

茉莉花重金属及有害元素的道地性研究及风险评估*

黄健军^{1,3}, 方刚¹, 伍国怡^{2**}, 邓刚¹, 梁少东², 刘艳云²

(1. 广西中医药大学, 南宁 530001; 2. 北海市食品药品检验所, 北海 536000; 3. 广西民族大学, 南宁 530008)

摘要 **目的:**研究茉莉花重金属元素与道地性的相关性, 并进行风险评估。**方法:**采用 ICP-MS 测定不同产区 43 批茉莉花重金属及有害元素含量的差异, 进行聚类分析, 研究茉莉花中各元素含量与道地性的相关性及水煎后各元素的溶出率, 筛选可能影响重金属及有害元素含量的标志性元素, 并进行风险评估。**结果:**不同产区 43 批茉莉花共聚为 2 类, 不同产区茉莉花粉末和干膏中各重金属及有害元素含量大小均为 Cu、Cd、Pb、As、Hg, 粉末和干膏中 Cu 元素含量均大于其他元素; 煎煮后各重金属及有害元素的溶出率大小为 As、Pb、Hg、Cu、Cd、Pb、Cd 与 As 是可能影响茉莉花重金属及有害元素含量的标志性元素; 风险评估显示广西横州市横州镇(批号 20200810)与福建省泉州市(批号 20230705) $MOE_{Pb} < 1$, 存在一定暴露风险, 其余产区危害指数和暴露限值均符合限值标准。**结论:**本文为种植区选择、人工育种、制定重金属及有害限量标准等方面提供科学依据。

关键词:茉莉花; 道地性; 重金属; 有害元素; 风险评估

中图分类号: R 917 文献标识码: A 文章编号: 0254-1793(2024)03-0482-11

doi: 10.16155/j.0254-1793.2024.03.14

Study on geo-authenticity and risk assessment of heavy metal and harmful elements in Jasmine*

HUANG Jian-jun^{1,3}, FANG Gang¹, WU Guo-yi^{2**},
DENG Gang¹, LIANG Shao-dong², LIU Yan-yun²

(1. Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530001, China; 2. Beihai Institute for Food and Drug Control, Beihai 536000, China;
3. Guangxi Minzu University, Nanning 530008, China)

Abstract Objective: To study the correlation between heavy metal and harmful elements of Jasmine and the geo-authenticity, and to evaluate the risk. **Methods:** The content difference of heavy metal elements in 43 batches of Jasmine from different production areas was determined by ICP-MS, and cluster analysis was carried out to study the correlation between the content of each element in Jasmine and the geo-authenticity. The dissolution rate of each element after decocting in water was determined, the symbolic elements that might affect the contents of heavy metal and harmful elements was screened, and risk assessment was performed. **Results:** The copolymerization of 43 batches of jasmine from different producing areas was divided into 2 types. The contents of heavy

* 2022 年广西中医药大学面上项目(2022MS026); 广西中医药多学科交叉创新资助(GZKJ2304); 桂派中医药传承创新团队——壮医毒病临床医学研究与应用创新团队(桂中医大党[2022]23号); 广西壮族自治区卫生健康委员会壮医应用基础研究重点实验室项目(广西中医药大学)(桂卫科教发[2020]17号); 广西医学高层次骨干人才培养‘139’计划资助项目(桂卫科教发[2020]15号)

** 通信作者 Tel:(779)2230575; E-mail:57916501@qq.com
第一作者 Tel:(771)3922715; E-mail:hjj198110@163.com

metals in powder and dry paste of Jasmine from different producing areas declined in the order of Cu, Cd, Pb, As and Hg, and the content of Cu in powder and dry paste was higher than other elements. The dissolution rates of heavy metal and harmful elements declined in the order of As, Pb, Hg, Cu and Cd, and Pb, Cd and As were the representative elements that might affect the content of heavy metal and harmful elements in Jasmine. Risk assessment showed that $MOE_{Pb} < 1$ existed in samples from Hengzhou Town, Hengzhou City, Guangxi Province (batch number: 20200810) and Quanzhou City, Fujian Province (batch number: 20230705), and the hazard index and exposure limit values in other producing areas were in line with the limit standards. **Conclusion:** This paper provides scientific basis for selection of planting area, artificial breeding and formulation of heavy metal and harmful limit standard.

Keywords: Jasmine; geo-authenticity; heavy metal; harmful elements; risk assessment

茉莉花 (*Jasminun sambac* (L.) Atiton) 为木犀科植物茉莉的花, 为常绿灌木幼枝圆柱形, 有时近倒卵形, 披短柔毛, 单叶对生, 花期 6~11 月, 花后通常不结果, 多栽培湿润肥沃土壤中, 原产区为印度^[1]。茉莉花性寒、味香淡、消胀气, 味辛、甘, 性温, 有理气止痛、温中和胃、消肿解毒、强化免疫系统的功效, 并对痢疾、腹痛、结膜炎及疮毒等具有很好的消炎解毒的作用。现在我国多地都有栽培, 现分布江苏、浙江、福建、台湾、广东、四川、云南等地, 以广西横县、福建和广州最多^[2-3]。茉莉为多年生植物, 药用历史悠久, 全身包括茉莉花、茉莉叶、茉莉渣、茉莉茎皆可药用, 其生长地土壤、环境和气候等条件的影响在一定程度上增加了重金属及有害元素残留的风险, 然而, 目前关于茉莉花重金属及有害元素污染及其安全性评价的研究较少^[4-7], 本研究建立茉莉花中 As、Hg、Pb、Cd、Cu 5 种有害重金属及有害元素的 ICP-MS 联合测定方法, 对不同产区茉莉花粉末及干膏中的重金属及有害元素残留进行测定, 研究不同产区茉莉花药材中 5 种重金属及有害元素在煎煮过程中由粉末到汤液的分布变化, 筛选可能影响其重金属及有害元素含量的标志性元素, 论证中医传统汤剂的科学性和合理性, 并对其重金属及有害元素污染状况进行分析与评价, 以期客观全面评价茉莉花的质量作出探索, 对制定其中药材重金属及有害元素限量标准、茉莉花种植区的选择、资源保护、人工育种、临床用药以及茉莉花这一重要的民族药的开发利用提供科学依据。

1 仪器与试剂

1.1 仪器

Agilent 7700X 电感耦合等离子体质谱仪 (安捷伦科技有限公司); Anton Pear Multiwave 3000 微波消解仪 (安东帕有限公司); MS-204 十万分之一电子

