DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251215005
引用格式: 胡丹丹, 王杨, 李春雨, 等. 2022—2025 年陕南地区魔芋制品中铝污染状况及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 278–284.
HU DD, WANG Y, LI CY, *et al*. Aluminum contamination status and health risk assessment of *Amorphophallus konjac* K. Koch products in Southern Shaanxi in 2022—2025 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 278–284. (in Chinese with English abstract).

2022—2025 年陕南地区魔芋制品中铝污染状况及健康风险评估

胡丹丹, 王　杨, 李春雨, 钟海婷, 杜　雨, 乔共松, 吴春燕, 柯红梅*

(安康市食品药品检验检测中心, 安康　725000)

摘　要: 目的　了解 2022—2025 年陕南地区魔芋制品铝污染水平及来源, 评估魔芋制品中铝膳食暴露风险。**方法**　系统性采集陕南地区 109 份魔芋制品, 按照 GB 5009.182—2017《食品安全国家标准 食品中铝的测定》测定铝含量, 采用两种极端假设推算日均消费量(薯类消费量推算法和膳食纤维推荐摄入量反推法), 结合铝含量数据, 用"点评估"法计算风险商(chronic hazard quotient, cHQ), 评估膳食铝暴露风险。**结果**　109 份样品铝检出率 78.0%, 中位数 28.8 mg/kg; 29 份铝含量大于 100 mg/kg 的样品中, 散装制品占比 65.5%、非即食制品占比 86.2%, 基于薯类消费量推算法的一般消费水平下, 所有样品 cHQ 均小于 1, 风险可接受; 仅在采用膳食纤维推荐摄入量反推法得到的理论消费量(0.0982 kg/d, 以推荐量平均值计)与铝含量 *P*90 (261 mg/kg)双重叠加时, cHQ 大于 1, 提示存在理论上的潜在风险。**结论**　陕南地区魔芋制品铝含量整体处于较低水平, 一般人群常规消费安全。局部污染较为突出, 散装非即食制品为铝污染高风险品类, 建议将小作坊及农贸市场作为监管重点, 进一步降低居民膳食铝暴露风险。

关键词: 魔芋制品; 铝含量; 风险评估

Aluminum contamination status and health risk assessment of *Amorphophallus konjac* K. Koch products in Southern Shaanxi in 2022—2025

HU Dan-Dan, WANG Yang, LI Chun-Yu, ZHONG Hai-Ting, DU Yu,
QIAO Gong-Song, WU Chun-Yan, KE Hong-Mei*

(*Ankang Center for Food and Drug Control*, *Ankang* 725000, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the aluminum contamination level and its sources in *Amorphophallus konjac* K. Koch products in Southern Shaanxi in 2022—2025, and assess the dietary exposure risk of aluminum from these products. **Methods**　A total of 109 *Amorphophallus konjac* K. Koch products were systematically collected

收稿日期: 2025-12-15
基金项目: 陕西省市场监督管理局科技计划项目(2022KY28)
第一作者: 胡丹丹(1997—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 1319416930@qq.com
***通信作者:** 柯红梅(1972—), 女, 教授, 主要研究方向为食品质量安全。E-mail: 2442293008@qq.com

from Southern Shaanxi. The aluminum content was determined according to GB 5009.182—2017 *National food safety standard-Determination of aluminum in foods*. The average daily consumption was estimated under 2 kinds of extreme assumptions, namely the tuber consumption estimation method and the dietary fiber recommended intake back-calculation method. Combined with the aluminum content data, the chronic hazard quotient (cHQ) was calculated using the point assessment approach to evaluate the dietary exposure risk of aluminum. **Results** The detection rate of aluminum in 109 samples was 78.0%, with a median content of 28.8 mg/kg. Among the 29 samples with aluminum content exceeding 100 mg/kg, bulk products accounted for 65.5% and non-ready-to-eat products accounted for 86.2%. Under the general consumption level estimated by the tuber consumption estimation method, the cHQ values of all samples were less than 1, indicating acceptable risk. Only when the theoretical consumption (0.0982 kg/d, based on the average recommended intake) calculated by the dietary fiber recommended intake back-calculation method was combined with the 90th percentile (*P*90) aluminum content (261 mg/kg), the cHQ value was greater than 1, suggesting a theoretical potential risk. **Conclusion** The overall aluminum content in *Amorphophallus konjac* K. Koch products in Southern Shaanxi is relatively low, and conventional consumption by the general population is safe. However, localized contamination is prominent, and bulk non-ready-to-eat products are high-risk categories for aluminum contamination. It is recommended that small workshops and farmers' markets be taken as key supervision targets to further reduce the dietary aluminum exposure risk of residents.

