

# 微波消解-火焰原子吸收光谱法测定液体钙锌热稳定剂中钙锌含量

谢晓龙<sup>1</sup>, 岳应征<sup>1</sup>, 谢景千<sup>2</sup>, 陈伟妮<sup>1</sup>, 邱佩爱<sup>3</sup>, 陈树娣<sup>2\*</sup>

(1. 揭阳职业技术学院, 广东 揭阳 522000; 2. 深圳市计量质量检测研究院, 广东 深圳 518110;  
3. 广东省粤东技师学院, 广东 汕头 515041)

**摘要:**建立微波消解-火焰原子吸收光谱法测定液体钙锌热稳定剂中钙、锌含量。取样0.25 g,以5 mL硝酸为消解液,优化消解程序,加适量镧试剂(20 g/L)。钙、锌的质量浓度在0.50~5.00 mg/L和0.10~1.00 mg/L范围内相关系数 $r$ 均大于0.999,钙、锌检出限为0.006 mg/g、0.001 mg/g,定量限为0.02 mg/g、0.003 mg/g,相对标准偏差为2.6%、2.8% ( $n=6$ ),加标回收率为98.6%~106.8%、97.7%~105.8%,方法精密度和回收率均较好。运用建立的方法测定3种货号产品,与理论推荐值相比,钙的相对误差为1.3%~2.7%,锌的相对误差-1.0%~2.0%,结果均较好。本法便捷可靠,能满足样品检测需求,为同类产品质量检测提供参考。

**关键词:**微波;火焰原子吸收光谱法;钙锌;热稳定剂

中图分类号:O657.3 文献标识码:A 文章编号:1009-8143(2026)02-0031-06

Doi:10.3969/j.issn.1009-8143.2026.02.06

## Determination of Calcium and Zinc Content in Liquid Calcium-Zinc Thermal Stabilizers by Microwave Digestion-Fire Atomic Absorption Spectrometry

Xie Xiao-long<sup>1</sup>, Yue Ying-zheng<sup>1</sup>, Xie Jing-qian<sup>2</sup>, Chen Wei-ni<sup>1</sup>, Qiu Pei-ai<sup>3</sup>, Chen Shu-di<sup>2\*</sup>

(1. Jieyang Polytechnic, Jieyang, Guangdong 522000, China;

2. Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection, Shenzhen, Guangdong 518110, China;

3. Guangdong Yuedong Technician College, Shantou, Guangdong 515041, China)

**Abstract:** Establish a microwave digestion-flame atomic absorption spectrometry method for determining calcium and zinc content in liquid calcium-zinc heat stabilizers. Sample 0.25 g and use 5 mL nitric acid as the digestion solution. Optimize the digestion procedure and add an appropriate amount of lanthanum reagent (20 g/L). The correlation coefficients  $r$  for calcium and zinc mass concentrations within the ranges of 0.50-5.00 mg/L and 0.10-1.00 mg/L are all greater than 0.999. The detection limits for calcium and zinc are 0.006 mg/g and 0.001 mg/g, respectively, with quantification limits of 0.02 mg/g and 0.003 mg/g. The relative standard deviations are 2.6% and 2.8% ( $n=6$ ), and the spiked recovery rates are 98.6%-106.8% and 97.7%-105.8%, demonstrating good method precision and recovery. Using the established method, three product grades were measured, and compared with theoretical recommended values, the relative errors for calcium were 1.3%-2.7%, while those for zinc were -1.0%-2.0%, with all results being satisfactory. This method is convenient and reliable, meeting sample testing requirements and providing a reference for the quality inspection of similar products.

