

果梅腌制过程中铝迁移规律的研究

郭启新, 张 蕾, 陈朋云, 甘献明, 刘 飞, 徐 幸*

(大理州质量技术监督综合检测中心, 大理 671000)

摘 要: **目的** 探究果梅腌制过程中铝的迁移规律。**方法** 采用聚乙烯容器为腌制容器, 腌制 4 种不同铝含量果梅, 对比腌制前、后铝含量变化; 研究真实腌制液在水泥制腌制容器中浸泡铝的迁移规律; 模拟人工污染腌制液向腌制果梅中迁移, 动态监测铝含量变化。**结果** 4 种果梅铝本底含量分别为 23.2、44.7、81.2、148.7 mg/kg, 采用聚乙烯容器腌制, 腌制前、后各组间梅坯中铝残留量无显著差异($Z=-1.826$, $P=0.068$), 腌制过程中果梅中的铝向腌制液中迁移, 迁移量与果梅中铝的本底含量成正相关($r^2=0.996$); 水泥制腌制容器在真实果梅腌制液(总酸 5.4 g/100 g, 氯化钠 27%)浸泡 36 d, 腌制液中铝含量增幅达 131.8 mg/kg; 4 种腌制果梅分别在铝含量 45.1 mg/kg 和 135.7 mg/kg 人工污染腌制液浸泡 60 d, 铝的最大迁移量分别为 40.5 mg/kg 和 78.4 mg/kg, 迁移量与果梅中本底铝的含量呈负相关($r^2>0.986$)。**结论** 开展果梅蜜饯中铝污染来源调查和风险控制时, 应充分考虑果梅在实际腌制过程中铝从水泥制腌制容器迁移带来的污染, 建议果梅在腌制时采用聚乙烯腌制容器或使用完好涂层水泥制容器, 避免与水泥制材料接触。

关键词: 果梅; 水泥制容器; 腌制; 铝; 迁移

Study on the aluminum migration rule during the pickling of *Prunus mume*

GUO Qi-Xin, ZHANG Lei, CHEN Peng-Yun, GAN Xian-Ming, LIU Fei, XU Xing*

(Dali Quality and Technical Comprehensive Supervision Testing Center, Dali 671000, China)

ABSTRACT: Objective To study the migration rule of aluminum in *Prunus mume* curing process. **Methods** Four kinds of *Prunus mume* with different aluminum content were pickled in polyethylene containers, and the changes of aluminum content before and after pickling were compared, the migration rule of aluminum in cement-based pickling vessel soaked in real pickling solution was studied, the migration of artificially polluted pickling solution to pickled *Prunus mume* was simulated, and the changes of aluminum content were dynamically monitored. **Results** The local content of aluminum in 4 kinds of *Prunus mume* were 23.2, 44.7, 81.2 and 148.7 mg/kg, respectively, there was no significant difference in the residual amount of aluminum in the *Prunus mume* before and after pickling ($Z=-1.826$, $P=0.068$) in polyethylene containers. During the pickling process, the aluminum in *Prunus mume* migrated into the pickling solution, and there was a positive correlation between the migration amount and the background content of aluminum in *Prunus mume* ($r^2=0.996$). The results showed that the content of aluminum increased by 131.8 mg/kg after 36 days of soaking in the pickling liquid of real *Prunus mume* pickling solution (total acid 5.4 g/100 g, sodium chloride 27%). When the 4 kinds of preserved *Prunus mume* were soaked in artificially polluted pickling

基金项目: 云南省市场监督管理局科技计划项目(2022YSJK15)

Fund: Supported by the Yunnan Market Supervision Administration Science and Technology Project (2022YSJK15)

*通信作者: 徐幸, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全检测。E-mail: xuxing1983@163.com

*Corresponding author: XU Xing, Ph.D, Senior Engineer, Dali Quality and Technical Comprehensive Supervision Testing Center, Dali 671000, China. E-mail: xuxing1983@163.com

solution with aluminum content of 45.1 mg/kg and 135.7 mg/kg for 60 days, the maximum migration of aluminum was 40.5 mg/kg and 78.4 mg/kg, respectively, the migration was negatively correlated with the content of background aluminum in the *Prunus mume* ($r^2 > 0.986$). **Conclusion** The migration of aluminum from the cement-based pickling container should be fully considered in the investigation and risk control of aluminum pollution sources in plum fruits, it is suggested to use polyethylene container or cement-based container with good coating to avoid contact with cement material.

