

刘育金, 李春雷, 孟强. 含铝食品添加剂及其检测技术与监测分析的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 470-476. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050366

LIU Yujin, LI Chunlei, MENG Qiang. Research Progress of Detection Technology and Monitoring Analysis of Aluminum-containing Food Additives[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 470-476. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050366

· 专题综述 ·

含铝食品添加剂及其检测技术与监测分析的研究进展

刘育金, 李春雷*, 孟 强

(中国人民公安大学犯罪学学院, 北京 100038)

摘 要: 含铝食品添加剂作为居民常用膨松剂及稳定剂, 具有广泛的受众, 但滥用含铝食品添加剂的行为可能导致潜在的公共健康风险。本文以含铝食品添加剂为研究对象, 从含铝食品添加剂的基本特性、含铝食品添加剂的检测技术、食品铝含量监测三个方面展开论述, 并对各部分存在的问题进行归纳总结。

关键词: 含铝食品添加剂, 食品安全, 检测监测

中图分类号: TS202.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)07-0470-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050366



本文网刊:

Research Progress of Detection Technology and Monitoring Analysis of Aluminum-containing Food Additives

LIU Yujin, LI Chunlei*, MENG Qiang

(College of Criminology, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China)

Abstract: As a common bulking agent and stabilizer for residents, aluminum-containing food additives have a comprehensive application scenario. However, it is noteworthy that the abuse of aluminum-containing food additives may cause a potential health risk to the public. Taking aluminum-containing food additives as the research object, the paper systematically discusses the basic characteristics of aluminum-containing food additives, detection technology of aluminum-containing food additives, and monitoring of food aluminum content, and summarizes the current problems for each part.

Key words: aluminum-containing food additives; food safety; detection and monitoring

我国居民以面食为主的饮食习惯及添加含铝食品添加剂后的优良口感, 促使了含铝食品添加剂超范围与超限量添加行为的增加。然而, 铝元素的过量摄入, 可能对个体健康带来不利影响, 导致潜在的公共食品安全风险, 因此, 开展对含铝食品添加剂相关文献的梳理工作, 显得尤为重要。目前, 学界对含铝食品添加剂的研究散见于铝元素与人体健康研究、含铝食品添加剂检测技术优化、各地食品铝含量监测分析等方向, 尚无对上述研究方向的综合性论述。本文从含铝食品添加剂基本特性出发, 对当前我国含铝

食品添加剂检测技术及全国各地膳食铝监测情况进行系统性论述, 并指出当前含铝食品添加剂研究中存在的现实问题及原因, 以期对我国含铝食品添加剂的科学研究及监督管理提供一定的参考。

1 含铝食品添加剂的用量规范与毒理学特性

铝是人体非必需的微量元素, 在自然界中广泛存在, 人体通过饮水、进食、呼吸等摄入铝。食物中铝的来源主要包括: 食品本身含有的铝(即本底铝)、食品加工工艺中添加的含铝食品添加剂, 以及铝制厨具中迁移出的铝^[1]。食物中的本底铝含量通常低于

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 国家重点研发计划项目“重大活动食品安全风险防控警务模式及关键技术研究”(项目编号: 2018YFC1602700)之课题一“重大活动食品安全风险防控基础理论与警务执法模式研究”(课题编号: 2018YFC1602701)。

作者简介: 刘育金(1995-), 男, 博士研究生, 研究方向: 食品犯罪、环境犯罪, E-mail: liuyujinppsuc@163.com。

* **通信作者:** 李春雷(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品犯罪、药品犯罪、环境犯罪, E-mail: ipr426@126.com。

10 mg/kg, 从铝制厨具中迁移的铝含量也较小^[2]。含铝食品添加剂则是个体铝元素的主要蓄积来源^[3], 占人体铝暴露的 95% 以上^[4]。

1.1 常用含铝食品添加剂与用量规范

我国于 2007 年首次将铝纳入国家食品安全风险监测计划^[5], 并详细规定了含铝食品添加剂的使用标准。目前, 我国含铝食品添加剂的种类与用量由《食品添加剂使用标准》(GB-2760-2014)(以下简称《标准》)所规定, 包括: 作为膨松剂和稳定剂的硫酸铝钾($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、硫酸铝铵($\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$), 可用于豆类制品、面糊、油炸制品、虾味片、焙烤食品、海蜇类腌制水产品等, 使用时按照生产需求适量添加, 除海蜇类腌制水产品铝残留量需 $\leq 500 \text{ mg/kg}$ (以即食海蜇中 Al 计)外, 其余食品中铝残留量需 $\leq 100 \text{ mg/kg}$ (干样品, 以 Al 计); 作为着色剂各类铝色淀, 常用于蜜饯制作中, 以获得良好稳定的着色效果及口感^[6], 不同种类食品对各类铝色淀分别规定了最大使用量。