**Key words:** microwave; Flame Atomic Absorption Spectrometry; Calcium Zinc; heat stabilize

收稿日期:2026-02-06

基金项目:2024年揭阳市社会发展领域科技计划项目(NO.SHFZ2024011)

第一作者简介:谢晓龙(1985—),女,硕士,讲师/化学检验员技师,主要从事分析检验教科研及技能竞赛工作。

E-mail: 493813094@qq.com

通讯作者简介:陈树娣(1982—),女,高级工程师,主要从事光谱分析技术研究工作。E-mail: 164793222@qq.com

PVC热稳定剂液体钙锌是一种应用于塑料加工领域的新型环保复合热稳定剂,由于其环保性能受到较大关注及较快发展,是极具发展前景的一类热稳定剂,欧洲国家专注于发展无毒钙/锌复合热稳定剂,此类产品经过专门的配方设计经加工合成制得,成分复杂且多为有机物如有机酸盐钙/锌热稳定剂、有机醇盐钙/锌热稳定剂、含氮有机钙/锌热稳定剂,其中钙锌配比及含量是关键指标,钙锌比影响热稳定时间/效果<sup>[1-2]</sup>。不同商品化的钙锌稳定剂成分及配比不一,产品中钙锌含量受到生产厂家及下游使用厂家的关注,开发检测方法可为产品质量控制提供重要技术支撑<sup>[3-4]</sup>。

钙锌元素检测方法主要两大类,一是配位滴定法<sup>[5]</sup>,二是仪器法包括电感耦合等离子体发射光谱法<sup>[6-7]</sup>、电感耦合等离子体质谱法<sup>[8]</sup>、石墨炉原子吸收光谱法<sup>[9]</sup>、火焰原子吸收光谱法<sup>[10-12]</sup>等。配位滴定法是经典的化学分析法,常用于测定含量不小于1%的常量组分,成本低试剂多流程较繁琐,测定结果与操作人员水平息息相关,较适合小型企业小批量样品的内部质检;电感耦合等离子体发射光谱法能满足多种元素同时测定但仪器昂贵且运行成本较高,不易推广;电感耦合等离子体质谱法和石墨炉原子吸收光谱法适应于痕量和微量元素的测定;火焰原子吸收光谱法具有快速简便高效、成本较低,自动化程度高,能满足大批量样品同时检测等优点。

样品前处理方面,经典方法有干法灰化和湿法消解。干法灰化时间长操作较繁琐;湿法消解包括浴式加热、电热板加热、电炉加热,均属常压湿法,对于复杂样品难分解彻底;随着样品前处理技术的发展,微波消解样品已被广泛应用于化工、环境、食品、化妆品等领域,该法属于高压湿法,具有大批量样品同时处理、加热均匀、试剂用量少、自动化程度高、降低污染风险和损失少等优点<sup>[13]</sup>。本文根据样品实际情况,对消解液、消解程序、镧试剂消除干扰及结果质量等进行研究。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂及仪器

钙标准贮备液:1 000 mg/L,编号GSB 04-1720-2004,国家有色金属及电子材料分析测试中心;锌标准贮备液:1 000 mg/L,编号GBW(E)082778,坛

墨质检科技股份有限公司;65%硝酸:优级纯,默克股份两合公司;盐酸:分析纯,东莞东江化学试剂有限公司;30%过氧化氢:分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;氧化镧:高纯试剂4N,国药集团化学试剂有限公司;液体钙锌:货号DH-78、HZ-26、JC-27,样品;实验用水为一级水。

火焰原子吸收分光光度计:ICE3500型,美国赛默飞世尔科技公司;微波消解仪:ETHOS UP型,意大利迈尔斯通;赶酸器:VB24 Plus型,北京莱伯泰科仪器股份有限公司;电子天平:QUINTIX224-1CN型,德国赛多利斯;滤纸:定性快速、 $\phi 15$  cm,深圳天林智能科学仪器有限公司;纯水机:Milli-Q型,美国密理博公司。

