DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251020009
引用格式: 胡小易, 马龙, 于雅倩, 等. 渝东北腊肉金属元素含量特征分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 255–263.
HU XY, MA L, YU YQ, *et al*. Analysis of the characteristics of metal element content in cured meat from Northeastern Chongqing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 255–263. (in Chinese with English abstract).

渝东北腊肉金属元素含量特征分析

胡小易, 马 龙, 于雅倩, 颛孙嘉智, 沈丽华, 陈可意, 肖国生*

(重庆三峡学院生物与食品工程学院, 重庆 404000)

摘 要: 目的 深入分析渝东北腊肉的金属元素含量特征, 探讨地域差异与生产方式对腊肉中金属元素分布的影响。**方法** 从渝东北地区 4 个区县分别采集农家自制和工厂生产的腊肉样品共 40 份, 采用压力罐消解结合电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)技术, 对腊肉中 9 种常见金属元素进行定量分析, 并通过统计分析比较不同地域与生产方式的差异及元素间的相关性。**结果** 镉(Cd)、铬(Cr)和总砷(As) 3 种重金属元素在腊肉样品中检出率较高, 但整体含量水平相对较低; Cd、As 和铅(Pb)含量均低于 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》, 仅 1 个样品的 Cr 含量为 1.2050 mg/kg, 超出肉制品的限量值(1.0 mg/kg) 0.205 mg/kg; 锌(Zn)、铁(Fe)和铝(Al)含量相对较高, 锰(Mn)和铜(Cu)含量较低。渝东北地区腊肉样品中各金属元素含量呈现出不同程度的地域性差异, 重金属含量各区县之间变化较小, 但其他金属元素呈现一定地域性差异, 而生产方式主要影响 Al 和 Cu 的含量。此外, Zn 与 Cu (P<0.001)和 Fe (P<0.01)均呈极显著正相关, Cu 与 Fe 之间也呈显著正相关(P<0.05), Cd 与 Pb 之间存在显著正相关(P<0.05)。**结论** 渝东北腊肉中重金属元素整体含量水平较低, 符合 GB 2762—2022 国家食品安全标准; 地域和生产方式对 Al 和 Cu 含量具有一定影响。研究结果揭示了渝东北腊肉金属元素的分布特征, 为区域腊肉制品的质量安全监管及生产消费提供了科学依据和参考。

关键词: 腊肉; 金属元素; 重金属; 检测分析

Analysis of the characteristics of metal element content in cured meat from Northeastern Chongqing

HU Xiao-Yi, MA Long, YU Ya-Qian, ZHUAN Sun-Jia-Zhi, SHEN Li-Hua, CHEN Ke-Yi, XIAO Guo-Sheng*

(*College of Biology and Food Engineering*, *Chongqing Three Gorges University*, *Chongqing* 404000, *China*)

ABSTRACT: Objective To conduct an in-depth analysis of the metal element content characteristics of cured meat in Northeastern Chongqing and to explore the influence of regional differences and production methods on the distribution of metal elements in cured meat. **Methods** A total of 40 samples of homemade and factory-produced

收稿日期: 2025-10-20
第一作者: 胡小易(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全监测与质量控制。E-mail: 1622587702@qq.com
***通信作者:** 肖国生(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微生物风险评价、微生物与生态安全、微生物资源开发利用等。E-mail: xgs03@163.com

cured meat from a total of 4 districts and counties in Northeastern Chongqing were collected respectively. The pressure tank digestion combined with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) technology was adopted. Quantitative analysis was conducted on 9 kinds of common metal elements in cured meat and statistical analysis was used to compare the differences in different regions and production methods as well as the correlations among the elements. **Results** The detection rates of 3 kinds of heavy metal elements, cadmium (Cd), chromium (Cr) and total arsenic (As), in the cured meat samples were relatively high, but the overall content levels were relatively low. The contents of Cd, As and lead (Pb) were all lower than the limits specified in GB 2762—2022 *National food safety standard-Limits for contaminants in foods*. Only the Cr content of 1 sample was 1.2050 mg/kg, which exceeded thel limit for meat products (1.0 mg/kg) by 0.205 mg/kg. The content of zinc (Zn), iron (Fe) and aluminum (Al) were relatively high, while those of manganese (Mn) and copper (Cu) were low. The content of various metal elements in cured meat samples from Northeastern Chongqing exhibited regional differences to varying degrees. Heavy metal content varied slightly among different districts and counties, whereas other metal elements showed certain regional differences. Production method mainly affected the content of Al and Cu. In addition, Zn was extremely significantly positively correlated with Cu and Fe (P<0.01), Cu was also significantly positively correlated with Fe (P<0.05), and Cd was significantly positively correlated with Pb (P<0.05). **Conclusion** The overall content level of heavy metal elements in the cured meat of Northeastern Chongqing is relatively low, meeting the GB 2762—2022. The region and production mode have certain influences on the content of Al and Cu. The research results reveal the distribution characteristics of metal elements in the cured meat of Northeastern Chongqing, providing a scientific basis and reference for the quality and safety supervision, production and consumption of cured meat products in the region.

KEY WORDS: cured meat; metal element; heavy metal; detection and analysis

0 引 言

肉制品是人们日常饮食的重要组成部分, 富含脂肪、蛋白质、矿物质和微量元素, 对维持人体营养平衡和生理功能具有重要作用[1]。随着生活水平的提高和消费结构的转变, 肉制品的种类和消费方式日益多样化, 传统加工肉制品因其独特风味和较长保质期, 在广大居民尤其是中老年群体中仍保持较高的市场接受度[2]。腊肉作为典型的传统腌腊肉制品, 广泛盛行于中国西南、华南等地区[3]。渝东北地区地处四川盆地东缘过渡带, 涵盖开州、奉节、巫溪和城口等多个重要农副产品产区, 是川渝地区传统腊肉的重要产区之一[4]。该地区腊肉以风味浓郁、口味独特深受广大消费者的喜爱, 生产方式以家庭自制和工厂生产为主。由于不同区县在腌制、熏制方式和加工环境控制水平等方面存在差异, 导致腊肉产品金属元素含量可能存在较大差异[5−6]。因此, 对渝东北地区腊肉中金属元素含量特征分析具有现实必要性。