天平 (梅特勒-托利多公司)。

1.2 药材及试剂

As、Cd、Pb 多元素标准溶液 (GNM-M41940-2013, 唯一标识: 22D30520, 浓度: $1\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); Cu 单元素标准溶液 (GBW8615, 批号 19041, 浓度: $1\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, 中国计量科学研究院); Hg 单元素标准溶液 (GBW(E) 83186a-1, 批号: B1907010, 浓度: $100\ \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, 北京坛墨质检科技有限公司)。柑橘叶 [国家一级标准物质, GBW10020 (GSB-11), 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所]。内标溶液为 $100\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Li、Sc、Ge、Rh、In、Tb、Lu、Bi 混合内标溶液 (批号 54-124CRY2, Agilent 公司)。硝酸为优级纯 (MERCK 公司); 水为娃哈哈纯净水。不同产区茉莉花分别从主产区广西、四川、广东、安徽等地采集, 共 43 批次。见表 1。

2 方法与结果

2.1 ICP-MS 工作条件

射频功率 1 400 W; 萃取电压 -142 V; 离子透镜 1、2、3 分别为 2.2、-23、-173.5 V; 采样深度 62 mm; 雾化室温度为 2 °C; 等离子体气体、辅助气体、载体、稀释气体流量分别为 15、1、1、1 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; 重复次数为 3 次; 积分时间为 0.3 s; 调谐模式为 He 模式。Pb、As、Cd 元素分别按以下干扰方程校正: $MC(75) = M(75) \times 1 - M(77) \times 3.127\ 8 + M(78) \times 1.017\ 7$; $MC(208) = M(206) \times 1 + M(207) \times 1 + M(208) \times 1$; $MC(114) = M(114) \times 1 - M(108) \times 1.628\ 5 - M(118) \times 0.014\ 9$ 。

2.2 微波消解条件

采用功率程序消解: ① 设定 5 min, 使温度从室温升至 130 °C, 130 °C 恒温 5 min; ② 设定 5 min, 使温度从 130 °C 升至 150 °C, 150 °C 恒温 5 min; ③ 设定 5 min, 使温度从 150 °C 升至 190 °C, 190 °C 恒温 25 min。

表 1 茉莉花样品信息
Tab. 1 Jasmine sample information

编号 (No.)	产区 (producing area)	批号/采收日期 (lot No./date of collection)	编号 (No.)	产区 (producing area)	批号/采收日期 (lot No./date of collection)
1	广西横州市横州镇(Hengzhou Town, Hengzhou City, Guangxi)	20200810	23	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui)	20230420
2	广西横州市马岭镇(Maling Town, Hengzhou City, Guangxi)	20200820	24	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui)	20230801
3	广西横州市校椅镇(Xiaoyi Town, Hengzhou City, Guangxi)	20200813	25	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui)	20230710
4	广西横州市云表镇(Yunbiao Town, Hengzhou City, Guangxi)	20200810	26	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui)	20230613
5	广西横州市那阳镇(Nayang Town, Hengzhou City, Guangxi)	20200820	27	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui)	20230722
6	广西横州市(Hengzhou City, Guangxi)	20230703	28	四川省(Sichuan)	20230715
7	广西南宁市(Nanning City, Guangxi)	210901	29	四川省(Sichuan)	20230712
8	广西南宁市(Nanning City, Guangxi)	221001	30	四川省雅安市(Ya'an City, Sichuan)	20200813
9	广东省(Guangdong)	2109001	31	四川省乐山市(Leshan City, Sichuan)	210601
10	广东省(Guangdong)	230617011	32	四川省广汉市(Guanghan City, Sichuan)	20200731
11	广东省广州市(Guangzhou City, Guangdong)	20230715	33	四川省雅安市(Ya'an City, Sichuan)	20230615
12	广东省惠州市(Huizhou City, Guangdong)	20220710	34	福建省(Fujian)	Z2112002
13	江苏省(Jiangsu Province)	220201	35	福建省泉州市(Quanzhou City, Fujian)	20230705
14	江苏省(Jiangsu)	230301	36	福建省泉州市(Quanzhou City, Fujian)	20230315
15	江苏省(Jiangsu)	221001	37	福建省厦门市(Xiamen City, Fujian)	20221201
16	江苏省盐城市(Yancheng City, Jiangsu)	20230620	38	云南省昆明市(Kunming City, Yunnan)	20230728
17	江苏省盐城市(Yancheng City, Jiangsu Province)	20230708	39	云南省昆明市(Kunming City, Yunnan)	20230411
18	江苏省盐城市(Yancheng City, Jiangsu Province)	20230717	40	云南省昆明市(Kunming City, Yunnan)	20230614
19	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui Province)	2021120686	41	河北省保定市(Baoding City, Hebei)	20230701
20	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui Province)	20230729	42	河北省保定市(Baoding City, Hebei)	20230718
21	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui Province)	20230710	43	吉林·延边朝鲜族自治州(Yanbian Korean Autonomous Prefecture, Jilin)	20220303
22	安徽省亳州市(Bozhou City, Anhui Province)	20230610			

2.3 溶液配制

2.3.1 标准溶液 分别精密量取 As、Cd、Pb 多元素标准溶液、Cu 单元素标准溶液和 Hg 单元素标准溶液,用 2% 硝酸溶液分别稀释成含 As、Cd、Pb、Cu 和 Hg 为 1、1、1、10、0.5 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的标准储备溶液。精密量取 As、Cd、Pb、Cu 标准储备液适量,用 2% 硝酸溶液分别稀释成含 As、Cd、Pb 为 0、1、5、10、20 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$,含 Cu 为 0、50、100、200、500 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 系列浓度混合标准溶液。另精密量取 Hg 标准储备溶液适量,用 2% 硝酸溶液稀释成含 Hg 为 0、0.2、0.5、1、2、5 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的系列浓度混合标准溶液(使用前临时配制)。

2.3.2 内标溶液 精密量取浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Li、Sc、Ge、Rh、In、Tb、Lu、Bi 混合内标溶液适量,用 2% 硝酸溶液稀释成质量浓度为 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混合内标溶液(In 作为 Cd 的内标,Ge 作为 As 和 Cu 的内

标,Bi 作为 Pb 和 Hg 的内标)。

2.4 供试品溶液的制备

2.4.1 粉末供试品溶液 取各样品适量,粉碎后过 70 目筛,混匀。精密称取粉末供试品 0.5 g 于消解罐中,加入 7 mL 硝酸,加盖放置过夜,旋紧灌盖,按照“2.2”项下操作步骤进行消解,冷却取出缓慢打开灌盖排气,用少量水冲洗内盖,将消解罐进行赶酸,将消化液转移至 25 mL 量瓶中,用少量水洗涤内罐 3 次,合并洗涤液并定容至刻度,混匀。同时作空白试验。

2.4.2 干膏供试品溶液 精密称取样品各 10 g 置 250 mL 三角烧瓶中,加入 200 mL 去离子水,浸泡 30 min,煎煮 3 次,每次 30 min,用双层纱布趁热滤过,合并滤液,混匀,浓缩至干膏,恒重,称质量。精密称取干膏供试品 0.5 g 于消解罐中,同“2.4.1”项下操作。

