

# 酶联免疫法快速检测食品中重金属含量的研究进展

王莹<sup>1</sup>, 王华<sup>2</sup>, 贾纪萍<sup>1</sup>, 丁宁<sup>1</sup>

(1. 江苏农牧科技职业学院动物药学院, 江苏泰州 225300; 2. 南京理工大学泰州科技学院药学院, 江苏泰州 225300)

**摘要** 重金属超标是食品安全的重要问题之一, 因此, 需通过严格的监测, 确保食品中的重金属含量在限量范围之内。传统的重金属检测方法灵敏度高、重复性好, 但操作较为复杂, 检测费用高, 不适用于大量样本的快速筛选。近年来, 随着酶联免疫检测技术的快速发展, 酶联免疫(ELISA)法已广泛应用于食品中重金属的检测。从样品前处理、重金属人工抗原及特异性抗体的制备、ELISA 法的选择三个方面介绍了该法在重金属检测方面的最新研究成果, 并对 ELISA 法的发展进行了展望。

**关键词** 酶联免疫; 重金属; 抗原; 抗体

中图分类号 TS207.5<sup>+</sup>1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)05-0010-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.05.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research Progress in Rapid Detection of Heavy Metals in Food by Enzyme-linked Immunosorbent Assay

WANG Ying<sup>1</sup>, WANG Hua<sup>2</sup>, JIA Ji-ping<sup>1</sup> et al (1. Department of Pharmacy, Jiangsu Animal Husbandry and Veterinary Science College, Taizhou, Jiangsu 225300; 2. School of Pharmaceutical Sciences, Taizhou Institute of Sci. &Tech., NJUST., Taizhou, Jiangsu 225300)

**Abstract** Excessive heavy metal is one of the important problems of food safety. Therefore, strict monitoring is needed to ensure that the content of heavy metals in food is within the limit. The traditional heavy metal detection method has high sensitivity and repeatability, but its operation is complex and the detection cost is high, so it is not suitable for rapid screening of a large number of samples. In recent years, with the rapid development of enzyme-linked immunosorbent assay, enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) has been widely used in the detection of heavy metals in food. We mainly introduced the latest research results in heavy metal detection from three aspects: sample pretreatment, preparation of heavy metal artificial antigen and specific antibody, and selection of ELISA, and prospected the development of ELISA.

**Key words** Enzyme-linked immunosorbent assay; Heavy metal; Antigen; Antibody

近年来, 随着我国工农业生产的迅猛发展, 环境污染较严重, 重金属超标已成为食品质量安全的主要因素, 重金属经食物链逐步沉积, 最后进入人体, 并在人体内与蛋白质和酶发生作用, 使它们失去活性, 从而产生致癌致畸等毒性作用, 甚至危害生命<sup>[1-3]</sup>。目前, 我国食品重金属超标问题时有发生, 2015 年山东省青岛市食品药品监督管理局对十类食品进行抽检, 结果发现早餐和烧烤食品中存在铅超标, 贝类产品和辣椒中存在镉超标。因此, 对重金属含量进行测定显得尤为重要。目前, 重金属检测方法主要有原子荧光光谱法(AFS)、原子吸收光谱法(AAS)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、高效液相色谱法(HPLC)等<sup>[4-9]</sup>。这些技术灵敏度高、重复性好, 但操作较复杂, 检测费用高, 不适用于大批量样本的快速筛选。随着酶联免疫检测技术的快速发展, 酶联免疫(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)法已广泛应用于食品中镉、汞、铅等多种重金属检测<sup>[10-12]</sup>, 该法是一种将抗体与酶结合成的偶联物与固相载体上的抗原反应后, 加上酶的相应底物, 根据反应的颜色对重金属进行定性或定量分析的方法, ELISA 法操作简单、灵敏度高, 检测时间短, 适用于现场检测。该研究从样品前处理、重金属人工抗原及特异性抗体的制备, ELISA 法的选择三个方面介绍了该法在重金属检测方面的最新研究成果, 并对 ELISA 法的发展进行了展望。