KEY WORDS: *Amorphophallus konjac* K. Koch products; aluminum content; risk assessment

0　引　言

魔芋制品是以鲜魔芋或魔芋精粉和水为主要原料, 通过凝胶、成型等工艺制成的一类食品[1]。在国内, 以魔芋食品为主的绿色保健食品, 已融入居民日常饮食体系, 并成为主流保健食品[2]。中国是最大的魔芋精粉及魔芋制品出口国[3], 陕西省是我国魔芋四大主产区之一, 陕南地区的安康市岚皋县被誉为"中国魔芋之乡", 魔芋是当地农村经济发展的重要产业[4]。

铝是地壳中含量最丰富的金属元素, 被广泛应用于食品工业[5–8], 但长期过量摄入铝会对人体健康产生多系统危害, 如干扰人体神经系统信号传导, 引发记忆力衰退, 影响钙磷代谢, 增加骨质疏松与骨骼畸形风险等[9–12]。

陕西省监督抽检数据显示, 2022 年第一季度魔芋制品铝残留不合格率达到 66.7%[13], 魔芋制品铝污染风险需开展系统性管控。GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中规定含铝添加剂的使用范围及铝残留限量的食品品类里未涵盖魔芋制品, 同时陕西省食品安全地方标准(DBS 61/0020—2019《食品安全地方标准 魔芋制品》、DBS 61/0020—2024《食品安全地方标准 魔芋凝胶制品》)则将魔芋制品归为蔬菜制品, 明确其不得使用含铝食品添加剂。2022 年 4 月中国园艺学会魔芋协会发布相关说明首次确认魔芋存在天然铝本底, 但未能确定其含量范围与分布特征, 导致监管难以区分铝污染来源, 影响了监管决策精准性。本研究系统采集不同产区、工艺的魔芋制品, 检测铝含量并分析其分布特征, 明确陕南地区魔芋制品铝污染状况, 评估其对健康造成危害的可能性, 为科学监管、产业健康发展与饮食安全提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

以 2022—2025 年陕西省内魔芋制品生产企业生产的魔芋制品以及批发市场、集贸市场、超市、食品店、网络平台等多渠道销售的魔芋制品为调查对象, 按不同品类, 共采集 109 份魔芋制品。

硝酸(分析纯, 中国医药集团有限公司); 铝标准溶液(质量浓度 100 μg/mL, 50 mL, 中国计量科学研究院)。

1.2　仪器与设备

AUW220D 电子分析天平[精度 0.01 mg, 岛津企业管理(中国)有限公司]; MS205DU 电子天平[精度 0.01 mg, 梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司]; Milli-Q Integral 5 纯水超纯水一体机[默克密理博实验室设备(上海)有限公司]; Multiwave PRO 24HVT80 微波消解仪、Multiwave PRO 48MF50 微波消解仪(奥地利安东帕有限公司); ED16 智能样品处理器(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); SP220 石墨消解仪(济南海能仪器股份有限公司); BHW-09A16 赶酸仪(上海博通化学科技有限公司); iCAP 7400 电感耦合等离子体发射光谱仪、iICP 6000 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); 240ZAA 原子吸收分光光度计(美国安捷伦公司)。

1.3　实验方法

按照 GB 5009.182—2017《食品安全国家标准 食品中铝的测定》第三法 电感耦合等离子体发射光谱法及第四

法 石墨炉原子吸收光谱法进行检测, 方法的检出限(limit of detection, LOD)分别为 0.5 mg/kg 和 0.3 mg/kg, 定量限(limit of quantitation, LOQ)分别为 2 mg/kg 和 0.8 mg/kg。结果以干样品中铝计, 单位 mg/kg。