KEY WORDS: *Prunus mume*; cement-based container; pickling; aluminum; migration

0 引 言

果梅(*Prunus mume*), 亦称酸梅, 种质资源丰富, 因成熟期和保鲜期较短, 果实酸度高, 常经清洗、腌制、晒干制成梅坯贮存^[1], 再经脱盐、干燥、添加辅料和食品添加剂等工艺加工制成话化类蜜饯。话化类蜜饯因风味独特、质地柔软又略带韧性而深受广大消费者的喜爱。近年来, 蜜饯中一些超范围、超限量使用食品添加剂^[2-3]、微生物污染^[4-5]和金属污染^[6]等质量安全问题引起了人们对其食用安全性的担忧和顾虑^[7-8], 特别是话化类蜜饯中铝污染问题, 近几年引起了人们高度关注, 国家食品安全风险监测已暂定蜜饯中铝的检测结果大于 40 mg/kg(以干基计)作为研判问题样品的参考值。

铝是一种低毒人体非必需的金属元素, 长期过量摄入会造成铝在人体内积累并产生毒性, 可造成阿尔茨海默病的发生及危害度明显增高, 高剂量铝还可导致免疫系统毒性、生殖毒性等^[9]。人体摄入铝的主要来源为药源性铝、食物性铝和铝制炊具溶出的铝, 其中, 食物中铝的主要从食品本底、添加含铝食品添加剂和食品接触容器和包装材料渗出。据报道显示, 从超市、市场上随机抽取的蜜饯样品中, 话化类和凉果类蜜饯中铝含量较高^[10-12], 这可能是由蜜饯生产加工过程中添加了含铝食品添加剂导致的, 也可能是从食品接触材料溶出。陈瑞敏等^[12]认为, 蜜饯中的铝残留主要来源于盐坯(果坯)。另外, 在食品加工过程中存在铝从接触材料迁移至食品体系^[13-14]与污染物从食品内部向外迁移^[15-16]的行为。因此, 在排查盐坯(果坯)中铝含量高的原因时, 除排查添加含铝食品添加剂外, 应充分考虑果梅在腌制过程中腌制容器带入的污染。

按照食品安全法对食品容器的规定^[17], 生产加工企业通常在水泥池内壁涂抹涂料或覆盖塑料膜作为果梅腌制容器, 在实际果梅腌制生产中, 涂料或塑料膜易发生破损脱落, 水泥制腌制容器在腌制液中受到腐蚀, 可能一些有毒有害物质从腌制容器中迁移到食品内部造成污染。目前, 还未见果梅腌制过程中铝的迁移变化的相关报道, 本研究拟采用广口聚乙烯容器为腌制容器, 考查果梅腌制过程中铝残留量的变化规律, 探讨果梅腌制液在水泥制腌制容器浸泡过程中, 铝离子从腌制容器向腌制液中迁移和从腌制液向果梅中迁移的行为, 为果梅蜜饯中铝污染的来源调查和风险控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

广口聚乙烯容器(3 L)购于当地超市; 火山灰水泥制容器(5 L)购于当地市场。

果梅(品种为盐梅, 来源于大理州果梅种植的主产区)、腌制液(盐梅浸出液)均由蜜饯生产企业提供; 铝元素标准溶液、钪元素标准溶液(内标)(1000 $\mu\text{g/mL}$, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 硝酸(超级纯, 苏州晶瑞化学股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

NeXion 300X 电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司); MARS 5 微波消解仪(美国 CEM 公司); PE20K pH 计[梅特勒-托力多仪器(上海)有限公司]; 101-3EBS 电热鼓风干燥箱、DZKW-S-6 电热恒温水浴锅(北京市永光明医疗仪器有限公司); BSA224S 型分析天平[精度 0.1 mg, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; Millipore-Direct-Q5 纯水机(美国 Millipore 公司)。

1.3 方 法

1.3.1 实验方案

腌制前, 将每份清洗干净的鲜果梅进行铝含量检测, 以确定其初始含量水平, 从中选择平均单果重 13.6~15.3 g 的 4 种不同铝含量的果梅为原料, 铝含量从低到高的果梅编号为 1#~4#。探讨腌制过程中铝元素的迁移行为, 设置如下 3 项铝迁移实验。

(1) 果梅中铝的迁移

挑选成熟度一致、清洗干净的 1#~4#果梅各 1 kg, 分别置于广口聚乙烯容器中, 用 200 g 食盐(果梅重 20%)腌制 90 d, 设置 3 个平行实验。分别取腌制时间为 15、30、45、60、75、90 d 的腌制液, 测定其中的总酸、食盐和铝元素含量。取样前, 先对腌制体系进行适当的混匀, 确保所取试样的代表性。

(2) 腌制容器中铝迁移和人工污染腌制液(A、B)制备

将盐梅浸出液于火山灰水泥制容器中浸泡, 分别取浸泡 6、12、18、24、30、36 d 浸泡液, 测定铝含量, 将浸泡 6 d 和 36 d 浸泡液作为人工污染腌制液 A 和人工污染腌制液 B。取样前, 对浸泡液进行混匀, 以广口聚乙烯容器作

腌制容器中铝迁移的对照。

(3)模拟人工污染腌制液中铝迁移

按(1)所述方法将 1#~4#果梅腌制 30 d, 倒出腌制液, 分别加入相同体积人工污染腌制液(A、B)进行浸泡, 混匀, 再分别取浸泡时间 0、15、30、45、60 d 浸泡液, 测定铝元素含量, 模拟人工污染腌制液中铝向腌制果梅中迁移。

