DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251011002
引用格式: 张继红, 张丽, 张玉梅, 等. 华容县腌制芥菜中铝含量本底值研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 303–310.
ZHANG JH, ZHANG L, ZHANG YM, *et al*. Study on the background value of aluminum content in pickled *Brassica juncea* from Huarong County [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 303–310. (in Chinese with English abstract).

华容县腌制芥菜中铝含量本底值研究

张继红[1], 张　丽[1], 张玉梅[2], 唐文杰[1], 言　剑[1], 汪霞丽[1], 李　政[1*]

(1. 湖南省产商品质量检验研究院, 食品安全监测与预警湖南省重点实验室, 长沙　410117;
2. 华容县检验检测中心, 岳阳　414200)

摘　要: 目的　了解华容地区腌制芥菜中铝的本底值。**方法**　以华容县 8 个乡镇为监测点, 采集土壤、新鲜芥菜共计 180 份, 华容县酱腌菜生产企业腌制芥菜成品样本 218 份, 市售华容县腌制芥菜产品 30 份, 不同腌制工艺形成的盐卤溶液、半成品、成品各 40 份, 共计 548 份样品进行了铝含量的检测。土壤样品检测采用 HJ 1315—2023《土壤和沉积物 19 种金属元素总量的测定 电感耦合等离子体质谱法》检测; 新鲜芥菜及其茎秆和菜叶, 腌制芥菜样本, 市售腌制芥菜产品, 不同工艺的盐卤溶液、半成品、成品检测采用 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中的第一法 电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)检测。**结果**　华容县土壤的铝含量的平均值为 67.82 g/kg, 中位值为 68.81 g/kg; 新鲜芥菜中铝含量的平均值为 97.02 mg/kg, 中位值为 85.30 mg/kg, 且呈现出菜叶的铝含量>全株的>茎秆的变化规律; 华容县腌制芥菜铝含量平均值为 34.74 mg/kg, 中位值为 32.29 mg/kg。**结论**　最终选取 82.90 mg/kg 作为腌制芥菜铝元素本底参考值。对不同腌制工艺生产出的腌制芥菜中铝含量进行对比, 建议企业采用二次腌制或清洁腌制的方式进行生产, 以控制成品中铝残留量。

关键词: 铝; 华容县; 酱腌菜; 本底值

Study on the background value of aluminum content in pickled *Brassica juncea* from Huarong County

ZHANG Ji-Hong[1], ZHANG Li[1], ZHANG Yu-Mei[2], TANG Wen-Jie[1],
YAN Jian[1], WANG Xia-Li[1], LI Zheng[1*]

(1. *Hunan Provincial Institute of Product and Goods Quality Inspection*, *Hunan Key Laboratory of Food Safety Detection and Early Warning*, *Changsha* 410117, *China*; 2. *Huarong County Inspection and Testing Center*, *Yueyang* 414200, *China*)

ABSTRACT: Objective　To understand the background value of aluminum in pickled *Brassica juncea* in the Huarong area. **Methods**　Taking 8 townships in Huarong County as monitoring sites, a total of 180 samples of soil and fresh *Brassica juncea* were collected, 218 samples of pickled *Brassica juncea* finished products from pickled vegetable production enterprises in Huarong County, 30 samples of pickled *Brassica juncea* products from Huarong

收稿日期: 2025-10-11
基金项目: 湖南省自然科学基金部门联合基金项目(2023JJ60148); 湖南省市场监督管理局科技计划项目(2024KJJH59)
第一作者: 张继红(1967—), 女, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为食品安全风险预警。E-mail: 383302005@qq.com
***通信作者:** 李政(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品安全质量管理。E-mail: 64423112@qq.com

County on the market, and 40 samples each of bittern solutions, semi-finished products and finished products formed by different pickling processes were collected. In total, 548 samples were tested for the content of aluminum element. Soil samples were detected by HJ 1315—2023 *Determination of total amount of 19 metal elements in soil and sediment-Inductively coupled plasma mass spectrometry*; fresh *Brassica juncea* and their stems and leaves, pickled *Brassica juncea* samples, commercial pickled *Brassica juncea* products, and different processes of brine solution, semi-finished products and final products were detected by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), the first method of GB 5009.268—2016 *National food safety standard-Determination of multi-elements in food*. **Results** The average value of aluminum element content in the soil of Huarong County was 67.82 g/kg, and the median value was 68.81 g/kg. The average value of aluminum element content in fresh *Brassica juncea* was 97.02 mg/kg, and the median value was 85.30 mg/kg. Moreover, it presented the changing rule that the aluminum element content in the leaves was greater than that in the whole plant, which in turn was greater than that in the stems. The average value of aluminum element content in pickled *Brassica juncea* in Huarong County was 34.74 mg/kg, and the median value was 32.29 mg/kg. **Conclusion** Eventually, 82.90 mg/kg is selected as the background reference value for aluminum element in pickled *Brassica juncea*. By comparing the aluminum content in pickled *Brassica juncea* produced through different pickling processes, it is recommended that enterprises adopt the methods of secondary pickling or clean pickling for production to control the residual amount of aluminum in finished products.