已有研究表明, 腊肉中普遍可检出镉(Cd)、铅(Pb)、总砷(As)和铬(Cr)等潜在有害重金属元素, 其含量受地区环境背景、原料来源及加工工艺差异等多因素共同影响。总体而言, 多数样品中重金属含量低于国家食品安全标准限值, 整体处于安全范围内, 但不同地区和不同样品之间仍表现出一定程度的波动[7−8]。例如, 湖南、贵州等地区腊肉中 Pb 和 Cd 的平均含量分别可达 0.12~0.58 mg/kg 和 0.02~0.11 mg/kg, 其中部分样品的Pb含量超过GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中肉制品的限量值(0.5 mg/kg)[9−10]。四川省南充市腊肉样品中 Pb、Cd、Cr、As 的含量范围分别为 0.000~0.100、0.000~0.081、0.000~0.17 以及 0.000~0.110 mg/kg[11]。此外, 对秦巴山区某县腊肉等样品的研究发现, Cd、Pb 和 Cr 的含量范围分别为 0.001~0.017、0.08~0.38、0.22~2.27 mg/kg[7]。

与鲜肉相比, 腊肉在腌制、烟熏及长期储藏过程中, 可能因食盐、调料或烟气中金属离子的吸附与沉积作用, 导致 Cr、Pb 元素含量升高[12−13]。相关研究表明, 腌制和烟熏处理后肉制品中 Cd、Pb 和 Cr 的含量平均可增加 20%~60%, 其中烟熏温度和燃料类型是影响重金属迁移与富集的关键因素[14]。腊肉中重金属含量异常不仅影响产品品质, 还可能对消费者健康造成潜在威胁。长期低剂量暴露于 Cd、Pb、As 等金属元素可能引发神经损伤、肾功能障碍及肝脏代谢紊乱, 具有明显的累积性毒理效应[15]。因此, 加强腊肉制品重金属污染的监测与风险评估, 对保障居民膳食安全具有重要意义。

近年来, 腊肉中重金属检测方法不断发展, 已广泛采用原子吸收光谱法(atomic absorption spectrometry, AAS)、原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, AFS)、电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma optical

emission spectrometry, ICP-OE)、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)等技术[16–21]。其中, ICP-MS 具有灵敏度高、检出限低和多元素同时测定等优势, 在食品安全检测领域得到广泛应用[22–23]。从食品安全与营养评价的角度来看, 腊肉中金属元素并非仅局限于 Cd、Pb、As 和 Cr 等潜在有害重金属元素, 还包括铜(Cu)、锌(Zn)、锰(Mn)和铁(Fe)等人体必需金属元素, 以及铝(Al)等非必需但具有潜在健康风险的金属元素。这些金属元素在维持机体代谢、免疫调节等方面具有重要作用, 其含量同样受原料来源、加工工艺及环境条件的影响。当摄入水平超过合理范围时, 也可能对人体健康产生不利影响, 所以有必要从元素整体出发, 对潜在有害金属与其他金属元素进行同步检测与综合分析。此外, 现有研究多集中于商品化腊肉产品或特定城市市场[24–29], 对特定地理区域如渝东北地区不同区县和加工方式的腊肉重金属污染特征研究仍较为稀少。基于此, 本研究以渝东北地区 4 个区县为研究对象, 采集典型家庭自制和工厂生产的腊肉样品, 采用 ICP-MS 技术对 Cd、Pb、As、Cr、Cu、Zn、Mn、Fe、Al 等 9 种金属元素进行定量检测分析。旨在揭示渝东北腊肉中金属元素的含量水平与安全特征, 分析不同加工方式的影响差异, 为该地区腌腊肉制品质量监管和生产消费提供参考。

1　材料与方法

1.1　腊肉样品

从重庆市城口、奉节、巫溪和开州 4 个渝东北腊肉主产区县, 采集代表性农家自制腊肉样品(编号为 NC)和工厂生产腊肉样品(编号为 GC), 共计 40 份。其中, 农户自制腊肉样品 20 份(城口 5 份、奉节 5 份、巫溪 5 份、开州 5 份), 其加工方式相似, 主要包括腌制、风干、烟熏, 工厂生产腊肉样品 20 份(城口 5 份、奉节 5 份、巫溪 5 份、开州 5 份)。为尽量控制个体差异和部位偏差, 所有样品均取自猪后腿上中下部位, 采样时涵盖肌肉层与脂肪层的混合组织。采样过程中使用经高温灭菌处理的不锈钢刀具并佩戴一次性手套, 避免金属交叉污染, 并对每份样品进行编号标识。采集后样品立即置于无金属污染的聚乙烯密封袋中, 现场采用便携式冷藏箱在 0~4 ℃条件下保存并于 24 h 内运回实验室, 于–80 ℃冰箱中冷冻保存备用。

1.2　试　剂

Cd、Cr、As、Pb、Al、Mn、Fe、Zn、Cu 标准溶液(质量浓度为 1000 mg/L, 坛墨质检科技股份有限公司); 调谐液[赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; 硝酸(优级纯, 重庆川东化工集团有限公司); 实验用水为超纯水。

1.3　仪　器

BP121S 型电子分析天平(精度 0.1 mg, 最大称量 120 g, 德国赛多利斯仪器公司); DHG-9240A 型电热鼓风干燥箱(上海鸿都电子科技有限公司); KQ-250DE 型超声水浴箱(昆山市超声仪器有限公司); X-SF-50 型压力消解罐(配有聚四氟乙烯消解内罐); ICAP Q 型 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱仪[赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; CD-150GD 型超纯水仪(重庆利迪实验仪器公司); T-25 型高速组织匀浆机(德国 IKA 公司); FP-FDL-50-TD 型冷冻干燥机[辅光精密仪器(上海)有限公司]。

