

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241226004

引用格式: 江静, 梁盛斌, 蒋红芝, 等. 广西各产区龙眼肉中5种重金属及有害元素含量分析及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 154–161.

JIANG J, LIANG SB, JIANG HZ, *et al.* Residue analysis and risk assessment of 5 kinds of heavy metals and harmful elements in longan lour from various production areas in Guangxi [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 154–161. (in Chinese with English abstract).

# 广西各产区龙眼肉中5种重金属及有害元素含量分析及风险评估

江静<sup>1</sup>, 梁盛斌<sup>2</sup>, 蒋红芝<sup>1</sup>, 孙良广<sup>1</sup>, 伍国怡<sup>3</sup>, 梁少东<sup>3\*</sup>

(1. 广西农业职业技术大学食品药品工程学院, 南宁 530007; 2. 北海市供水有限责任公司, 北海 536000;  
3. 北海市公共检验检测中心, 北海 536000)

**摘要:** **目的** 建立电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)法同时测定广西不同产区龙眼肉中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu) 5种重金属及有害元素的含量, 并对其安全性进行评价。**方法** 采用微波消解-ICP-MS法分析测定龙眼肉中5种重金属及有害元素的含量, 污染情况评价采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法, 健康风险评估按照危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述4个步骤进行评估。**结果** 5种重金属及有害元素在一定含量范围内具有良好的线性关系( $r>0.999$ ), 回收率在97.5%~106.8%, 相对标准偏差为0.11%~2.52%, 表明该方法准确可靠。参照《中华人民共和国药典》(2020年版)中药材和饮片的重金属及有害元素的限量标准, 1个产区龙眼肉药材中的Pb超标, 不合格率为5%; 安全性评价研究表明, 3个产区龙眼肉样品受到不同程度的重金属及有害元素污染, 其余17个产区安全; 健康风险评估研究表明, 少部分产区龙眼肉中的Pb和As暴露会对人体造成一定的非致癌健康风险, 需要引起关注。**结论** 本研究模型可对龙眼肉药材中的重金属及有害元素健康风险作出有效评估, 为制定龙眼肉中重金属的限量标准提供参考数据, 并为建立龙眼肉安全评价体系提供科学依据。

**关键词:** 龙眼肉; 风险评估; 重金属及有害元素; 安全性; 电感耦合等离子体质谱法

## Residue analysis and risk assessment of 5 kinds of heavy metals and harmful elements in longan lour from various production areas in Guangxi

JIANG Jing<sup>1</sup>, LIANG Sheng-Bin<sup>2</sup>, JIANG Hong-Zhi<sup>1</sup>, SUN Liang-Guang<sup>1</sup>,  
WU Guo-Yi<sup>3</sup>, LIANG Shao-Dong<sup>3\*</sup>

(1. College of Food and Pharmaceutical Engineering, Guangxi Vocational University of Agriculture, Nanning 530007, China; 2. Beihai Tap Water Limited Liability Company, Beihai 536000, China; 3. Beihai Public Inspection and Testing Center, Beihai 536000, China)

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 广西农业科技自筹经费项目(Z2023116); 广西农业职业技术大学科学研究与技术开发项目(YKJ2236)

第一作者: 江静(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品、药品质量与安全。E-mail: 825523917@qq.com

\*通信作者: 梁少东(1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向是食品、药品质量与安全。E-mail: 34697171@qq.com

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for simultaneous determination of 5 kinds of heavy metals [lead (Pb), cadmium (Cd), arsenic (As), mercury (Hg), copper (Cu)] and harmful elements in longan lour by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), and to evaluate the safety of longan lour. **Methods** Microwave digestion-ICP-MS was used to determine 5 kinds of heavy metals and harmful elements in longan lour, single factor pollution index method and Nemero comprehensive pollution index method were used for pollution assessment, the health risk assessment was carried out according to 4 steps: Hazard identification, hazard characterization, exposure assessment and risk characterization. **Results** The 5 kinds of elements had a good linear relationship ( $r>0.999$ ) within a certain content range, the recovery rates were 97.5%–106.8%, and relative standard deviations were 0.11%–2.52%, indicating that the method was accurate and reliable. According to the heavy metal and harmful element limit standards for medicinal materials and decoction pieces in the *Pharmacopoeia of the People's Republic of China* (2020 edition), longan lour from one producing region exceeded the Pb limit, with a non-compliance rate of 5%. Safety evaluation studies revealed that samples from 3 producing regions were contaminated with heavy metals and harmful elements to varying degrees, while those from the remaining 17 regions were safe. Health risk assessment studies indicated that Pb and As exposure from longan lour in a small number of producing regions might pose certain non-carcinogenic health risks to humans, warranting attention. **Conclusion** The model established in this study effectively assesses the health risks of heavy metals and harmful elements in longan lour, providing reference data for formulating limit standards for heavy metals in longan lour and offering a scientific basis for establishing a safety evaluation system for this medicinal material.