KEY WORDS: aluminum; Huarong County; pickled vegetables; background value

0 引 言

铝是地壳中含量最高的金属元素，自 19 世纪被发现提纯之后，广泛地应用于医药、化妆、化工、冶炼、食品等各个领域[1]，在食品设备、食品包装材料、食品添加剂等方面发挥重大作用，铝的摄入几乎是不可避免的。上世纪 50 年代，人体铝的负荷量大约为 1 mg/d，据研究人员评估，到 2050 年，人体铝的负荷量可能会达到 100 mg/d[2]。随着研究的深入，发现铝是一种环境神经毒剂[3–4]，对人体骨骼[5–7]、消化系统[8–10]、生殖系统[11–12]、神经系统[13–14]等产生危害。相关研究数据表明，铝元素能够与 DNA 结合形成复合物，并通过与染色体蛋白的交联反应，诱发遗传毒性[15]。1989 年，联合国粮油组织和世界卫生组织(Food and Agriculture Organization/World Health Organization, FAO/WHO)，将铝元素定为食品污染物[16],并确定人体每周耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)定为 7.0 mg/(kg bw)[17–18]，在经过多次风险评估后，在 2011 年，FAO/WHO 食品添加剂联合专家委员会调整了铝的 PTWI，设定为 2.0 mg/(kg bw)[19]。由于铝在自然界中存在的普遍性，食品中特别是植源性食品中会存在铝的本底。

目前，对食品中铝本底值的研究，多见于面制品、小麦粉、面粉、淀粉制品等，但关于蔬菜以及蔬菜制品中铝元素的本底值报道较少。韩德娟等[20]分析结果显示，山东省小麦的铝元素本底参考值为 92.6 mg/kg，小麦粉的为 44.0 mg/kg。邓云等[21]分析得到茂名地区河粉中铝元素本底值为 15 mg/kg。曾秀珊等[22]调查得出河源地区米粉原料中铝本底值为 14.15 mg/kg。李杉等[23]列出了小麦、稻谷、淀粉、畜禽肉、鲜冻水产品、鲜蛋、液态乳等的铝本底含量参考值。寸宇智等[24]研究云南省的生牛乳和扇乳，确定其本底值为 1.65 mg/kg 和 7.13 mg/kg。

湖南省是酱腌菜生产和消费大省，华容县是我省最大的芥菜生产区，2023 年，华容县辖区内各乡镇的芥菜种植面积达 15 万亩，芥菜加工企业 39 家，年产值约 80 亿元[25]。腌制芥菜产品远销海内外，是消费者喜爱的餐桌美食。在近年来开展的食品安全抽检监测过程中发现，部分华容腌制芥菜产品的铝残留量较高，存在一定的食品安全风险。但由于土壤中的铝元素会随着植物的生长而迁移到植物体中，且芥菜属于十字花科的芸薹属，对铝胁迫有较强的适应能力[26]，使得无法确定在腌制芥菜产品中检出的较高铝残留量是来自原料还是食品添加剂。因此，有必要确定华容县腌制芥菜中铝元素的本底值。中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会在《对十二届全国人大四次会议第 4751 号建议的答复(摘要)》中指出，食品中铝本底水平与土壤地理环境相关，地区差异大[27]。为此，在华容县选取 8 个芥菜主要种植乡镇为监测点，对该地区的土壤、新鲜鲜芥菜、腌制芥菜中的铝含量进行研究，为华容县腌制芥菜生产工艺的改进以及食品安全国家标准的制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 样品采集

采集华容县境内插旗镇、注滋口镇、三封寺镇、团洲乡、禹山镇、梅田湖镇、治河渡镇、万庾镇 8 个乡镇的新鲜芥菜及其根部土壤各 90 份；采集华容县酱腌菜生产企

业生产的以华容芥菜为原料的腌制芥菜成品样本(以下简称腌制芥菜样本)218 份; 随机采集市售华容县腌制芥菜产品 30 份; 采集不同腌制工艺形成的盐卤溶液、半成品、成品各 40 份, 共计 548 份样品。

1.1.2　试　剂

铝单元素标准溶液(质量浓度 1000 mg/L, 坛墨质检科技股份有限公司); 钪单元素标准溶液(质量浓度 1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 粉条中铝成分分析质控样品(98.8 mg/kg, 广州谱恩科学仪器有限公司); 进口硝酸(优级纯, 默克股份两合公司); 过氧化氢(30%质量分数水溶液, 上海沪试实验室器材股份有限公司)。

1.1.3　仪器与设备

ICAP-RQ 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦科技有限公司); ME204E/02 电子天平(精度 0.1 mg; 量程: 220 g, 美国奥豪斯有限公司); MARS6 微波消解仪(美国 CEM 公司)。

1.2　检测方法

1.2.1　土　壤

参考 HJ 1315—2023《土壤和沉积物 19 种金属元素总量的测定 电感耦合等离子体质谱法》进行前处理, 再用电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)进行检测。

微波消解工作条件: 从室温升温至120 ℃, 保持3 min; 随后升温至 160 ℃保持 3 min; 最后升温至 180 ℃并保持 25 min。

ICP-MS 工作条件: 射频功率: 1550 W; 采样锥: 镍锥; 等离子体气流量: 15 L/min; 载气流速: 0.96 L/min; 辅助气流量: 0.80 L/min; 重复次数: 3 次。