1.3.2 指标检测和质量控制

腌制液和梅坯中氯化物按照 GB 5009.44—2016《食品安全国家标准 食品中氯化钠的测定》第三法检测; 腌制液中总酸按照 GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》第二法检测; 果梅及梅坯中铝元素按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法检测, 梅坯中铝元素测定时, 取腌制果梅可食部分、干燥、粉碎、测定梅坯中铝元素含量, 结果以不含食盐干基质计。所有样品均进行 2 次独立分析测定, 同时进行空白实验和加标回收率实验, 另外, 采用 4 家实验室间比对分析, 保证数据的准确性。加标回收率控制在 80%~108%; 实验室内 2 次独立分析检测值和实验室间比对结果的相对标准偏差小于 10%, 满足标准方法要求。

1.4 数据处理

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行统计和分析, 腌制过程样本中铝残留量的差异采用 Mann-Whitney U 法进行分析, 所有检验均为双侧检验, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义; 采用 Excel 2007 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 果梅在腌制过程中铝的迁移

腌制前, 1#~4#果梅中铝含量分别为 23.2、44.7、81.2、148.7 mg/kg(以干基计), 腌制用食盐中铝含量为 0.97 mg/kg, 检测值低于方法的定量限, 在后续迁移分析中, 将食盐中铝含量的初始值视为 0。果梅中铝的本底含量可能是果梅在生长过程中从环境中吸附, 在一些其他植物性样品的铝富集研究也有类似的报道^[18-19]。果梅腌制期间, 腌制液中总酸(以乙酸计)的含量变化不大, 从 5.0 g/100 mL 上升至 5.5 g/100 mL, 以乙酸平均含量 5.2 g/100 mL 计为腌制液中的酸度, 这与其他果蔬腌制过程中总酸呈上升趋势结果一致, 只是不同特性的食品在腌制过程中酸度上升趋势不一致^[20-21]。

腌制液铝元素含量随腌制时间的变化曲线见图 1, 由图 1 可知, 4 种果梅在腌制过程中变化趋势相同, 均先逐渐上升后趋于平衡。在腌制期间, Na^+ 逐渐渗透到果梅中, 与果梅中 H^+ 、 Al^{3+} 等离子交换, 果梅中 H^+ 、 Al^{3+} 等离子通过渗透或扩散作用慢慢溶出, 直至腌制液与果梅中的 Na^+ 浓度一致, 不再发生离子交换, 迁移达到平衡, 故腌制前 30 d, 铝向腌制液中迁移的速度较快, 30 d 后, 铝迁移速度基本保持平衡, 另外, 这还可能与铝在果梅中存在形态有关。

已有相关研究表明, 铝在植物性样品中以多种形式存在: 无机单核铝 Al^{3+} 、羟基态铝 $[\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_4^-]$ 、胶体态铝 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、铝氟化物以及天然有机配体形式的有机铝和聚合铝等^[22-25], 一般无机态的铝更容易从食品内部向外部迁移, 有机态铝在食品中较稳定, 不易从食品中迁出^[26-27]。其中, 腌制 90 d 的腌制液中铝含量分别为 1.34、2.30、4.72、8.31 mg/kg, 结合果梅中本底铝含量可知, 梅果中与有机质结合态铝含量较高。

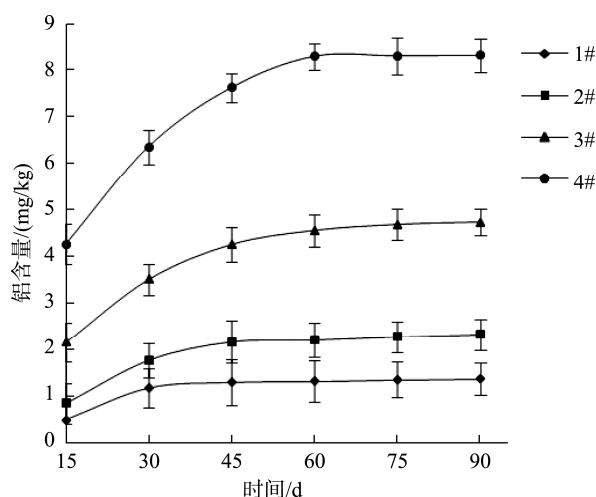


图1 腌制过程中腌制液中铝含量变化

Fig.1 Changes of aluminum content in salted solution during pickling

腌制 90 d 的 1#~4#果梅梅坯中铝含量分别为 19.8、37.5、71.0、133.7 mg/kg, 有所降低, 但腌制前、后各组梅坯中铝含量无显著差异($Z = -1.826$, $P = 0.068$), 说明用聚乙烯容器腌制果梅不能使其中铝残留量增加。对果梅本底铝含量、腌制液铝含量和梅坯中铝含量进行对比分析, 结果见图 2。4 种不同铝含量果梅在腌制过程中铝发生了一定量