目前, 包括我国在内的世界主要国家及地区如美国、加拿大、欧盟、挪威、冰岛、澳大利亚、英国、新西兰等均允许在食物中适量添加含铝食品添加剂, 波兰是少数的全面禁止含铝食品添加剂的国家之一^[7]。在国际层面, 国际食品添加剂联合专家委员会 (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA) 在第 74 次会议上对铝进行了最新一轮评估^[8], 将 1987 年第 31 次 JECFA 会议中专家规定的每周可耐受的临时摄入量 (provisional tolerable weekly intake, PTWI) 从 7 mg/kg bw , 下调至 2 mg/kg bw ^[9]。欧洲食品安全局 (European Food Safety Authority, EFSA) 于 2008 年便下调铝每周耐受摄入量 (tolerable weekly intake, TWI) 至 1 mg/kg bw , 并于 2012 年修改了 EC1333/2008 号法规附件 II, 对包括铝色淀在内的含铝食品添加剂的使用标准进行规范, 以保证欧盟居民, 尤其是儿童的每周膳食铝暴露量低于 TWI^[10]。

1.2 含铝食品添加剂的毒理学特性

铝于 20 世纪 70 年代之前因其假定的“生物学惰性”而被广泛用至烹调器具、食品添加剂、非处方药以及污水处理的混凝剂^[11]。1989 年, 世界卫生组织和联合国粮农组织 (WHO/FAO) 将铝列为低毒元素, 并将铝认定为食品污染物^[12]。研究表明, 长期食用高含铝量食品会导致记忆力衰退、视觉与运动协调失灵等风险^[13]。

含铝化合物通过过度磷酸化神经元纤维蛋白、改变血脑屏障的通透性致使铝在脑组织中蓄积等机制, 对神经系统造成潜在风险^[14]。铝被人体吸收后, 可以通过血液扩散到机体的所有组织, 并积累在某些骨骼中, 铝甚至可以进入大脑并通过胎盘到达胎儿体内^[15], 影响儿童骨骼发育与智力发展^[16]。铝的长期蓄积可能导致阿尔兹海默症、透析性脑病、关岛肌萎

缩性侧索硬化综合症等神经退行性病变^[17]。

毒理学实验表明, 雄性成年大鼠摄入 520 mg/kg 的氯化铝后, 出现嗜睡、自发运动减少、流泪和呼吸困难等症状^[18]。另有研究指出, 摄入明矾后, 铝通过进入脑组织与对机体具有重要作用的儿茶酚胺类神经递质结合, 降低大鼠脑组织中儿茶酚胺类神经递质的含量、影响儿茶酚胺类神经递质在脑组织中的传递, 且破坏大鼠脑组织中神经细胞的形态, 影响神经细胞正常生理功能, 对脑组织造成病理损伤^[19]。含铝化合物对生物机体健康不仅会造成一定的影响, 而且这种影响会长期存在, 针对铝的潜在蓄积性实验的人体铝静脉注射同位素标记法表明, 铝的生物半衰期约为 7 年^[20]。目前对含铝食品添加剂的毒理学研究不仅关注铝元素与某些疾病之间的关联, 也开始注重对铝元素的作用机制研究。但是, 为了最直观地探讨过量摄入铝对个体的危害, 大部分实验均采用让实验动物直接/间接大量使用含铝化合物来达到效果, 现实生活中, 并不会直接摄入如此高剂量的含铝食品。同时实验所采用的“含铝化合物”并非膳食中常见的硫酸铝钾与硫酸铝铵等, 仅有铝元素的存在便能导致上述研究结果, 还是需要铝元素与其相结合的阴离子共同作用才能产生上述结果, 仍需要进一步实验来验证。

2 含铝食品添加剂的检测技术

《食品添加剂使用标准》(GB 2760-2014) 对可添加含铝食品添加剂的食品及其铝残留区间进行了详细的规定, 同时《食品安全国家标准 食品中铝的测定》(GB 5009.182-2017) 明确了食品中铝的检测方法, 主要包括分光光度法、电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)、电感耦合等离子体光谱法 (ICP-OES) 及石墨炉原子吸收法等^[21]。除国标规定的检测方法之外, 还有部分科研人员自行开发的快速检测方法。