### 1 样品前处理

ELISA 法可用于快速检测重金属离子, 该方法对试样有

一定的要求, 只能在液态环境中进行。故要实现食品中重金属的 ELISA 检测, 需通过前处理使食品中的重金属离子释放到液相环境中, 同时还需除去干扰离子的影响, 故选择合适的样品前处理方法至关重要。目前, ELISA 法快速检测食品中重金属含量的前处理方法主要有微波消解法、稀酸浸提法、湿法消化法等<sup>[13-15]</sup>。

**1.1 微波消解法** 微波消解法是指利用微波加热消解罐中的样品和消解试剂(如 HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 在高温条件下, 使样品快速消解, 释放出离子。该方法在快速消解样品有机物的同时, 避免了待测元素的损失, 且酸用量较少, 环境污染小。李霞雪等<sup>[13]</sup>考察了硝酸、硝酸+过氧化氢、硝酸+盐酸这 3 种消解液对蔬菜样品中重金属离子的消解效果, 发现硝酸、硝酸-过氧化氢消解液对样品有较好的消解效果, 硝酸-盐酸体系不能将蔬菜样品中的有机物质全部消解, 但过氧化氢的加入使反应过于剧烈, 易造成样品损失, 故选用硝酸作为消解液, 同时研究了消解液用量、消解温度、消解时间等因素对消解结果的影响, 通过正交试验确定了最佳消解条件。开建荣等<sup>[14]</sup>比较了微波消解法和湿法消解法在处理大米粉样品中重金属的优劣, 结果发现微波消解和湿法消解均符合分析要求, 但从准确度、精密性、试剂消耗等方面来看, 微波消解优于湿法消解。微波消解法根据所测基质的不同, 采用不同的消解程序, 具体见表 1。

**1.2 稀酸浸提法** 稀酸浸提法通常采用稀盐酸、稀硫酸和稀硝酸作为浸提剂, 该方法简单易行, 可作为样品前处理的辅助手段, 应用于样品的初筛。汪慧等<sup>[17-18]</sup>采用稀酸浸提法分别浸提水产(近江牡蛎、翡翠贻贝和基围虾)和禽畜肉产品(鸡肉、鸭肉、猪肉和牛肉)中的重金属 Cu、Pb 和 Cd, 发现稀

**基金项目** 2019 年泰州市科技支撑计划社会发展(指导性)项目。

**作者简介** 王莹(1983—), 女, 江苏姜堰人, 讲师, 硕士, 从事药物分析研究。

**收稿日期** 2020-08-05

硝酸的浸提效果最好,稀盐酸的浸提效果最差,之后采用 ELISA 检测稀酸浸提液中的重金属离子,发现检测结果线性相关良好,说明稀酸浸提法满足 ELISA 检测水产品 and 禽畜肉中重金属前处理要求。周明慧等<sup>[19]</sup>采用稀硝酸提取大米中

的 Cd,并对提取方法进行了优化,与微波消解法相比,该法可在常温下提取,提取时间缩短,简化了前处理步骤,大米中 Cd 元素的检测效率和分析准确度高,降低成本。

表 1 微波消解法  
Table 1 Microwave digestion methods

待测金属 Metal to be tested	基质 Matrix	消解液 Digestion solution	消解程序 Digestion program	文献 Literature
Cr、Cd、As、Pb、Hg	蔬菜	HNO <sub>3</sub>	三步:(1)400 W,5 min (2)1 000 W,2.5 min (3)1 000 W,25 min	[13]
Cu、Zn、Cd	大米	HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	三步:(1)1 600 W,120 °C,1 min (2)1 600 W,150 °C,5 min (3)1 600 W,170~180 °C,10 min	[14]
Pb、Cr、Cd	水果和蔬菜	HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1 000 W,180 °C,15 min	[8]
Pb、Cr、As、Fe、Mn、Cd、Al	大豆素火腿	HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	三步:(1)130 °C,3 min (2)180 °C,6 min (3)220 °C,15 min	[15]
V、Cr、Co、Ni、As、Mo、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb	虾酱	HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	三步:(1)1 400 W,120 °C,2 min (2)1 400 W,160 °C,5 min (3)1 400 W,190 °C,60 min	[16]