1.2.2　新鲜芥菜及其茎秆和菜叶, 腌制芥菜样本, 市售腌制芥菜产品, 不同工艺的盐卤溶液、半成品、成品

采用 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法 ICP-MS 进行检测。

微波消解工作条件: 从室温升温至 120 ℃, 保持 10 min; 随后升温至 150 ℃保持 10 min; 最后升温至 190 ℃并保持 30 min。

ICP-MS 工作条件: 射频功率: 1500 W; 雾化器: 同心雾化器; 采样锥: 镍锥; 等离子体气流量: 15 L/min; 载气流速: 0.8 L/min; 辅助气流量: 0.4 L/min; 氦气流量: 4 mL/min; 雾化室温度: 2 ℃; 重复次数, 3 次。

1.3　标准曲线绘制

铝标准溶液: 吸取适量铝素标准贮备液, 用硝酸溶液(5:95, *V*:*V*)逐级稀释, 配制成质量浓度分别为 0、10、100、1000、10000、20000 μg/L 的铝标准系列溶液。

内标使用液: 取适量铝元素内标贮备液, 用硝酸溶液($V_{硝酸}$:$V_{水}$=5:95, *V*:*V*)配制成合适浓度的内标使用液。

测定铝元素和内标元素的信号响应值, 以铝元素的质量浓度为横坐标(*X*, μg/L), 待测元素与所选内标元素信号响应值的比值为纵坐标(*Y*), 绘制标准曲线。

1.4　质量控制

每批检测过程中插入标准物质、质控样、空白样, 验证数据可靠性, 采用平行样测定、加标回收等方法跟踪实验过程, 检测结果保留两位小数。

1.5　数据处理

检测数据的统计分析及作表、作图利用 WPS Excel 365、SPSS 27 进行处理。对未检出的数据, 参照 WHO《食品中痕量污染物的可靠评价》及相关研究, 用 1/2 检出限来计算。

2　结果与讨论

2.1　华容县内各乡镇土壤铝含量

采集了华容县 8 个监测点芥菜种植地的土壤, 共计 90 份。其中插旗镇 20 份、注滋口镇 16 份、三封寺镇 9 份、团洲乡 8 份、梅田湖镇 12 份、治河渡镇 7 份、万庾镇 8 份、禹山镇 10 份, 土壤中铝含量详见表 1。

由表 1 可见, 8 个监测点土壤中均检出较高的铝含量, 三封寺镇土壤中铝含量平均值最高, 为 71.29 g/kg, 梅田湖镇最低, 为 63.75 g/kg, 其余乡镇土壤中铝含量平均值相差不大。从每个乡镇的铝含量平均值和中位数来看, 存在正态分布右偏或左偏的情况, 这可能是由于样品量较少的原因。但综合来看, 华容县土壤中的铝含量平均值和中位数

表 1　华容县的 8 个监测点土壤中铝含量

Table 1　Aluminum content in the soil from 8 monitoring sites in Huarong County

地区	样本数	铝含量平均值/(g/kg)	含量范围/(g/kg)	中位数/(g/kg)	P_{95}(第 95 百分位数)/(g/kg)
插旗镇	20	66.32	53.26~77.61	66.02	77.36
注滋口镇	16	68.76	48.71~76.42	70.21	75.57
三封寺镇	9	71.29	62.67~81.01	70.34	74.35
团洲乡	8	69.08	54.25~77.15	70.76	80.03
梅田湖镇	12	63.75	54.46~74.74	62.70	75.83
治河渡镇	7	69.88	61.72~82.76	69.04	79.85
万庾镇	8	69.43	64.23~76.32	68.48	74.99
禹山镇	10	67.39	58.25~75.21	68.88	74.01
合计	90	67.82	48.71~82.76	68.81	77.26

分别为 67.82 g/kg 和 68.81 g/kg。用正态分布来分析，发现其峰度绝对值小于 10，偏度绝对值小于 3，说明该组数据基本呈正态分布，其正态分布曲线详见图 1。华容县土壤中铝含量主要集中在 58~78 g/kg 区间，占总数据的约 87.78%。

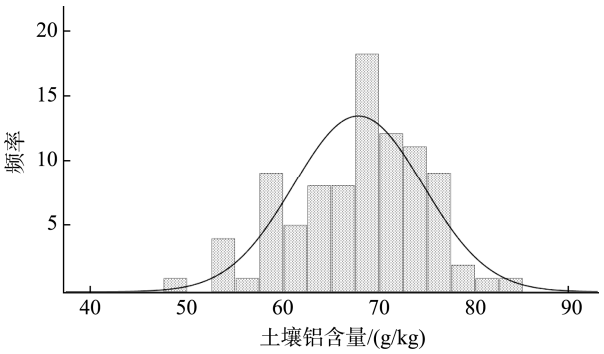


图 1 华容县土壤中铝含量正态分布曲线

Fig.1 Normal distribution curve of aluminum content in soils of Huarong County

2.2 华容县内各乡镇新鲜芥菜铝含量

采集华容县内 8 个监测点的土壤对应种植的新鲜芥菜 90 份，每份芥菜分为 2 份，一份作为全株样品检测铝含量，另一份中的菜叶和茎秆分别检测铝含量。

2.2.1 新鲜芥菜叶子的铝含量

对 90 份新鲜芥菜菜叶进行铝含量检测，检测结果详见表 2。由表 2 可知，菜叶中铝含量平均值，禹山镇最低，为 104.83 mg/kg，团洲乡最高，为 180.94 mg/kg。从检测结果来看，50%以上菜叶样本的铝含量范围在 90~180 mg/kg，75%以上在 69~230 mg/kg 之间。但菜叶中铝含量的波动范围较大，同一监测点采集的芥菜菜叶中铝含量也存在较大差异，这可能与新鲜芥菜的成熟度有关，在芥菜的生长过程中，菜叶中铝含量会随着菜叶的成熟而逐渐增加，使得成熟度高的菜叶的铝含量高于新叶的[28]。