**KEY WORDS:** longan lour; risk assessment; heavy metals and harmful elements; safety; inductively coupled plasma-mass spectrometry

## 0 引言

龙眼肉, 俗名“桂圆”, 始载于《神农本草经》<sup>[1-2]</sup>, 是无患子科植物龙眼(*Dimocarpus longan* Lour.)的假种皮<sup>[3]</sup>。我国龙眼主要产于海南、广东、广西、福建、四川和云南等地区<sup>[4]</sup>。现代医学研究表明, 龙眼肉药材中含有糖类、氨基酸及微量元素等化学成分, 具有抗氧化应激、抗菌、抗衰老、抗肿瘤、影响内分泌和增强免疫等药理作用<sup>[5]</sup>。

近年来, 随着中医药在世界范围的广泛应用, 中药材安全问题也引起了全球的重点关注, 外源性污染<sup>[6]</sup>, 尤其重金属<sup>[7-10]</sup>污染和农药残留<sup>[11-15]</sup>, 是目前制约我国中药材进入国际市场最主要的风险因素, 严重影响了我国中药材的发展<sup>[16-17]</sup>。

龙眼肉是多年生药用植物, 随着生态环境的污染以及加工炮制环节缺乏有效监管, 其中重金属污染的风险也逐渐增大。目前, 不少学者对龙眼肉的化学成分、药理作用、真菌毒素等方面做了深入研究<sup>[18-21]</sup>, 然而对龙眼肉中重金属及有害元素含量的研究则较少。因此, 本研究拟采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)分析龙眼肉药材中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu) 5 种重金属及有害元素的含量, 并通过计算内梅罗综合污染指数评价其安全性, 结合暴露限值(margin of exposure, MOE)法和危害指数(hazard index, HI)法评价其健康风险, 为龙眼肉药材安全

限量的制定、质量控制提供科学依据, 以期促进中药产业的健康、可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 样品采集及处理

20 份样品采集于广西贵港、玉林、博白、南宁、桂林、来宾、北海等地, 经蒋红芝教授鉴定为无患子科植物龙眼(*Dimocarpus longan* Lour.)的假种皮, 详见表 1。样品置于 4 °C 保存备用。

#### 1.1.2 试剂

ICP-MS Internal Std 内标溶液(批号 54-124CRY2, 100 μg/mL, 美国 Agilent 公司); Cu 元素标准溶液(批号 19041)、Hg 元素标准溶液(批号 21073)(1000 μg/mL, 中国计量科学研究院); 多元素标准溶液(Pb、As、Cd)(唯一性标识 23D20401, 质量浓度 1000 μg/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 硝酸(优级纯, 美国 MERCK 公司); 水为娃哈哈纯净水。

### 1.2 仪器

MS 204 型十万分之一电子天平(瑞士梅特勒-托利多公司); G1879B 冷水循环机、Agilent ICP-MS 7700X 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司); BHW 赶酸仪(上海博通化学科技有限公司); MARS6 微波消解仪(美国 CEM 公司)。

表 1 龙眼肉样品信息  
Table 1 Informations of longan lour

编号	产地
S1	广西壮族自治区贵港市
S2	广西壮族自治区来宾市
S3	广西壮族自治区桂林市
S4	广西壮族自治区桂林市
S5	广西壮族自治区宾阳市
S6	广西壮族自治区宾阳市
S7	广西壮族自治区贺州市
S8	广西壮族自治区贺州市
S9	广西壮族自治区玉林市
S10	广西壮族自治区玉林市
S11	广西壮族自治区玉林市
S12	广西壮族自治区南宁市
S13	广西壮族自治区南宁市
S14	广西壮族自治区博白县
S15	广西壮族自治区博白县
S16	广西壮族自治区博白县
S17	广西壮族自治区博白县
S19	广西壮族自治区北海市
S20	广西壮族自治区北海市

### 1.3 溶液配制

#### 1.3.1 混合标准储备溶液的配制

分别精密量取上述标准溶液适量,用 2%硝酸溶液稀释制成含汞和铜的质量浓度分别为 0.1 μg/mL 和 10 μg/mL,含 Pb、Cd、As 的质量浓度为 1 μg/mL 的混合标准储备液。

#### 1.3.2 混合标准使用溶液

精密量取上述混合标准储备溶液适量,用 2%硝酸溶液稀释制成含 Hg 的质量浓度为 0、0.1、0.5、1.0、2.0 ng/mL,含铜的质量浓度为 0、50、100、200、500 ng/mL,含 Pb、Cd、As 的质量浓度为 0、1、5、10、20 ng/mL 的系列浓度混合溶液。

#### 1.3.3 内标溶液的配制

精密量取锗(Ge)、铟(Im)、铋(Bi)混合内标溶液适量,用 2%硝酸溶液稀释制成质量浓度为 0.5 μg/mL 的内标溶液。

### 1.4 仪器条件

#### 1.4.1 ICP-MS 条件

采样深度: 62 mm; 雾化室温度: 2 °C; 萃取电压: -142 V; 积分时间: 0.3 s; 重复次数: 3 次; 射频功率: 1400 W; 调谐模式: He 模式。离子透镜 1、2 和 3 分别为 2.2、-23 和 -173.5 V; 等离子体气体、辅助气体、载气、稀释气体流速分别为 15、1、1 和 1 L/min。