2.1 分光光度法

分光光度计法具有成本低廉、分析速度快、设备维护便利的优点, 该方法主要采取铝离子与络合剂结合发生络合反应, 并检测特定波长下吸光值的原理, 因此络合剂的好坏与否关系到反应结果的稳定性与准确性。王正等^[22]以碱共热为前处理条件, 通过定量检测桑色素与铝离子发生络合反应所产生的黄绿色荧光, 对食品中的铝离子进行快速检测, 结果表明, 该方法的方法检出限 (MDL) 和应用定量限 (PQL) 分别为 1.49 mg/kg 与 4.92 mg/kg , 相对标准偏差 (RSD) 为 2.4%, 具有较高的灵敏度。谭亚男等^[23]认为, 目前国标检测方法易受环境因素、试剂及容器污染因素干扰, 导致样品测定“平行性和重复性不易保证”, 鉴此开发出“微波消解法消解样品—铬天青 S 与铝离子反应产生蓝绿色胶束—分光光度法检测”的检测方法, MDL 为 0.5 mg/kg , RSD 小于 8%, 具有高精度、前期准备时间短、降低污染率等特点。此外, 有研究认为国标检测方法只能检测食品中的铝残留, 无法确定所添加的含铝食品添加剂是否为食品级添加

剂,进而导致可能的健康风险。基于上述原因,黄忠意等^[24]建立了基于微波电磁辐射的样品提取方法,能够直接提取含铝添加剂并进行后续分光光度检测,结果显示其平均回收率为90.6%~97.2%,RSD范围在2.1%~4.7%,均符合实验要求。在运用分光光度法进行含铝食品添加剂检测时,常见问题主要在于样品前处理步骤复杂耗时且对反应条件要求较高,具有较差的显色稳定性与准确性,仅适合铝残留较高的样品检测。因此,未来的改进思路可集中于对样品前处理步骤的简化以及对显色剂的优化。

2.2 石墨炉原子吸收法

相较于分光光度法、ICP-MS、ICP-OES等检测方法,石墨炉原子吸收法具有分析速度快、灵敏度高、检出限低的优点,适合高通量样品筛查。该方法常使用带铂盐涂层的特制石墨管,但用于检测的石墨管在高温下极易损坏,同时由于铝元素在高温下的高度活性导致结果稳定性较差。基于此,石红霞^[25]通过使用硝酸、高压消解罐法对样品进行前处理,以硝酸镁为基体改进剂,并选择涂铂石墨管,同时选择1300℃、2600℃分别作为灰化温度、原子化温度,对石墨炉原子吸收法进行了前处理及仪器条件的优化,通过比对标准物质,该方法检测准确度达到90%以上,RSD值小于5%,结果理想。李银萍^[26]则以硝酸、双氧水、微波消解罐法对样品进行前处理,并选择700℃、2400℃分别作为灰化温度、原子化温度,一方面提高了石墨管的使用寿命,另一方面在不同样本间达到了90%~110%的回收率,RSD值小于10%,具有较好的实验结果。周易枚等^[27]同样采用微波消解罐法的前处理方法,但消解液选用浓硝酸,灰化温度选择1200℃,原子化温度选择2300℃,其回收率在95.60%~97.08%之间,RSD值区间为2.32%~4.64%,结果显示其方法检出限为0.163 mg/kg,较之国家标准提高了1倍。但在实际应用中,石墨炉原子吸收法则对铝的原子化具有较高要求,因此存在检测结果不稳定等问题。未来研究中不仅需要对石墨管易损耗问题进行进一步研究,还需解决由高温下高度活跃的铝原子所导致的结果稳定性差的问题。

2.3 电感耦合等离子体法

电感耦合等离子体法主要包括ICP-MS及ICP-OES,二者均具有多元素高分辨分析能力以及较高的检测精确度的优点,适合检测食品中痕量或含铝极低的铝残留^[28]。电感耦合等离子体法十分适合铝残留的高通量检测,但是由于ICP-MS与ICP-OES的仪器及运行成本高昂,普及度较低^[29]。当前主要的学术研究集中于利用ICP-MS或ICP-OES法对食品中的铝残留进行检测,或是改良实验条件。例如宋政等^[30]通过建立以乙二胺四乙酸二钠溶液为提取剂、ICP-MS进行后续检测的方法,MDL为0.026 mg/kg,在50 mg/kg、100 mg/kg两种提取剂梯度加标的条件

下RSD值为1.36%~2.58%,成功排除本底铝对实验的干扰。也有少量研究关注ICP-MS、ICP-OES之间及与其他方法之间的优劣,如泮秋立等^[31]通过比较分光光度法与电感耦合等离子体质谱法两种方法间的方法线性范围、MDL、PQL、精密度和回收率等指标,指出分光光度法与电感耦合等离子体质谱法均可有效实现铝残留的检测任务,但是电感耦合等离子体质谱法在上述指标上均优于分光光度法,更适合检测大批量、低铝残留样品的检测。在ICP-MS与ICP-OES两种方法之间,ICP-OES的耐盐量较低,易出现谱线重叠干扰。安永鹏等^[32]同时利用ICP-MS与ICP-OES检测粉条中的铝残留并进行结果比对,数据显示ICP-MS与ICP-OES的检出限分别为0.0008 μg/mL和0.0024 μg/mL,RSD均小于3%,二者之间的各项指标并无显著性差异,但用ICP-MS较之ICP-OES在检出限、数据稳定性及分析速度上具有优势。ICP-MS与ICP-OES相较于国标中其他的检测方法,虽然具有较高的检测精度,但是由于所用仪器昂贵,检测成本较高,因此适用于高校、科研机构等科研经费充足的单位,无法全面下沉至基层执法办案单位。