**1.3 湿法消化法** 湿法消化法是指通过加入硫酸、硝酸、高氯酸等氧化剂,加热消煮,使样品中的金属离子释放出来。Sasaki 等<sup>[20]</sup>通过加入浓硝酸将植物、土壤、肥料等物质中的重金属离子释放出来,通过 C<sub>18</sub> 硅胶螯合物柱纯化后进行免疫学检测。杨亚君等<sup>[21]</sup>采用湿法消解法测定香菇中镉的含量,在香菇样品中加入硝酸和高氯酸,加热消解至一定程度赶酸,最后用水定容即可,相比于国标法,湿法消解法处理样

品操作简易,耗时短,回收率高。高加龙等<sup>[22]</sup>采用湿法消化法测定贝肉中镉的含量,在贝肉样品中加入硝酸和硫酸,低温消解,再加入过氧化氢继续消化,赶酸,该法处理贝肉样品,镉加标回收率较高,检出限低,线性关系好,精密度和准确度均满足贝类样品的测定。

以上总结了 ELISA 法快速检测食品中的前处理方法,其优缺点如表 2 所示。

表 2 3 种样品前处理方法比较

Table 2 Comparison of three sample pretreatment methods

方法 Method	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
微波消解法 Microwave digestion method	耗时短、受热均匀、消耗试剂少,能有效避免痕量元素损失和样品污染	设备复杂,过程较为繁琐
稀酸浸提法 Dilute acid extraction method	耗时短,试剂用量少,浸提温度范围宽,适于现场检测	浸提效果相对较差
湿法消化法 Wet digestion method	对设备要求低,对样品中的元素有较好的保留	需大量消解液,产生有害气体,污染环境;耗时费力,操作不当易引入误差

## 2 重金属人工抗原及特异性抗体的制备

**2.1 人工抗原的合成** 重金属分子量小,无免疫原性,不足以引起免疫动物产生特异性抗体,且金属离子带有电荷,能与生物分子发生强烈的不可逆反应而导致动物中毒,故选用与目标金属离子具有高度亲和性的双功能螯合物制备重金属螯合物,再与合适的载体蛋白偶联,制备成重金属-螯合物-载体蛋白的复合物作为免疫原<sup>[23]</sup>。郭建军等<sup>[24]</sup>以 2-S-

(4-氨基苯)-1,4,7 三氮杂环壬烷-1,4,7-三乙酸 (NOTA) 作为双功能螯合剂,采用戊二醛法将 Cu<sup>2+</sup> 分别与载体蛋白牛血清白蛋白 (BSA)、卵清蛋白 (OVA) 偶联制备免疫原和包被原,具体铜人工抗原合成路线如图 1 所示。

徐誉等<sup>[25]</sup>以 ITCBE 为螯合剂,将砷与载体蛋白 BSA 和 OVA 偶联,制备人工免疫抗原 As<sup>3+</sup>-ITCBE-BSA 和人工鉴定抗原 As<sup>3+</sup>-ITCBE-OVA,通过鉴定,证实抗原合成成功。