1.4 膳食暴露风险评估

采用世界卫生组织/联合国粮农组织(World Health Organization/Food and Agriculture Organization of the United Nations, WHO/FAO)推荐的《食品中化学物质膳食暴露评估》"点评估"法计算食品安全指数, 描述单一污染物暴露风险商(chronic hazard quotient, cHQ), cHQ 越小风险越小。每日膳食摄入量按公式(1)计算, 结果代入公式(2)计算 cHQ。当 cHQ<1 时, 表示研究的食物安全健康风险可接受; 当 cHQ≥1 时, 表示研究的食物有不可接受的安全健康风险[14–16]。

$$\mathrm{EDI}=\frac{C\times D}{\mathrm{bw}} \tag{1}$$

$$\mathrm{cHQ}=\frac{\mathrm{EDI}}{\mathrm{ADI}} \tag{2}$$

式中: EDI 为每人每千克体重每日铝摄入量(estimated daily intake), mg/(kg·d); C 为魔芋制品中的铝含量, mg/kg; D 为居民魔芋制品平均日消费量, kg/d; bw 为消费者平均体重(body weight), 参考我国成年人平均体重取值 60 kg; ADI 为铝的每日容许摄入量(acceptable daily intake), mg/(kg·d); 参照 WHO 和 FAO 联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)的建议, 铝的暂定每周耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)为 2 mg/kg[17], 换算为 ADI 等同于 0.286 mg/(kg·d)。

1.5 数据处理

数据采用 Excel 2019 和 SPSS 27.0 软件进行分析处理。参照 WHO 食品污染监测低水平数据处理原则对数据进行整理[18], 当未检出数据(低于 LOQ)比例小于 60%时, 未检出值用 1/2LOQ 计。在数据组中有不同的 LOQ, 采用最高的 LOQ[19]。数据呈偏态分布, 则采用中位数及关键百分位数($P$75、$P$90、$P$95)描述[20–22]。

2 结果与分析

2.1 魔芋制品中铝总体含量分析

将 109 份魔芋制品按照加工区域、采样环节和不同类别进行整理, 铝含量分布见表 1。其中 22.0% (24/109)的样品中铝含量低于 LOQ, 未检出样品统一以 1/2LOQ (1.0 mg/kg)代入统计分析。检测结果显示, 魔芋制品铝含量范围为 ND~749.0 mg/kg, 平均值为 84.4 mg/kg, 中位数为 28.8 mg/kg, 数据呈显著右偏态分布(表 1)。26.6% (29/109)的样品铝含量大于 100 mg/kg, 其中散装制品占比 65.5%, 非即食制品占比 86.2%, 16.5% (18/109)的样品铝含量大于 200 mg/kg, 7.3% (8/109)的样品铝含量大于 300 mg/kg。样品铝检出率达 78.0%, 但中位数仅 28.8 mg/kg, 表明多数魔芋制品铝含量处于较低水平, 整体污染风险可控, 而少数样品存在异常高值, 需重点关注其污染来源与风险。

2.2 不同食用方式的魔芋制品铝含量分析

按食用方式将魔芋制品分为即食类与非即食类, 两类样品的铝含量分布见表 2。因两类制品铝含量未检出比例均小于 60%, 未检出样品统一以 1/2LOQ (1.0 mg/kg)代入统计分析。38 份即食类魔芋制品的铝含量范围为 ND~191.0 mg/kg, 中位数为 21.8 mg/kg, 平均值为 34.0 mg/kg; 其中 13.2% (5/38)的样品铝含量为未检出。71 份非即食类魔芋制品的铝含量范围为 ND~749.0 mg/kg, 中位数为 41.9 mg/kg, 平均值为 111.0 mg/kg; 其中 25.4% (18/71)的样品铝含量为未检出。

表 1 魔芋制品铝含量及分布

Table 1 Aluminum content and distribution of *Amorphophallus konjac* K. Koch products

样品数/份	平均含量值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	$P$75/(mg/kg)	$P$90/(mg/kg)	检出率/%	含量分布/%					
							≤10 mg/kg	>10~≤50 mg/kg	>50~≤100 mg/kg	>100~≤200 mg/kg	>200~≤300 mg/kg	>300 mg/kg
109	84.4±130.0	ND~749.0	28.8	104.0	261.0	78.0	32.1	31.2	10.1	10.1	9.2	7.3

注: ND 为未检出, 本组数据未检出比例小于 60%, 故将未检出值采用 1/2LOQ (1.0 mg/kg)代替, 表 2~4 同。

表 2 不同食用方式的魔芋制品铝含量及分布

Table 2 Aluminum content and distribution of *Amorphophallus konjac* K. Koch products with different consumption methods

样本类别	样品数/份	平均含量值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	$P$90/(mg/kg)	检出率/%	含量分布/%					
							≤10 mg/kg	>10~≤50 mg/kg	>50~≤100 mg/kg	>100~≤200 mg/kg	>200~≤300 mg/kg	>300 mg/kg
即食	38	34.0±46.1	ND~191.0	21.8	75.2	86.8	34.3	52.6	2.6	10.5	0	0
非即食	71	111.0±151.0	ND~749.0	41.9	302	74.6	32.3	19.7	12.7	9.9	14.1	11.3