### 1.2 试剂配制

20 g/L 镧试剂:称取 2.345 g 氧化镧,先用少量水湿润后加入 7.5 mL 盐酸溶液(1+1),纯水定容至 100 mL 容量瓶。

1% 盐酸:量取 10 mL 盐酸,稀释至 1 000 mL。

钙系列标准工作溶液:吸取钙标准贮备液(1 000 mg/L)5 mL,用 1% 盐酸定容至 50 mL,稀释为 100 mg/L;再分别吸取 0.00、0.25、0.50、1.00、1.50、2.00、2.50 mL,加 0.10 mL 镧试剂,用 1% 盐酸稀释定容至 50 mL,摇匀,配制成钙标准溶液浓度分别为 0.00、0.50、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 mg/L 的钙元素标液。

锌系列标准工作溶液:吸取锌标准贮备液(1 000 mg/L)0.50 mL,定容至 50 mL,稀释为 10.0 mg/L;再分别吸取 0.00、0.50、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 mL,用 1% 盐酸稀释定容至 50 mL,得到锌标准溶液浓度分别为 0.00、0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mg/L 的锌元素标液。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 仪器工作条件

测量时间 4.0 秒,火焰参数雾化器提升 4 秒;钙分析线 422.7 nm,光谱通带宽度 0.5 nm,灯电流 75%,燃气流量 1.0 L $\cdot$ min<sup>-1</sup>,燃烧器高度 11.0 mm;锌分析线 213.9 nm,光谱通带宽度 0.2 nm,灯电流 75%,燃气流量 1.2 L $\cdot$ min<sup>-1</sup>,燃烧器高度 7.0 mm。

#### 1.3.2 样品处理

称样品 0.25 g(称准至 0.000 1 g)于消解管中,加 5 mL 硝酸,100 $^{\circ}$ C 加热预消解 30 min,冷却至室温后微波消解,结束后,在 190 $^{\circ}$ C 加热赶酸至近干,冷

却,用1%盐酸转移定容至50 mL,摇匀静置。

### 1.3.3 样品测定

取上述1.3.2溶液适量至20 mL容量瓶,加适量镧试剂,用1%盐酸稀释定容,即得测钙上机样液;取上述1.3.2溶液适量至50 mL容量瓶,用1%盐酸稀释定容,即得测锌上机样液。同时制备空白样品溶液。按照1.3.1仪器工作条件,依次测定系列工作溶液、空白样品溶液与样品溶液,采用标准曲线法进行定量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 考察不同消解液组成

对货号DH-78(无色)、HZ-26(无色)、JC-27(橘红色)进行试验,分别考察8种消解液组成:10 mL硝酸、9 mL硝酸-1 mL过氧化氢、8 mL硝酸-2 mL过氧化氢、7 mL硝酸-3 mL过氧化氢、6 mL硝酸-4 mL过氧化氢、5 mL硝酸、5 mL硝酸-1 mL过氧化氢、4 mL硝酸-1 mL过氧化氢,各平行2份,结

果表明,消解液加入后产生微小白色气泡;消解液为纯酸体系时,样品消解后定容至50 mL溶液无色或浅黄,消解液为硝酸加过氧化氢体系时,样品消解后定容至50 mL呈不同程度黄色,且过氧化氢加入量越多黄色越深;货号DH-78和HZ-26的样品消解后定容至50 mL静置后底部有少量白色沉淀,该物质可能为样品中的硬脂酸盐与酸反应后的产物硬脂酸<sup>[14]</sup>,货号JC-27的样品消解后无沉淀。综合试验结果并考虑减少检验成本及简化操作,选择5 mL硝酸为消解液。

### 2.2 消解程序优化试验

以更难消解的DH-78为研究对象,考察3种微波方案,各平行3次,不同条件下的消解效果见表1。方案1和2定容至50 mL溶液混浊且测得钙含量显著偏小于理论推荐值,说明分解不彻底;方案3定容至50 mL溶液静置后溶液澄清,底部有少量白色沉淀,2种元素的测定结果均接近理论推荐值,说明该白色沉淀影响很小,选择方案3为消解程序。

表1 3种微波方案的消解效果( $n=3$ )

Table.1 Dissolution effects of three microwave methods( $n=3$ )