2.2.2 新鲜芥菜茎秆的铝含量

对 90 份新鲜芥菜茎秆进行铝含量检测，检测结果详见表 3。数据表明，新鲜芥菜茎秆中铝含量平均值，插旗镇最低，为 47.85 mg/kg，治河渡镇最高，为 78.73 mg/kg；75%以上茎秆样本的铝含量分布在 26~81 mg/kg 之间。

2.2.3 新鲜芥菜全株的铝含量

对 90 份新鲜芥菜全株进行铝含量检测，检测结果详见表 4。数据表明，新鲜芥菜全株中铝含量平均值为 97.02 mg/kg，中位值为 85.30 mg/kg，，其中插旗镇均值最低，为 81.37 mg/kg，团洲乡最高，为 143.59 mg/kg；50%以上全株样本的铝含量范围在 56~118 mg/kg，75%以上在 43~150 mg/kg 之间。

各乡镇新鲜芥菜的菜叶、茎秆和全株样本均检出了铝元素，虽含量波动较大，出现了平均值高于中位值的情况，但这与部分样本的检测结果较大，使得平均值偏高有关。这些偏高的样本，可能与样本中的灰尘、杂质、样本成熟度、土壤中铝含量等多重因素有关。另外，有些乡镇的样本量不足，使得检测数据量较少，在后续的研究中，可增加样本量来进行结论验证性分析，以确证本研究的研究结论。

表 2 华容县的 8 个监测点芥菜菜叶中铝含量

Table 2 Aluminum content in *Brassica juncea* leaves from 8 monitoring sites in Huarong County

监测点	样本数	铝含量平均值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)
插旗镇	20	156.49	31.65~444.61	145.52	327.89
注滋口镇	16	154.62	43.22~349.69	146.20	281.81
三封寺镇	9	155.08	67.53~303.90	130.53	269.56
团洲乡	8	180.94	107.73~305.87	155.44	285.62
梅田湖镇	12	130.96	52.39~338.63	88.41	309.87
治河渡镇	7	144.32	95.60~297.08	107.73	261.87
万庾镇	8	138.50	90.03~164.05	145.34	163.89
禹山镇	10	104.83	65.49~139.90	98.11	136.95
合计	90	146.50	31.65~441.61	129.14	304.98

表 3 华容县的 8 个监测点芥菜茎秆中铝含量

Table 3 Aluminum content in *Brassica juncea* stems from 8 monitoring sites in Huarong County

监测点	样本数	铝含量平均值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)
插旗镇	20	47.85	23.40~114.86	43.37	101.24
注滋口镇	16	62.64	20.73~134.11	47.21	128.68
三封寺镇	9	67.33	33.69~118.13	62.15	110.81
团洲乡	8	64.05	33.12~103.83	63.65	97.65
梅田湖镇	12	49.81	29.81~84.03	48.18	78.79
治河渡镇	7	78.73	50.73~156.33	61.52	142.72
万庾镇	8	66.27	53.59~104.51	58.29	95.45
禹山镇	10	60.56	44.71~97.83	55.69	87.19
合计	90	59.58	20.73~156.33	53.85	113.92

表 4　华容县的 8 个监测点芥菜全株中铝含量

Table 4　Aluminum content in whole *Brassica juncea* plants from 8 monitoring sites in Huarong County

监测点	样本数	铝含量平均值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位数/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)
插旗镇	20	81.37	25.05~191.98	75.43	164.69
注滋口镇	16	109.21	23.32~203.05	85.06	200.81
三封寺镇	9	111.26	85.38~182.96	116.84	163.43
团洲乡	8	143.59	75.22~262.50	122.10	251.04
梅田湖镇	12	82.42	23.66~159.97	52.46	135.14
治河渡镇	7	116.79	72.43~206.52	87.24	189.72
万庾镇	8	95.84	72.20~123.53	89.48	123.33
禹山镇	10	82.26	50.92~111.45	81.07	106.19
合计	90	97.02	23.32~262.50	85.30	199.78

2.2.4　新鲜芥菜全株、叶、茎秆的铝含量情况

华容县 8 个监测点新鲜芥菜的菜叶、茎秆以及全株的铝含量平均值见表 5。通过对比发现, 菜叶的铝含量平均值远高于茎秆的, 而全株样品由于混合了菜叶和茎秆, 其铝含量处于菜叶和茎秆之间。

表 5　华容县的 8 个监测点芥菜各部位铝含量平均值(mg/kg)

Table 5　Average aluminum content in different parts of *Brassica juncea* from 8 monitoring sites in Huarong County (mg/kg)

监测点	样本数	全株	叶	茎秆
插旗镇	20	81.37	156.49	47.85
注滋口镇	16	109.21	154.62	62.64
三封寺镇	9	111.26	155.08	67.33
团洲乡	8	143.59	180.94	64.05
梅田湖镇	12	82.42	130.96	49.81
治河渡镇	7	116.79	144.32	78.73
万庾镇	8	95.84	138.50	66.27
禹山镇	10	82.26	104.83	60.56
合计	90	97.02	146.50	59.58