非即食魔芋制品的铝含量中位数为 41.9 mg/kg, 约是即食制品(21.8 mg/kg)的 1.9 倍; 平均值达 111.0 mg/kg, 更是即食制品(34.0 mg/kg)的 3.3 倍, 整体含量明显高于即食类。非即食制品的平均值约为中位数的 2.6 倍, 数据呈强烈右偏分布, 说明该品类中存在少量铝含量极高的异常样本, 显著拉高了整体平均水平。

分析其含量分布特征, 非即食魔芋制品中铝含量大于 100 mg/kg 的样本占比达 35.3%, 是即食制品(10.5%)的 3.4 倍, 还出现了 749.0 mg/kg、641.0 mg/kg 等大于 300 mg/kg 的高值样本; 而即食制品的高值样本多集中在 141.0~191.0 mg/kg 区间, 均未超过 200 mg/kg。这些数据表明, 非即食魔芋制品不仅整体铝含量偏高, 高含量风险更普遍, 铝残留风险远高于即食类。

2.3　不同包装规格的魔芋制品中的铝含量分布

按包装规格将魔芋制品分为散装与预包装两类, 其铝含量分布特征见表 3、图 1。因两类制品铝含量未检出比例均小于 60%, 未检出样品统一以 1/2LOQ (1.0 mg/kg)代入统计分析。50 份散装魔芋制品的铝含量范围为 ND~749.0 mg/kg, 中位数为 55.0 mg/kg, 平均值为 133.0 mg/kg; 其中 12 份样品铝含量为未检出, 占比 24.0%。59 份预包装魔芋制品的铝含量范围为 ND~310.0 mg/kg, 中位数为 21.6 mg/kg, 平均值为 44.3 mg/kg; 12 份样品铝含量为未检出, 占比 20.3%。

从表 3 可见, 散装制品的铝含量中位数(55.0 mg/kg)是预包装制品(21.6 mg/kg)的 2.5 倍, 平均值(133.0 mg/kg)为预包装制品(44.3 mg/kg)的 3.0 倍; 铝含量大于 100 mg/kg 的样本占比(38.0%)是预包装制品(15.3%)的 2.5 倍, 表明散装制品铝含量显著高于预包装制品。进一步分析样本分布: 铝含量大于 200 mg/kg 的 18 份样品中, 16 份为散装魔芋豆腐, 其中约 75%来自农贸市场, 其余来自超市(推测其货源为小作坊或农贸市场)。散装制品出现 641.0 mg/kg、749.0 mg/kg 等高值, 而预包装制品最高值(310.0 mg/kg)仅为散装制品高值的 41%, 且预包装制品中大于 200 mg/kg 的高值样本占比更低, 充分说明散装制品的高铝含量风险更为突出。

表 3　不同包装规格的魔芋制品铝含量及分布

Table 3　Aluminum content and distribution of *Amorphophallus konjac* K. Koch products with different packaging specifications

样本类别	样品数/份	平均含量值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	*P*90/(mg/kg)	检出率/%	含量分布/%					
							≤10 mg/kg	>10~≤50 mg/kg	>50~≤100 mg/kg	>100~≤200 mg/kg	>200~≤300 mg/kg	>300 mg/kg
散装	50	133.0±168.0	ND~749.0	55.0	328.0	76.0	26.0	20.0	16.0	6.0	18.0	14.0
预包装	59	44.3±64.7	ND~310.0	21.6	114.0	81.4	35.6	42.3	6.8	11.9	1.7	1.7

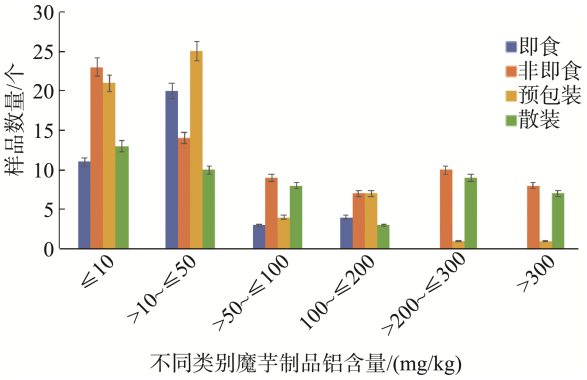


图 1　不同类别魔芋制品铝含量分布图

Fig.1　Distribution map of aluminum content in different categories of *Amorphophallus konjac* K. Koch products