1.4　实验方法

1.4.1　样品的制备

取出–80 ℃冰箱中腊肉样品, 置于室温自然解冻。去除表面附着物, 用干净陶瓷刀具对样品进行去骨、去皮处理, 保留肌肉和脂肪层的混合组织, 切割为小块, 用高速组织匀浆机对样品进行充分均质混合。随后, 将样品经冷冻干燥(–50 ℃, 48 h)处理至恒重, 再使用研磨机将其研磨成粉末状, 过 60 目尼龙筛, 得到均匀的样品粉末。将样品粉末装入样品袋, 置于–18 ℃的冰箱内保存备用。

1.4.2　试样消解

称取 0.50 g 试样于消解内罐中, 加入 3 mL 硝酸, 静置过夜, 旋紧不锈钢外套, 放入恒温干燥箱进行消解: 先升温至 80 ℃, 保持 120 min; 然后升温至 120 ℃, 保持 120 min; 最后升温至 160 ℃, 保持 240 min。消解完成后, 待样品冷却, 缓慢旋松不锈钢外套, 将消解内罐取出, 在超声水浴箱中, 于 100 ℃超声脱气 5 min, 用水定容至 25 mL, 混匀备用, 同时做空白试验。空白试验不加入试样, 其余处理过程与样品完全一致: 向消解内罐中加入 3 mL 硝酸, 静置过夜, 旋紧不锈钢外套, 放入恒温干燥箱中按相同程序进行消解(80 ℃保持 120 min, 120 ℃保持 120 min, 160 ℃保持 240 min)。消解完成后, 待冷却, 缓慢旋松不锈钢外套, 将消解内罐取出, 在超声水浴箱中, 于 100 ℃超声脱气 5 min, 用水定容至 25 mL, 混匀备用。

1.4.3　混合标准工作溶液配制

吸取适量单元素标准贮备液或多元素混合标准贮备液, 用 5% (*V*:*V*)硝酸溶液逐级稀释配成混合标准工作溶液系列, 各元素质量浓度见表 1。

1.4.4　上机检测

经消解、脱气、定容后的样品上清液转移至 15 mL EP 管, 置于 ICP-MS 自动进样器中, 进行定量测定, 其工作参数见表 2。

1.5　数据处理

经采用单因子污染指数法获取研究区腊肉样品中重金属污染状况, 如公式(1)计算:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: P_i 为 i 金属元素对应的单因子污染指数; C_i 为 i 金属元素含量实测值, mg/kg; S_i 为 i 金属元素含量限量值, mg/kg。

表 1 标准溶液系列质量浓度(μg/L)
Table 1 Series mass concentration of standard solution (μg/L)

元素	系列 1	系列 2	系列 3	系列 4	系列 5	系列 6
Cd	0.00	0.50	1.00	3.00	3.00	5.00
Cr	0.00	2.00	4.00	5.00	8.00	10.00
Cu	0.00	2.00	4.00	5.00	8.00	10.00
As	0.00	2.00	4.00	5.00	8.00	10.00
Pb	0.00	2.00	4.00	5.00	8.00	10.00
Al	0.00	5.00	8.00	10.00	12.00	50.00
Mn	0.00	5.00	10.00	12.00	14.00	50.00
Fe	0.00	4.00	8.00	9.00	10.00	50.00
Zn	0.00	2.00	6.00	8.00	10.00	50.00

表 2 ICP-MS 工作参数
Table 2 Working parameters of ICP-MS

参数名称	参数	参数名称	参数
射频功率/W	1500	雾化器	高盐/同心雾化器
等离子体气流量/(L/min)	15	采样锥/截取锥	镍/铂锥
载气流量/(L/min)	0.80	采样深度/mm	8
辅助气流量/(L/min)	0.40	采样模式	跳峰
氦气流量/(mL/min)	4	检测方式	自动
雾化室温度/℃	2	每峰测定点数/次	3
样品提升速率/(r/s)	0.3	重复次数/次	3

当 $P_i \leqslant 0.6$ 时, 表示有污染物残留, 但仍在安全范围内; 当 $0.6<P_i<1.0$ 时, 表示污染物残留较多, 属于轻度污染; 当 $P_i \geqslant 1.0$ 时, 表示污染物残留已超过食品卫生标准, 属于重度污染[30]。

用 SPSS 26.0 软件进行数据处理, 采用最小显著差(least significant difference, LSD)多重比较法和 Pearson 相关分析, 每份腊肉样品作为一个独立重复, 每个样品进行 3 次平行测定, 结果以均值±标准偏差表示, 采用 GraphPad Prism 8 软件绘制图表, 并参考 GB 2730—2015《食品安全国家标准 腌腊肉制品》对腊肉重金属污染的等级或危害进行评价。

2 结果与分析

2.1 渝东北腊肉重金属元素污染特征

Cd、Cr、As 的检出率均为 100.00%, Pb 的检出率为 12.50%。各元素中, Cr 含量最高, 平均浓度为(0.5820±0.2510) mg/kg, 其次为 As [(0.0420±0.0690) mg/kg], Pb [(0.0099±0.0283) mg/kg]和 Cd [(0.0042±0.00439) mg/kg]含量相对较低, 见表 3。与国内相关研究相比, 本研究中 Cd 和 Pb 含量处于较低水平。全国肉制品监测数据的空间分析显示, 不同区域肉类产品中 Cr 和 As 的浓度存在一定差异, 但整体上呈现 Cr 含量最高, As 次之, Cd 和 Pb 较低的分布特征[31], 该元素浓度顺序与本研究结果一致, 说明渝东北地区腊肉中重金属组成具有一定的普遍性特征。各重金属元素平均含量均低于 GB 2762－2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中所规定的污染物限量, P_i 较低(<0.6),但有 1 个样品中的 Cr 略微超过了安全限值(≤1.0 mg/kg), 提示 Cr 仍是渝东北腊肉中需要重点关注的风险元素。已有研究指出, 在多种传统肉类产品中, Cr 往往是含量最高的重金属元素之一, 通常高于 Cd、Pb 和 As[8], 与本研究结果相一致。