2.4 其他快速检测方法

相较于利用实验室仪器操作以检测食品中的铝残留,快速检测方法具有检测速度快、操作简单等优势,为一线执法人员现场快速检测样品中的铝残留提供了极大的便利。陈楠等^[33]利用Al³⁺与铬天青S、十六烷基三甲基溴化铵在pH5.5的缓冲体系中形成的三元配合物颜色与Al³⁺含量呈正比的原理,开发出通过目视比色即可快速检测微量铝离子的试剂盒,其方法测定范围是0.01~0.50 mg/mL,具有实验条件易控制、显色速度快、溶液稳定时间长等优点。张新等^[34]则开发了微波消解前处理与比色卡对照的快检试剂盒,RSD均小于5%,不同样品的加标回收率区间为91.6%~104.7%,具有试剂消耗少、操作简单等优点,适用于执法部门现场快速检测。值得注意的是,以中国知网收录的文献为例,目前此类研究仍处于初始阶段,未进入主流研究视野,现有研究可能无法满足基层实战需要,因此需要进一步加强含量添加剂快速检测方法的开发与应用。

3 食品铝含量监测分析

3.1 全国性膳食铝暴露研究

我国自二十世纪七十年代起便有学者注意到膳食中铝与人体健康的关系,并积极引介外国研究进展至国内^[35-38],但针对全国范围的居民膳食铝暴露研究则起步较晚,相关研究及报告十分稀少。张俭波^[8]利用2002年“中国居民营养与健康状况调查”中居民食物摄入量数据及2003~2007年“全国污染物监测数据”中含铝食品添加剂数据对全国居民面制品膳食铝暴露开展的评估,结果表明发酵面制品、油炸食品等均存在不同程度的铝残留超标问题,其中油条最为

严重。中国国家食品安全风险评估专家委员会则于 2011 年专门出具了“中国居民膳食铝暴露风险评估”技术报告,并指出我国全人群平均膳食铝摄入量低于 JECFA 提出的 PTWI(2 mg/kg 体重/周),但是低年龄组、高食品消费组以及北方居民的含量均超过 PTWI。总体来讲,我国膳食铝摄入量高于其他国家,其中主要原因是我国居民日常摄入的食物中铝含量过高^[39]。

3.2 各地食品铝含量监测分析

不同于全国范围的居民膳食铝暴露研究文献匮乏的状况,以省、市、区为单位的居民膳食铝暴露评估则呈现较为活跃的状态,自二十世纪九十年代起便有地区开展了相关研究^[40-43]。各地食品铝含量检测分析主要由本地市场监督管理局、疾病预防控制中心、出入境检验检疫局等部门联合组织开展或单独开展,主要以粮食制品铝元素的专项检测为主,例如某地“食品中重金属污染情况分析”“面制食品铝含量测定”“高含铝食品铝残留量监测”“居民铝的膳食暴露评估”“卫生指标检测结果”,或者针对特定食品如馒头、油条、粉丝、拉皮等的“铝含量调查”及“铝污染水平的风险评估”。检测食品铝含量的目的则主要在于为居民健康饮食提供指导^[44],以及为监管部门的食品监管工作提供科学参考依据^[45]。根据各地抽查检测结果显示,超标类食品主要集中在油炸类面制品、即食海蜇、小麦粉及其制品等食物中,部分食品检测超标的原因主要被归结为含铝添加剂、铝色淀的超量超范围使用^[46-51]。

目前,此类研究主要分为两种形式,一类是对各大市场、商店、饭店所售卖的目标食品进行随机抽样,并结合居民食物消费量进行评估。例如杨积军等^[52]调查了 2015 年广西 14 个市的膳食铝暴露情况,结果显示广西居民的 PTWI 为 0.12 mg/kg bw。姜松强等^[53]于 2018 年在郑州进行为期一周的调查显示,面制品的 PTWI 在 0.2332 mg/kg bw,为 JECFA 暂定 PTWI 的 11.7%。采用上述短时随机抽样的研究方法的优点在于能够及时反映出所调查地区的膳食铝暴露情况,但由于采样时间较短,抽样数量较少,可能难以形成代表性。另一类研究形式则主要采用长时间的纵向研究方法,通过收集一定时间段内(通常是以年为单位)的数据进行统计,例如秦赢等^[54]在对 2012~2014 年哈尔滨市 6 类食品进行膳食铝暴露调查中表明,哈尔滨市的居民平均 PTWI 为 8.9 mg/kg bw,单项食品指标中馒头 PTWI 最高,为 4.4 mg/kg bw。张倩等^[55]则对青海省居民 2015~2020 年膳食铝暴露进行评估,结果显示居民总铝暴露量为 0.5572 mg/kg bw(原文为每日铝暴露量,为保证全文统一便进行了换算),为 PTWI 的 27.86%。采用纵向研究的膳食铝暴露研究具有数据量大、追踪时间长等优点,但是由于各地调查均采取“食品抽样-检测-结果除以样本数以取平均值”的研究策略,因此