#### 1.4.2 微波消解仪条件

本研究采用微波消解仪进行消解,微波消解仪条件见表 2。

表 2 微波消解程序  
Table 2 Program of microwave digestion

程序	升温时间/min	消解温度/min	保持时间/min
1	5	130	5
2	5	150	5
3	5	190	25

### 1.5 实验方法

精密称取样品 0.5 g 置于消解罐中,加入 7 mL 硝酸,加盖浸泡过夜后,置于微波消解仪中消解,消解条件见表 2。稍冷后取出,待消解液冷却至室温,用纯化水冲洗内盖,合并冲洗液。用赶酸仪将消解罐进行赶酸至罐内溶液至 1~2 mL。将消化液转移至 25 mL 容量瓶中,洗涤内罐,合并洗涤液,用纯化水定容至刻度,摇匀备用。同法制备空白溶液。

### 1.6 重金属污染评价

参照头花蓼<sup>[22]</sup>、37 种植物类药材<sup>[23]</sup>和 7 种药用植物<sup>[24]</sup>中重金属污染评价的方法,本研究拟采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对样品中的重金属及有害金属污染程度及综合污染程度进行评价<sup>[25-26]</sup>。单因子污染指数法可以衡量某种重金属因子的污染程度,内梅罗综合污染指数法可以评价重金属综合污染程度,是当前进行污染评价最常用的方法。

单因子污染指数计算如公式(1):

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为药材中重金属  $i$  的单因子污染指数;  $C_i$  为药材中重金属  $i$  的含量, mg/kg;  $S_i$  为重金属  $i$  的标准限值, mg/kg。  $S_i$  参照《中国药典》(2020 年版)限度值。

采用单因子污染指数评价某种金属的污染情况,若单因子污染指数大于 1,即为污染。

内梅罗综合指数计算如公式(2):

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{mean}})^2 + (P_{i\text{max}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{综}}$  为药材中重金属综合污染指数;  $P_{\text{max}}$  为药材中单项重金属单因子污染指数中最大值;  $P_{\text{mean}}$  为药材中各项重金属单因子污染指数的平均值。

根据综合污染指数对重金属污染进行评价,并对重金属污染情况划分等级,污染程度分级标准:  $P_{\text{综}} \leq 0.7$ , 安全(I);  $0.70 < P_{\text{综}} \leq 1.00$ , 警戒线(II);  $1.00 < P_{\text{综}} \leq 2.00$ , 轻度污染(III);  $2.00 < P_{\text{综}} \leq 3.00$ , 中度污染(IV);  $P_{\text{综}} > 3.00$ , 重度污染(V)。  $P_{\text{综}}$  越大,受污染程度越重。

### 1.7 健康风险评估

中药中外源性有害残留物的风险评估需符合中药使用、“医疗价值-残留物风险”等特点。本研究按照中药中

外源性有害残留物安全风险评估的基本程序: 危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述, 对龙眼肉药材中 5 种重金属及有害元素对人体的健康风险进行评估。

### 1.7.1 危害识别

世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单将 As 和 Cd 列为 1 类致癌物、Pb 为 2B 类致癌物、Hg 为 3 类致癌<sup>[27]</sup>, 摄入过量的 Cu 也会对人体健康造成危害<sup>[28]</sup>, 如损伤 DNA<sup>[29]</sup>。

### 1.7.2 危害特征描述

Cd、Cu、Hg 的健康指导值(health-based guidance values, HBGV)参照 2010 年第 73 次联合国粮农组织和世界卫生组织下的食品添加剂联合专家委员会会议世界卫生组织推荐经口摄入参考剂量。Cd 的暂定每月可耐受摄入量(provisional tolerable monthly intake, PTMI)值为 25  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; Cu 的每日最大容许摄入量(provisional maximum theoretical daily intake, PMTDI)值为 500  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; Hg 的暂定每周耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)值为 4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[30-31]</sup>。Pb 的 PTWI 值和 As 的 PTWI 值在 2010 年被世界卫生组织取消, Pb、As 的 HBGV 参照世界卫生组织提出的毒理效应终点, 确定 Pb、As 的 HBGV 分别为 1.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$  和 3.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[32]</sup>。

### 1.7.3 暴露评估

以日暴露量(daily exposure, Exp)对龙眼肉药材中 5 种重金属及有害元素进行暴露评估。

日暴露值计算如公式(3):

$$\text{Exp} = \frac{\text{EF} \times \text{Ed} \times \text{IR} \times \text{C} \times t}{\text{AT} \times W} \quad (3)$$

式中: EF 为暴露频率(exposure frequency), 以 90 d/每年计; Ed 为暴露年限(exposure duration), 以 20 年计; IR 为日摄入量(ingestion rate), IR 的 P95 分位值为 500 g; C 为样品中重金属及有害元素的测定值, mg/kg; t 为经过煎煮等方式提取后重金属及有害元素的转移率(transfer rate), Pb、Cd、As、Hg、Cu 的 t 值分别为 14%、14%、35%、24%、14%; AT 为平均寿命天数(averaging time), 取人类平均寿命 70 年, 以 25550 d 计; W 为人体质量(weight), 以 63 kg 计<sup>[23,25]</sup>。

### 1.7.4 风险特征描述

参照左甜甜等<sup>[25]</sup>建立的风险特征描述方法, 采用 HI 法对已确立健康指导值的重金属及有害元素(Cd、Cu、Hg)