Cr 主要以 Cr^{3+}和 Cr^{6+}两种形态存在。3 价铬在适量摄入时可促进糖类和脂类代谢, 对人体具有一定的营养作用, 而 6 价铬具有显著的毒性、致癌性和致突变性[32]。究其原因, 主要与生猪养殖环境、饲料质量等因素密切相关[33]。本研究中个别样品中铬含量偏高, 可能与样品前处理过程中使用含铬不锈钢刀具或容器有关, 从而产生轻微的交叉污染[34]。已有研究表明, 不锈钢器具在高盐或酸性环境下可能释放微量 Cr, 导致样品中 Cr 含量增加约 0.05~0.2 mg/kg[35], 与本研究中个别样品的超标幅度相近, 提示应在样品预处理过程中尽量避免使用含铬金属器具。

此外, 生猪养殖环境和饲料质量也是影响腊肉中 Cr 含量的重要因素。文献报道, 在受工业废水或矿区土壤影响的养殖区, 饲料及猪肝样品中 Cr 含量可达 0.8~1.5 mg/kg, 而普通生态养殖环境下肉样中 Cr 含量通常低于 0.3 mg/kg[36]。与上述研究相比, 本研究腊肉中 Cr 的平均含量(0.5820 mg/kg)处于上述范围中值, 表明区域环境因素可能对 Cr 的积累具有一定影响。此外, 腊肉加工工艺也会导致 Cr 含量升高。有研究发现, 烟熏时间延长会显著增加肉制品中 Cr 残留, 与熏制 1 年的腊肉(Cr 含量约 0.35 mg/kg)相比, 熏制 2 年的腊肉中 Cr 平均升至约 0.75 mg/kg[37]。这与本研究样品的 Cr 水平处于相似量级, 说明烟熏时长及燃料类型可能是导致个别样品 Cr 偏高的重要原因。

表 3　腊肉中有害金属元素含量

Table 3　Content of harmful metal elements in cured meat

元素种类	Cd	Cr	As	Pb
最大值/(mg/kg)	0.0120	1.2050	0.2220	0.1130
最小值/(mg/kg)	0.0005	0.2830	0.0032	n.d.
中位数/(mg/kg)	0.0026	0.5070	0.0140	n.d.
标准偏差/(mg/kg)	0.0039	0.2510	0.0690	0.0283
平均浓度/(mg/kg)	0.0042	0.5820	0.0420	0.0099
检出率/%	100.00	100.00	100.00	12.50
限量值/(mg/kg)	≤0.1	≤1	≤0.5	≤0.5
单因子污染指数	0.04	0.58	0.08	0.01
方法检出限/(mg/kg)	0.002	0.050	0.010	0.020
超标率/%	0.00	2.50	0.00	0.00

注: n.d.表示未检出。

2.2　渝东北腊肉其他金属元素含量

在其他金属元素方面, Al、Fe、Zn、Cu 的检出率均为 100.00%, Mn 的检出率为 81.25%。其中 Zn [(4.706±3.167) mg/kg]、Fe [(3.881±2.542) mg/kg]和 Al [(2.292±1.428) mg/kg]的含量相对较高，而 Mn [(0.266±0.383) mg/kg]和 Cu [(0.183±0.104) mg/kg]的含量较低(均低于 1 mg/kg)，见表 4。渝东北腊肉中 Zn 和 Fe 含量高于其他元素，与罗培林等[38]研究结果基本一致。值得注意的是，渝东北腊肉中 Al 含量相对较高。已有研究表明，过量 Al 暴露可在体内蓄积并引发多种毒性反应，包括氧化应激、蛋白质折叠等病理过程。长期摄入过量 Al 与神经退行性损伤、认知功能障碍等神经系统异常有关联，同时可干扰钙磷代谢并对骨骼代谢产生不利影响，进而增加骨质异常的风险[27]，其含量高的原因有待进一步溯源。

表 4　腊肉中其他金属元素含量

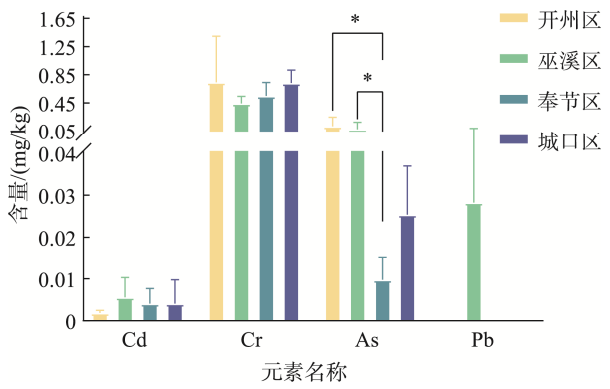
Table 4　Content of other metal elements in cured meat

元素种类	Al	Mn	Fe	Zn	Cu
最大值/(mg/kg)	4.323	1.439	11.743	11.942	0.409
最小值/(mg/kg)	0.148	0.000	0.652	0.457	0.035
中位数/(mg/kg)	2.786	0.123	3.439	4.077	0.166
标准差/(mg/kg)	1.428	0.383	2.542	3.167	0.104
平均浓度/(mg/kg)	2.292	0.266	3.881	4.706	0.183
检出率/%	100.00	81.25	100.00	100.00	100.00

2.3　不同区县腊肉金属元素含量差异

不同区县腊肉样品重金属元素含量存在一定差异。总体来看，各区县中 Cr 含量最高, As 次之，见图 1。其中，开州区和城口县腊肉样品中 Cr 含量相对较高，平均浓度分别为(0.744±0.652) mg/kg 和(0.734±0.183) mg/kg，而奉节县[(0.551±0.189) mg/kg]和巫溪县[(0.443±0.099) mg/kg]腊肉样品铬污染程度相对较低。开州区腊肉 As (0.115 mg/kg)最高，其次为巫溪县(0.073 mg/kg)、城口县(0.025 mg/kg)和奉节县(0.010 mg/kg)。Pb 仅在巫溪县有检出，其他区县均未检出，而 Cd 在 4 个区县样品中均有检出，但含量均小于 0.010 mg/kg。