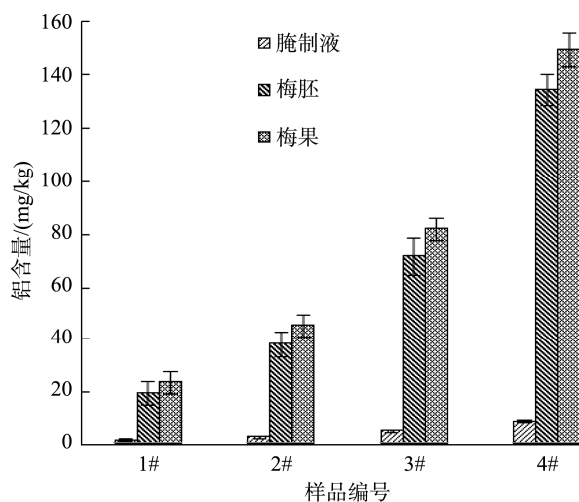


图2 4种果梅、腌制液、梅坯中铝含量对比

Fig.2 Content comparison of aluminum in 4 kinds of *Prunus mume*, salted solution and *Prunus mume* embryo

的溶出,使得梅坯中铝的含量有一定程度的减少,经分析发现,腌制液中铝含量与果梅中本底铝含量成正相关($r^2=0.996$),果梅本底含量越高,腌制液铝越高,反之亦然。而类似的研究也证明,在腌制过程中,蜜饯内部的重金属元素可向外迁移,从而一定程度上降低其残留量,例如,李文祥等^[28]发现,蜜饯在腌制过程中,其所含的铅、镉、铬、砷等重金属会迁移到腌制液中,进而降低蜜饯中的相应元素的残留量。

2.2 腌制容器中铝的迁移

企业在生产加工过程中常采用水泥池作为果梅腌制容器。因此,其相应的容器材料也成为了腌制体系最具代表性的接触材料。浸泡前,腌制液铝含量为 4.6 mg/kg,总酸含量为 5.4 g/100 g,氯化钠含量为 27%。腌制液中铝含量随腌制时间的变化趋势见图 3。由图 3 可知,以聚乙烯容器作对照,浸泡 36 d 的浸泡液中铝含量几乎无变化,而水泥制容器浸泡腌制液中铝含量从起初 4.6 mg/kg 逐渐升高到 136.4 mg/kg,腌制液中铝含量增幅达 131.8 mg/kg。在浸泡过程中,腌制液中 H^+ 通过渗透或扩散作用进入水泥浆体内部,与遇到的水泥水化产物发生中和反应,使 Al^{3+} 溶出^[29],在高盐、高酸的腌制体系中, Al^{3+} 从水泥制腌制容器中迁至腌制溶液中,这与前人对接触材料中重金属向食品中迁移的研究相一致^[30-31]。

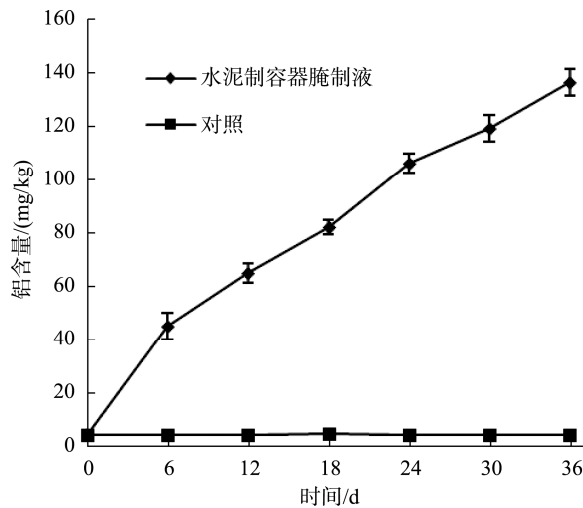


图3 水泥制容器腌制液中铝含量的变化

Fig.3 Variation of aluminum content in pickling solution of cement vessel

2.3 模拟人工污染腌制液中的铝向腌制果梅中的迁移

2.3.1 人工污染腌制液 A 中的铝向腌制果梅中的迁移

腌制液 A 中铝初始含量为 45.1 mg/kg,腌制液中铝含量随腌制时间的变化趋势如图 4A 所示。4 种样品腌制液中铝含量变化曲线基本一致,随着腌制时间延长,腌制液中

铝元素含量先快速下降后趋于平衡。1#~4#果梅对应的腌制液中 Al^{3+} 向腌制果梅的迁移速度(迁移量/腌制时间)逐渐降低,这可能与腌制果梅中铝本底含量有关,腌制果梅中铝含量越低,腌制液中 Al^{3+} 迁移速度越快。由图 4A 可知,腌制前 30 d 腌制液中 Al^{3+} 向果梅中迁移速度下降较快,这是由于腌制液与腌制果梅中 Al^{3+} 存在较大的浓度差, Al^{3+} 从高浓度腌制液逐渐向低浓度果梅中迁移,随着 Al^{3+} 在两者中迁移,两者之间的浓度差减小,腌制 30 d 后 Al^{3+} 迁移速度减小,迁移逐渐达到平衡,这与采用食品模拟物对接触材料中的污染物迁移研究结论是一致的^[32-33]。

