2018, 57(9): 627-631.
- CHEN Y, ZHENG JJ, YANG H, *et al.* Investigation and analysis of rational use of pesticides in vegetable of China [J]. *Agrochemicals*, 2018, 57(9): 627-631.
- [6] 彭西甜, 龚艳, 王小飞, 等. 湖北省小品种蔬菜用药情况调查及产品安全性风险评估[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(10): 2627-2631.
- PENG XT, GONG Y, WANG XF, *et al.* Pesticide use surveys of small species vegetables and product safety risk assessment [J]. *Hubei Agric Sci*, 2016, 55(10): 2627-2631.
- [7] 黄飞飞, 张宁, 赵敏娟, 等. 2016—2018年苏州市水生蔬菜重金属污染状况分析及健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(2): 648-654.
- HUANG FF, ZHANG N, ZHAO MX, *et al.* Analysis of heavy metal pollution status and health risk assessment of aquatic vegetables in Suzhou from 2016 to 2018 [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(2): 648-654.
- [8] HE BY, LING L, ZHANG LY, *et al.* Cultivar-specific differences in heavy metal (Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) concentrations in water spinach (*Ipomoea aquatic* 'Forsk') grown on metal-contaminated soil [J]. *Plant Soil*, 2015, 386: 251-262.
- [9] LUTFI Z, KALIM Q, SHAHID A, *et al.* Water chestnut, rice, corn starches and sodium alginate. A comparative study on the physicochemical, thermal and morphological characteristics of starches after dry heating [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 184: 476-482.
- [10] ZHANG XY, PENG Y, WANG QG. Study on the browning and structure properties of fresh-cut Chinese water chestnut (*Eleocharis tuberosa*) [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 39(2): 396-402.
- [11] 谢丽萍, 李焱, 蒋翠文, 等. 重金属镉、汞、铜和铅在荸荠体内的累积特性研究[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(8): 1712-1716.
- XIE LP, LI T, JIANG CW, *et al.* Study on accumulation characteristics of heavy metals of cadmium, mercury copper and lead in water chestnut [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2018, 31(8): 1712-1716.
- [12] 李长乐, 潘永贵. 鲜切荸荠表面黄化过程中黄酮类物质和抗氧化活性变化[J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 212-217.
- LI CL, PAN YG. Changes in flavonoid content and antioxidant activity of fresh-cut Chinese water chestnut during surface etiolation [J]. *Food Sci*, 2018, 39(19): 212-217.
- [13] 郑丹, 王晓芳, 郭鹏. 不同磷肥施用水平和磷肥品种搭配对马蹄产量及品质的影响[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(16): 3880-3883.
- ZHENG D, WANG XF, GUO P. Effects of different application levels and species of phosphate fertilizer on water chestnut [J]. *Hubei Agric Sci*, 2015, 54(16): 3880-3883.
- [14] 张惠贤, 郑丹, 夏虹, 等. 分散固相萃取净化-超高效液相色谱串联质谱检测荸荠中的高氯酸盐[J]. *分析实验室*, 2020, 39(8): 899-903.
- ZHANG HX, ZHENG D, XIA H, *et al.* Determination of perchlorate in water chestnut by disperse solid phase extraction cleanup coupled with ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2020, 39(8): 899-903.
- [15] XIAO LY, CHEN JH, WANG XC, *et al.* Structural and physicochemical properties of chemically modified Chinese water chestnut [*Eleocharis dulcis* (Burm. f.) Trin. ex Hensch] starches [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 120: 547-556.
- [16] 高琴, 钟攀, 刘纳, 等. 基于 IFS 法评估柑橘中农药残留的风险[J]. *四川农业科技*, 2019, 4: 32-34.
- GAO Q, ZHONG P, LIU N, *et al.* Evaluate the risk of pesticide residues in citrus based on the IFS method [J]. *Sichuan Agric Sci Technol*, 2019, 4: 32-34.
- [17] 董四平, 徐辉. 食品安全指数法评估荆州市莲藕铅、镉污染水平[J]. *中国卫生检验杂志*, 2019, 29(15): 1893-1895.
- DONG SP, XU H. Evaluation of lead and cadmium contamination in lotus roots sold in Jingzhou city by food safety index method [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2019, 29(15): 1893-1895.
- [18] NASERI M, VAZIRZADEH A, KAZEMI R, *et al.* Concentration of some heavy metals in rice types available in shiraz market and human health risk assessment [J]. *Food Chem*, 2015, 175: 243-248.
- [19] 齐艳丽, 李晋栋, 高婧, 等. 戊唑醇及吡唑醚菌酯在玉米上的残留行为及风险评估[J]. *农药学报*, 2020, 22(1): 115-121.
- QI YL, LI JD, GAO J, *et al.* Residue behavior and dietary risk assessment of tebuconazole and pyraclostrobin in corn [J]. *Chin J Pest Sci*, 2020, 22(1): 115-121.
- [20] World Health Organization. Template for the evaluation of chronic exposure (IEDI) [EB/OL]. [2019-03-21]. https://www.who.int/foodsafety/areas_work/chemic-al-risks/gem-s-food/en/ [2020-12-20].
- [21] 邹小园, 郭金润, 梁耀明. 农户化肥减施意愿与行为研究进展[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(5): 149-157.
- ZOU XY, GUO JR, LIANG YM. Research progress in farmers' willingness and behavior to reduce fertilizer application [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2021, 48(5): 149-157.
- [22] 刘娟. 蔬菜种植户农药减施意愿的影响因素研究—以临沂市为例[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- LIU J. Factors influencing vegetable farmers' willingness to reduce pesticide application—take Linyi as an example [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [23] LI J, XU Y, WANG LQ, *et al.* Heavy metal occurrence and risk assessment in dairy feeds and manures from the typical intensive dairy farms in China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, 26: 6348-6358.
- [24] ZHOU H, YANG WT, ZHOU X, *et al.* Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment [J]. *Int J Environ Res Pub Health*, 2016, 13(3): 289-300.
- [25] PAN XD, WU PG, JIANG XG. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China [J]. *Sci Rep-UK*, 2016, 6: 20317-20323.
- [26] 王方园, 龙珠, 徐金玲, 等. 浙中地区水生蔬菜及其生长环境重金属污染调查与评价[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(3): 338-345.
- WANG FY, LONG Z, XU JL, *et al.* Investigation and evaluation of the heavy metal pollution for aquatic vegetables and its growing environment in the middle area of Zhejiang [J]. *J Zhejiang Norm Univ (Nat Sci)*, 2016, 39(3): 338-345.
- [27] 周敏楠. 湿法消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定水生蔬菜中5种元素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(19): 7106-7113.
- ZHOU MN. Simultaneous determination of five elements in aquatic