将各地采集的新鲜芥菜全株的铝含量, 与对应土壤中铝含量进行比较, 土壤中铝含量高的芥菜中铝含量也相对高, 土壤中含量低的芥菜中铝含量也相对低。

2.2.5　华容县辖区内芥菜铝含量分布情况

对华容县各监测点采集的 90 份新鲜芥菜全株铝含量, 按其测量值进行分段, 其含量分布情况见表 6。由表 6 可知, 超过 50%的样本中铝含量分布在 40~100 mg/kg 之间, 但约 11%样本的含量超过 160 mg/kg, 这可能跟取样时菜叶、茎秆的比例有关。

2.3　华容县酱腌菜生产企业生产的腌制芥菜样本中铝含量

采集华容县辖区内的 8 家酱腌菜生产企业生产的 218 份腌制芥菜成品样本, 所采样品在加工过程中未使用含铝食品添加剂或与铝元素相关的食品添加剂, 未与含铝元素的材料接触, 所采样品包材中亦未检出铝元素含量, 样品在生产加工过程中没有外源铝的介入, 成品中铝元素含量均来自原料。华容县 8 家酱腌菜企业生产的腌制芥菜产品中铝含量检测结果见表 7。从检测结果来看, 所有酱腌菜均检出了铝元素, 检出率为 100%。每家企业生产的腌制芥菜样本的铝含量范围值分布较宽, 这可能与芥菜种植点的土壤中的铝元素含量有关, 一般情况下, 土壤含量越高, 芥菜吸附的铝元素含量越多, 成品中铝元素含量越高; 每家企业的腌制芥菜样本铝含量平均值在 30.69~39.37 mg/kg 之间, 所有样品的平均值为 34.74 mg/kg, 中位值为 32.29 mg/kg, 75%的酱腌菜铝含量在 22.53~44.94 mg/kg 之间。

从 8 家企业铝含量的平均值来看, 除 2 家企业酱腌菜中铝含量的平均值低于中位数外, 其余企业生产的样品平均值均高于中位值, 整体上以芥菜为原料生产的酱腌菜中铝元素的平均含量也是平均值高于中位值。这说明在样品中, 存在铝含量较高的情况。

表 6　华容县芥菜全株铝含量分布情况

Table 6　Distribution of aluminum content in whole *Brassica juncea* plants in Huarong County

指标	检测值范围								
	20~<40 mg/kg	40~<60 mg/kg	60~<80 mg/kg	80~<100 mg/kg	100~<120 mg/kg	120~<140 mg/kg	140~<160 mg/kg	160~<200 mg/kg	≥200 mg/kg
频次	8	13	20	16	7	10	6	5	5
占比/%	8.89	14.44	22.22	17.78	7.78	11.11	6.67	5.56	5.56

表 7 华容县 8 家酱腌菜企业生产的腌制芥菜产品中铝含量

Table 7 Aluminum content in the pickled *Brassica juncea* produced by 8 pickled vegetable companies in Huarong County

生产企业	样本量	平均值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)
企业 1	42	38.79	10.40~82.61	38.70	70.49
企业 2	31	33.22	9.82~82.90	26.68	78.94
企业 3	23	31.88	11.56~68.73	31.00	68.44
企业 4	29	35.24	10.83~75.33	32.88	79.80
企业 5	25	39.37	12.67~72.40	40.68	71.44
企业 6	19	33.02	10.26~57.55	33.24	57.55
企业 7	24	32.54	12.44~49.79	32.19	49.79
企业 8	25	30.69	13.83~53.61	28.60	51.82
合计	218	34.74	9.82~82.90	32.29	68.40

2.4 腌制芥菜中铝本底值的确定

华容县辖区内 8 家酱腌菜企业生产的不同批次的 218 份腌制芥菜成品样本的铝含量按其测量值进行分段，超过 88%的样本的铝含量分布在 10~50 mg/kg 之间。再对采集的 218 批次腌制芥菜的铝含量进行铝含量的正态分布分析，发现其峰度绝对值小于 10，偏度绝对值小于 3，说明该组数据基本呈正态分布，详见图 2。腌制芥菜样本平均值为 34.47 mg/kg，95%概率下的置信区间为 32.42~36.51 mg/kg。按文献资料，以平均值与 3 倍标准偏差的和与最大值进行比较来确定参考本底值，当平均值与 3 倍标准偏差的和小于样本的最大值时，以最大值作为腌制芥菜中铝含量的本底值；当平均值与 3 倍标准偏差的和大于最大值时，以平均值与 3 倍标准偏差的和作为腌制芥菜中铝含量的本底值[20,29–30]。经计算，218 份腌制芥菜样本的铝元素含量平均值与 3 倍标准偏差的和为 80.70 mg/kg，而样本中的最大值为 82.90 mg/kg，因此，确定华容县腌制芥菜中铝含量的本底值以 82.90 mg/kg 为参考值。

2.5 市售腌制芥菜中铝含量的测定

对随机采购的 30 份华容县生产的腌制芥菜样本进行检测，样本包括鱼酸菜、芝麻芥菜、老坛酸菜等，其检测结果详见表 8。30 份样本的铝含量平均值为 38.34 mg/kg，芝麻芥菜和鱼酸菜中铝含量的平均值、P_{95}、最大值等均小铝含量于 82.90 mg/kg，符合本研究得到的腌制芥菜铝本底值的要求范围，但在老坛酸菜中检出了 1 份样本的铝含量较高，超过了本研究得到的腌制芥菜铝本底值的要求范围。