城口、奉节、巫溪和开州 4 个区县腊肉样品中 Zn、Fe、Al 含量相对较高，而 Mn 和 Cu 含量则相对较低，见图 2。其中，Zn 含量：城口县(7.828 mg/kg)>巫溪县(6.264 mg/kg)>开州区(3.298 mg/kg)>奉节县(2.879 mg/kg)，且城口县与



注: *表示差异显著, $P<0.05$，图 2、4~5 同。

图 1　不同区县腊肉样品的重金属含量差异

Fig.1　Differences in the content of heavy metal in cured meat samples from different districts and counties

奉节县存在显著差异(P<0.05)。巫溪县腊肉样品中 Fe (5.144 mg/kg)和 Al (3.537 mg/kg)的含量最高，城口县腊肉的 Al 含量显著低于巫溪和开州。Cu 含量分布情况则与 Zn 分布特征相似，以城口县(0.289 mg/kg)最高，奉节县(0.135 mg/kg)最低，且仅在城口县和奉节县间存在显著差异。

渝东北地区腊肉样品中各金属元素含量呈现出不同程度的地域性差异，重金属含量各区县之间变化较小，而其他金属元素呈现一定地域性差异。类似的区域差异特征在其他地区的烟熏肉制品研究中也有报道，通常与养殖环境及加工方式差异有关[39]。

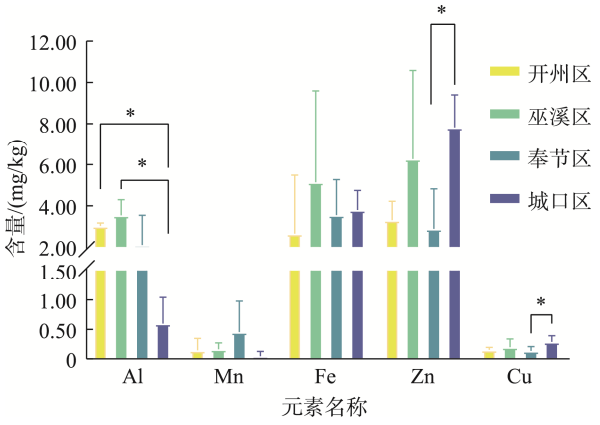


图 2 不同区县腊肉样品其他金属元素含量差异

Fig.2 Differences in the content of other metal elements in cured meat samples from different districts and counties

2.4 不同生产方式腊肉的金属元素含量差异

生产方式对农家腊肉与工厂腊肉中重金属含量的影响不大，见图 3。其中，工厂腊肉中(0.077 mg/kg) As 含量略高于农家腊肉(0.015 mg/kg)，农家腊肉(0.572 mg/kg)和工厂腊肉(0.595 mg/kg)的 Cr 含量相当。Pb 和 Cd 在农家和工厂腊肉中的含量较低，工厂低于农家。结果表明，生产方式对 Cd、Cr、As 和 Pb 的整体污染水平影响有限，这一结果与已有有关肉类产品加工过程中对重金属含量影响的研究分析一致。食品加工/处理过程中的设备材料、处理方法等因素均可能引入或减少重金属残留，但在某些情况下这种影响并不显著[40]。

工厂和农家腊肉 Al 和 Cu 存在显著性差异(P<0.05)，Zn、Fe、Mn 3 种元素之间差异不明显，见图 4。具体来看，工厂腊肉中 Al 含量(1.510 mg/kg)显著低于农家腊肉(2.899 mg/kg) (P<0.05)，但工厂腊肉 Cu (0.240 mg/kg)显著高于农家腊肉(0.138 mg/kg) (P<0.05)。相比之下，工厂腊肉 Zn 和 Fe 含量要高于农家腊肉，农家腊肉 Mn 含量要高于工厂。结果表明，不同生产方式对渝东北腊肉中 Al 和 Cu 含量影响较大，而对 Zn、Fe、Mn 等营养元素影响有限。Al 和 Cu 含量的差异可能与加工过程中采用设备等有关。已有研究表明，食品接触金属材料中金属迁移规律可能导致金属向食品基质迁移，不同金属材质及处理条件会影响产品中金属元素的含量水平[41]。

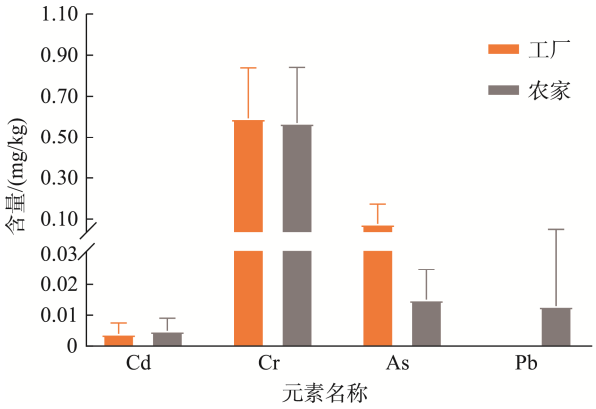


图 3 不同生产方式腊肉样品重金属含量差异

Fig.3 Differences in the content of heavy metal in cured meat samples produced by different methods

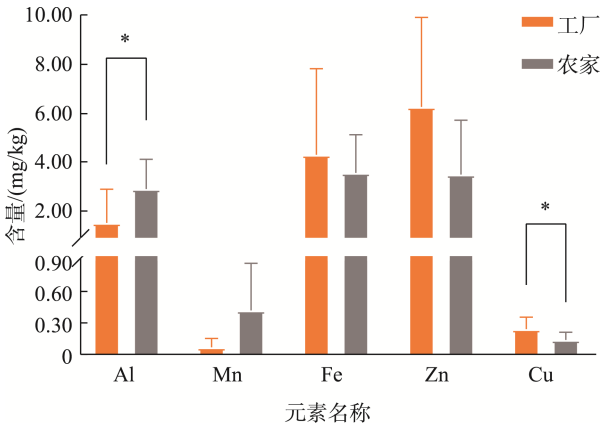


图 4 不同生产方式腊肉样品其他金属元素含量差异

Fig.4 Differences in the content of other metal elements in cured meat samples produced by different methods