- vegetables by wet digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(19): 7106–7113.
- [28] WU G, KANG HB, ZHANG XY, *et al.* A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities [J]. *J Hazard Mater*, 2010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.113
- [29] QURESHI AS, HUSSAIN MI, ISMAIL S, *et al.* Evaluating heavy metal accumulation and potential health risks in vegetables irrigated with treated wastewater [J]. *Chemosphere*, 2016, 163: 54–61.
- [30] HUANG SY, ZHUO C, DU XY, *et al.* Emediation of arsenic-contaminated paddy soil by intercropping aquatic vegetables and rice [J]. *Int J Phytoremediat*, 2021, 23(10): 1021–1029.
- [31] 马正波, 唐会会, 王庆燕, 等. 矮壮素配合氮肥基肥对夏玉米氮代谢及氮素利用特征的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(4): 130–136.
MA ZB, TANG HH, WANG QY, *et al.* Effects of chlormequat chloride on summer maize nitrogen metabolism and nitrogen utilization efficiency [J]. *J Maize Sci*, 2020, 28(4): 130–136.
- [32] 郑丹, 王晓燕, 彭西甜, 等. 喷施矮壮素对茭蒿产量、品质及氮素利用特征的影响[J]. *中国蔬菜*, 2021, 11: 61–68.
ZHENG D, WANG XY, PENG XT, *et al.* Effects of foliar spraying chlormequat chloride on yield, quality and nitrogen utilization efficiency of *Artemisia selengensis* Turcz. [J]. *China Veget*, 2021, 11: 61–68.
- [33] 温韬, 段玉林, 黄星琳. 湿法快速消解-电感耦合等离子质谱法测定大米中的锌、铜、镍[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(1): 209–214.
WEN T, DUAN YL, HUANG XL. Determination of zinc, copper and nickel in rice by wet fast digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(1): 209–214.
- [34] 李硕, 李红霞, 李莉, 等. 油菜花粉和茶花花粉中重金属含量的分布特征研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(11): 4596–4601.
LI S, LI HX, LI L, *et al.* Distribution of heavy metals in the species of *Brassica campestris* L. bee pollen and *Camellia japonica* L. bee pollen [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(11): 4596–4601.
- [35] 李峰, 高贤彪, 陈秋生, 等. 冀东典型蔬菜种植区设施土壤重金属特征[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(4): 1362–1368.
LI F, GAO XB, CHEN QS, *et al.* Characteristics of heavy metals in greenhouse soils on typical vegetable cultivation regions of east Hebei [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(4): 1362–1368.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



郑丹, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农业环境与农产品质量安全。
E-mail: zhengdan_2004@163.com



彭西甜, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农业环境与农产品质量安全。
E-mail: pxitian@aliyun.com