2.5 检测限及线性关系考察

按“2.3.1”项下方法配制的合标准溶液,在

“2.1”项工作条件下测定各个质量浓度梯度的混合标准溶液,各质量浓度平行测定3次,并绘制标准曲线。在试验条件下,用样品空白溶液重复进样20

次,平行测定3次,计算标准偏差,按标准偏差3倍计算,并结合取样量求得各个元素的检测限。见表2。

表2 元素方法学考察

Tab.2 Method validation results

元素 (element)	回归方程 (regression equation)	r	检测限 (detection limit)/(mg · kg ⁻¹)	线性范围 (linear range)/(ng · mL ⁻¹)
As	$Y = 347X + 100$	1.000	0.005	0 ~ 20
Cd	$Y = 842X + 8.89$	1.000	0.001	0 ~ 20
Pb	$Y = 1.88 \times 10^{-3}X + 9.95 \times 10^{-4}$	1.000	0.002	0 ~ 20
Cu	$Y = 1.98 \times 10^2 X + 3.13 \times 10^2$	0.999 9	0.006	0 ~ 500
Hg	$Y = 3.76 \times 10^{-4}X + 2.76 \times 10^{-5}$	0.999 2	0.001	0 ~ 5

2.6 精密度试验

取同一浓度的As、Cd、Pb、Cu混合标准溶液和Hg标准溶液,连续进样6次,记录测定值,结果上述各元素测定值的RSD($n=6$)分别为1.9%,1.9%,0.50%,0.40%,1.4%,精密度良好。

2.8 重复性试验

按“2.4”项方法操作,平行制备6份样品溶液,同法测定,计算各元素含量,结果As、Cd、Pb、Cu、Hg平均含量($n=6$)分别为0.164、0.381 1、0.884 2、10.295 6、0.003 1 mg · kg⁻¹,RSD($n=6$)分别为2.9%,2.1%,0.80%,0.60%,3.0%。

2.9 回收率的测定

精密称取标准物质柑橘叶[GBW10020(GSB-11)]约0.05、0.5 g,按“2.4”项方法操作,并进行6次平行试验,测定含量并计算回收率。结果As、Cd、Pb、Cu和Hg平均回收率($n=6$)分别为98.7%、99.8%、95.2%、94.1%、103.1%,RSD分别为2.8%、2.1%、2.8%、2.3%、2.9%。

2.10 样品含量的测定

按“2.1”项下条件,对不同产区的茉莉花粉末和干膏中5种重金属及有害元素进行含量测定,每份供试品平行测定3次。水煎剂是中医传统剂型,中医临床应用以水煎汤液形式服用,故以干膏来表达汤液,分析茉莉花中5种重金属及有害元素溶出率。本文中干膏由10 g茉莉花粉末水煎液浓缩所得。(①样品所含各重金属总量=质量浓度×样品质量;②汤液重金属溶出率=汤液重金属总量/所用粉末重金属总量)。结果见表2、3。

2.11 数据统计与分析^[8-12]

2.11.1 聚类分析 采用SPSS25分析软件对不同产区43批次的茉莉花粉末的重金属及有害元素含量测定结果进行聚类分析。采用组间连接聚类方法,重金属及有害元素含量作为聚类变量,结果当欧氏距离为15时,43批次药材聚为二类,第Ⅰ类为2~15、17~34、36~43,第Ⅱ类为1、16、35。分析结果显示不同产区不同批次的茉莉花基本聚为一类,由此可看出,重金属及有害元素富集的影响因素较多,土壤类型、地质背景、水质、大气污染等产区环境均会影响重金属及有害元素的富集能力,不同产区如具有相似环境,重金属及有害元素的富集能力相当,并聚为同类。

2.11.2 3类数据的均数和标准差 采用SPSS25分析软件分别计算2种聚类重金属元素的均数和标准差。结果As、Cd、Pb、Cu和Hg的均数和标准差($\bar{x} \pm s$)分别为第Ⅰ类:0.09 ± 0.02、0.42 ± 0.07、0.12 ± 0.04、6.65 ± 1.55、0.01 ± 0.04;第Ⅱ类:0.12 ± 0.04、0.4 ± 0.04、0.74 ± 0.16、7.31 ± 2.72、0.01 ± 0.01。2种聚类中Pb元素含量:第Ⅰ类 < 第Ⅱ类, $F = 436.317, P < 0.001$,差异具有显著性意义。As、Cd、Cu和Hg元素含量均无显著性差异。

2.11.3 粉末和干膏中重金属元素含量 对不同产区43批次的茉莉花粉末和干膏的重金属及有害元素含量进行统计学分析,结果表明:不同产区茉莉花粉末和干膏中各重金属及有害元素含量大小均为Cu、Cd、Pb、As、Hg,粉末和干膏中Cu元素含量均大于其他元素。见表5。

表3 粉末和干膏中重金属及有害元素的含量测定结果 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n=3$)