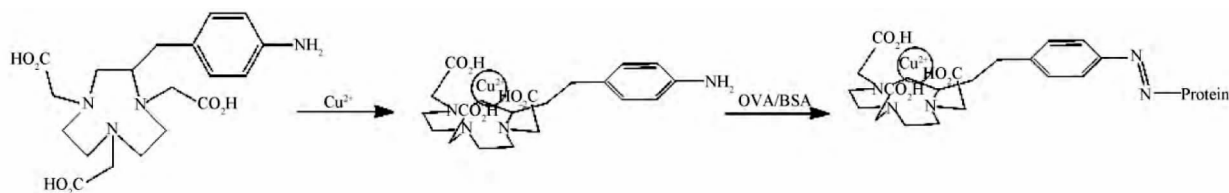


图 1 铜人工抗原合成路线

Fig. 1 Synthetic route of Cu<sup>2+</sup> artificial antigen

目前,常采用的双功能螯合剂主要有谷胱甘肽(GSH)、二乙基三胺五乙酸(DTPA)、异硫氰酸苄基乙二胺四乙酸(ITCBE)、2-S-(4-氨基苯)-1,4,7-三氮杂环壬烷-1,4,7-三乙酸(NOTA)等。常见的载体蛋白有钥孔血蓝蛋白(KLH)、牛血清白蛋白(BSA)、卵清蛋白(OVA)等,常见的评定方法有紫外分光光度法(UV)、SDS-PAGE电泳、原子荧光光谱法(AFS)等,常见金属离子人工抗原的合成方法见表3。

表3 人工抗原的合成方法

Table 3 Synthetic method of artificial antigen

金属离子 Metal ion	螯合剂 Chelating agent	载体蛋白 Carrier protein	评定方法 Appraising method	耦合比 Coupling ratio	文献 Literature
Cd <sup>2+</sup>	ITCBE	BSA, KLH	BCA, SDS-PAGE、 UV	—	[26]
As <sup>3+</sup>	ITCBE	BSA, OVA	UV, SDS-PAGE、 AFS	BSA:70.76% OVA:52.81%	[25]
Cu <sup>2+</sup>	NOTA	BSA, OVA	UV, SDS-PAGE	—	[24]
Hg <sup>2+</sup>	GSH	BSA, OVA	UV, SDS-PAGE	9:1	[27]
Pb <sup>2+</sup>	NOTA	BSA, OVA	UV, SDS-PAGE、 ICP-MS, BCA	BSA:9:1 OVA:7:1	[27]
Cr <sup>3+</sup>	DTPA	BSA, OVA	SDS-PAGE	—	[28]

**2.2 特异性抗体的制备** ELISA法具有灵敏度高、特异性强、简便快速等优点,建立ELISA法需要的核心试剂是高效价和高特异性的抗体,抗体可分为多克隆抗体、单克隆抗体。Reardan等<sup>[29]</sup>在1985年首次采用螯合剂将In<sup>3+</sup>和BSA偶联制备完全抗原,并成功制备In<sup>3+</sup>特异性抗体,为重金属的免疫检测提供了参考。孙勇等<sup>[30]</sup>采用已合成的Cu<sup>2+</sup>人工抗原Cu<sup>2+</sup>-ITCBE-BSA免疫Balb/C小鼠,通过间接ELISA和阻断ELISA筛选备用小鼠,用细胞融合技术制备抗Cu<sup>2+</sup>的单克隆抗体,该抗体除了与Zn<sup>2+</sup>-EDTA的交叉反应率为26.0%,与其他金属螯合物没有交叉反应,证实抗体具有不错的特异性。王亚楠等<sup>[31]</sup>用Cr<sup>3+</sup>-ITCBE-BSA免疫Balb/C小鼠,制备了抗Cr<sup>3+</sup>单克隆抗体(Cr<sup>3+</sup>mAb),效价为1:(5.12×10<sup>5</sup>),亲和常数2.69×10<sup>9</sup> L/mol,且与其他金属离子无交叉反应,表明Cr<sup>3+</sup>mAb亲和力和高、特异性强、稳定性好,为Cr<sup>3+</sup>残留免疫学检测法的建立奠定了基础。翟一凡等<sup>[32]</sup>采用合成的完全抗原(Pb-DTPA-OVA)免疫小鼠,制备多克隆抗体,抗血清效价高达1:400 000,与Fe<sup>3+</sup>有近5%的交叉反应,与其他金属离子的交叉反应率均小于1%,表明铅离子多克隆抗体制备成功,且特异性强。翟璐等<sup>[27]</sup>成功制备了免疫抗原(Pb-NOTA-BSA)与包被抗原(Pb-NOTA-OVA),以免疫原免疫兔子制备了高效价的多克隆抗体,并建立了间接竞争ELISA法,其IC<sub>50</sub>和IC<sub>20</sub>分别为157.89、13.30 ng/mL,说明制备的多抗具有较高的检测灵敏度,交叉反应试验显示:该抗体与镉交叉反应率为12.3%,与重金属铁、铜和锌的交叉反应率小于5.3%,具有较好的特异性。