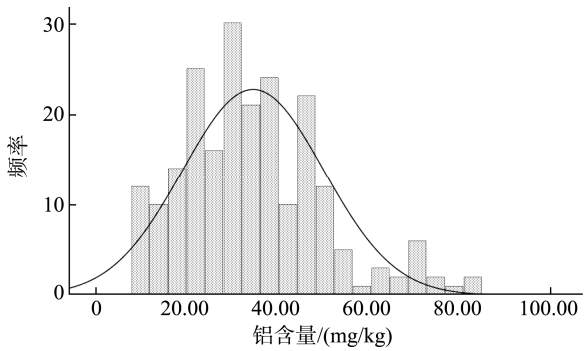


图 2 华容县 8 家酱腌菜企业的腌制芥菜成品中铝含量正态分布曲线

Fig.2 Normal distribution curve of aluminum content in the pickled *Brassica juncea* produced by 8 pickled vegetable companies in Huarong County

2.6 不同腌制工艺生产的腌制芥菜铝含量

目前，华容县腌制芥菜的腌制加工过程主要分为 3 种方式。(1)一次腌制，新鲜芥菜经采摘、晾晒，去除老茎、黄叶、腐败叶及明显泥沙后，放入腌渍池中，按层盐层菜进行腌制，腌制成熟起窖，即得一次腌制的半成品，腌制出盐卤溶液，将半成品经挑选去老叶、清洗、改制、脱盐、配料、拌料、灌装等工艺即得一次腌制成品；(2)二次腌制，

表 8 30 份市售华容腌制芥菜样品中铝含量

Table 8 Aluminum content in 30 commercially available Huarong pickled *Brassica juncea* samples

样本名称	样本量	平均值/(mg/kg)	含量范围/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)
芝麻芥菜	9	31.52	11.82~55.81	28.23	54.65
鱼酸菜	8	39.96	6.16~76.77	36.80	73.95
老坛酸菜	13	42.05	11.53~121.05	37.25	88.24
合计	30	38.34	6.16~121.05	33.66	73.15

以一次腌制的半成品为原料, 挑选、清洗干净再配料后密封, 进行二次腌制, 5~7 d 后, 即得二次腌制的半成品和盐卤溶液, 半成品经改制、配料、拌料、灌装后形成二次腌制成品; (3)清洁腌制, 新鲜芥菜采收后, 经晾晒, 除老茎、老叶、腐败叶, 清洗去泥沙, 震动脱水后, 再按照层盐层菜腌制至成熟, 即得腌制盐卤和半成品, 起窖后经改制、配料、拌料、灌装、杀菌等工序后形成成品。不同工艺下的盐卤溶液、半成品、成品的铝含量详见表 9。

从表 9 的数据对比来看, 清洁腌制的半成品中的铝含量最低, 其次是二次腌制, 而一次腌制的半成品中铝含量最高。华容芥菜收获期短, 采收量大, 清洗后鼓风震动脱水, 但由于量大, 很难脱干所有水分, 带入的水分容易坏窖, 因此只有少数低盐产品采用了清洁腌制。一次腌制时, 由于带入了少量土壤和灰尘, 盐卤溶液和半成品中铝含量偏高, 但经过清洗、脱盐等生产工艺后的成品以及二次腌制的半成品和成品, 其铝的含量明显下降。说明在酱腌菜腌制的过程中, 清洗是重要环节, 直接影响成品中铝含量。

表 9　不同腌制工艺时盐卤、半成品及成品中铝含量

Table 9　Aluminum content in bittern, semi-finished products and finished products during different pickling processes

样品	工艺		批次数	平均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	P_{95}/(mg/kg)
盐卤溶液	清洁腌制		9	9.54	13.92	9.81
	初腌制	一次腌制	14	30.70	65.67	36.56
		二次腌制	17	23.70	38.59	24.11
半成品	清洁腌制		9	47.35	55.76	44.09
	初腌制	一次腌制	14	102.10	129.02	101.56
		二次腌制	17	76.52	119.30	78.21
成品	清洁腌制		9	28.48	34.26	26.90
	初腌制	一次腌制	14	65.07	79.63	62.64
		二次腌制	17	39.70	56.43	37.98

3　结　论

本研究对华容县辖区内 8 个监测点的土壤, 新鲜芥菜, 腌制芥菜样本, 不同生产工艺下的盐卤溶液、半成品及成品中铝含量进行了分析。经过多角度的比较分析, 发现华容县土壤中铝含量的平均值为 67.82 g/kg。新鲜芥菜中, 菜叶的铝含量明显高于根茎的, 全株的铝含量中位值为 85.30 mg/kg, 75%以上的铝含量分布在 43~150 mg/kg 之间。在未添加含铝食品添加剂和未接触含铝材料与包材的情况下, 对 218 份腌制芥菜样本进行了本底值调查, 经精确检验与分析, 最终确定将 82.90 mg/kg 作为华容县铝含量本底值的参考值。