方案	程序	升温时间/min	温度/°C	保温/min	消解效果	测定结果/%	理论推荐值/%
1	1	10	120	5	定容至50 mL溶液混浊,絮状物和颗粒物	钙为1.13~1.35 锌为2.04~2.12	
	2	5	150	5			
	3	5	180	15			
2	1	10	120	5	定容至50 mL溶液混浊,絮状物和颗粒物	钙为1.14~1.37 锌为2.04~2.10	钙为1.50 锌为2.00
	2	5	150	5			
	3	5	180	30			
3	1	10	120	5	定容至50 mL,溶液静置后澄清,底部有少量白色沉淀	钙为1.48~1.55 锌为2.02~2.08	
	2	5	160	5			
	3	5	190	30			

### 2.3 样液过滤-不过滤比对

以DH-78为研究对象,考察消解后的样液过滤与不过滤两种操作。试验表明过滤操作时滤纸上有少量白色不溶物,测定结果钙为1.28%和锌为1.44%;无过滤操作测定结果钙为1.52%和锌为2.05%,可见无过滤操作测得结果接近理论推荐值,有过滤操作显著低于理论推荐值,说明在过滤环节2种元素有明显损失,因此消解后的样液如有沉淀不宜过滤,先全部转移定容至50 mL,摇匀静置后取

中上层清液进一步稀释。

### 2.4 镧试剂消除干扰试验

化学干扰是原子吸收光谱分析中的主要干扰。在常规火焰原子吸收条件下, $PO_4^{3-}$ 会对测定产生干扰,这是由于 $PO_4^{3-}$ 在高温时与 $Ca^{2+}$ 生成高熔点、难挥发、难解离的磷酸盐或焦磷酸盐,主要干扰物是 $Ca_3(PO_4)_2$ ,可加入释放剂消除干扰<sup>[15]</sup>,如镧试剂,反应为 $La^{3+}+PO_4^{3-} \rightarrow LaPO_4$ 。由于样品中含有的亚磷酸酯类在消解过程中可能转化为磷酸盐,以货号DH-

78、HZ-26、JC-27为研究对象,称0.25 g样品微波消解后定容至50 mL,平行取12份,分别加入0.00、0.10、0.30、0.50、0.70、0.90 mL的镧试剂(20 g/L),各平行2份,用1%盐酸定容,上机测吸光值,结果见图1,试验表明货号DH-78、JC-27当镧试剂加入量大于等于0.1 mL时吸光度趋于平缓,货号HZ-26当镧试剂加入量大于等于0.3 mL时吸光度趋于平缓,综上,考虑到方法的普适性,镧试剂加入量为0.3 mL。

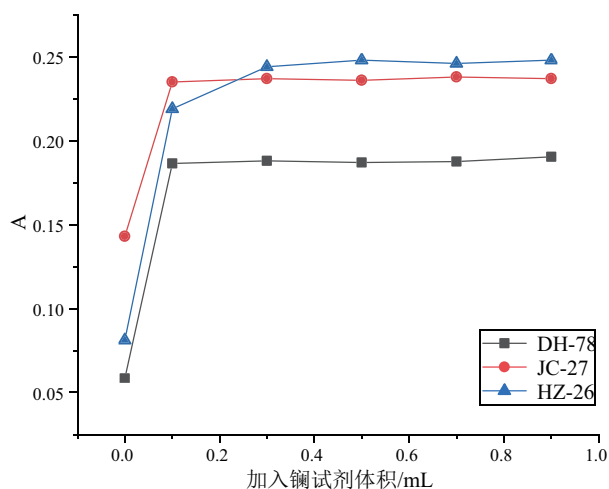


图1 镧试剂消除干扰曲线( $n=2$ )

Fig.1 Lanthanum reagent interference elimination curve( $n=2$ )