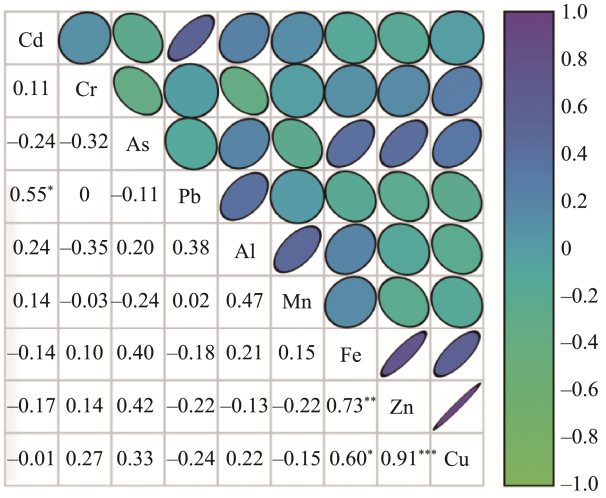
2.5 不同金属元素间相关性分析

不同金属元素的相关性在一定程度上反映其来源的相似性，渝东北腊肉中各金属元素含量相关性结果见图 5。结果显示，Zn 与 Cu (r=0.91, P<0.001)和 Fe (r=0.73, P<0.01)呈极显著正相关，Cu 与 Fe 之间也呈显著正相关(r=0.60, P<0.05)，Cd 与 Pb 则表现出显著正相关关系(r=0.55, P<0.05)。结果表明，渝东北地区腊肉中 Zn、Fe、Cu 3 种元素可能具有共同的来源或在生产加工过程中存在类似的迁移富集机制，但需警惕镉-铅联合污染问题。

这种显著的 Zn-Cu-Fe 相关性表明 3 者可能具有相似的代谢或环境来源。已有研究表明，这 3 种元素均为生物必需的常量金属元素，在猪体内主要参与血红蛋白合成、金属酶活性维持及氧化还原反应，常在组织中表现出同步积累的趋势[42]。因此，该相关性不仅可能与加工过程有关，也可能反映其在鲜肉阶段的生理共存特征。此外，文献报

道鲜猪肉样品中 Zn 与 Cu、Fe 的相关系数通常在 0.65~0.88 之间[43]，与本研究腊肉结果相近，说明此类常量元素的相关性主要受生理调控影响，而非完全由加工环节引起。

另一方面，Cd 与 Pb 在渝东北腊肉中的正相关关系（r=0.55，P<0.05），提示二者可能具有共同的外源性污染来源。Cd 和 Pb 通常来源于饲料、饮水或环境沉降物[44]，在动物体内尤其是在脂肪组织中具有较强的协同吸附和迁移能力。已有研究表明，饲料类型或成分会影响猪体内 Cd 和 Pb 的累积水平，同时多种重金属在生物体内可能存在相互作用，其混合暴露可能影响体内组织分布和潜在毒性[45–47]。因此，本研究中观察到的渝东北腊肉中 Cd-Pb 的相关性提示，应关注区域饲养及加工环境中潜在的联合污染风险，以保障食品安全。



注：**表示差异极显著，P<0.01，***表示差异强极显著，P<0.001。

图 5　渝东北地区腊肉样品不同金属元素含量相关性

Fig.5　Correlation of different metal element content in cured meat samples from Northeastern Chongqing

3　结论与讨论

渝东北腊肉样品中，Cd、Cr 和 As 检出率较高，但其含量水平整体较低，Cd、As 和 Pb 均未超过 GB 2762－2022 国家限量标准，仅有 1 个样品的 Cr 含量略超标。这与全国肉制品监测数据的空间分析结果基本一致，即 Cr 通常是含量最高的重金属，而 As、Cd 和 Pb 含量相对较低[31]。Zn、Fe 和 Al 含量相对较高，Mn 和 Cu 含量较低，不同区县腊肉样品中重金属元素含量总体差异不大，而 Zn、Fe 和 Al 等元素表现出一定的地域性差异。生产方式对重金属元素整体含量影响不明显，但 Al 和 Cu 在不同生产方式之间存在一定差异，这可能与加工设备材质有关[41]。总体来看，渝东北腊肉重金属含量水平低，符合 GB 2762－2022 国家食品安全标准，具有较高食用安全性，但个别元素略超标提示在加工及贮藏过程中仍需加强质量监管，尤其应关注设备材料和加工环境可能对元素含量产生潜在影响。Zn、Fe 和 Al 的地域性差异可能与原料来源、饲养环境及腌制配料差异有关。本研究样品数量有限、地域覆盖范围不足，且未对金属来源进行系统解析，存在一定局限性。未来研究可通过扩大样品规模、结合环境监测及源解析方法，系统分析金属元素在腊肉生产全过程中的迁移转化规律，同时探讨不同加工工艺对元素富集或损失的作用机制，为渝东北腊肉制品的质量安全监管及生产工艺优化提供科学依据和技术支撑。

参考文献

[1] WEISS J, GIBIS M, SCHUH V, *et al*. Advances in ingredient and processing systems for meat and meat products [J]. Meat Science, 2010, 86(1): 196–213.

[2] 刘晓晖，李涛. 肉制品营养成分与食用价值研究进展[J]. 肉类工业，2021, 42(2): 18–22.
LIU XH, LI T. Research progress on nutritional composition and edible value of meat products [J]. Meat Industry, 2021, 42(2): 18–22.

[3] 陈静，彭华，王燕. 我国腊肉制品中重金属污染现状与控制对策[J]. 食品研究与开发，2020, 41(10): 186–191.
CHEN J, PENG H, WANG Y. Current status and control measures of heavy metal pollution in Chinese cured meat products [J]. Food Research and Development, 2020, 41(10): 186–191.