研究发现, 不同的腌制工艺对腌制芥菜成品中铝含量的影响较大, 采用清洁腌制法腌制的腌制芥菜成品中铝含量最少, 但是清洗后脱水难度较大, 且容易坏窖, 大批量腌制时的工艺控制技术要求较高。而一次腌制的成品中铝含量较高, 二次腌制的成品中铝含量略高于清洁腌制。故结合生产企业的实际情况与腌制工艺的影响, 建议生产企业采用二次腌制工艺生产, 对于有条件的或欲生产低铝含量腌制芥菜的生产企业, 采用清洁腌制的方式, 逐渐淘汰一次腌制, 以降低成品菜中铝含量。

在对市售酱腌菜进行铝含量研究时发现, 有含量超过 100 mg/kg 的情况, GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》对部分食品的铝残留量进行了规定, 要求不得超过 100 mg/kg。根据 2025 年国家市场监督管理总局对全国食品安全监督抽检和风险监测工作的要求, 未对酱腌菜中铝含量进行监督抽检或风险监测。鉴于酱腌菜中铝含量的高本底值, 且铝含量受到腌制工艺影响, 对腌制芥菜中铝的残留量的最大使用限量应做进一步的研究。在目前食品安全国家标准不完善的情况下, 针对可能引发的潜在食品安全风险, 一方面监管部门加大食品安全全过程监管力度, 进一步推动企业主体责任落实; 另一方面, 生产企业作为生产主体, 应提高食品安全意识, 积极改进工艺, 以提高自身产品食品安全水平。

参考文献

[1] 程代, 李想, 刘敬民, 等. 食源性铝污染及其毒性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2): 291–296.
CHENG D, LI X, LIU JM, *et al*. Research progress on the toxicity of foodborne aluminum contamination [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(2): 291–296.

[2] 董锦平, 陈涛, 邹公伟, 等. 铝对人体健康的影响[J]. 环境监测管理与技术, 1998, 10(5): 9–11.
DONG JP, CHEN T, ZOU GW, *et al*. Effects of aluminum on human health [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 1998, 10(5): 9–11.

[3] 邱爽. 铝对人体的毒性及相关食品安全问题研究进展[J]. 食品界, 2020(11): 104–105.
QIU S. Research progress on the toxicity of aluminum to human and related food safety issues [J]. Food Industry, 2020(11): 104–105.

[4] 庞洁. 铝对人体的毒性及相关食品安全问题研究进展[J]. 内科, 2011, 6(5): 470–473.
PANG J. Research progress on the toxicity of aluminum to human body and related food safety issues [J]. Internal Medicine, 2011, 6(5): 470–473.

[5] OHYASHILD T, KAFINO T, SUZUKI S, *et al*. Effect of aluminum ion on Fe2-Inducedlipid peroxidation in phospholipid liposomes under acidic conditions [J]. The Journal of Biochemistry, 1996, 120(5): 895–900.

[6] 孙中蕾, 陈瑶, 白静. 铝中毒研究进展[J]. 医学综述, 2013, 19(15): 2741–2743.

SUN ZL, CHEN Y, BAI J. Research progress in aluminum poisoning [J]. Medical Recapitulate, 2013, 19(15): 2741–2743.

[7] 冯文艇, 张镏琢, 黄红英, 等. 某电解铝厂作业工人慢性肌肉骨骼损伤调查分析[J]. 职业卫生与应急救援, 2016, 34(3): 189–191.
FENG WT, ZHANG LZ, HUANG HY, *et al*. Investigation on chronic musculoskeletal injury of workers in an electrolytic aluminium [J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2016, 34(3): 189–191.

[8] 刘佳喜, 张立丰. 铝的毒性作用研究进展[J]. 现代预防医学, 2021, 48(5): 806–809, 871.
LIU JX, ZHANG LF. Research progress on toxicity of aluminum [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(5): 806–809, 871.

[9] HADRUP N, SØRLI JB, JENSSEN BM, *et al*. Toxicity andbiokinetics following pulmonary exposure to aluminium (alu-minum): A review [J]. Toxicology, 2024, 506: 153874.

[10] 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. Advances in research on toxicity and dietary exposureofaluminum [J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2020, 31(1): 118–122.

[11] 唐玉航, 韦俊宏, 肖荣清, 等. 调节性细胞死亡在铝神经毒性中的机制研究进展[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(7): 854–860.
TANG YH, WEI JH, XIAO RQ, *et al*. Advances on mechanisms of regulated cell death in neurotoxicity of aluminum [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2023, 40(7): 854–860.

[12] 元辉雄, 陈文成. 铝的雄性生殖毒性研究进展[J]. 医学综述, 2019, 25(15): 2993–2997.
YUAN HX, CHEN WC. Research progress in reproductive toxicity of aluminium in males [J]. Medical Recapitulate, 2019, 25(15): 2993–2997.

[13] 尹玉华, 杨烁, 张天, 等. 亚慢性铝暴露对子代大鼠海马神经生长因子表达的影响[J]. 神经解剖学杂志, 2025, 41(2): 181–186.
YIN YH, YANG S, ZHANG T, *et al*. The effects of subchronic aluminum exposure on nerve growthfactor in hippocampus of offspring rats [J]. Chinese Journal of Neuroanatomy, 2025, 41(2): 181–186.