并不能反映每一年的膳食铝暴露情况及其变化。同时,无论是采用第一种研究方式还是第二种研究方式,在选取“居民食品摄入量”这一指标时,部分研究所采用的数据时效性均有待探讨,例如前述秦赢等^[54]的研究所采用的食品消费量数据来自于“2002 年中国居民营养与健康状况调查”,未考虑十年之间居民的饮食结构及不同食物的摄入量的变化。此类情况应列入研究者的考量范围,以便更精确地反映膳食铝暴露问题。

4 结语

含铝食品添加剂的存在使得食物口感更加丰富,但无良商家无视《标准》中对食品中铝残留的规定非法超范围、超限量添加含铝食品添加剂,在触犯《中华人民共和国食品安全法》与《中华人民共和国刑法》的同时,给群众健康带来极大的安全隐患。因此,应正确把握含铝食品添加剂的允许用量与毒理学特性,并掌握合理高效的检验检测方法,在日常监测监管中做到“科学认识”“高效检测”。同时,仍应认识到现有研究的不足并加以改进,具体体现为:在未来毒理学实验中根据日常膳食摄入的含铝食品添加剂种类与剂量进行更加科学的设计;关注检测技术的优化与一线执法设备的开发;在膳食铝暴露监测中设计更加合理的评估策略,全链条加强含铝食品添加剂研究能力。

参考文献

- [1] ERTL K, GOESSLER W. Aluminium in foodstuff and the influence of aluminium foil used for food preparation or short time storage[J]. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2018, 11(2): 153-159.
- [2] European Food Safety Authority. Safety of aluminium from dietary intake-scientific opinion of the panel on food additives, flavorings, processing aids and food contact materials (AFC)[J]. *EFSA Journal*, 2008, 6(7): 1-34.
- [3] PENNINGTON J A T. Aluminum content of foods and diets[J]. *Food Additives and Contaminants*, 1988, 5(2): 161-232.
- [4] The Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. Evaluation of certain food additives and contaminants[J]. *World Health Organization Technical Report Series*, 1995, 859(940): 1-54.
- [5] 焦丽娟,周霞,李双,等. 2014-2018 年盐城市盐都区市售面制食品中铝含量分析及暴露评估[J]. *职业与健康*, 2020, 36(18): 2499-2502. [JIAO Lijuan, ZHOU Xia, LI Shuang, et al. Analysis and exposure assessment of aluminum content in commercially available flour food in Yandu District of Yancheng City from 2014-2018[J]. *Occupation and Health*, 2020, 36(18): 2499-2502.]
- [6] 杨春芳,伍慧方. 铝的毒性和来源研究进展[J]. *轻工科技*, 2019, 35(1): 104-107. [YANG Chunfang, WU Hui Fang. Research progress on toxicity and source of aluminum[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2019, 35(1): 104-107.]
- [7] SAIYED S M, YOKEL R A. Aluminum content of some foods and food products in the USA, with aluminum food additives[J].

Food Additives & Contaminants, 2005, 22(3): 234-244.

[8] 张俭波. 危险性分析技术在我国食品添加剂管理中的应用研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2009. [ZHANG Jianbo. Study on application of risk analysis on management of food additives in China[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2009.]

[9] 张玉华, 刘于飞, 张维蔚, 等. 2014-2018年广州市市售食品中铝含量调查及人群膳食暴露评估[J]. 现代预防医学, 2020, 47(11): 1967-1969, 1974. [ZHANG Yuhua, LIU Yufei, ZHANG Weiwei, et al. Investigation on aluminum content in commercially available foods in Guangzhou City and dietary exposure assessment, 2014-2018[J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(11): 1967-1969, 1974.]

[10] 蒋琦, 黄琼, 张永慧. 膳食铝暴露评估研究现状[J]. 中国食品卫生杂志, 2013, 25(1): 102-106. [JIANG Qi, HUANG Qiong, ZHANG Yonghui. The research status of exposure assessment of aluminum in food[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2013, 25(1): 102-106.]

[11] 王劲. 铝的生物学作用研究概况[J]. 卫生研究, 2002(4): 320-322. [WANG Jin. Current researches on biological effect of aluminum[J]. Journal of Hygiene Research, 2002(4): 320-322.]

[12] 程敏. 濮阳市面制品中铝含量检测及研究分析[J]. 食品安全导刊, 2021(27): 101-103. [CHENG Min. Detection and analysis of aluminum content in Puyang market products[J]. China Food Safety Magazine, 2021(27): 101-103.]