腌制 60 d 的果梅梅坯中铝残留量结果见图 4B,梅坯中铝增量与腌制液中铝减少量一致,说明腌制液 A 中铝向腌制果梅中迁移。其中,1#~4#梅坯中迁移量逐渐变小,梅坯中铝最大迁移量和最小迁移量分别 40.5 mg/kg 和 32.4 mg/kg,迁移量与果梅中铝本底含量呈负相关($r^2=0.986$),果梅中铝本底含量越小,铝迁移量越大。在相同腌制时间和同一浓度腌制液下,迁移速度越快,迁移量越大。

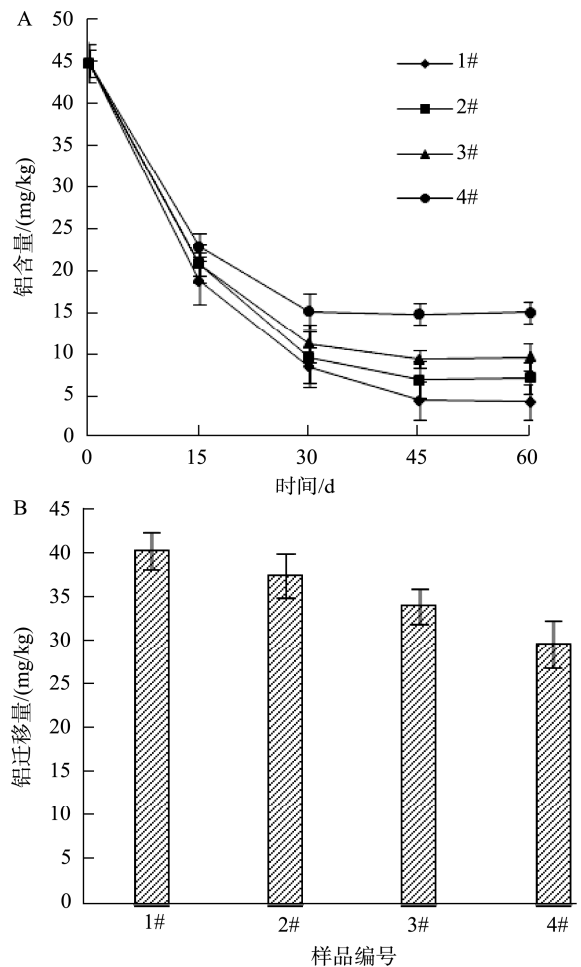


图4 腌制液A中4种果梅铝含量变化(A)及梅坯中铝迁移量(B)

Fig.4 Content changes of aluminum content of 4 kinds *Prunus mume* (A) and migration amount of aluminum in plum embryo (B) in pickling solution A

2.3.2 人工污染腌制液 B 中的铝向腌制果梅中的迁移

腌制液 B 中铝初始含量为 135.7 mg/kg, 腌制液中铝含量随腌制时间的变化趋势如图 5A 所示。4 种样品在腌制液 B 中腌制 60 d 铝含量逐渐下降。由 4A 可知, 铝迁移达到平衡的时间与腌制液中铝含量有关, 腌制液中铝含量越高, Al^{3+} 迁移时间越长, 达到平衡时间越长, 迁移量也就随之增加, 这与乔兆华等^[34]采用食品模拟物对铝塑复合食品包装中随着铝的迁移时间延长, 铝的最大迁移量都在增加的结果相一致。

腌制 60 d 的果梅梅坯中铝残留量结果见图 5B, 1#~4#梅坯中迁移量逐渐变小, 梅坯中铝最大迁移量和最小迁移量分别 78.4 mg/kg 和 63.2 mg/kg, 迁移量与果梅中铝本底含量呈负相关($r^2=0.997$), 果梅中铝本底含量越低, 铝迁移量越大。腌制液中铝含量越高, 相应的梅坯中铝残留量就越大。

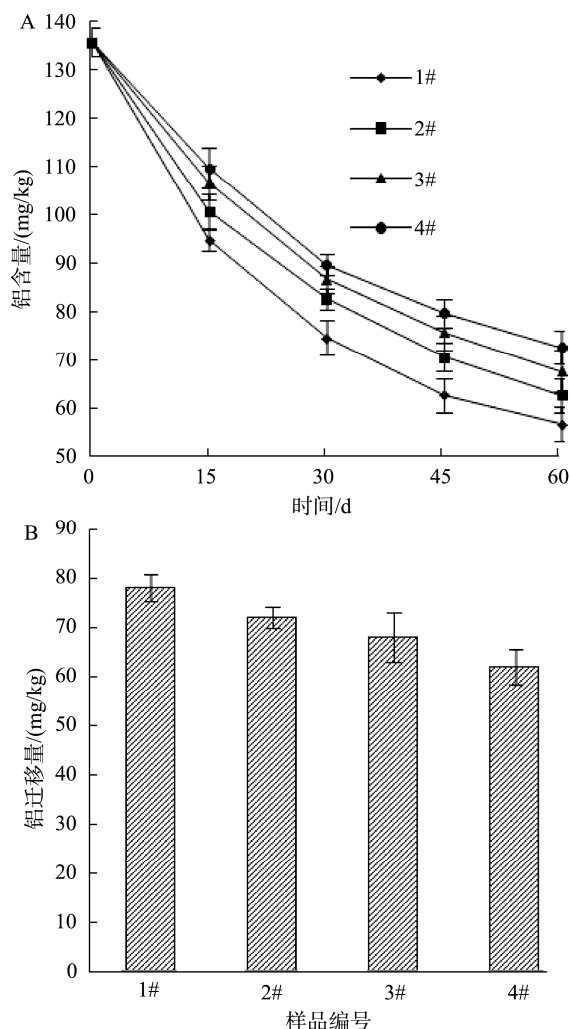


图5 腌制液A中4种果梅铝含量变化(A)及梅坯中铝迁移量(B)