### 3 ELISA法检测重金属常用方法

**3.1 间接竞争法** 间接竞争法的原理是将包被抗原包被在固相载体上,同时加入待检样品和抗体,使待检样品和包被抗原竞争结合抗体的结合位点,加入酶标二抗显色,底物显色后可通过标准曲线得到待检样品中重金属含量。该法易

受多种因素干扰,造成检测结果出现假阳性或假阴性。Wang等<sup>[33]</sup>制备了抗Hg<sup>2+</sup>的特异性多克隆抗体,建立了间接竞争ELISA检测方法,测定水样、牛奶、青菜、海带中的Hg<sup>2+</sup>,ELISA分析结果表明,灵敏度IC<sub>50</sub>为1.12 ng/mL,最低检测限(IC<sub>10</sub>)为0.08 ng/mL,回收率为80%~113%,与Hg<sup>+</sup>、Au<sup>3+</sup>的交叉反应率分别为11.5%和4.4%,其他金属离子如Cu<sup>2+</sup>、Sn<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>均未发现交叉反应,与CV-AFS检测结果相比,液体样品(水样)的相关系数为0.97,其他样品的相关系数为0.98,进一步证明了间接竞争ELISA检测结果具有较高的准确性。易翠平等<sup>[34]</sup>建立了Cd<sup>2+</sup>间接竞争ELISA法,灵敏度IC<sub>50</sub>为1 150 ng/mL,最低检测限为260 ng/mL(R<sup>2</sup>=0.991 6),可通过优化ELISA条件提高该方法的检测限,扩大应用范围;与Hg<sup>2+</sup>有较强交叉,与Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>交叉较弱,与Mg<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup>几乎无交叉。Xu等<sup>[35]</sup>制备了Pb<sup>2+</sup>单克隆抗体,建立了间接竞争法,测定水、食品和饲料中Pb<sup>2+</sup>含量,结果表明灵敏度IC<sub>50</sub>为9.4 ng/mL,检测限为0.7 ng/mL,且Pb<sup>2+</sup>单克隆抗体对其他金属离子的交叉反应率小于0.943%,表明所制得的单抗具有较高的灵敏度和特异性,回收率为82.1%~108.3%,表明该方法专属性强,简便准确,可用于样品中痕量铅的测定。

**3.2 直接竞争法** 直接竞争的原理是将单克隆抗体包被于固相载体上,同时加入待检样品与已知浓度的酶标半抗原,二者共同竞争抗体的结合位点,显色后通过标准曲线计算出样品中所含重金属离子的浓度。研究表明,直接竞争ELISA比间接竞争ELISA更加方便,检测结果更加准确,其检测pH范围更宽。刘艳梅等<sup>[36]</sup>采用纯化后的镉单克隆抗体建立直接竞争ELISA检测,其灵敏度为19 ng/mL,检测限为2.1 ng/mL,检测范围为3.6~98.2 ng/mL,与石墨炉原子吸收法相比较,2种方法的线性相关系数R<sup>2</sup>=0.998,说明该方法具有较高的准确性,可用于实际样品的快速检测。

ELISA法因价格低廉、检测速度快,被广泛应用于大规模样品中的重金属检测。目前常见重金属ELISA法检测见表4。

### 4 展望

ELISA法是检测食品中重金属离子的一种新方法,与传统方法相比,具有耗时短、费用低、易操作等优点,适用于大量样品重金属离子的现场检测。目前,ELISA法检测样品中重金属离子已经被广泛应用,但其研究尚处于起步阶段,亟待解决的问题主要有以下三点。