进行风险特征描述; 采用 MOE 法对尚未确立健康指导值的重金属及有害元素(Pb、As)进行风险特征描述。

危害指数计算如公式(4):

$$\text{HI} = \frac{\text{Exp} \times 10}{\text{HBGV}} \quad (4)$$

暴露限值计算如公式(5):

$$\text{MOE} = \frac{\text{BMDL}}{\text{Exp} \times 10} \quad (5)$$

式中: Exp 为日暴露量,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; 10 为安全因子; HBGV 为重金属及有害元素的健康指导值,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。Cd、Hg 的 HBGV=PTWI/7; Cu 的 HBGV=PMTDI。BMDL 为重金属及有害元素的基准剂量下限值(benchmark dose lower),  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[25]</sup>。

若  $\text{HI} \leq 1$  或  $\text{MOE} > 1$ , 重金属及有害元素的健康风险较低, 可以忽视; 若  $\text{HI} > 1$  或  $\text{MOE} \leq 1$ , 重金属及有害元素的健康风险较高, 不可忽视。

## 1.8 数据处理

检测结果采用 Excel 2016 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 质量控制与保证

本研究在仪器自动调谐后进行分析, 采用内标法进行定量分析, 各待测元素在相应浓度范围内线性良好, 其相关系数均大于 0.999。取空白溶液连续进样 11 次, 以 3 倍信噪比(S/N)时对应的浓度为仪器检出限(limit of detection, LOD); 以 10 倍信噪比(S/N)时对应的浓度为仪器定量限(limit of quantitation, LOQ)。在样品中加入含量为 5  $\mu\text{g}$  的 Cu 标准品、0.25  $\mu\text{g}$  的 Pb、Cd、As 标准品和 0.025  $\mu\text{g}$  的 Hg 标准品进行基质加标回收, 平均回收率为 97.5%~106.8%, 相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)小于 2.52%, 表明方法的测定结果准确可靠, 结果见表 3、表 4。

### 2.2 样品中重金属的含量

本研究采集了广西不同产区(贵港、来宾、桂林、宾阳、玉林、南宁、博白、北海)的 20 份样品, 并对其重金属的含量进行检测, 每份样品平行测定 3 次, 结果见表 5。

表 3 各元素的线性曲线方程、相关系数、LODs 与 LOQs  
Table 3 Linear curve equations, correlation coefficients, LODs and LOQs of various elements

元素	回归方程	线性相关系数(r)	线性范围/(ng/mL)	LODs/(mg/kg)	LOQs/(mg/kg)
Hg	$Y=13236.7499X+2162.4567$	0.9990	0~2	0.0011	0.0039
Cu	$Y=3384.5440X+8782.2600$	1.0000	0~500	0.0045	0.0150
Pb	$Y=13169.4597X+1265.1667$	0.9997	0~20	0.0018	0.0060
Cd	$Y=738.2745X+8.8900$	0.9994	0~20	0.0003	0.0008
As	$Y=263.0906X+26.6667$	1.0000	0~20	0.0010	0.0033

表 4 各元素加标回收试验结果

Table 4 Results of spiked recovery tests for various elements

元素	加标量/ $\mu\text{g}$	平均回收率/%	RSDs/%
Hg	0.025	106.8	2.52
Cu	5	99.5	1.01
Pb	0.25	99.9	0.11
Cd	0.25	99.2	0.74
As	0.25	97.5	1.01

由表 5 可知, 龙眼肉药材中 Cu 含量最高, Pb 次之, Hg 基本未检出。Cu、Pb、As、Cd、Hg 5 种重金属质量分数分别为 4.8500~14.2519、0.0218~6.7621、0.0096~1.9834、0.0054~0.2605、0.0000~0.0040 mg/kg。根据《中国药典》(2020 年版)、WM/T2—2004《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》、ISO 18664:2015《中草药重金属限量国际标准》中重金属限度规定, 除 1 个样品的 Pb 含量超标, 其余 19 个样品中 5 种重金属及有害元素的含量均在规定范围内, 各标准限量规定见表 6。

表 5 20 批龙眼肉药材中 5 种重金属及有害金属元素的含量(mg/kg, n=3)

Table 5 Content of 5 kinds of heavy metals and harmful elements in 20 batches of longan lour (mg/kg, n=3)

编号	含量					总含量
	Cu	As	Cd	Pb	Hg	
S1	5.7253	0.0096	0.0054	0.0218	-	5.7622
S2	5.4054	0.1834	0.0117	0.1272	-	5.7278
S3	5.3745	0.5861	0.0231	0.6632	0.0012	6.6480
S4	6.3302	0.8153	0.1052	0.4447	-	7.6954
S5	4.9493	1.2380	0.1055	1.2531	-	7.5459
S6	6.3419	0.1111	0.0661	1.8439	-	8.3630
S7	6.1961	0.7029	0.0900	0.3452	-	7.3342
S8	5.1565	0.7096	0.1022	0.3961	-	6.3643
S9	5.6560	0.5433	0.1151	0.3833	-	6.6978
S10	6.4245	0.5093	0.1106	0.9162	-	7.9607
S11	11.0994	1.9834	0.1691	3.5557	-	16.8076
S12	7.0322	0.1682	0.0422	1.3661	-	8.6087
S13	6.1997	0.0571	0.0322	1.8548	-	8.1438
S14	6.1470	0.6176	0.1114	0.4728	-	7.3488
S15	13.5105	1.4905	0.2487	6.7621	-	22.0118
S16	6.1258	0.1835	0.0129	3.1993	0.0040	9.5255
S17	14.2519	1.4912	0.2605	3.5883	-	19.5918
S18	6.7798	0.0572	0.0288	0.9080	-	7.7738
S19	4.8500	1.5526	0.0171	1.0663	-	7.4860
S20	5.5290	0.0603	0.0627	0.1533	0.0033	5.8085
平均值	6.9543	0.6535	0.0860	1.4661	0.0004	9.1603