Fig.5 Content changes of aluminum content of 4 kinds *Prunus mume* (A) and migration amount of aluminum in plum embryo (B) in pickling solution B

3 讨论与结论

本研究采用聚乙烯腌制容器对 4 种铝本底含量不同的果梅腌制过程中的铝迁移规律进行探究, 通过真实腌制液在水泥制容器中浸泡污染和人工污染腌制液中的铝向腌制果梅中迁移变化的研究发现, 采用聚乙烯容器腌制果梅会有一定量的铝迁移到腌制液中, 但腌制前、后各组间梅坯中铝残留量没有显著差异($Z=-1.826$, $P=0.068$)。另外, 4 种腌制果梅分别在铝含量 45.1 mg/kg 和 135.7 mg/kg 人工污染腌制液浸泡 60 d, 铝的最大迁移量分别为 40.5 mg/kg 和 78.4 mg/kg, 迁移量与果梅中本底铝的含量呈负相关($r^2>0.986$), 同时发现在果梅腌制过程中, 铝从水泥制腌制容器中向腌制果梅中迁移是梅坯中铝污染主要来源, 腌制液中铝含量越高, 相应梅坯中铝的残留量越大。在实际果梅腌制过程中, 生产加工企业采用的水泥制腌制容器的内涂层涂料易破损脱落, 水泥制材料暴露在高盐(23%~34%)、高酸(5.2 g/100 mL)的腌制液中发生严重腐蚀, 腌制液中铝向腌制果梅中迁移是造成梅坯中铝的残留量高的主要原因。

目前, 我国现行有效的蜜饯标准及食品安全国家标准中均未对蜜饯中铝的限量进行规定, 但 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》应用原则条款中规定无论是否制定污染物限量, 食品生产和加工者均应采取控制措施, 使食品污染物的含量达到最低水平, 结合《中华人民共和国食品安全法》^[18]对在食品生产过程中的食品接触材料的规定, 建议生产加工过程中企业在腌制果梅时采用食品级聚乙烯容器, 如使用带有涂层的水泥制容器时, 应检查水泥制容器内涂层的完好, 以防在腌制过程中内涂层破损脱落, 禁止直接使用水泥制容器。

由于梅果成熟期较短, 本研究仅采用人工污染腌制液模拟实际腌制过程中铝从腌制液向腌制果梅中迁移, 没有对鲜果梅中铝来源和果梅腌制过程中铝吸附动力学模型构建进行系统分析。今后, 课题组将对果梅中铝本底来源与果梅腌制过程中铝吸附动力学模型构建进一步研究, 为企业蜜饯生产过程中减少铝污染提供理论依据。

参考文献

- [1] 于新, 黄雪莲, 胡林子. 果脯蜜饯加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] YU X, HUANG XL, HU LZ. Processing technology of preserved fruit preserves [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [3] 董新风, 崔丽华. 2011 年石家庄市食品中防腐剂、甜味剂、色素含量结果分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2013, 23(4): 191-192.
- [4] DONG XF, CUI LH. Analysis of detection results of preservatives, sweeteners and colorants in foods in Shijiazhuang in 2011 [J]. Chin J Health Lab Technol, 2013, 23(4): 191-192.
- [5] 肖杰, 苏明, 钟宇思, 等. 基于优化的高效液相色谱法测定蜜饯中 7 种人工合成色素及风险分析[J]. 食品与发酵工业, 2023. DOI: 10.20048/