## 2.5 背景吸收干扰试验

背景干扰是在原子化过程中,由于分子吸收和光散射作用产生的干扰,使吸光度增加,导致测定结果偏高,分子吸收中无机酸如硫酸、磷酸在紫外区有很强吸收,盐酸、硝酸及高氯酸吸收很小;光散

射发生在试液原子化过程中形成高度分散的固体微粒,入射光照射在这些固体微粒时发生散射,一般入射光波长愈短光散射作用强,试液基体浓度愈大,光散射作用愈严重<sup>[15]</sup>。以货号DH-78为研究对象,分别考察在有氙灯背景扣除和无氙灯背景扣除条件下测定结果,结果见表2,试验表明2种元素测定结果无差异,说明无背景吸收干扰。

表2 背景吸收干扰试验( $n=3$ )

Table .2 Background absorption interference test( $n=3$ )

背景扣除	测得结果/%	
	钙	锌
有	1.56	2.04
无	1.55	2.05

## 2.6 线性范围、检出限与定量限

以标准系列溶液浓度为横坐标( $X$ ),以相应的吸光度为纵坐标( $Y$ )做线性回归方程,见表3,线性范围钙在0.50~5.00 mg/L,锌在0.10~1.00 mg/L,相关系数 $r>0.999$ ,符合要求。采用基于响应值标准偏差和标准曲线斜率法,测试12次空白样品溶液的响应值获得标准偏差 $\delta$ ,根据标准曲线的斜率计算检出限,定量限为3倍的检出限。钙和锌检出限为0.006 mg/g和0.001 mg/g;定量限为0.02 mg/g和0.003 mg/g,远低于液体钙锌热稳定剂中的钙锌含量,满足液体钙锌热稳定剂样品中2种元素测定灵敏度要求。

表3 钙、锌标准曲线、检出限与定量限

Table .3 Standard curve, Detection and quantification limits for calcium and zinc

元素	线性范围/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	线性回归方程	相关系数	检出限/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	定量限/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
钙	0.50~5.00	$y=0.05648x+0.0083$	0.9991	0.006	0.02
锌	0.10~1.00	$y=0.33949x+0.0059$	0.9993	0.001	0.003

## 2.7 方法精密度考察

称同一份样品6份,按1.3操作,结果见表4。由表4可知,钙和锌相对标准偏差为2.6%和2.8%,表明本法精密度较好。

## 2.8 加标回收率

选择钙含量为15.5 mg/g、锌为20.5 mg/g的样本进行加标回收率试验,称18份0.25 g样品,进行低、中、高3个添加水平的测定,每份分别添加1.00、2.00、3.00 mL钙标准溶液(1 000 mg/L),另分别添加

表4 方法精密度

Table. 4 Method Precision

元素	质量分数/%		RSD/%
	测得值	平均值	
钙	1.59, 1.55, 1.48, 1.54, 1.53, 1.58	1.55	2.6
锌	2.06, 2.05, 2.11, 2.05, 1.94, 2.07	2.05	2.8

1.00、2.00、3.00 mL锌标准溶液(1 000 mg/L),每个添加水平平行3份,结果见表5,钙和锌的回收率

表5 样品加标回收率( $n=3$ )Table. 5 Sample spiked recovery rate( $n=3$ )

元素	质量分数/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )		回收率/%	元素	质量分数/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )		回收率/%
	加标量	测得值			加标量	测得值	
钙	3.99	19.53	100.9	锌	4.02	24.73	105.1
	3.95	19.45	100.0		4.04	24.85	97.8
	3.97	19.58	102.8		3.96	24.82	105.0
	7.98	24.11	104.2		7.93	27.92	98.5
	8.04	24.18	105.4		7.86	28.17	97.7
	8.06	23.45	98.6		7.98	28.53	100.5
	12.02	28.53	100.1		11.87	32.40	103.6
	12.23	28.11	103.1		11.99	31.98	105.8
	11.62	27.91	106.8		12.02	32.47	99.9