[14] 朱元州, 孙昊, 赵慧, 等. 铝中毒的诊断和治疗[J]. 巴楚医学, 2024, 7(2): 1–16.
ZHU YZ, SUN H, ZHAO H, *et al*. Diagnosis and treatment of aluminum toxicity [J]. Bachu Medical Journal, 2024, 7(2): 1–16.

[15] 王博. 吉林省居民膳食中特定有害金属暴露及其代谢机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
WANG B. The study on the exposure and metabolic mechanism of specific harmful metals for diets of residents in Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2023.

[16] FAO/WHO. Evaluation of certain food additives andcontaminants (Thirty-third report of the joint FAO/WHO expert committee on food additives) [R]. Geneva: WHO TechnicalReport Series, 1989.

[17] 尹红娜, 郑纯字, 张亚勋, 等. 河南省小麦和小麦粉中铝本底调查研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 8906–8911.
YIN HN, ZHENG CZ, ZHANG YX, *et al*. Investigation of aluminumbackground in wheat and wheat flour in Henan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(23): 8906–8911.

[18] 黄常刚, 梁高道, 谭慧. 武汉市面制食品中铝污染现状及膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(24): 6582–6585.
HUANG CG, LIANG GD, TAN H. Status of aluminum pollution andevaluation of' dietary exposure in flojur foods of Wuhan City [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(24): 6582–6585.

[19] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Evaluation ofcertain food additives and contaminants (Sixty-seventh report of the JointFAO/WHO Expert Committee on Food Additives) [R]. Geneva: WHO Tech RepSer, 2011.

[20] 韩德娟, 张喜琦, 高明辉, 等. 山东省小麦及小麦粉中铝本底值分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 366–372.
HAN DJ, ZHANG XQ, GAO MH, *et al*. Analysis of aluminum background value of wheat and wheat flour in Shandong Province [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 366–372.

[21] 邓云, 邱英莲, 李土贵, 等. 茂名地区河粉中铝本底值的研究[J]. 现代食品, 2021(21): 176–179.
DENG Y, QIU YL, LI TG, *et al*. Study on background value of aluminum element in rice noodles in Maoming area [J]. Modern Food, 2021(21): 176–179.

[22] 曾秀珊, 曾石峭, 成莲, 等. 河源地区米粉原料中铝本底值的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(4): 1156–1160.
ZENG XS, ZENG SQ, CHENG L, *et al*. Study on the background value of aluminum in rice noodle raw materials in Heyuan area [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(4): 1156–1160.

[23] 李杉, 付鹏钰, 杨丽, 等. 2013—2017 年河南省食品中铝含量及本底值调查[J]. 中国预防医学杂志, 2020, 21(4): 439–441.
LI S, FU PY, YANG L, *et al*. Aluminum content in food and and its baseline level in Henan in 2013—2017 [J]. Chinese Preventive Medicine, 2020, 21(4): 439–441.

[24] 寸宇智, 杨卫花. 云南省生牛乳和乳扇铝本底值研究[J]. 中国乳品工业, 2025, 53(7): 39–43.
CUN YZ, YANG WH. Investigation of the background values of aluminum in raw milk and dairy fan in Yunnan Province [J]. China Dairy Industry, 2025, 53(7): 39–43.

[25] 华容县人民政府. 企业强强联合!推动华容芥菜产业高质量发展[EB/OL]. (2023-12-26) [2025-10-11]. https://www.huarong.gov.cn/33047/content_2148780.html
The People's Government of Huarong County. Strong-strong alliance of enterprises! Promoting the high-quality development of Huarong mustard industry [EB/OL]. (2023-12-26) [2025-10-11]. https://www.huarong.gov.cn/33047/content_2148780.html

[26] 李朝苏, 刘鹏, 徐根娣, 等. 铝对芥菜(*Brassica juncea* Coss)幼苗根系形态和叶内抗氧化系统的影响[J]. 园艺学报, 2006(3): 645–648.
LI ZS, LIU P, XU GD, *et al*. Effects of aluminum on rootmorphology and antioxidant system in leaves of mustard (*Brassica juncea* Coss) seedlings [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006(3): 645–648.

[27] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 对十二届全国人大四次会议第 4751 号建议的答复(摘要)[EB/OL]. (2016-11-13) [2025-10-11]. https://www.nhc.gov.cn/zwgkzt/xxjy/201611/972f90135dd14bd3841fc47d96b502b8.shtml
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Reply to the Proposal No.4751 for the Fourth Session of the Twelfth National People's Congress (summary) [EB/OL]. (2016-11-13) [2025-10-11]. https://www.nhc.gov.cn/zwgkzt/xxjy/ 201611/972f90135dd14bd3841fc47d96b502b8.shtml

[28] 李勇, 唐澈, 赵华, 等. 茶树耐铝聚铝特性及其机理研究进展[J]. 茶叶科学, 2018, 38(1): 1–8.
LI Y, TANG C, ZHAO H, *et al*. Advances of aluminum tolerance and accumulation in tea plant [J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(1): 1–8.

[29] 魏宁果, 范芳芳, 樊成, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定小麦粉中的二氧化钛的本底值[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(3): 124–127.
WEI NG, FAN FF, FAN C, *et al*. Background value of titanium dioxide inwheat flours as determined by ICP-AES [J]. Cereals & Oils, 2021, 34(3): 124–127.

[30] 倪宗瓒. 卫生统计学(第 4 版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001.
NI ZZ. Health statistics (4th ed) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2001.

(责任编辑: 安香玉 冯东慧)