Tab.3 Determination of heavy metal and harmful elements in powder and dry paste

样品编号 (No.)	As		Pb		Cu		Hg	
	粉末 (powder)	干膏 (dry paste)	粉末 (powder)	干膏 (dry paste)	粉末 (powder)	干膏 (dry paste)	粉末 (powder)	干膏 (dry paste)
1	0.162 7	0.242 1	0.893 6	1.380 6	10.439 1	9.917 3	0.002 7	0.003 2
2	0.106 2	0.246 9	0.144 8	0.223 7	6.839 2	7.047 5	0.004 1	0.004 3
3	0.116 8	0.252 1	0.099 6	0.199 3	7.728 7	10.065	0.000 4	0
4	0.114 6	0.214 3	0.135 8	0.195 2	7.590 4	7.738 3	0	0
5	0.115 9	0.172 4	0.102 2	0.179 9	8.967 9	4.497	0.003 2	0.001 5
6	0.092 8	0.074	0.141 6	0.079 9	5.771 2	2.248 4	0.013 6	0.008 1
7	0.092 7	0.211	0.066	0.057	7.547 3	7.472 2	0.008	0.008 1
8	0.067 4	0.051 9	0.068	0.049 9	6.551 3	2.528 1	0.007 2	0.001 3
9	0.115 6	0.161 9	0.140 3	0.120 8	7.376 8	3.667 2	0.000 9	0.000 5
10	0.071 7	0.077 5	0.082 2	0.066 6	5.557 2	3.519 9	0.008 9	0
11	0.089 1	0.119 7	0.118 5	0.132 5	5.632 4	3.093 8	0	0
12	0.081 8	0.151 4	0.197 4	0.165 8	5.831 9	3.345 8	0	0
13	0.068 9	0.148 2	0.085	0.157 5	6.318 8	4.235 3	0	0
14	0.098 2	0.114	0.175 4	0.135 6	5.902 2	2.922 9	0.008 6	0.006 9
15	0.095 9	0.168	0.132	0.138 4	6.195 7	3.890 1	0	0
16	0.090 3	0.132	0.582 2	0.417 4	5.973 3	3.066 2	0.016 4	0.008 8
17	0.093 6	0.146 1	0.093	0.075 8	5.980 2	2.438 3	0.007 5	0
18	0.128 2	0.176 7	0.154	0.159 4	5.965 8	3.624	0.001 3	0
19	0.088 8	0.181 3	0.099 5	0.126 7	7.112 2	4.687 9	0	0
20	0.068 9	0.077	0.083 8	0.087 2	6.076	3.660 6	0	0
21	0.105 8	0.145 5	0.143 5	0.143 3	6.241 9	3.115 4	0	0
22	0.075 3	0.097 4	0.184	0.189 2	6.933 9	4.726 7	0.006	0
23	0.073 2	0.068 2	0.095 3	0.062 9	5.634 7	1.834	0.015 8	0.006 8
24	0.072 5	0.074	0.132 3	0.154	5.446 9	1.940 1	0	0
25	0.108 2	0.144	0.097 3	0.090 7	6.569 2	4.121 3	0.046 9	0.019 5
26	0.105 4	0.086 4	0.044 9	0.029 8	5.737 3	2.547 2	0	0
27	0.104 8	0.074	0.128 4	0.083 3	5.807 4	1.704 5	0	0
28	0.072 1	0.102 7	0.155 3	0.129 6	5.636 3	2.582 7	0.005 8	0.001 5
29	0.083 9	0.067 9	0.168 3	0.096 8	5.837 2	2.142 8	0.036 3	0.011 4
30	0.100 4	0.177 5	0.115	0.161 9	7.117 8	3.967 3	0	0
31	0.112 6	0.171 5	0.102 6	0.116 8	14.439	7.681 7	0.006	0.006 7
32	0.077 7	0.090 7	0.123 7	0.121 9	5.536	2.320 6	0	0
33	0.092 4	0.099 9	0.117 2	0.077 7	5.736 2	2.729 9	0.019 8	0.006 9
34	0.080 7	0.068 3	0.145 1	0.113 1	5.812 7	2.135 5	0.004 1	0
35	0.098 8	0.081 9	0.739 9	0.309 1	5.523 4	2.231 9	0	0
36	0.098 5	0.087 2	0.121 8	0.120 3	5.893	1.792 6	0.206 5	0.047
37	0.106 9	0.076 8	0.089 8	0.062 2	5.659 5	1.999	0.004 4	0
38	0.089 5	0.098 7	0.207 6	0.149 9	6.149 4	2.573	0	0
39	0.104 4	0.092 2	0.075 2	0.053 8	6.121 7	1.911 4	0.007	0.000 8
40	0.078 4	0.070 3	0.101 1	0.051 7	7.406 4	2.050 5	0.014 1	0.006 7
41	0.072 5	0.144 4	0.132 1	0.147 2	7.329 3	4.774 9	0.004 9	0.004 1
42	0.074	0.113 4	0.139 8	0.135 9	9.024 1	3.421 5	0.084 3	0.045 1
43	0.089 2	0.185 4	0.102 8	0.130 1	6.989 8	4.807 7	0.002 1	0.000 9

表 4 汤液中重金属及有害溶出率 (% , n = 3)

Tab. 4 Dissolution rate of heavy metal and harmful elements in decoction

样品编号 (No.)	As	Cd	Pb	Cu	Hg	样品编号 (No.)	As	Cd	Pb	Cu	Hg
1	45.32	16.29	47.07	28.94	35.31	23	41.06	12.04	28.92	14.27	18.71
2	63.97	26.51	42.53	28.37	28.44	24	49.02	15.91	55.87	17.09	0
3	68.98	18.41	63.96	41.63	0	25	49.7	11.89	34.85	23.44	15.56
4	56.95	12.77	43.75	31.04	0	26	55.27	31.47	44.59	29.91	0
5	46.58	18.04	55.11	15.71	14.79	27	52.13	20.78	47.97	21.68	0
6	54.32	21.57	38.04	26.26	40.46	28	63.01	17.42	36.91	20.26	11.19
7	67.94	14.71	25.82	29.57	29.98	29	53.75	22.96	37.74	24.08	20.58
8	53.98	11.51	50.74	26.64	13.68	30	60.97	21.83	48.57	19.23	0
9	49.66	17.32	30.56	17.64	19.83	31	58.28	19.85	43.61	20.37	43.02
10	51.91	25.99	38.66	30.19	0	32	57.37	17.86	48.51	20.63	0
11	58.97	19.87	49.06	24.11	0	33	53.16	21.07	32.15	23.1	16.9
12	68.58	18.77	31.13	21.25	0	34	56.95	21.59	52.46	24.75	0
13	67.18	19.1	57.93	20.94	0	35	52.82	21.69	26.53	25.66	0
14	49.89	14	33.18	21.25	34.31	36	48.39	18.63	53.94	16.62	12.48
15	46.81	10.8	27.97	16.75	0	37	42.11	22.54	40.56	20.71	0
16	53.09	9.5	25.79	18.46	21.11	38	56.81	21.73	37.59	21.79	0
17	59.7	14.84	31.21	15.59	0	39	54.82	17.88	44.16	19.21	7.24
18	42.17	9.11	31.69	18.57	0	40	54.77	20.79	30.94	16.75	29.88
19	57.78	18.73	36.05	18.66	0	41	48.97	8.11	27.35	15.97	20.95
20	46.52	15.64	42.79	24.78	0	42	50.68	17.67	32.14	12.53	17.68
21	37.96	11.24	27.51	13.73	0	43	52	16.64	31.66	17.2	10.71
22	35.67	10.65	28.34	18.79	0	均值(mean)	53.4	17.58	39.44	21.72	22.04

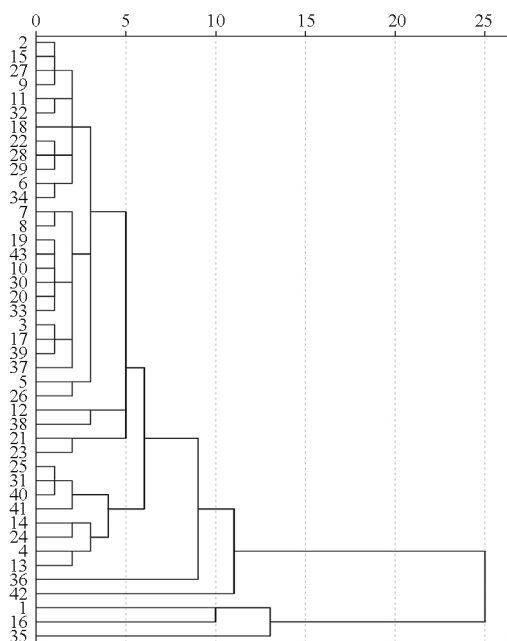


图 1 不同产区茉莉花聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis of jasmine from different areas