[13] WALTON J R. Chronic aluminum intake causes Alzheimer's disease: Applying sir austin bradford hill's causality criteria[J]. *Journal of Alzheimer's Disease*, 2014, 40(4): 765-838.

[14] 朱方争, 谢佩意. 铝的神经毒性机理的研究概况[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 1998(1): 69, 72. [ZHU Fangzheng, XIE Peiyi. A survey of neurotoxicity mechanism of aluminum[J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 1998(1): 69, 72.]

[15] GOLUB M S, DOMINGO J L. Fetal aluminum accumulation[J]. *Teratology*, 1998, 58(6): 225-226.

[16] WANG B, LIU Y, WANG H, et al. Contamination and health risk assessment of lead, arsenic, cadmium, and aluminum from a total diet study of Jilin Province, China[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020; 8.

[17] 元凤丽. 铝接触与神经毒性作用研究进展[J]. *预防医学情报杂志*, 2001(6): 442-443. [QI Fengli. Research progress of aluminum exposure and neurotoxicity[J]. *Journal of Preventive Medicine Information*, 2001(6): 442-443.]

[18] KUMAR S. Acute toxicity of aluminium chloride, acephate, and their coexposure in male wistar rat[J]. *International Journal of Toxicology*, 2001, 20(4): 219-223.

[19] 曹艺耀, 刘萍, 焦海涛, 等. 明矾对大鼠脑组织中儿茶酚胺类神经递质的影响[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(6): 502-504. [CAO Yiyao, LIU Ping, JIAO Haitao, et al. Effect of alum on catecholamine neurotransmitters in cerebrum of rats[J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(6): 502-504.]

[20] PRIEST N D, NEWTON D, DAY J P, et al. Human metabolism of aluminium-26 and gallium-67 injected as citrates[J].

Human & Experimental Toxicology, 1995, 14(3): 287.

[21] 段嘉绅. 食品中铝元素的测定方法分析[J]. *中国食品*, 2021(21): 66-67. [DUAN Jiashen. Determination and analysis of aluminum in food[J]. *China Food*, 2021(21): 66-67.]

[22] 王正, 吴丽, 邹沫君. 桑色素-荧光分光光度法测定油炸面制品中的铝[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 309-312. [WANG Zheng, WU Li, ZOU Mojun. Determination of aluminum in fried flour products with morin by fluorescence spectrophotometry[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(8): 309-312.]

[23] 谭亚男, 马伟, 陆阳. 微波消解-比色法测定食品中的铝[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 281-284. [TAN Yanan, MA Wei, LU Yang. Spectrophotometer method for the determination of aluminum in food using microwave digestion[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(1): 281-284.]

[24] 黄忠意, 王云昊, 张新, 等. 微波提取分光光度法快速测定食品中含铝添加剂[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(3): 85-87. [HUANG Zhongyi, WANG Yunhao, ZHANG Xin, et al. Rapid determination of aluminum-containing additives in foods by spectrophotometry after microwave extraction[J]. *Cereals & Oils*, 2018, 31(3): 85-87.]

[25] 石红霞. 石墨炉原子吸收法检测食品中的铝方法优化[J]. 检验检疫学刊, 2019, 29(3): 36-38, 41. [SHI Hongxia. Optimization of graphite furnace atomic absorption spectrometry for the detection of aluminum in food[J]. *Quality Safety Inspection and Testing*, 2019, 29(3): 36-38, 41.]

[26] 李银萍. 石墨炉原子吸收法检测食品中铝的方法优化[J]. 河南化工, 2021, 38(11): 52-54. [LI Yinping. Method optimization of determination of aluminum in food by graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. *Henan Chemical Industry*, 2021, 38(11): 52-54.]

[27] 周易枚, 陈彬, 蒋林惠, 等. 微波消解-石墨炉原子吸收光谱法检测食品中的铝[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4736-4740. [ZHOU Yimei, CHEN Bin, JIANG Linhui, et al. Determination of aluminum in food by graphite furnace atomic absorption spectrometry with microwave digestion[J]. *Journal of Food Safety Quality*, 2017, 8(12): 4736-4740.]

[28] 徐冲, 赵立琴, 李玉丹, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定面制品中铝含量的不确定度评定及方法改进[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(11): 120-127. [XU Chong, ZHAO Liqin, LI Yudan, et al. Evaluating uncertainty and improving methods of determination of aluminum in flour product by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(11): 120-127.]

[29] 祝婧, 董华燕. 食品中铝的测定方法研究进展[J]. 现代食品, 2017(15): 55-58. [ZHU Jing, DONG Huayan. Research progress of determination methods of aluminum in food[J]. *Modern Food*, 2017(15): 55-58.]