注: -表示无具体数据, 下同。

表 6 不同标准下各重金属元素限量

Table 6 Limits of heavy metal elements of different standards

标准	重金属限量/(mg/kg)					
	Cu	Cd	Hg	As	Pb	总量
《中国药典》(2020 年版)	20	0.3	0.2	2	5	-
ISO 18664:2015	-	2.0	3.0	4.0	10	-
WM/T2—2004	20	0.3	0.2	2	5	20

## 2.3 重金属污染情况

单因子污染指数和内梅罗综合污染指数通过样品中重金属含量及限量标准计算而得。药材中重金属限量标准参照《中国药典》(2020 年版)中相关规定。结果见表 7。本研究样品中单项重金属及有害金属污染程度结果为: 博白产区龙眼肉样品 S15 的 Pb 的  $P_i$  为 1.3524, 表明该产区存在 Pb 污染; 其余样品的 Cu、Hg、Pb、As、Cd 的  $P_i$  均  $\leq 1$ , 表明其他产区受到重金属污染程度较低。内梅罗综合污染指数计算结果显示: 玉林产区龙眼肉样品 S11 和博白产区龙眼肉样品 S17 的  $P_{综}$  分别为 0.8068、0.7499, 达到警戒线水平; 博白产区龙眼肉样品 S15 的  $P_{综}$  为 1.0835, 存在轻度污染; 其他产区的  $P_{综}$  小于 0.7, 为安全等级。综合污染程度结果表明大部分产区样品的重金属污染水平符合要求, 不会对人体健康造成威胁, 而博白和玉林产区存在一定程度的重金属污染。重金属污染主要来源于土壤污染、工业“三废”污染、农药肥料污染以及中药

表 7 龙眼肉药材中重金属及有害元素污染程度  
Table 7 Contamination degree of heavy metals and harmful elements in longan lour

编号	单因子污染指数( $P_i$ )					内梅罗综合污染指数 ( $P_{综}$ )	污染程度
	Cu	As	Cd	Pb	Hg		
S1	0.2863	0.0048	0.0181	0.0044	-	0.2072	I
S2	0.2703	0.0917	0.0391	0.0254	-	0.2004	I
S3	0.2687	0.2931	0.0768	0.1326	0.0062	0.2346	I
S4	0.3165	0.4077	0.3506	0.0889	-	0.3319	I
S5	0.2475	0.6190	0.3515	0.2506	-	0.4845	I
S6	0.3171	0.0556	0.2204	0.3688	-	0.2941	I
S7	0.3098	0.3515	0.3001	0.0690	-	0.2881	I
S8	0.2578	0.3548	0.3406	0.0792	-	0.2903	I
S9	0.2828	0.2717	0.3838	0.0767	-	0.307	I
S10	0.3212	0.2547	0.3687	0.1832	-	0.3056	I
S11	0.5550	0.9917	0.5637	0.7111	-	0.8068	II
S12	0.3516	0.0841	0.1407	0.2732	-	0.2761	I
S13	0.310	0.0286	0.1072	0.3710	-	0.2866	I
S14	0.3074	0.3088	0.3712	0.0946	-	0.3038	I
S15	0.6755	0.7453	0.8289	1.3524	-	1.0835	III
S16	0.3063	0.0917	0.043	0.6399	-	0.4785	I
S17	0.7126	0.7456	0.8683	0.7177	-	0.7499	II
S18	0.339	0.0286	0.0961	0.1816	-	0.2565	I
S19	0.2425	0.7763	0.0571	0.2133	-	0.5784	I
S20	0.2765	0.0301	0.2089	0.0307	-	0.2111	I

材储存和加工过程污染<sup>[33]</sup>。如长期不合理使用化肥、农药, 或者工业“三废”的不合理排放, 都会导致土壤中重金属超标, 从而增加龙眼肉重金属污染风险。此外, 在龙眼肉储存和加工、运输过程中, 如设备清洁不够彻底或者违规添加含重金属的添加剂, 也会增加重金属污染的风险。

### 2.4 重金属健康风险评估结果

本研究拟采用符合我国中药使用特点的重金属健康风险评估模型, 该模型结合权威机构发布的健康指导值、样品含量、Ed 等因子对样品中重金属的健康风险进

行评价。本研究的样品中 Cd、Cu、Hg 的 HI 的平均值由高到低依次为 0.0808、0.0109、0.0010, Pb、As 的 MOE 的平均值分别为 6.7205 和 15.0139, 对 HI 和 MOE 值贡献最高的分别为 Cd 和 Pb, 是主要风险因素。6 个产区样品中的 Pb 和 2 个产区样品中的 As 的暴露限值 MOE<1, 表明相应产区样品中的 Pb、As 会对人体健康造成一定危害, 应引起重点关注。大部分产区样品中的 Cd、Cu、Hg 的 HI 小于 1, Pb、As 的 MOE 大于 1, 表明大部分产区样品中的重金属的健康风险较低, 可以忽略。结果见表 8。