2.11.4 溶出率方差分析 从表 3、4 可看出,茉莉花中各重金属及有害元素溶出率介于 7.24% ~ 68.98%,由于溶出率的差异,Cu 元素在粉末中含量较高,但溶出率有限;As、Pb 元素在粉末中含量较低,溶出率高,煎煮后各重金属及有害元素溶出率大小顺序为 As、Pb、Hg、Cu、Cd。采用 SPSS25 分析软件计算各重金属及有害元素溶出率的均数与标准差,并进行方差分析,结果显示 $F = 183.066, P < 0.001$,差异具有统计学意义。见表 6。

2.11.5 S-N-K 法分析 采用 S-N-K 法对 43 批不同产区茉莉花中各重金属及有害元素溶出率进行分析,结果各元素溶出率中,除 Cu 与 Hg 无显著性差异外,其他元素互相之间均有显著性差异。见表 7。

2.11.6 不同产区茉莉花重金属及有害元素特征分析 为研究不同产区茉莉花重金属及有害元素特征,以粉末中 5 种重金属及有害元素作为因变量,

表 5 粉末和干膏重金属及有害元素含量分析 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Tab.5 Content analysis of heavy metal and harmful elements in powder and dry paste

样品 (sample)	质量分数(mass fraction)/(mg · kg ⁻¹)				
	As	Cd	Pb	Cu	Hg
粉末(powder)	0.09 ± 0.02	0.42 ± 0.07	0.16 ± 0.17	6.7 ± 2.24	0.01 ± 0.03
干膏(dry paste)	0.13 ± 0.05	0.18 ± 0.08	0.16 ± 0.2	3.79 ± 2.1	0 ± 0.01

表 6 干膏中重金属及有害元素溶出率方差分析 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Tab.6 Variance analysis of heavy metal and harmful elements leaching rate in dry paste

元素 (element)	个案数 (number of cases)	溶出率 (dissolution rate)/%	F	P
As	43	53.4 ± 7.85	183.066	<0.001
Cd	43	17.58 ± 5.01		
Pb	43	39.44 ± 10.07		
Cu	43	21.72 ± 5.73		
Hg	43	22.04 ± 7		

表 7 干膏中重金属及有害元素溶出率 S-N-K 法比较 ($\alpha = 0.05$)

Tab.7 Comparison of dissolution rate of heavy metals and harmful elements in dry paste by S-N-K method

元素 (element)	个案数 (number of cases)	1	2	3	4
Cd	43	17.575			
Cu	43		21.724		
Hg	43		22.04		
Pb	43			39.44	
As	43				53.395
P		1	0.842	1	1

不同产区作为自变量,采用 SIMCA14.1 分析软件进行正交偏最小二乘法-判别分析(OPLS-DA),结果自变量拟合指数 $R^2 X$ 为 0.583,预测指数 (Q^2) 为 0.504, R^2 和 Q^2 均大于 0.5,拟合结果可靠,模型稳定。

对模型进行置换验证(permutation, $n = 200$),结果 $R^2 Y = 0.0228$, $Q^2 = -0.0135$,模型中 R^2 在 Y 轴的截距小于 0.4, Q^2 在 Y 轴的截距小于 0.05,模型不存在过度拟合,可用于判别不同产区的茉莉花。再利用变量重要性投影值(variable importance projection, VIP)筛选影响茉莉花重金属及有害元素含量的标志性元素,以 $VIP > 1$ 为标准,结果表明 Pb、Cd 与 As 元素可能是影响茉莉花重金属及有害元素含量的标志性元素^[13]。见图 2~4。

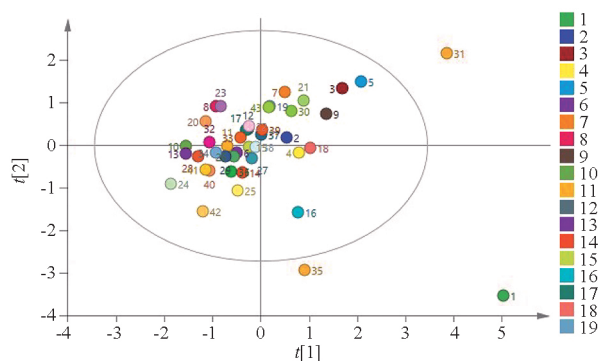


图 2 不同产区茉莉花重金属及有害元素含量 OPLS-DA 图(样品编号:1~43)

Fig.2 OPLS-DA plot of heavy metal and harmful elements content in Jasmine from 43 producing areas (No. 1~43)

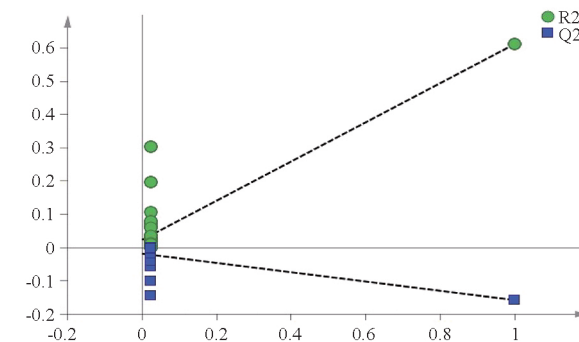


图 3 不同产区茉莉花重金属及有害元素含量置换检验图

Fig.3 Replacement test diagram of heavy metal and harmful elements content in Jasmine from 43 producing areas

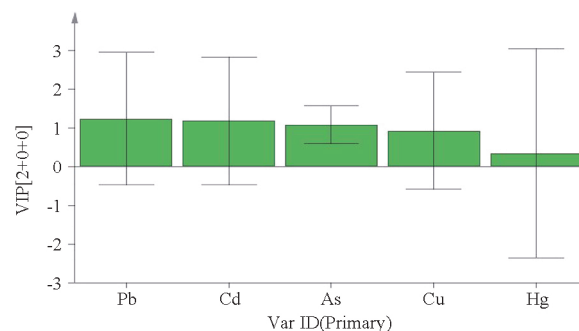


图 4 不同产区茉莉花重金属及有害元素含量 VIP 图

Fig.4 VIP plot of heavy metal and harmful elements content of Jasmine from 43 producing areas

2.12 风险评估^[14-21]

本研究通过危害识别、危害特征描述、暴露评估、风险特征描述步骤,对茉莉花进行风险评估。

2.12.1 危害识别、危害特征 采用适用于中药材使用特点的评估方法,采纳国际权威机构食品添加剂联合专家委员会(Joint Expert Committee on Food Additives, JECFA)建立的元素健康指导值(health-based guidance values, HBGV)[多用每日可接受摄入量(acceptable daily intake, ADI)、暂定每月可耐受摄入量(provisional tolerable monthly intake, PTMI)等表示],规定 Cd 的暂定 PTMI 为 $25 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Hg 的暂定每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)为 $4 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 的暂定每日可耐受摄入量(provisional maximum theoretical daily intake, PMTDI)为 $500 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 由于 JECFA 已于 2010 年撤销 Pb、As 健康指导值,现尚未建立新的健康指导值,故 Pb 参考 WHO 提出的成年人心血管效应收缩压基准剂量下限值(benchmark dose lower 01, BMDL01)为每日 $1.3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 参考无机砷诱发人类致癌发病率增加 0.5% 的基准剂量可信下限值(Benchmark dose lower 0.5, BMDL 0.5)为每日 $3.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.12.2 日暴露量 日暴露量(exposure, Exp)计算公式为 $\text{Exp} = \text{EF} \times \text{Ed} \times \text{IR} \times C \times t / \text{AT} / W$, 其中 EF 为 90 d, Ed 为 20 年, IR 为 500 g, C 为茉莉花粉中各重金属及有害元素含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), t 为茉莉花汤液中各重金属及有害元素溶出率, AT 为 25 550(平均寿命天数), W 为人体平均体质量,以 63 kg 计。