2.4　不同地域的魔芋制品中的铝含量分布

陕南是陕西魔芋的主产区, 本研究聚焦安康、汉中、商洛三大核心产区采集魔芋制品样品, 各地铝含量分布特征见表 4。因 3 个区域样品铝含量未检出比例均小于 60%, 未检出样品统一以 1/2LOQ (1.0 mg/kg)代入统计分析。

安康地区 60 份样品的铝含量范围为 ND~641.0 mg/kg, 中位数为 26.9 mg/kg, 平均值为 76.6 mg/kg; 其中 10 份样品铝含量为未检出, 占比 16.7%。汉中地区 32 份样品的铝含量范围为 ND~749.0 mg/kg, 中位数为 37.2 mg/kg, 平均值为 118.0 mg/kg; 其中 13 份样品铝含量为未检出, 占比 40.6% (13/32)。商洛地区 17 份样品的铝含量范围为 ND~278.0 mg/kg, 中位数为 29.3 mg/kg, 平均值为 56.6 mg/kg; 其中 1 份样品铝含量为未检出(1/17), 占比 5.9%。从核心数据来看, 商洛地区魔芋制品铝含量平均值最低, 汉中地区最高, 安康地区居中。值得注意的是, 三大产区样品铝含量最高值均超过 200 mg/kg, 且这些大于 200 mg/kg 的样品 88.9%为散装魔芋豆腐。

2.5　魔芋制品中铝的风险评估

鉴于目前陕西省尚无居民魔芋制品专项消费数据, 本研究采用极端假设推算魔芋制品的日均消费量(以干基计), 以覆盖不同消费场景下的风险评估需求。

2.5.1　薯类制品分类关联推算魔芋制品平均日消费量

参考国家市场监督管理总局《食品安全监督抽检实施细则》中“魔芋制品归为其他薯类制品”的分类规则, 采用《中国统计年鉴》中“居民薯类食品人均消费量 2.8 kg(以干基计)”作为保守估算依据[23], 计算出薯类平均日消费量为 0.00767 kg/d(以干基计), 假设“薯类食品全部为魔芋制品”, 在不同的铝含量水平下的暴露风险结果见表 5。

表 4 不同地域的魔芋制品铝含量及分布

Table 4 Aluminum content and distribution of *Amorphophallus konjac* K. Koch products from different regions

样本类别	样品数/份	平均含量值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	*P*90/(mg/kg)	检出率/%	含量分布/%					
							≤10 mg/kg	>10~≤50 mg/kg	>50~≤100 mg/kg	>100~≤200 mg/kg	>200~≤300 mg/kg	>300 mg/kg
安康	60	76.6±113.0	ND~641.0	26.9	212.0	83.3	28.3	35.0	8.3	16.7	6.7	5.0
汉中	32	118.0±171.0	ND~749.0	37.2	343.0	59.4	40.7	12.5	15.6	3.1	12.5	15.6
商洛	17	56.6±77.7	ND~278.0	29.3	140.0	94.1	17.6	58.8	11.8	0	11.8	0

表 5 铝膳食暴露风险结果

Table 5 Dietary exposure risk results of aluminum

项目	铝含量/(mg/kg)	平均日消费量/(kg/d)	平均体重/kg	ADI/[mg/(kg·d)]	EDI/[mg/(kg·d)]	cHQ
平均值	84.4	0.00767	60	0.286	0.01080	0.0377
中位数	28.8	0.00767	60	0.286	0.00368	0.0129
*P*75	104.0	0.00767	60	0.286	0.01330	0.0465
*P*90	261.0	0.00767	60	0.286	0.03340	0.1170

2.5.2 膳食纤维推荐摄入量关联推算魔芋制品平均日消费量

魔芋的核心成分为葡甘聚糖(水溶性膳食纤维)[24], 根据 DBS 61/0020—2024 中的规定, 魔芋制品中的膳食纤维平均为 28 g/100 g(以干基计)。结合《中国居民膳食营养素参考摄入量(2023 版)》中“成年人每日膳食纤维推荐摄入量 25~30 g”的标准[25], 假设膳食纤维全部来源于魔芋制品, 取推荐量平均值 27.5 g/d 进行点评估, 对应魔芋制品消费量 98.2 g/d (0.0982 kg/d, 以干基计), 以此作为魔芋制品的平均日消费量, 核算铝暴露风险, 结果见表 6。