[30] 宋政, 周陶鸿, 胡家勇, 等. 面制品及糕点中含铝食品添加剂的测定[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(4): 142-147. [SONG Zheng, ZHOU Taohong, HU Jiayong, et al. Determination of aluminum containing additives in flour products and pastry[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(4): 142-147.]

[31] 泮秋立, 孙满慧, 张廷文, 等. 分光光度法和电感耦合等离子体质谱法测定粉条中铝含量的结果比较[J]. 食品安全质量检测学

- 报, 2021, 12(17): 6929-6932. [PAN Qiuli, SUN Xiaohui, ZHANG Tingwen, et al. Comparison of the results of aluminum content in starch noodles by spectrophotometry and inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(17): 6929-6932.]
- [32] 安永鹏, 杨彦丽, 丁轲. ICP-MS 和 ICP-OES 法检测粉条中铝含量的比较研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(6): 108-113. [AN Yongpeng, YANG Yanli, DING Ke. Comparison of ICP-MS and ICP-OES for detection of aluminum in vermicelli[J]. China Food Additives, 2021, 32(6): 108-113.]
- [33] 陈楠, 熊松, 王伟, 等. 快速测铝试剂盒的研制[J]. 分析科学学报, 2010, 26(5): 563-566. [CHEN Nan, XIONG Song, WANG Wei, et al. Development of reagent kit for the determination of aluminum[J]. Journal of Analytical Science, 2010, 26(5): 563-566.]
- [34] 张新, 黄忠意, 孙桂芳, 等. 食品中含铝添加剂试剂盒分析[J]. 食品安全导刊, 2016(33): 107-108. [ZHANG Xin, HUANG Zhongyi, SUN Guifang, et al. Analysis of aluminum additive kit in food[J]. China Food Safety Magazine, 2016(33): 107-108.]
- [35] 丁立. 脑铝浓度和透析性脑病[J]. 国外医学(内科学分册), 1979(1): 34. [DING Li. Brain aluminum concentration and dialysis encephalopathy[J]. International Journal of Internal Medicine, 1979(1): 34.]
- [36] 林田, 牛映斗. 国人脑组织铝蓄积初步调查[J]. 西安交通大学学报(医学版), 1986(3): 230-231, 313. [LIN Tian, NIU Yingdou. Preliminary investigation on aluminum accumulation in human brain tissue in China[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University (Medical Sciences), 1986(3): 230-231, 313.]
- [37] 刘凤贞, 阎金录. 环境铝的生物学作用研究近况[J]. 环境与健康杂志, 1987(6): 37-40. [LIU Fengzhen, YAN Jinlu. Recent research on biological effects of environmental aluminum[J]. Journal of Environment and Health, 1987(6): 37-40.]
- [38] 刘凤贞, 于德奎, 吕严, 等. 国人铝日允许摄入量的初步研究[J]. 环境与健康杂志, 1991(2): 49-54. [LIU Fengzhen, YU Dekui, LÜ Yan, et al. A preliminary study on the daily allowable intake of aluminum in Chinese[J]. Journal of Environment and Health, 1991(2): 49-54.]
- [39] 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: 3. [National Food Safety Risk Assessment Expert Committee. Risk assessment of dietary exposure to aluminum in Chinese population[R]. Beijing: National Food Safety Risk Assessment Center, 2012: 3.]
- [40] 徐格晟, 金蓉培, 张振文, 等. 天津市常用食物的铝含量及居民铝摄入量初探[J]. 中华预防医学杂志, 1992(3): 171-173. [XU Gesheng, JIN Rongpei, ZHANG Zhenwen, et al. Aluminum content in common foods and aluminum intake of residents in Tianjin[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 1992(3): 171-173.]
- [41] 闻武, 陈炳卿, 李丹, 等. 哈尔滨市饮食中的铝及居民日摄入铝量的研究[J]. 中华预防医学杂志, 1993(1): 32-36. [WEN Wu, CHEN Bingqing, LI Dan, et al. Study on aluminum in diet and daily aluminum intake of residents in Harbin[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 1993(1): 32-36.]
- [42] 钟才云, 王颖明, 谢慧文, 等. 南京市居民铝摄入量研究[J]. 南京医科大学学报, 1996(1): 50-53. [ZHONG Caiyun, WANG Yingming, XIE Huiwen, et al. Study on aluminum intake of residents in Nanjing[J]. Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences), 1996(1): 50-53.]
- [43] 王林, 苏德昭, 王永芳, 等. 中国居民每日摄铝量及面制食品中铝限量卫生标准研究[J]. 中国食品卫生杂志, 1996(2): 2-6, 13. [WANG Lin, SU Dezhao, WANG Yongfang, et al. Study on the daily aluminum intake of Chinese residents and the hygienic standard of aluminum limit in flour food[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 1996(2): 2-6, 13.]
- [44] 许燕, 赵晓慧, 刘敏, 等. 2013-2016 年云南省部分使用含铝添加剂食品中铝残留含量分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(10): 3715-3720. [XU Yan, ZHAO Xiaohui, LIU Min, YANG Zushun, et al. Analysis of residual aluminum in food with aluminum additives in Yunnan Province in 2013-2016[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(10): 3715-3720.]
- [45] 陈晓琬, 韩琳. 2017—2019 年洛阳市市售油条铝含量调查分析[J]. 应用预防医学, 2021, 27(2): 131-133. [CHEN Xiaolong, HAN Lin. Investigation and analysis on aluminum content of commercial fried dough sticks in Luoyang from 2017 to 2019[J]. Applied Preventive Medicine, 2021, 27(2): 131-133.]
- [46] 马丹英, 邢超, 张炎艳, 等. 绍兴地区食品中铝监测结果分析[J]. 预防医学, 2018, 30(2): 202-204. [MA Danying, XING Chao, ZHANG Yanyan, et al. Analysis of monitoring results of aluminum in food in Shaoxing area[J]. Preventive Medicine, 2018, 30(2): 202-204.]
- [47] 斯冬芳, 刘梦丽, 卢国伟, 等. 绍兴市柯桥区 2015 年-2019 年部分市售食品中铝残留量的调查分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(8): 1008-1010. [SI Dongfang, LIU Mengli, LU Guowei, et al. Investigation of aluminum residues in some commercially available food in Keqiao District of Shaoxing City during 2015-2019[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(8): 1008-1010.]
- [48] 李琼, 郭晏强, 宋秋坤, 等. 2013 年-2016 年平顶山市市售油条、油饼中铝含量监测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2019, 29(4): 500-502. [LI Qiong, GUO Yanqiang, SONG Qiukun, et al. Surveillance and analysis of aluminum content in deep-fried bread stick and deep-fried dough cake in Pingdingshan from 2013 to 2016[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2019, 29(4): 500-502.]
- [49] 李国星, 麻顺广, 杨翠平, 等. 2012-2015 年濮阳市油条、油饼中铝含量结果分析[J]. 河南预防医学杂志, 2016, 27(5): 385-387. [LI Guoxing, MA Shunguang, YANG Cuiping, et al. Analysis on net content of aluminum in twisted cruller and seedcake in Puyang in 2012-2015[J]. Henan Journal of Preventive Medicine, 2016, 27(5): 385-387.]
- [50] 徐清, 李永波, 秦国富. 2010 年-2013 年西安市高含铝食品铝残留量监测及风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(11): 1823-1825. [XU Qing, LI Yongbo, QIN Guofu. Investigation and risk evaluation of aluminum residues in high aluminum-containing food in Xi'an during 2010-2013[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2015, 25(11): 1823-1825.]
- [51] 李流川, 李德华, 王卓, 等. 2017—2018 年达州市 603 份熟制米面食品中铝含量监测分析[J]. 预防医学情报杂志, 2021,