[4] 邓泽鑫，胡清，刘毅. 四川盆地东缘过渡带地质地貌特征与农业生产关系[J]. 地理科学，2018, 38(4): 101–109.
DENG ZX, HU Q, LIU Y. Geological and geomorphological features of the transitional zone at the eastern margin of the Sichuan basin and its relationship with agricultural production [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 101–109.

[5] 朱慧玲，黄德钦，谢兰香. 腌腊肉制品中重金属污染的研究进展[J]. 肉类研究，2021, 35(5): 51–56.
ZHU HL, HUANG DQ, XIE LX. Research progress on heavy metal pollution in cured meat products [J]. Meat Research, 2021, 35(5): 51–56.

[6] 张晓红，李春光，杨秀兰. 腌腊肉制品中重金属含量及其风险评估研究进展[J]. 食品科学，2020, 41(10): 307–313.
ZHANG XH, LI CG, YANG XL. Research progress on heavy metal content and risk assessment in cured meat products [J]. Food Science, 2020, 41(10): 307–313.

[7] 朱联旭，李崇勇，吴国飞，等. 腊肉中重金属和苯并[a]芘分析及膳食风险评估[J]. 农产品质量与安全，2023(1): 61–67.
ZHU LX, LI CY, WU GF, *et al*. Analysis of heavy metals and benzo [a] pyrene in Chinese traditional cured meat and dietary risk assessment [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2023(1): 61–67.

[8] HAN JL, PAN XD, CHEN Q. Distribution and safety assessment of heavy metals in fresh meat from Zhejiang, China [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 3241.

[9] 王琳，曾平. 湖南地区腊肉中重金属污染水平及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报，2020, 11(15): 5082–5089.
WANG L, ZENG P. Heavy metal pollution level and health risk assessment of cured meat in Hunan [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(15): 5082–5089.

[10] 吴娟, 李俊. 贵州省部分腊肉样品中铅镉含量及风险分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 304–310.
WU J, LI J. Lead and cadmium content and risk analysis of some cured meat samples in Guizhou Province [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 304–310.

[11] 罗星宇. 2019 年南充市主要肉制品安全现状研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2020.
LUO XY. Study on the safety status of major meat products in Nanchong City in 2019 [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.

[12] 王宇, 赵斌. 不同加工环节对猪肉中重金属富集的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 236–242.
WANG Y, ZHAO B. Influence of different processing stages on heavy metal accumulation in pork [J]. Food Science, 2019, 40(12): 236–242.

[13] 郭燕, 何勇. 腊肉与鲜肉中重金属含量差异比较研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(17): 159–165.
GUO Y, HE Y. Comparative study on heavy metal contents between cured and fresh meat [J]. Food Research and Development, 2020, 41(17): 159–165.

[14] ZHANG X, LI Y, ZHOU Y, *et al*. Accumulation of heavy metals in smoked meat and influencing factors during traditional processing [J]. Food Control, 2021, 123: 107789.

[15] 王娟, 张雪. 食品中重金属暴露与人体健康风险研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(1): 85–92.
WANG J, ZHANG X. Research progress on heavy metal exposure in food and human health risk [J]. Journal of Environment and Health, 2020, 37(1): 85–92.

[16] HAMIDA S, HAMIDA L, LADJEL AF, *et al*. Determination of cadmium, copper, lead, and zinc in pilchard sardines from the bay of Boumerdés by atomic absorption spectrometry [J]. Analytical Letters, 2018, 51(16): 2499–2506.

[17] JOSEPH KA, DZAKADZIE F, EMMANUEL O, *et al*. Assessing metal contaminants in milled maize products available on the Ghanaian market with atomic absorption spectrometry and instrumental neutron activation analyser techniques [J]. Food Control, 2020, 109: 106912.

[18] 开建荣, 王彩艳, 李彩虹. 2 种消解方法-原子吸收分光光度法检测大米粉中铜、锌、镉含量[J]. 食品科技, 2018, 43(2): 322–325.
KAI JR, WANG CY, LI CH. Comparative study on two pretreatment methods for atomic absorptive spectrophotometry determination of Cu, Zn and Cd in rice [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(2): 322–325.

[19] 岳晓君, 王毅, 刘子璇. 石墨消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定食品中多元素[J]. 微量元素与健康研究, 2019, 36(2): 56–59.
YUE XJ, WANG Y, LIU ZX. Determination of multiple elements in foods by graphite digestion-inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2019, 36(2): 56–59.

[20] KHADER KKA, ZUBAIR P, TAJUDHEEN KK, *et al*. Using inductively coupled plasma mass spectrometry to assess essential and performance-enhancing metals in the urine of racehorses [J]. Journal of Analytical Toxicology, 2020, 44(5): 490–498.

[21] 欧朝接, 吴琼, 韦东, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定稻谷中铬、镍、铜、砷、镉、铅的含量[J]. 中国无机分析化学, 2019, 9(2): 5–8.
OU CJ, WU Q, WEI D, *et al*. Determination of chromium, nickel, copper, arsenic, cadmium, and lead contents in rice by ICP-MS with microwave digestion [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2019, 9(2): 5–8.

[22] 王秋泉, 唐南南, 杨利民. 电感耦合等离子体质谱技术与应用[J]. 中国科学: 化学, 2014, 44(5): 664–671.
WANG QQ, TANG NN, YANG LM. Inductively coupled plasma mass spectrometry technology and applications [J]. Science China: Chemistry, 2014, 44(5): 664–671.

[23] 刘虎生, 邵宏翔. 电感耦合等离子体质谱技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LIU HS, SHAO HX. Inductively coupled plasma mass spectrometry technology and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[24] NORDBERG GF, FOWLER BA, NORDBERG M. *Handbook on the toxicology of metals* [M]. 4th ed. Amsterdam: Academic Press, 2015.