表 8 龙眼肉药材中 5 种重金属及有害元素的 Exp、HI 和 MOE  
Table 8 Exp, HI and MOE of 5 kinds of heavy metals and harmful elements in longan lour

编号	Exp( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )					HI			MOE	
	Cu	Cd	Hg	As	Pb	Cu	Cd	Hg	As	Pb
S1	0.4482	0.0004	-	0.0019	0.0017	0.0090	0.0051	-	159.3807	76.2008
S2	0.4231	0.0009	-	0.0359	0.0100	0.0085	0.0110	-	8.3596	13.0534
S3	0.4207	0.0018	0.0002	0.1147	0.0519	0.0084	0.0217	0.0029	2.6154	2.5043
S4	0.4955	0.0082	-	0.1596	0.0348	0.0099	0.0988	-	1.8803	3.7343
S5	0.3874	0.0083	-	0.2423	0.0981	0.0077	0.0991	-	1.2383	1.3253
S6	0.4964	0.0052	-	0.0217	0.1443	0.0099	0.0621	-	13.7970	0.9006
S7	0.4850	0.0070	-	0.1376	0.0270	0.0097	0.0846	-	2.1808	4.8116
S8	0.4036	0.0080	-	0.1389	0.0310	0.0081	0.0960	-	2.1604	4.1931
S9	0.4427	0.0090	-	0.1063	0.0300	0.0089	0.1082	-	2.8214	4.3333
S10	0.5029	0.0087	-	0.0997	0.0717	0.0101	0.1039	-	3.0099	1.8126
S11	0.8688	0.0132	-	0.3881	0.2783	0.0174	0.1589	-	0.7729	0.4671
S12	0.5505	0.0033	-	0.0329	0.1069	0.0110	0.0397	-	9.1161	1.2157
S13	0.4853	0.0025	-	0.0112	0.1452	0.0097	0.0302	-	26.8397	0.8954
S14	0.4812	0.0087	-	0.1209	0.0370	0.0096	0.1046	-	2.4823	3.5127
S15	1.0576	0.0195	-	0.2917	0.5293	0.0212	0.2336	-	1.0285	0.2456
S16	0.4795	0.0010	0.0005	0.0359	0.2504	0.0096	0.0121	0.0094	8.3559	0.5191
S17	1.1156	0.0204	-	0.2918	0.2809	0.0223	0.2447	-	1.0280	0.4628
S18	0.5307	0.0023	-	0.0112	0.0711	0.0106	0.0271	-	26.7926	1.8291
S19	0.3797	0.0013	-	0.3038	0.0835	0.0076	0.0161	-	0.9874	1.5576
S20	0.4328	0.0049	0.0004	0.0118	0.0120	0.0087	0.0589	0.0078	25.4317	10.8359

### 3 结 论

龙眼肉药材是《广西“十四五”中药材种植业高质量发展专项规划(2021—2025 年)》重点发展的名贵道地药材之一,同时也是广西中医药局公示的“桂十味”道地药材及区域特色药材品种。为探讨广西龙眼肉药材中重金属的污染状况,本研究以不同产区的 20 份龙眼肉作为样本,采用 ICP-MS 分析龙眼肉中的 5 种重金属及有害元素的含量。结果表明,不同产区龙眼肉中重金属元素含量各有差异,除 1 个产区的龙眼肉中的 Pb 超标外,其余产区的龙眼肉均符合《中国药典》(2020 年版)及 WM/T2—2004《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》中药材重金属限量的规定。

不同产区的龙眼肉中 As、Pb、Cd、Cu、Hg 5 种重金属及有害元素的  $P_i$  小于 0.7 的占比分别为 80%、85%、90%、95%、100%,  $P_{\text{总}}$  小于 0.7 的占比为 85%, Pb 和 As 的 MOE 值大于 1 的占比分别为 70%和 90%,表明大部分地区龙眼肉中的重金属不会对人体健康造成威胁,但是少部分产区龙眼肉受到轻度到中重金属污染,会对人体健康造成一定影响。中药材的种植过程和生长环境是其受重金属污染的主要来源<sup>[34]</sup>。建议龙眼种植基地应远离重工业污染区,避免水土污染导致的重金属富集;在种植过程中,科学合理规范使用农药,严禁滥用农药<sup>[35]</sup>;加大中药材种植技术研究投入,以科技创新助推中药材产业提质增效,开展中药材种植技术培训。