- 37(12): 1693–1697,1702. [LI Liuchuan, LI Dehua, WANG Zhuo, et al. Analysis of aluminum content in 603 cooked rice flour foods in Dazhou from 2017 to 2018[J]. *Journal of Preventive Medicine Information*, 2021, 37(12): 1693–1697,1702.]
- [52] 杨积军, 陈莉, 吕春秋, 等. 广西面制食品铝残留量监测及人群暴露风险评估[J]. *实用预防医学*, 2018, 25(2): 185–188. [YANG Jijun, CHEN Li, LÜ Chunqiu, et al. Monitoring of aluminum residuals in flour products and exposure assessment among residents in Guangxi[J]. *Practical Preventive Medicine*, 2018, 25(2): 185–188.]
- [53] 姜松强, 朱慧丽, 陈彦哲, 等. 郑州市面制品中铝膳食暴露调查[J]. *中国卫生检验杂志*, 2020, 30(11): 1394–1396. [JIANG Songqiang, ZHU Huili, CHEN Yanzhe, et al. Investigation on the exposure of aluminum in the flour products of Zhengzhou[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2020, 30(11): 1394–1396.]
- [54] 秦赢, 孙长颢, 蔡璐, 等. 哈尔滨市居民膳食铝的摄入量调查及暴露量评估[J]. *中国公共卫生管理*, 2018, 34(1): 131–133. [QIN Ying, SUN Changhao, CAI Lu, et al. Intake survey and exposure assessment of dietary aluminum in Harbin[J]. *Chinese Journal of Public Health Management*, 2018, 34(1): 131–133.]
- [55] 张倩, 郭学斌. 青海省成年居民膳食铝暴露风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2021, 33(5): 605–609. [ZHANG Qian, GUO Xuebin. Assessment on dietary exposure of aluminum among adult residents in Qinghai Province[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2021, 33(5): 605–609.]