两种消费量推算依据下的核算结果显示: 按照薯类制品关联推算(*D*=0.00767 kg/d, 以干基计)时, cHQ 均小于 1, 表明膳食暴露风险处于可接受范围。在按照膳食纤维关联推算(*D*=0.0982 kg/d, 以干基计)时, 当魔芋制品铝含量小于 104.0 mg/kg 时, 对应的 cHQ 小于 1, 表明居民铝暴露风险处于可接受范围; 但当铝含量达到 *P*90 分位数(261.0 mg/kg)时, cHQ 为 1.490, 大于 1, 提示需通过铝残留限量管控降低高风险样品流通。

需特别注意的是, JECFA 设定的铝 PTWI (2 mg/kg)针对的是所有膳食来源铝的总和, 而非单一食物来源。本研究仅评估魔芋制品的铝暴露贡献, 而已有研究显示, 我国北方地区居民每周通过含铝添加剂食品(如面制品、膨化食品)摄入的铝平均为 0.416 mg/kg[26]。若居民同时消费高铝含量魔芋制品, 两类食物的铝摄入叠加后, 总摄入量可能接近或超过 PTWI, 增加潜在健康隐患。

此外, 欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA) 2023 年发布的最新评估报告中, 将铝的每周耐受摄入量(tolerable weekly intake, TWI)修订为 0.3 mg/kg[27], 该标准较 JECFA 的 PTWI 更为严格。按此标准核算, 本研究中日消费量为 0.0982 kg/d(以干基计)时, 即使铝含量为中位数(28.8 mg/kg), 对应的每周铝摄入量已占 EFSA 推荐 TWI 的 110%。这一结果进一步强调魔芋制品铝含量“持续下行”的必要性。

表 6 铝膳食暴露风险结果

Table 6 Dietary exposure risk results of aluminum

项目	铝含量/(mg/kg)	平均日消费量/(kg/d)	平均体重/kg	ADI/[mg/(kg·d)]	EDI/[mg/(kg·d)]	cHQ
平均值	84.4	0.0982	60	0.286	0.1390	0.486
中位数	28.8	0.0982	60	0.286	0.0471	0.165
*P*75	104.0	0.0982	60	0.286	0.1700	0.595
*P*90	261.0	0.0982	60	0.286	0.4270	1.490

3 讨论与结论

检测结果显示, 陕南地区 109 份魔芋制品的铝检出率高达 78.0%, 中位数为 28.8 mg/kg, *P*75 和 *P*90 相对偏高, 主要受部分高铝样品的影响, 反映出陕南地区魔芋制品铝含量整体处于较低水平, 但存在局部污染较为严重的情况。进一步分析高铝含量样品的分布特征发现, 此类样品以非即食散装魔芋豆腐为主, 主要来源于超市及集贸市场, 生产模式多为小作坊或手工制作, 而即食魔芋制品因以工业化预包装生产为主, 在原料选购及加工环节的质量控制

更为严格, 有效减少了铝从原料外皮的引入, 因此铝含量相对更低。

从铝含量超标的成因来看, 原料层面的因素占据主导地位。前期研究已证实鲜魔芋天然含有铝且外皮为铝的富集部位, 因此外皮去除是否彻底、清洗是否干净, 直接影响最终产品的铝含量。此外, 加工环节的环境与器具也可能成为铝污染的诱因, 魔芋制品加工过程中常处于碱性环境, 该条件会促进铝质器皿中铝的迁移[28], 不排除少数加工者使用铝质容器导致铝溶出的可能性; 还有含铝涂层或铝箔包装材料若质量不合格, 与制品长期接触也可能造成铝迁移。值得关注的是, 部分样品的铝含量较高, 可能存在人为添加硫酸铝钾、硫酸铝铵等含铝物质的违规行为, 需进一步核查。此外, 9 份预包装样品(铝含量>100 mg/kg)中有 3 份含海藻粉, 结合海藻高铝富集特性[29–30], 推测为铝偏高潜在因素, 具体贡献度需后续验证。