2.12.3 危害指数 危害指数(hazard index, HI)适用于有健康指导值的 Cd、Hg、Cu 元素,计算公式为: $\text{HI} = \text{Exp} \times 10 / \text{HBGV}$, Exp 和 HBGV 单位均为 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 10 为安全因子, Cd 元素 $\text{HBGV} = \text{PTMI} / 30$, Hg 元素 $\text{HBGV} = \text{PTWI} / 7$, Cu 元素 $\text{HBGV} = \text{PMTDI}$ 。 $\text{HI} > 1$, 风险应予以关注; $\text{HI} \leq 1$, 不具备致癌风险。

2.12.4 暴露限值 暴露限值(margin of exposure, MOE)适用于未建立健康指导值的 As、Pb 元素,计算公式为 $\text{MOE} = \text{BMDL} / \text{Exp} / 10$, Exp 和 BMDL 单位均为 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, BMDL 为 As、Pb 元素基准剂量下限值, 10 为安全因子。 $\text{MOE} \leq 1$, 风险应予以关注; $\text{MOE} > 1$, 不具备致癌风险。

2.12.5 数据处理 按上述步骤,对 43 批茉莉花中 As、Cd、Pb、Cu 和 Hg 进行风险评估。风险评估

结果见表 8。

3 讨论与结论

近年来,随着健康观念的普及,人们对食品质量安全愈加重视,在药用植物使用上同样如此。由于植物的生长环境中或多或少地存在着有害重金属元素,又因其自身特性等因素,因此生长在自然环境中植物会吸收、积累一定数量的有害重金属^[22-24]。同时,随着社会工业化的发展,茉莉花产地的生态环境可能会遭到严重破坏,其安全性面临严重的挑战。大量研究证明,重金属对人体的新陈代谢和正常的生理作用造成明显的损害,并抑制人体正常生理作用的发挥,当食品或中药材中的重金属通过服用后进入机体内,人体的蛋白质、核酸等与重金属离子结合并反应后形成金属螯合物或配合物,会造成机体器官的损害,严重的可致癌变、畸形等^[25-30]。因此,对食品或中药中重金属元素进行控制已成为当前亟需解决的重要问题之一^[31]。

茉莉花作为广西主要经济作物之一,其广西种植面积位居全国前列,其产业链作为广西横市的支柱产业之一,质量控制显得尤为重要。2020 年版《中华人民共和国药典》规定,重金属及有害元素照 Pb、Cd、As、Hg、Cu 测定法(通则 2321 原子吸收分光光度法或电感耦合等离子体质谱法)测定, Pb 不得过 $5 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 不得过 $1 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 不得过 $2 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Hg 不得过 $0.2 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 不得过 $20 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。上述茉莉花粉及干膏重金属及有害元素含量均符合要求。风险评估显示广西横州市横州镇(批号 20200810)与福建省泉州市(批号 20230705)的 $\text{MOE}_{\text{Pb}} < 1$, 存在一定暴露风险,其余产地的危害指数 HI_{Cd} 、 HI_{Hg} 和 HI_{Cu} 均小于 1, 暴露限值 MOE_{As} 和 MOE_{Pb} 均大于 1, 造成人体健康危害的可能性较低。

43 批次茉莉花粉和干膏中各重金属及有害元素含量大小顺序均为 Cu、Cd、Pb、As、Hg, 粉末和干膏中 Cu 元素含量均大于其他金属元素,煎煮后各重金属元素溶出率大小顺序为 As、Pb、Cu、Cd、Hg, 方差分析表明差异具有统计学意义,研究结果表明,重金属元素含量由饮片到汤液的迁移未具有正相关性。

S-N-K 法分析结果表明,不同产区茉莉花中的重金属及有害元素溶出率中 Cu 与 Hg 无显著性差异,其他元素互相之间均有显著性差异,说明在茉莉花质量控制中 As、Pb 与 Cd 元素的含量需重点关注。

表 8 茉莉花中 5 种元素的日 Exp 和 MOE 及 HI
Tab. 8 Exp, MOE and HI of five elements in Jasmine