本研究建立龙眼肉药材中 Cu、As、Cd、Hg、Pb 5 种有害重金属的微波消解-ICP-MS 联合测定方法,并进行健康风险评估,为精准防治重金属污染问题提供了参考价值,也对中药材重金属安全限度标准的制定、药材质量体系的建立和中药材入药安全性的提高具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 蔡长河,唐小浪,张爱玉,等. 龙眼肉的食疗价值及其开发利用前景[J]. 食品科学, 2002, 23(8): 328–330.  
CAI CH, TANG XL, ZHANG AIY, *et al.* Therapeutic value of longan meat and its development and utilization prospect [J]. Food Science, 2002, 23(8): 328–330.
- [2] 肖培根. 新编中药志(第二卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.  
XIAO PG. Modern Chinese material medica (volume 2) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 2020 年版. 一部[M]. 北京: 中国医学出版社, 2020.  
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China Part I [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020.
- [4] 齐文娥,陈厚彬,彭朵芬,等. 中国龙眼产业发展现状、问题与对策建议[J]. 广东农业科学, 2016, 43(8): 169–174.  
QI WE, CHEN HB, PENG DF, *et al.* Present situation, problems and suggestions of the development of Chinese longan industry [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(8): 169–174.
- [5] 盛康美,王宏洁. 龙眼肉的化学成分与药理作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2010, 16(5): 236–238.  
TANG KM, WANG HJ. Advances in research of chemical constituents and pharmacological activities of *Arillus longan* [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2010, 16(5): 236–238.
- [6] 窦亚洁,刘慧,李晓萌,等. 中药中外源性有害物的残留现状及风险评估的研究进展[J]. 中草药, 2023, 54(2): 396–407.  
DOU YJ, LIU H, LI XM, *et al.* Research progress on residual status and risk assessment of exogenous hazardous substances in traditional Chinese medicine [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(2): 396–407.
- [7] 黎晓欣,路浚齐,李琼. 中药重金属及有害元素健康风险评估的研究进展[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(17): 4630–4636.  
LI XX, LU JQ, LI Q. Research progress in health risk assessment of heavy metals and harmful elements in traditional Chinese medicine [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 49(17): 4630–4636.
- [8] 郭愿生,左甜甜,陈安珍,等. 海洋中药中重金属及有害元素质量控制进展及未来发展方向[J]. 中国新药杂志, 2024, 33(9): 877–884.  
GUO YS, ZUO TT, CHEN ANZ, *et al.* Progress in quality control of heavy metals and harmful elements in marine traditional Chinese medicine and future development directions [J]. Chinese Journal of New Drugs, 2024, 33(9): 877–884.
- [9] 林校新,吴泽. 食品中重金属的健康风险评估研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 225–233.  
LIN XX, WU Z. Research progress on health risk assessment of heavy metals in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 225–233.
- [10] 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): 3276–3283.  
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]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(10): 3276–3283.
- [11] 王莹,芑汐,申明睿,等. 枸杞中农药最大残留限量标准及检测方法研究[J]. 中国药理学杂志, 2024, 59(16): 1453–1459.  
WANG Y, RUAN X, SHEN MR, *et al.* Research on pesticide residue detection methods and limit standards in *Lycium barbarum* L. [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2024, 59(16): 1453–1459.
- [12] 王嘉琦,金书含,高海云,等. QuEChERS-液相色谱-串联质谱法测定不同产地人参中 147 种农药残留[J]. 中草药, 2023, 54(13): 4662–4671.  
WANG JQ, JIN SH, GAO HY, *et al.* Determination of 147 pesticide residues in *Panax ginseng* from different producing areas by QuEChERS-liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(13): 4662–4671.
- [13] 杜玲玲,王小东,冯华,等. GC-MS/MS 测定 8 种中药材中 31 种农药残留[J]. 中成药, 2024, 46(5): 1734–1739.  
DU LL, WANG XD, FENG H, *et al.* Residues of 31 kinds of pesticides in 8 kinds of Chinese medicinal materials were determined by GC-MS/MS [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(5): 1734–1739.
- [14] 李雯婷,陈艳芳,杨新华,等. 三七中农药残留风险评估与农药残留限量标准转化的研究[J]. 中国药理学杂志, 2024, 59(16): 1478–1487.  
LI WT, CHEN YF, YANG XH, *et al.* Risk assessment of pesticide residues in *Panax notoginseng* and transformation of pesticide residue limit standards [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2024, 59(16): 1478–1487.
- [15] 胡利喆,胡丹玲,王星宇,等. 黄芩中农药残留现状及风险评估研究进