膳食暴露风险评估结果显示, 在基于薯类消费量推算的一般消费水平(0.00767 kg/d)下, 所有铝含量水平的魔芋制品 cHQ 均小于 1, 表明常规消费场景下铝暴露风险处于可接受范围, 一般人群可正常食用。在基于膳食纤维反推法的理论消费量(0.0982 kg/d, 以推荐量平均值计)情景下, 铝含量低于 104.0 mg/kg 时 cHQ 小于 1, 表明该含量水平在理论高消费假设下仍具备充足安全边际; 而铝含量达到 *P*90 (261.0 mg/kg)时, cHQ 为 1.490, 略大于 1。该结果系在“膳食纤维全部来源于魔芋制品”这一极端假设下推演得出的理论风险边界, 提示约 10%的高铝含量产品存在工艺优化空间, 并非代表真实世界的普遍暴露风险。建议监管部门加强小作坊监督, 打击违规添铝行为; 企业强化原料质控与工艺优化, 选用海藻粉时需筛查铝含量, 以进一步降低居民膳食铝暴露风险。本研究为相关监管提供数据支撑, 后续可扩大样本量, 深入探究污染机制与防控技术。

参考文献

[1] 邓云, 薛雯晶, 唐青云, 等. 魔芋葡甘聚糖的食品加工性能研究进展[J]. 热带农业科学, 2024, 44(1): 127–134.
DENG Y, XUE WJ, TANG QY, *et al*. Research progress on the food processing properties of konjac glucomannan [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2024, 44(1): 127–134.

[2] 周高新, 陈永刚, 段龙飞, 等. 我国魔芋产业体系高质量发展的对策建议[J]. 农业与技术, 2025, 45(16): 166–171.
ZHOU GX, CHEN YG, DUAN LF, *et al*. Countermeasure suggestions for the high-quality development of China’s konjac industry system [J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(16): 166–171.

[3] 张盛林, 胡玲玉. 我国魔芋产业的发展现状及问题与建议[J]. 中国农村科技, 2023(3): 47–50.
ZHANG SL, HU LY. Current development status, problems and suggestions of China’s konjac industry [J]. China Rural Science & Technology, 2023(3): 47–50.

[4] 周高新, 段龙飞, 覃剑锋, 等. 陕西魔芋产业发展现状、问题与对策[J]. 西北园艺, 2025(1): 1–4.
ZHOU GX, DUAN LF, QIN JF, *et al*. Current situation, problems and countermeasures of konjac industry development in Shaanxi [J]. Northwest Horticulture, 2025(1): 1–4.

[5] 沈川, 樊新瑞, 李夏, 等. 陕南魔芋资源开发利用 SWOT 分析及策略研究[J]. 陕西农业科学, 2024, 70(5): 103–107.
SHEN C, FAN XR, LI X, *et al*. SWOT analysis and strategy research on the development and utilization of konjac resources in southern Shaanxi [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2024, 70(5): 103–107.

[6] 杨乐, 蒲云霞. 铝的毒性和膳食暴露评估研究进展[J]. 公共卫生与预防医学, 2020, 31(1): 118–122.
YANG L, PU YX. Research progress on toxicity and dietary exposure assessment of aluminum [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2020, 31(1): 118–122.

[7] 国家食品安全风险评估专家委员会. 中国居民膳食铝暴露风险评估[R]. 北京: 国家食品安全风险评估中心, 2012.
Expert Committee of National Food Safety Risk Assessment. Dietary aluminum exposure risk assessment of Chinese residents [R]. Beijing: China National Center for Food Safety Risk Assessment, 2012.

[8] RANAU R, OEHLENSCHLÄGER J, STEINHART H. Aluminium levels of fish fillets baked and grilled in aluminium foil [J]. Food Chemistry, 2001, 73(1): 1–6.

[9] Panel on Food Additives, Flavourings, Processing Aids and Food Contact Materials (AFC). Safety of aluminium from dietary intake [J]. The EFSA Journal, 2008, 754: 1–34.

[10] STAHL T, TASCHAN H, BRUNN. Aluminum content of selected foods and food products [J]. Environmental Sciences Europe, 2011, 23(1): 1–11.

[11] 张泓, 李倩云, 陈少鸿, 等. 食品接触用铝和铝合金材料及制品中铝元素的迁移及风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(1): 92–97.
ZHANG H, LI QY, CHEN SH, *et al*. Migration and risk assessment of aluminum in aluminum and aluminum alloy materials and products for food contact [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(1): 92–97.

[12] 牛侨. 铝的神经毒性与神经退行性变[J]. 新兴科学和技术趋势, 2022, 1(1): 97–106.
NIU Q. Neurotoxicity of aluminum and neurodegeneration [J]. Emerging Science and Technology, 2022, 1(1): 97–106.