样品编号 (No.)	Exp/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)					MOE/HI				
	As	Pb	Cd	Cu	Hg	As(MOE)	Pb(MOE)	Cd(HI)	Cu(HI)	Hg(HI)
1	0.048 6	0.197 1	0.037 9	1.267 8	0.000 3	6.175 6	0.659 7	0.454 8	0.025 4	0.005 8
2	0.031 7	0.031 9	0.042 5	0.830 6	0.000 5	9.461 2	4.071 2	0.510 5	0.016 6	0.008 8
3	0.034 9	0.022	0.052 8	0.938 6	0	8.602 5	5.918 8	0.633 3	0.018 8	0.000 9
4	0.034 2	0.029 9	0.037 9	0.921 8	0	8.767 7	4.341 1	0.455 2	0.018 4	0
5	0.034 6	0.022 5	0.053 2	1.089 1	0.000 4	8.669 3	5.768 3	0.638 6	0.021 8	0.006 9
6	0.027 7	0.031 2	0.039 1	0.700 9	0.001 7	10.827 3	4.163 2	0.468 9	0.014	0.029 3
7	0.027 7	0.014 6	0.048 9	0.916 6	0.001	10.839	8.932 1	0.586 8	0.018 3	0.017 3
8	0.020 1	0.015	0.044 1	0.795 6	0.000 9	14.907 6	8.669 3	0.529 5	0.015 9	0.015 5
9	0.034 5	0.030 9	0.048 3	0.895 9	0.000 1	8.691 8	4.201 8	0.579 2	0.017 9	0.001 9
10	0.021 4	0.018 1	0.036 2	0.674 9	0.001 1	14.013 6	7.171 7	0.434 7	0.013 5	0.019 2
11	0.026 6	0.026 1	0.038 7	0.684	0	11.276 9	4.974 8	0.464 7	0.013 7	0
12	0.024 4	0.043 5	0.045 9	0.708 2	0	12.283 3	2.986 4	0.551	0.014 2	0
13	0.020 6	0.018 7	0.032 8	0.767 4	0	14.583 1	6.935 5	0.393 5	0.015 3	0
14	0.029 3	0.038 7	0.035 4	0.716 8	0.001 1	10.231 9	3.361	0.425 1	0.014 3	0.018 5
15	0.028 6	0.029 1	0.038 9	0.752 4	0	10.477 3	4.466	0.467	0.015	0
16	0.027	0.128 4	0.044	0.725 4	0.002	11.127 1	1.012 6	0.528 3	0.014 5	0.035 4
17	0.027 9	0.020 5	0.042 1	0.726 3	0.000 9	10.734 8	6.338 9	0.505 4	0.014 5	0.016 2
18	0.038 3	0.034	0.042 9	0.724 5	0.000 2	7.837 6	3.828	0.515 3	0.014 5	0.002 8
19	0.026 5	0.021 9	0.046 4	0.863 7	0	11.315	5.924 8	0.556 5	0.017 3	0
20	0.020 6	0.018 5	0.041 2	0.737 9	0	14.583 1	7.034 8	0.494 8	0.014 8	0
21	0.031 6	0.031 6	0.052 1	0.758	0	9.496 9	4.108 1	0.624 7	0.015 2	0
22	0.022 5	0.040 6	0.044 5	0.842 1	0.000 7	13.343 6	3.203 9	0.534 4	0.016 8	0.012 9
23	0.021 9	0.021	0.047 3	0.684 3	0.001 9	13.726 4	6.185 9	0.567 2	0.013 7	0.034 1
24	0.021 6	0.029 2	0.028 5	0.661 5	0	13.859	4.455 9	0.341 6	0.013 2	0
25	0.032 3	0.021 5	0.029 9	0.797 8	0.005 8	9.286 3	6.058 7	0.358 6	0.016	0.101 1
26	0.031 5	0.009 9	0.033 9	0.696 8	0	9.533	13.129 5	0.406 4	0.013 9	0
27	0.031 3	0.028 3	0.037 1	0.705 3	0	9.587 6	4.591 2	0.444 8	0.014 1	0
28	0.021 5	0.034 2	0.036 6	0.684 5	0.000 7	13.935 9	3.796	0.439 5	0.013 7	0.012 5
29	0.025 1	0.037 1	0.039 8	0.708 9	0.004 5	11.975 9	3.502 8	0.478 1	0.014 2	0.078 3
30	0.03	0.025 4	0.046 8	0.864 4	0	10.007 7	5.126 2	0.561 7	0.017 3	0
31	0.033 6	0.022 6	0.054 8	1.753 5	0.000 7	8.923 4	5.745 8	0.657 2	0.035 1	0.012 9
32	0.023 2	0.027 3	0.038 9	0.672 3	0	12.931 5	4.765 7	0.467 1	0.013 4	0
33	0.027 6	0.025 8	0.042 2	0.696 6	0.002 4	10.874 2	5.03	0.506 5	0.013 9	0.042 7
34	0.024 1	0.032	0.037 5	0.705 9	0.000 5	12.450 7	4.062 8	0.449 5	0.014 1	0.008 8
35	0.029 5	0.163 2	0.036 8	0.670 8	0	10.169 8	0.796 8	0.441 9	0.013 4	0
36	0.029 4	0.026 9	0.045 4	0.715 7	0.025 4	10.200 8	4.84	0.544 4	0.014 3	0.445 3
37	0.031 9	0.019 8	0.041 9	0.687 3	0.000 5	9.399 2	6.564 8	0.503 1	0.013 7	0.009 5
38	0.026 7	0.045 8	0.042 1	0.746 8	0	11.226 5	2.839 7	0.504 6	0.014 9	0
39	0.031 2	0.016 6	0.041 9	0.743 4	0.000 9	9.624 3	7.839 3	0.502 2	0.014 9	0.015 1
40	0.023 4	0.022 3	0.029 7	0.899 5	0.001 7	12.816	5.831	0.356 5	0.018	0.030 4
41	0.021 6	0.029 1	0.030 4	0.890 1	0.000 6	13.859	4.462 6	0.364 2	0.017 8	0.010 6
42	0.022 1	0.030 8	0.023 4	1.095 9	0.010 4	13.578	4.216 9	0.281	0.021 9	0.181 8
43	0.026 6	0.022 7	0.046 5	0.848 9	0.000 3	11.264 3	5.734 6	0.558 5	0.017	0.004 5
均值(mean)	0.028	0.036 2	0.040 9	0.813 2	0.001 6	11.104 1	5.061 6	0.490 4	0.016 3	0.027 4

VIP 技术基于偏最小二乘回归的筛选方法,对于某一自变量,其 VIP 值反映该变量本身对因变量的影响的同时,考虑其他自变量通过该变量间接对因变量的影响,一定程度上更符合实际。本文以 $VIP > 1$ 为标准筛选影响茉莉花重金属有及害元素含量的的标志性元素,结果表明 Pb、Cd 与 As 元素是可能影响茉莉花重金属有及害元素含量的标志性元素。该结果与 S - N - K 法分析结果基本一致。