- j.cnki.issn.1003-0174.000576
- XIAO J, SU M, ZHONG YS, *et al.* Determination of 7 kinds of synthetic colorants in preserved fruits by optimized high performance liquid chromatography and risk analysis [J/OL]. Food Ferment Ind, 2023. DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000576
- [4] 于翠芳, 赵晓丽, 宫春波, 等. 超市散装食品卫生状况检测及其原因分析[J]. 食品与发酵科技, 2011, 47(5): 84–86.
- CUI CF, ZHAO XL, GONG CB, *et al.* Hygienic condition and causes analysis of bulk foodstuff in the supermarket [J]. Food Ferment Sci Technol, 2011, 47(5): 84–86.
- [5] 曾晓房, 刘嘉玲, 白卫东, 等. 不同防腐处理对果脯蜜饯(台湾乌梅)微生物控制的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(6): 207–212.
- ZENG XF, LIU JL, BAI WD, *et al.* Effect of different preservative treatments on microbial control in preserved fruit (Taiwan Wumei) [J]. Mod Food Sci Technol, 2016, 32(6): 207–212.
- [6] 陈美春, 孙亮, 林舒忆. 蜜饯食品中铝污染水平的风险评估[J]. 中国食物与营养, 2010, (10): 13–15.
- CHEN MC, SUN L, LIN SY. Risk evaluation of pollution level of aluminum in glace fruits [J]. Food Nutr Chin, 2010, (10): 13–15.
- [7] 卫世乾. 我国果脯行业现状、问题及对策[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(8): 212–215.
- WEI SQ. The current condition and main problems in preserved fruit industry and measures for improvement [J]. Food Res Dev, 2016, 37(8): 212–215.
- [8] 雷蕾, 梁先龙, 冯娟, 等. 蜜饯行业主要质量安全问题分析[J]. 现代食品, 2020, 5(10): 146–147.
- LEI L, LIANG XL, FENG J, *et al.* Analysis of quality safety on preserved fruits [J]. Mod Food, 2020, 5(10): 146–147.
- [9] LANKOFF A, BANASIK A, DUMA A, *et al.* A comet assay study reveals that aluminium induces DNA damage and inhibits the repair of radiation-induced lesions in human peripheral blood lymphocytes [J]. Toxicol Lett, 2006, 161(1): 27–36.
- [10] 宋美英, 乐丽华, 罗钰珊. 蜜饯中铝残留量的结果分析及健康风险评估[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 330–333.
- SONG MY, LE LH, LUO YS. Analysis and health risk assessment of aluminum residue in preserved fruits [J]. Food Ind, 2020, 41(1): 330–333.
- [11] 邹晓华, 王军, 马辉. 用电感耦合等离子体质谱法测定果脯中铝的结果分析[J]. 医学动物防制, 2014, 30(9): 1056–1057.
- ZOU XH, WANG J, MA H. Results analysis of inductively coupled plasma mass spectrometry determination on aluminum in preserved fruit [J]. J Med Pest Control, 2014, 30(9): 1056–1057.
- [12] 陈瑞敏, 袁洁, 温力力. 蜜饯中铝残留量的检测及结果分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 149–152.
- CHEN RM, YUAN J, WEN LL. Investigation and analysis of residual aluminum in preserved fruits [J]. Food Res Dev, 2017, 38(6): 149–152.
- [13] 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.* Study of migration and safety assessment of aluminum in food contact aluminum and aluminum alloy materials and articles in china [J]. Chin J Food Hyg, 2022, 34(1): 92–97.
- [14] 李林林, 许超, 慕春玲, 等. 电感耦合等离子体质谱法检测食品接触用铝箔在不同迁移条件下的铝迁移量[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11): 2817–2820.
- LIN LL, XU C, MU CL, *et al.* Determination of aluminum migration in food contact aluminum foil under different migration conditions by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(11): 2817–2820.
- [15] 刘晶, 任佳丽, 林亲录, 等. 大米浸泡过程中重金属迁移规律研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 66–67, 79.
- LIU J, REN JL, LIN QL, *et al.* Migration of heavy metals in rice during soaking process [J]. Food Mach, 2013, 29(5): 66–67, 79.
- [16] 张钦, 叶明樵, 王娜, 等. 接装纸中甜味剂的迁移机制[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 118–122.
- ZHANG Q, YE MJ, WANG N, *et al.* Study on migration mechanism of sweeteners in tipping paper [J]. Food Mach, 2022, 38(10): 118–122.
- [17] 国家市场监督管理总局. 中华人民共和国食品安全法[EB/OL]. [2022-11-02]. https://www.samr.gov.cn/zw/zfxgk/fdzdgknr/fgs/art/2023/art_6bff4ef87291497fa72949e1fc88efb5.html [2023-11-10].
- State Administration for Market Regulation. Food Safety Law of the People's Republic of China [EB/OL]. [2022-11-02]. https://www.samr.gov.cn/zw/zfxgk/fdzdgknr/fgs/art/2023/art_6bff4ef87291497fa72949e1fc88efb5.html [2023-11-10].
- [18] 刘智禹, 吴靖娜, 李琳, 等. 苣荬对镉、铅和铝的生物富集动力学研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10): 154–158.
- LIU ZY, WU JN, LI L, *et al.* Kinetics of cadmium, lead and aluminum bioaccumulation by *Enteromorpha prolifera* [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(10): 154–158.
- [19] 郭启新, 舒平, 甘献明, 等. ICP-MS 方法测定地参中铝及其来源的探讨[J]. 食品工业, 2014, 35(4): 108–112.
- GUO QX, SHU P, GAN XM, *et al.* Exploration on detecting the content of aluminium and its source of *Lycopus lucidus turcz* by ICP-MS [J]. Food Ind, 2014, 35(4): 108–112.
- [20] 张灿, 刘广宇, 叶晓仪, 等. 小黄姜腌制过程中硬度变化及其影响因素研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7382–7387.
- ZHANG C, LIU GY, YE XY, *et al.* Study on hardness change and its influencing factors of *Zingiber officinale* Roscoe during pickling [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(18): 7382–7387.
- [21] 韩晓磊, 梁钰钦, 方志辉, 等. 不同盐分含量对南荬笋腌制过程中品质变化影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8049–8055.
- HAN XL, LAING JQ, FANG ZH, *et al.* Effects of different salt content on the quality changes of *Triarrhena lutarioriparia* shoots during salting [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(20): 8049–8055.
- [22] 杨小弟, 章福平, 王先龙, 等. 环境与生物体系中铝形态分析技术的新进展[J]. 分析化学, 2003, 31(9): 1131–1138.
- YANG XD, ZHANG FP, WANG XL, *et al.* Novel analytical techniques for fractionation and speciation of aluminum in environmental and biological systems [J]. Chin J Anal Chem, 2003, 31(9): 1131–1138.
- [23] 王丹红, 蔡春平, 陈祥明, 等. 福建省藻类中铝含量的调查与分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(18): 2705–2707.
- WANG DH, CAI CP, CHEN XM, *et al.* Survey and analysis of the aluminum content in algae in Fujian Province [J]. Chin J Health Lab Technol, 2014, 24(18): 2705–2707.
- [24] 袁爽, 蔡怀依, 许翔, 等. 条浒苔中铝的化学形态分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(20): 44–53.
- YUAN S, CAI HY, XU H, *et al.* Speciation analysis of aluminum in *Enteromorpha clathrata* [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(20): 44–53.