(1)进一步优化样品前处理方法,在保证重金属离子浸提效果的同时,尽量减小环境污染。

(2)如何进一步合成新型螯合剂来螯合金属离子,制备重金属半抗原,是合成特异性强抗体的基础。

(3)如何进一步提高抗体的特异性,减小抗体与其他金属离子的交叉反应,是ELISA法快速检测重金属离子的关键。

可以预见,随着以上问题的逐步解决,ELISA法将会有更加广阔的应用前景。

表 4 常见重金属 ELISA 检测方法  
Table 4 Detection of heavy metals by ELISA

重金属离子 Heavy metal ion	检测方法 Test method	灵敏度 IC <sub>50</sub> Sensitivity IC <sub>50</sub> ng/mL	检测限 Detection limit ng/mL	检测范围 Detection range ng/mL	回收率 Rate of recovery//%	相关性分析 Correlation analysis	文献 Literature
Hg <sup>2+</sup>	间接竞争法	1.12	0.08	—	—	CV-AFS, 0.970	[33]
Cd <sup>2+</sup>	间接竞争法	1 150	260	260~5 000	—	—	[34]
Pb <sup>2+</sup>	间接竞争法	9.4	0.7	—	82.1~108.3	—	[35]
Hg <sup>2+</sup>	间接竞争法	4.10	0.45	—	—	ICP-MS, 0.988	[10]
Pb <sup>2+</sup>	间接竞争法	1.5	—	—	—	—	[32]
Cu <sup>2+</sup>	间接竞争法	29.8	2.4	4.5~96.58	—	—	[37]
Hg <sup>2+</sup>	间接竞争法	1.12	0.08	0.1~100	80.0~113.0	CV-AFS, 0.980	[33]
Cd <sup>2+</sup>	直接竞争法	19	2.1	3.6~98.2	—	—	[34]
Cu <sup>2+</sup>	直接竞争法	12.89	0.88	1.72~96.58	—	—	[36]