98.6%~106.8%和97.7%~105.8%,方法回收率较好。

## 2.9 准确度

运用建立的方法,对3个不同货号的样品进行检测,结果见表6,与理论推荐值相比对,钙的相对误差为1.3%~2.7%,锌的相对误差-1.0%~2.0%,检测结果均较好,能满足检测需求。

表6 不同货号检测结果( $n=3$ )Table .6 Test results from different batches( $n=3$ )

样品货号	元素	理论推荐值/%	测定值/%	相对误差/%
DH-78	钙	1.50	1.52	1.3
	锌	2.00	2.02	1.0
HZ-26	钙	1.50	1.54	2.7
	锌	2.00	2.04	2.0
JC-27	钙	2.50	2.56	2.4
	锌	1.00	0.99	-1.0

## 3 结论

本研究通过对消解液组成、微波消解程序、镧试剂加入量等条件进行优化,建立了液体钙锌热稳定剂中钙锌含量测定方法。本法能满足大批量样品同时处理,无需过滤无需氘灯背景扣除,方法精密度与准确度良好,操作简便,能够为同类产品检测提供参考。

## 参考文献

- [1] 崔芷萱,蒋平平,冷炎,等. 环保钙/锌PVC热稳定剂的发展现状及应用[J]. 塑料,2024,53(01):138-144.
- [2] 汪晓鹏,卢武. 绿色环保型聚氯乙烯热稳定剂的研究进展[J]. 上海塑料,2023,51(05):28-31.
- [3] 伍焕铭,吴海龙,曹宇. 钙锌稳定剂的质量控制[J]. 聚氯乙烯,2021,49(08):19-23+26.
- [4] Morsy A, Anwar A, Anwar H, et al. Utilizing a blend of expandable graphite and calcium/zinc stearate as a heat stabilizer environmentally friendly for polyvinyl chloride[J]. SPE Polymers,2023,5(1):45-57.
- [5] 任小娜,谢顺碧,贾丽华. 分析化学[M]. 成都:电子科技大学出版社,2024:108-129.
- [6] 崔丹,黎常成,涂莉娟,等. 碱熔-电感耦合等离子体光谱法测定石墨矿中6种金属元素[J]. 实验室检测,2025,3(04):13-16.
- [7] Kargarghomsheh P, Noghre N, Sharifiarab G, et al. Evaluation of elements in Persian tahini (ardeb) using ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy) method[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry,2025,105(8):1723-1737.
- [8] 王子剑,巩俐彤,李倩. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定海娜粉中的13种微量元素[J]. 实验室检测,2025,34(08):81-87+103.
- [9] 侯刚强,杜旭朋,魏佳伟,等. 微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定野生羊肚菌中的硒、铁、锌、锰、钙、铅[J]. 山东化工,2024,53(11):131-133+136.

- [10] 吴忠文, 虞安楠, 吴小说. 火焰原子吸收光谱法测量不同产地红枣中钙、铁、锌[J]. 云南化工, 2023, 50(11): 61-64.
- [11] 全国有色金属标准化技术委员会(SAC/TC 243). 硬质合金 钴粉中钙、铜、铁、钾、镁、锰、钠、镍和锌含量的测定 火焰原子吸收光谱法: GB/T 42511-2023[S]. 中国标准出版社, 2023.
- [12] Jamali R M, Gorji K S, Rahnema R. Assessment of In Situ Sorbent Formation Solid-Phase Extraction for the Determination of Cadmium in Natural Water Samples and Plant Leaves by Flame Atomic Absorption Spectrometry[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2025, 80(8): 1445-1453.
- [13] 张鏢, 付裕. 分析化学实验指导[M]. 上海: 上海浦江教育出版社, 2025: 125-136.
- [14] 魏良璟, 郭艳萍. 硬脂酸铅(轻质). HG 2337-92 [S]. 北京: 企业标准信息公共服务平台.
- [15] 黄一石, 吴朝华, 杨小林. 仪器分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022: 158-212.