茉莉花在日常生活中主要以浸泡或水煎煮后服用,因此,本文首次对不同产地的茉莉花粉末、水煎液的重金属有及害元素含量及其溶出率进行研究,分析不同产地茉莉花中 5 种重金属有及害元素含量由饮片到汤液的迁移变化,研究重金属有及害元素含量与道地性的相关性,筛选影响其质量的标志性重金属有及害元素,并进行风险评估。本文研究结果对全面客观评价茉莉花质量,制定其重金属有及害元素限量标准、种植区的选择、资源保护、人工育种等方面均具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 邱长玉. 茉莉花遗传多样性及亲缘关系的 ISSR 分析[D]. 南宁:广西大学, 2008
QIU CY. Studies on the Genetic Diversity and Relationship of *Jasminum sambac*(L.) Aiton Cultivars by ISSR Analysis[D]. Nanjing: Guangxi University, 2008
- [2] 俞轩, 刘宴秀, 陶劲强, 等. 茉莉花活性成分分析及提取技术研究进展[J]. 化工技术与开发, 2018, 47(7):29
YU X, LIU YX, TAO JQ, et al. Research progress on active ingredients and extraction techniques of jasmine[J]. Technol Devel Chem Ind, 2018, 47(7): 29
- [3] 刘志平, 汤希雁, 陈方胜. 茉莉花香精油的提取与应用研究[J]. 化工时刊, 2019, 33(9):19
LIU ZP, TANG XY, CHEN FS. Extraction and application of essential oil from Jasmine flower[J]. Chem Ind Times, 2019, 33(9):19
- [4] 梅宇, 梁晓. 2019 中国茉莉花茶产销形势分析报告[J]. 茶世界, 2019(9): 10
MEI Y, LIANG X. 2019 China Jasmine tea production and marketing situation analysis report [J]. Tea World, 2019(9): 10
- [5] 王超英, 蓝长波, 许蓉蓉, 等. 广西产茉莉花重金属含量及有机氯农药残留量分析[J]. 广西医学, 2013, 35(4): 488
WANG CY, LAN CB, XU RR, et al. Analysis of heavy metal content and organochlorine pesticide residues in Guangxi Jasmine [J]. Guangxi Med, 2013, 35(4): 488
- [6] 朱丽霞, 林逸涵, 陆鑫眉, 等. 茉莉花对四种重金属污染土壤的抗性和富集特性研究[J]. 福建热作科技, 2013, 35(4): 17
ZHU LX, LIN YH, LU LM, et al. Study on resistance and enrichment characteristics of Jasmine to soil contaminated by four kinds of heavy metals[J]. Fujian Sci Technol Trop Crops, 2013, 35(4): 17
- [7] 周浩, 何金祥, 郭伦发, 等. 广西横县无公害茉莉花茶园环境质量分析研究[J]. 广西农业科学, 2009, 40(7): 869
ZHOU H, HE JX, GUO LF, et al. Environmental quality evaluation of pollution-free Jasmine scented tea plantations in Hengxian, Guangxi[J]. Guangxi Agric Sci, 2009, 40(7): 869
- [8] 廖婉, 高天慧, 林美斯, 等. 姜黄属中药重金属元素与道地性的相关性研究[J]. 中草药, 2018, 49(12): 2833
LIAO W, GAO TH, LIN MS, et al. Correlation between heavy metal elements in Curcuma herbs and their genuineness[J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2018, 49(12): 2833
- [9] 万莉, 郭娅, 向琴, 等. 夏枯草中 7 种重金属元素的测定及污染等级分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3278
WAN L, GUO Y, XIANG Q, et al. Determination and pollution grade analysis of 7 kinds of heavy metal elements in *Prunella vulgaris* L. [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(10): 3278
- [10] 阳文武, 王巍, 万莉, 等. 党参中 7 种重金属及有害元素的污染评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 5954
YANG WW, WANG W, WAN L, et al. Pollution assessment of 7 kinds of heavy metals and harmful elements in *Codonopsis pilosula* [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(15): 5954
- [11] 刘静, 李湘利, 宋子艺, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定小麦粉 13 种重金属元素[J]. 食品工业科技, 2020, 41(20): 241
LIU J, LI XL, SONG ZY, et al. Determination of 13 kinds of heavy metal elements in wheat flours by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(20): 241
- [12] 庞小莲, 陈婷婷, 刘兰, 等. ICP-MS 法测定药食同源性食物中的重金属及有害元素[J]. 食品工业科技, 2019, 40(10): 280
PANG XL, CHEN TT, LIU L, et al. Determination of heavy metals and harmful elements in medicine food homologous food by ICP-MS[J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(10): 280
- [13] 张政, 冯国双. 变量投影重要性分析在自变量筛选中的应用[J]. 现代预防医学, 2012, 39(22): 5813
ZHANG Z, FENG GS. Application of variable importance for projection in the variables selection[J]. Mod Prev Med, 2012, 39(22): 5813
- [14] 左甜甜, 王莹, 张磊, 等. 中药中外源性有害残留物安全风险评估技术指导原则[J]. 药物分析杂志, 2019, 39(10):1902
ZUO TT, WANG Y, ZHANG L, et al. Guideline of risk assessment of exogenous harmful residues in traditional Chinese medicines[J]. Chin J Pharm Anal, 2019, 39(10):1902
- [15] BORCHERS A, PIELER T. Programming pluripotent precursor

- cells derived from *Xenopus embryos* to generate specific tissues and organs[J]. *Genes (Basel)*, 2010, 1(3): 413
- [16] JI Y, WU P, ZHANG J, *et al.* Heavy metal accumulation, risk assessment and integrated biomarker responses of local vegetables: a case study along the Le'an river[J]. *Chemosphere*, 2018, 199: 361
- [17] MA Q, ZHU YT, LI YD, *et al.* Quantification of heavy metals and health risk assessment in Sichuan pickle[J]. *J Food Sci*, 2022, 87(5): 2229
- [18] PAUL S, JOSEPH D, MAJUMDAR M. Health risk assessment of macro, trace - elements and heavy metal in various indian antidiabetic polyherbal formulations[J]. *Environ Sci Pol Res Int*, 2021, 28(30): 40929
- [19] QVARFORTH A, LUNDGREN M, RODUSHKIN I, *et al.* Future food contaminants: an assessment of the plant uptake of technology - critical elements versus traditional metal contaminants[J]. *Environ Int*, 2022, 169: 107504
- [20] XU D, SHEN Z, DOU C, *et al.* Effects of soil properties on heavy metal bioavailability and accumulation in crop grains under different farmland use patterns[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 9211
- [21] YAN M, NIU C, LI X, *et al.* Heavy metal levels in milk and dairy products and health risk assessment: a systematic review of studies in China[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 851(Pt 1): 158161
- [22] BERMUDEZ GM, JASAN R, PLA R, *et al.* Heavy metal and trace element concentrations in wheat grains; assessment of potential non - carcinogenic health hazard through their consumption [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 193: 264
- [23] CLEMENS S, MA JF. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2016, 67: 489
- [24] EBRAHIM AM, ELTAYEB MH, KHALID H, *et al.* Study on selected trace elements and heavy metals in some popular medicinal plants from Sudan[J]. *J Nat Med*, 2012, 66(4): 671
- [25] 刘毅, 邱昌贵. 中药中重金属研究综述[J]. *微量元素与健康研究*, 2008, 25(4):56
- LIU Y, QIU CG. Review of heavy metals in traditional Chinese medicine[J]. *Studies Trace Elements Health*, 2008, 25(4):56
- [26] 罗晓健, 孙婷婷, 高丽丽, 等. 中药重金属研究概况[J]. *江西中医学院学报*, 2007, 19(6):88
- LIU XJ, SUN TT, GAO LL, *et al.* Survey of heavy metals in traditional Chinese medicine[J]. *J Jiangxi Univ Tradit Chin Med*, 2007, 19(6):88
- [27] FU ZS, S XI SH. The effects of heavy metals on human metabolism[J]. *Toxicol Mechan Methods*, 2020, 30(3): 167
- [28] BORCHERS A, PIELER T. Programming pluripotent precursor cells derived from *Xenopus embryos* to generate specific tissues and organs [J]. *Genes (Basel)*, 2010, 1(3): 413
- [29] RENU K, CHAKRABORTY R, MYAKALA H, *et al.* Molecular mechanism of heavy metals (lead, chromium, arsenic, mercury, nickel and cadmium) - induced hepatotoxicity - a review [J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129735
- [30] RUNHONG M, CHENG J, TANG F, *et al.* Heavy metals in bamboo shoots from southeastern China and risk assessment[J]. *Food Addit Contam Part B Surveill*, 2021, 14(4): 264
- [31] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险[J]. *环境科学*, 2021, 42(10): 4916
- YANG JZ, WANG ZL, GAO JW, *et al.* Accumulation and health risk of heavy metals in cereals, vegetables, and fruits of intensive plantations in Hainan province[J]. *Envir Sci*, 2021, 42(10): 4916

(本文于2023年4月7日收到)