[13] 常薇, 汪瑾, 刘李婷, 等. 陕西省魔芋制品铝残留问题现状及分析[J]. 粮食加工, 2023, 48(6): 115–116.
CHANG W, WANG J, LIU LT, *et al*. Current situation and analysis of aluminum residue in konjac products in Shaanxi Province [J]. Grain Processing, 2023, 48(6): 115–116.

[14] 王鼎南, 王扬, 戴一科, 等. 2021-2024 年浙江省淡水鱼和饮用水中地西泮污染水平和膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 329–336.
WANG DN, WANG Y, DAI YK, *et al*. Pollution levels and dietary exposure risk assessment of diazepam in freshwater fish and drinking water in Zhejiang Province from 2021 to 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 329–336.

[15] 李传秀, 孙枫林, 于红卫, 等. 青岛市市售蔬菜中农残特征及膳食暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(4): 407–413.
LI CX, SUN FL, YU HW, *et al*. Characteristics of pesticide residues in vegetables sold in Qingdao City and dietary exposure risk assessment [J].

Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(4): 407–413.

[16] 蔡华, 罗宝章, 秦璐昕, 等. 不同膳食暴露评估方法在上海市居民镉暴露风险评估中的应用[J]. 上海预防医学, 2024, 36(3): 224–229.
CAI H, LUO BZ, QIN LX, *et al*. Application of different dietary exposure assessment methods in cadmium exposure risk assessment of residents in Shanghai [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2024, 36(3): 224–229.

[17] World Health Organization. Evaluation of certain food additives and contaminants [J]. World Health Organization Technical Report Series, 2011, 966: 1–136.

[18] WHO. Aluminum (environmental health criteria 194) [EB/OL]. (2000-01-15) [2025-04-05]. http://www.inchem.org/documents/ehec/ ehec194.htm

[19] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志, 2002, 36(4): 63–64.
WANG XQ, WU YN, CHEN JS. Issues on low-level data processing in food contamination monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 63–64.

[20] SINHA P, LAMBERT MB, TRUMBULL VL. Evaluation of statistical methods for left-censored environmental data with nonuniform detection limits [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, 25(9): 2533–2540.

[21] 宫春波, 王朝霞, 孙月琳, 等. 食品安全风险监测数据统计处理常见问题探讨[J]. 中国食品卫生杂志, 2013, 25(6): 575–578.
GONG CB, WANG CX, SUN YL, *et al*. Discussion on common problems in statistical processing of food safety risk monitoring data [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2013, 25(6): 575–578.

[22] 肖革新. 食品安全风险监测数据综合分析方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
XIAO GX. Comprehensive analysis methods and applications of food safety risk monitoring data [M]. Beijing: Science Press, 2018.

[23] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024[M/OL]. 北京: 中国统计出版社, 2024. [2025-12-12]. https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2024 [M/OL]. Beijing: China Statistics Press, 2024. [2025-12-12]. https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm

[24] 胡敏, 李波, 龙萌, 等. 魔芋葡甘聚糖含量的测定[J]. 湖北农业科学, 1998, 37(5): 56–62.
HU M, LI B, LONG M, *et al*. Determination of konjac glucomannan content [J]. Hubei Agricultural Sciences, 1998, 37(5): 56–62.

[25] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2023 版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2023.
Chinese Nutrition Society. Dietary reference intakes for Chinese residents (2023 edition) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2023.

[26] HONG Z, YUE JZ, LI HW, *et al*. The revision of aluminum-containing food additive provisions in China [J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2016, 29(6): 461–466.

[27] European Commission. Commission Regulation (EU) 2023/1021 of 31 May 2023 on the use of aluminium-containing food additives [S]. Official Journal of the European Union, 2023, L210: 45–48.

[28] 王生. 铝质食炊具中铝的溶出实验调查[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(9): 1683–1684.
WANG S. Investigation on aluminum dissolution experiment in aluminum food cookware [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2007, 17(9): 1683–1684.

[29] 王祺. 海藻中铝的形态分析及其食用安全性评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
WANG Q. Speciation analysis of aluminum in seaweed and evaluation of its edible safety [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.

[30] 王联珠, 赵艳芳, 李娜, 等. 海藻产品质量安全风险研究[J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(2): 1–12.
WANG LZ, ZHAO YF, LI N, *et al*. Research on quality and safety risks of seaweed products [J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2021, 11(2): 1–12.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)