- 展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 1-8.
- HU LJ, HU DL, W XY, *et al.* Research progress on pesticide residues and risk assessment in *Astragalus membranaceus* [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(17): 1-8.
- [16] 姜振俊, 张红梅, 于志斌, 等. 中国中药材出口面对的国际市场标准[J]. 中国现代中药, 2018, 20(2): 217-238.
- JIANG ZJ, ZHANG HM, YU ZB, *et al.* International market standards for export of chinese medicinal materials [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2018, 20(2): 217-238.
- [17] 杜选香, 王自梁, 杨碧娟, 等. 中药材重金属超标概况[J/OL]. 云南民族大学学报(自然科学版). <https://link.cnki.net/urlid/53.1192.N.20241025.1444.002>
- DU XX, WANG ZL, YANG BJ, *et al.* Overview of heavy metal exceedances in Chinese medicinal herbs [J/OL]. *Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition)*. <https://link.cnki.net/urlid/53.1192.N.20241025.1444.002>
- [18] 冯婷, 杨涛. 龙眼肉化学成分库构建及其治疗贫血机制的网络药理学研究[J]. 中国现代应用药理学, 2023, 40(6): 751-764.
- FENG T, YANG T. Construction of chemical constituents database of longan *Arillus* and study on network pharmacology of its mechanism of treating anemia [J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2023, 40(6): 751-764.
- [19] 李红艳, 雷天荣, 岳德琼, 等. 龙眼肉调节肠道菌群和 BDNF-TrkB 通路抗 AD 的作用机制研究[J]. 中国现代中药, 2024, 26(1): 29-36.
- LI HY, LEI TR, YUE DQ, *et al.* Study on anti-AD mechanism of longan aril by regulating intestinal flora and BDNF-TrkB signaling pathway [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2024, 26(1): 29-36.
- [20] 沈玉彬, 郝二伟, 杜正彩, 等. 龙眼多糖化学结构、构效关系与药理活性研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(23): 7624-7632.
- SHEN YB, HAO ERW, DU ZC, *et al.* Research progress on chemical structure, structure-activity relationship and pharmacological activity of *Dimocarpus longan* polysaccharides [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2022, 53(23): 7624-7632.
- [21] 尹青春, 陈小妹, 周凌聿, 等. 龙眼及其制品中 44 种真菌毒素高通量检测方法的建立及其膳食暴露风险评估[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 1-13.
- YIN QC, CHEN XM, ZHOU LY, *et al.* High-throughput analytical methods establishment and dietary exposure risk assessment of 44 mycotoxins in longan and its products [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2024, 40(7): 1-13.
- [22] 罗洪莲, 万红才, 段萍, 等. 头花蓼中 5 种重金属及有害金属含量测定方法的建立及安全性评价[J]. 药物分析杂志, 2023, 43(5): 859-866.
- LUO HL, WAN HC, DUAN P, *et al.* Study on determination of 5 heavy metals and harmful element and safety assessment in *Polygoni capitati* Herba [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2023, 43(5): 859-866.
- [23] 费毅琴, 肖凌, 汪波, 等. 37 种植物类药材中重金属和有害元素残留分析及风险评估[J]. 药物分析杂志, 2021, 4(6): 1000-1008.
- FEI YQ, XIAO L, WANG B, *et al.* Residue analysis and risk assessment of heavy metals and harmful elements in 37 plant medicinal materials [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2021, 41(6): 1000-1008.
- [24] 颜秋晓, 王道平, 李相楹, 等. 黔产 7 种药用植物重金属污染特征及健康风险评估[J]. 沈阳药科大学学报, 2022, 39(9): 1091-1099.
- YAN QX, WANG DP, LI XY, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of 7 medicinal plants from Guizhou [J]. *Journal of Shenyang Pharmaceutical University*, 2022, 39(9): 1091-1099.
- [25] 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): 1902-1907.
- ZUO TT, WANG Y, ZHANG L, *et al.* Guideline of risk assessment of exogenous harmful residues in traditional Chinese medicines [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2019, 39(10): 1902-1907.
- [26] 师敏, 安妮, 吴冀东, 等. 不同干制柴达木枸杞重金属含量测定及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 299-308.
- SHI M, AN N, WU JD, *et al.* Determination of heavy metal content and health risk evaluation of different dried Chaidamu *Lycium barbarum* L. [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2025, 16(4): 299-308.
- [27] 世界卫生组织国际癌症研究机构致癌物清单[EB/OL]. (2017-10-27) [2024-03-01] <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/mtbd/20171030163101383.html?type=pc&m=>
- World Health Organization international agency for research on cancer list of carcinogens [EB/OL]. (2017-10-27) [2024-03-01] <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/mtbd/20171030163101383.html?type=pc&m=>
- [28] 付鹏钰, 韩涵, 叶冰, 等. 微量元素铜对人体健康的影响[J]. 河南预防医学杂志, 2021, 32(12): 888-892.
- FU PY, HAN H, YE B, *et al.* Effects of trace element copper on human health [J]. *Henan Journal of Preventive Medicine*, 2021, 32(12): 888-892.
- [29] 单志, 陈惠, 唐自钟, 等. 体液中氯离子对铜致 DNA 的损伤及机理研究[J]. 雅安: 四川农业大学, 2021.
- SHAN Z, CHEN H, TANG ZZ, *et al.* Study on the mechanism of copper induced DNA damage caused by chloride ions in body fluids [J]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2021.
- [30] MBABAZI J. Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2011, 68: 251-252.
- [31] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Summary report of the seventy-third meeting of JECFA [EB/OL]. (2010-06-24) [2023-01-01]. <http://www.who.int/foodsafety/publications/chem/summary72.pdf?ua=1>
- [32] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives Summary report of the seventy-second meeting of JECFA [EB/OL]. (2010-02-16) [2023-01-01]. <http://www.who.int/foodsafety/publications/chem/summary72.pdf?ua=1>
- [33] 王超, 刘畅, 胡清, 等. 植物药重金属污染状况及全链条生产过程污染的溯源与管控[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3789-3800.
- WANG C, LIU C, HU Q, *et al.* Pollution status of heavy metals in herbal medicine and their traceability & control in the whole chain production process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3789-3800.
- [34] 沈燕, 仲建锋, 黄亚威, 等. 植物类中药材生产过程中质量安全研究进展[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 268-277.
- SHEN Y, ZHONG JF, HUANG YW, *et al.* Advances in the quality and safety of Chinese herbal medicines in the producing process [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 38(1): 268-277.
- [35] 赵永胜, 石文鑫, 郝变青. 山西省黄芩、远志重金属污染与安全性评价[J]. 山西农业科学, 2024, 52(6): 86-94.
- ZHAO YS, SHI WX, HAO BQ. Pollution and safety assessment of heavy metals in *Scutellaria baicalensis* and *Polygonae radix* in Shanxi Province [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2024, 52(6): 86-94.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)