(上接第 24 页)

- brane enzymes, carbohydrate metabolism and impairs antioxidant system of Wistar rat intestine[J]. Environ Toxicol, 2017, 32(5): 1607 - 1616.
- [7] Zhang Y, Li M, Wang H, et al. Chlorate-induced oxidative stress and hematological toxicity in Sprague-Dawley rats: A subchronic exposure study[J]. Toxicology Letters, 2020, 335: 82-90.
- [8] 张卓娜, 孙琦, 杨艳伟. 国内市场季铵盐类消毒剂使用情况调查[J]. 中国消毒学杂志, 2018, 35(1): 23 - 25.
- [9] 李俊, 张勇杰, 李运玲, 等. 季铵盐杀菌剂的现状与发展趋势[J]. 日用化学品科学, 2015, 38(9): 32 - 35, 39.
- [10] 中华人民共和国卫生部办公厅. 食品用消毒剂原料(成分)名单(2009年版)[EB/OL]. (2010-01-30)[2025-12-13].
- [11] European Food Safety Authority (EFSA). Evaluation of monitoring data on residues of didecyl dimethyl ammonium chloride (DDAC) and benzalkonium chloride (BAC)[J]. EFSA Supporting Publications, 2013, 10(9): 483E.
- [12] 韩丽. 奶粉中的季铵盐咋回事[J]. 江苏卫生保健, 2019, 21(11): 55.
- [13] The European Parliament and the Council. Commission directive (EU) 2023/377 of 15 February 2023 amending annexes II, III, IV and V to regulation (EC) No 396/2005[J]. Official Journal of the European Union, 2023(55): 1 - 16.
- [14] 龙璇周, 文玉杨, 雪婷. 苯扎氯铵致颗粒状角化不全 2 例及文献回顾[J]. 实用皮肤病学杂志, 2024, 17(4): 253 - 256.
- [15] Zhang Y, Liu J, Wang L. Allergic reactions induced by residual quaternary ammonium compounds in food processing equipment[J]. Food and Chemical Toxicology, 2022, 165: 113089.
- [16] 牛洪梅, 朱华剑, 许莉, 等. 苯扎氯铵适应对食源性致病菌杀菌剂耐受性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 329 - 337.
- [17] Kim J W, Kim M S, Kim H R. Research review and transcriptomic insights into Benzalkonium chloride inhalation and disease association[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2025, 289: 117610.
- [18] 孙成虎, 吕孝云. 预制菜加工环节食品安全问题及控制措施[J]. 食品安全导刊, 2023(23): 35 - 38.
- [19] 成都市食品药品检验研究院. 食品中氯酸盐和高氯酸盐的测定: BJS 201706[S]. 北京: 国家食品药品监督管理总局, 2017.
- [20] 北京市食品安全监控和风险评估中心(北京市食品检验所). 婴幼儿配方食品中消毒剂残留检测: BJS 202007 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2020.
- [21] KETTLITZ B, KEMENDI G, THORGRIMSSON N, et al. Why chlorate occurs in potable water and processed foods: a critical assessment and challenges faced by the food industry[J]. Food Addit Contam A, 2016, 33(6): 968 - 982.
- [22] German Federal Institute for Risk Assessment. Health assessment of benzalkonium chloride residues in food: BfR opinion No 032/2012[EB/OL]. (2012-07-13) [2024-09-25].
- [23] European Food Safety Authority. Risk assessment related to the presence of benzalkonium chloride (BAC), didecyl dimethyl ammonium chloride (DDAC) and chlorates in fish and fish products[R/OL]. (2023-05-30)[2025-10-21].
- [24] 俞淑. 婴幼儿配方乳粉中苯扎氯铵和二癸基二甲基氯化铵的污染水平监测及膳食暴露评估[J]. 乳业科学与技术, 2025, 48(1): 7 - 13.
- [25] 谢响, 周伟娥, 许秀丽, 等. 食品中季铵盐类消毒剂检测方法建立及北京市市售食品及膳食样品中含量分析[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 261 - 270.