[25] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(DRIs) (2013 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Chinese Nutrition Society. Dietary reference intakes for Chinese residents (DRIs) (2013 edition) [M]. Beijing: Science Press, 2013.

[26] COUTO C, KEATING E. Trace elements in food: Nutritional and safety issues [J]. Foods, 2025, 14(16): 2802.

[27] BEHRA P, BHADAURIA M, NIRALA SK. Aluminum toxicity: A comprehensive narrative review [J]. Toxicology Research, 2025, 14(6): tfaf167.

[28] 熊敏, 秦建. 黔式传统腌腊肉食用安全性探析[J]. 微量元素与健康研究, 2016, 33(4): 45–47.
XIONG M, QIN J. Exploration of the food safety of traditional Qian-style cured meat [J]. Trace Elements and Health Research, 2016, 33(4): 45–47.

[29] 蔡振林. 湖南农家腊肉和工业化生产腊肉品质及安全性比较研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
CAI ZL. Comparative study on quality and safety of traditional Hunan bacon and industrially produced bacon [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.

[30] 吴艾琳, 罗书全, 赵怡楠, 等. 基于污染指数法对重庆市市售食品中重金属污染调查及评价[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(2): 175–180.
WU AIL, LUO SQ, ZHAO YN, *et al*. Survey evaluation of heavy metal pollution of food in Chongqing by contamination index method [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(2): 175–180.

[31] WANG X, ZHANG Y, GENG Z, *et al*. Spatial analysis of heavy metals in meat products in China during 2015—2017 [J]. Food Control, 2019, 104: 174–180.

[32] 张云琳. 猪肉制品中重金属来源、危害及检测标准分析[J]. 食品安全导刊, 2023(20): 163–165.
ZHANG YL. Analysis of heavy metals sources, hazards, and detection standards in pork products [J]. China Food Safety Magazine, 2023(20): 163–165.

[33] 蹇慧, 李应国, 刘力, 等. 重庆市部分地区养猪生产中重金属污染情况研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2007(3): 69–73.
JIAN H, LI YG, LIU L, *et al*. Preliminary research on heavy metal pollution in pig production in some areas of Chongqing [J]. Journal of Southwest Normal University (Natural Science Edition), 2007(3): 69–73.

[34] 陈伟, 李健. 食品样品制备过程中的金属污染及控制措施[J]. 分析试验室, 2021, 40(8): 921–927.
CHEN W, LI J. Metal contamination and control measures in food sample preparation processes [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2021,

40(8): 921–927.

[35] 张恒, 王琦. 不锈钢器具在食品样品消解及保存过程中的元素迁移研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 314–320.
ZHANG H, WANG Q. Study on the migration of elements from stainless steel utensils during food sample digestion and preservation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 314–320.

[36] 胡晓东, 刘宇. 饲料中重金属污染水平及其在畜禽体内的富集特征[J]. 畜牧与饲料科学, 2021, 42(6): 56–61.
HU XD, LIU Y. Levels of heavy metal contamination in feed and their accumulation characteristics in livestock and poultry [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2021, 42(6): 56–61.

[37] 李芳, 陈伟. 传统烟熏工艺对肉制品重金属含量的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 278–285.
LI F, CHEN W. The impact of traditional smoking processes on heavy metal content in meat products [J]. Food Science, 2020, 41(8): 278–285.

[38] 罗培林, 吴虹玥, 曾琳雅, 等. 成都地区猪肉和猪肝中重金属及部分微量元素含量检测[J]. 四川畜牧兽医, 2025, 52(1): 15–17.
LUO PL, WU HY, ZENG LY, *et al*. Detection of heavy metals and certain trace elements in pork and pig liver in the Chengdu area [J]. Sichuan Animal & Veterinary Sciences, 2025, 52(1): 15–17.

[39] AFÉ OHI, KPOCLOU YE, DOUNY C, *et al*. Chemical hazards in smoked meat and fish [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(12): 6903–6922.

[40] JACKSON LS, KNIZE MG, MORGAN JN. Impact of processing on food safety [M]. Boston, MA: Springer US, 1999.

[41] 梅炼, 邓金伟, 谢永萍, 等. 接触食品的铝及铝合金制品中有害金属迁移规律的研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 34(1): 92–97.
MEI L, DENG JW, XIE YP, *et al*. Research on migration of harmful substances from food contact aluminum and aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 34(1): 92–97.

[42] 陈鹏, 赵晨. 猪肉中铁、锌、铜元素的分布特征及其相互关系研究[J]. 肉类研究, 2020, 34(6): 72–77.
CHEN P, ZHAO C. Study on the distribution characteristics of iron, zinc and copper elements in pork and their interrelationships [J]. Meat Research, 2020, 34(6): 72–77.

[43] 李想, 张超, 王丽. 猪肉及其制品中金属元素含量特征与营养相关性[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5): 1442–1450.
LI X, ZHANG C, WANG L. Characteristics of metal element content in pork and its products and their nutritional correlation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(5): 1442–1450.

[44] 王刚, 黄静. 饲料中重金属污染及其在畜禽体内的迁移转化[J]. 畜牧兽医杂志, 2020, 39(7): 58–63.
WANG G, HUANG J. Heavy metal pollution in feed and its transfer and transformation in livestock and poultry [J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2020, 39(7): 58–63.

[45] KARRI V, SCHUHMACHER M, KUMAR V. Heavy metals (Pb, Cd, As and MeHg) as risk factors for cognitive dysfunction: A general review of metal mixture mechanism in brain [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2016, 48: 203–213.

[46] LEONTOPOULOS S, GOUGOULIAS N, KANTAS D, *et al*. Heavy metal accumulation in animal tissues and internal organs of pigs correlated with feed habits [J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2015, 21(3): 693–697.

[47] CHAŁABIS-MAZUREK A, PIEDRA JLV, MUSZYŃSKI S, *et al*. The concentration of selected heavy metals in muscles, liver and kidneys of pigs fed standard diets and diets containing 60% of new rye varieties [J]. Animals, 2021, 11(5): 1377.

(责任编辑: 冯东慧　韩晓红)