- [25] 黄丹娟, 毛迎新, 谭荣荣, 等. 英山云雾茶中活性铝的溶出及形态分布研究[J]. 茶叶学报, 2017, 58(2): 55–57.
HUANG DJ, MAO YX, TAN RR, *et al.* Hygienic condition and causes analysis of bulk foodstuff in the supermarket [J]. *Acta Tea Sin*, 2017, 58(2): 55–57.
- [26] LODEIRO P, LÓPEZ-GARCÍA M, HERRERO L, *et al.* Aphysicochemical study of Al^{3+} interactions with edible seaweed biomass in acidic waters [J]. *J Food Sci*, 2012, 77(9): 987–993.
- [27] LIU ZY, WU JN, LI L, *et al.* Kinetics of cadmium, lead and aluminum bioaccumulation by *Enteromorpha prolifera* [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(10): 154–158.
- [28] 李文祥, 周颂航, 王灿, 等. 蜜饯腌制过程中重金属的迁移变化[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 60–62, 66.
LI WX, ZHOU SH, WANG C, *et al.* Migration an change of heavy metal during the pickling of candied fruits [J]. *Food Mach*, 2018, 34(12): 60–62, 66.
- [29] 金惠玲, 孙振平, 杨海静, 等. 两种酸溶液对水泥浆体的腐蚀及机理[J/OL]. 建筑材料学报: 1–12. [2023-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20230603.1052.004.html>
JIN HL, SUN ZP, YANG HJ, *et al.* Study on corrosion laws and mechanisms of portland cement and aluminate cement [J/OL]. *J Build Mater*: 1–12. [2023-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20230603.1052.004.html>
- [30] 董占华, 卢立新, 刘志刚. 陶瓷食品包装材料中铅、镉向真实食品的迁移研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 258–262.
DONG ZH, LU LX, LIU ZG. Migration of lead and cadmium from ceramic food packaging materials into foods [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(9): 258–262.
- [31] 梁军, 邓后勤, 李文祥, 等. 接触材料中重金属铅、镉向蜜饯腌制体系迁移的模拟分析[J]. 湖南农业科学, 2019, (2): 76–78.
LIANG J, DENG HQ, LI WX, *et al.* Simulation analysis on migration of lead and cadmium from contact materials into pickling system of candied fruit [J]. *Hunan Agric Sci*, 2019, (2): 76–78.
- [32] 钱荣敬, 赵金尧, 文明, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定烘焙纸中 13 种元素含量及迁移情况研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 1040–1047.
QIAN RJ, ZHAO JR, WEN M, *et al.* Determination of 13 elements of in baking paper by inductively coupled plasma mass spectrometry and study on the migration situation [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(3): 1040–1047.
- [33] 肖黎, 董占华, 孙长江, 等. 陶瓷食品接触材料中铅向酸性食品模拟物迁移的规律[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 15–24.
XIAO L, DONG ZH, SUN CJ, *et al.* Migration pattern of lead from ceramic food contact materials into acidic food simulants [J]. *Food Sci*, 2021, 42(1): 15–24.
- [34] 乔兆华, 单利君, 林勤保, 等. 铝塑复合食品包装中的铝向食品模拟物的迁移研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(13): 250–253.
QIAO ZH, SAHN LJ, LIN QB, *et al.* Aluminum migration from aluminum-plastic composite packaging to food simulants [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(13): 250–253.

(责任编辑: 郑 丽 张晓寒)

作者简介

郭启新, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品质量与安全检测。
E-mail: 45542746@qq.com

徐 幸, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全检测。
E-mail: xuxing1983@163.com