## 参考文献

- 赵瑾, 黄久红, 黄为红. 泰州市 2005—2012 年蔬菜中铅、镉污染状况分析[J]. 现代预防医学, 2014, 41(10): 1766-1768.
- TANG J, HUANG Z, PAN X D. Exposure assessment of heavy metals (Cd, Hg, and Pb) by the intake of local foods from Zhejiang, China[J]. Environmental geochemistry and health, 2014, 36(4): 765-771.
- 王艳敏, 周鸿, 熊丽, 等. 江西省蔬菜中重金属污染状况调查及评价[J]. 现代预防医学, 2020, 47(7): 1202-1206.
- XIA H, LIU X, HUANG K, et al. Matrix-assisted UV-photochemical vapor generation for AFS determination of trace mercury in natural water samples: A green analytical method[J]. Spectroscopy letters, 2010, 43(7/8): 550-554.
- AKRAM S, NAJAM R, RIZWANI G H, et al. Determination of heavy metal contents by atomic absorption spectroscopy (AAS) in some medicinal plants from Pakistani and Malaysian origin[J]. Pakistan journal of pharmaceutical sciences, 2015, 28(5): 1781-1787.
- XING G, SARDAR, M R, LIN B, et al. Analysis of trace metals in water samples using NOBIAS chelate resins by HPLC and ICP-MS (Article) [J]. Talanta, 2019, 204: 50-56.
- 张艳, 王琦, 陈也然, 等. 微波消解-原子荧光光谱法测定云南食用玫瑰中重金属元素[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 185-190.
- YANG G, LI Z, SHI H, et al. Study on the determination of heavy-metal I-ions in tobacco and tobacco additives by microwave digestion and HPLC with PAD detection[J]. Journal of analytical chemistry, 2005, 60(5): 480-485.
- 梁书怀, 蒙华毅, 吴祖军, 等. 熟肉食品中 7 种有害重金属元素的快速质谱分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(25): 35-36.
- 方淑兵, 王俊平, 王硕, 等. 重金属汞酶联免疫检测方法的建立[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 86-88, 91.
- 杨依锦, 王俊平, 王津, 等. 重金属铅酶联免疫检测方法的研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 80-83.
- 吴峰, 毛茅, 吕琦, 等. 重金属汞、镉离子快速检测方法建立及应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(S1): 87-91.
- 李霞雪, 刘爱平, 陈亚, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定蔬菜中铬、镉、砷、铅、汞的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2019, 55(1): 39-45.
- 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.
- 邵玉芳, 邵世勤. 微波消解-火焰原子吸收光谱法测定水产品中重金属元素[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(14): 159-162.
- 朱有涛, 张遐, 邵梅, 等. 微波消解-ICP-MS 法监测大豆素火腿中的 7 种金属残留[J]. 食品工业, 2019, 40(12): 326-329.
- 汪慧, 江涛, 唐勇, 等. 稀酸浸提水产品中重金属铜、铅和镉[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 88-92.
- 朱富强, 高会兰, 贺志乔, 等. 微波消解-ICP-MS 法测定虾酱中 11 种重金属[J]. 食品工业, 2019, 40(8): 288-290.
- 周明慧, 王松雪, 伍燕湘. 稀酸温和提取直接进样快速测定大米中镉含量[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(2): 97-102.
- SASAKI K, YONGVONGSOONTORN N, TAWARADA K, et al. Cadmium purification and quantification using immunochromatography [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2009, 57(11): 4514-4519.
- 杨亚君, 王春龙, 王会君, 等. 湿式消解法测定香菇中镉的含量[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(1): 84-86, 93.
- 高加龙, 章超桦, 梁家辉, 等. 湿法消化-石墨炉原子吸收法测定贝肉中镉含量的条件优化[J]. 现代食品科技, 2012, 28(11): 1585-1589.
- JONES R M, YU H N, DELEHANTY J B, et al. Monoclonal antibodies that recognize minimal differences in the three-dimensional structures of metal-chelate complexes[J]. Bioconjugate Chemistry, 2002, 13(3): 408-415.
- 郭建军, 桑丽雅, 王振国, 等. 基于双功能螯合剂 NOTA 的重金属铜人工抗原的合成与鉴定[J]. 核农学报, 2018, 32(10): 2012-2018.
- 徐誉, 张小千, 张晓晓, 等. 类金属螯合物人工抗原的合成与鉴定[J]. 畜牧与兽医, 2019, 51(2): 114-117.
- 韩盈盈, 李小兵, 刘国文, 等. 重金属镉离子人工抗原的合成与鉴定[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(2): 188-191.
- 翟璐, 郭建军, 桑丽雅, 等. 基于 NOTA 的重金属铅人工抗原的合成与鉴定[J]. 中国食品学报, 2020, 20(4): 233-239.
- 俞华齐, 王娟, 姜忍忍, 等. 重金属铬单克隆抗体特异性 ELISA 免疫检测方法的建立[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 460-466.
- REARDAN D T, MEARES C F, GOODWIN D A, et al. Antibodies against metal chelates[J]. Nature, 1985, 316(6025): 265-268.
- 孙勇, 付世杰, 秦保亮, 等. 抗重金属铜离子单克隆抗体的制备及其免疫学特性[J]. 西北农业学报, 2016, 25(6): 836-840.
- 王亚楠, 丁茜, 王晓斐, 等. 抗重金属 Cr<sup>3+</sup> 单克隆抗体的研制及其免疫学特性分析[J]. 西北农业学报, 2016, 25(11): 1597-1602.
- 翟一凡, 向军俭, 唐勇, 等. 重金属铅多克隆抗体的制备及鉴定[J]. 食品科学, 2010, 31(13): 180-183.
- WANG Y Z, YANG H, PSCHENITZA M, et al. Highly sensitive and specific determination of mercury (II) ion in water, food and cosmetic samples with an ELISA based on a novel monoclonal antibody[J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2012, 403(9): 2519-2528.
- 易翠平, 苏芳, 陈永发, 等. 重金属镉单克隆抗体的制备与性质分析[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 248-253.
- XU L, SUO X Y, ZHANG Q, et al. ELISA and chemiluminescent enzyme immunoassay for sensitive and specific determination of lead (II) in water, food and feed samples. [J]. Foods, 2020, 9(3): 1-10.
- 刘艳梅, 钟铨, 黄建芳, 等. 直接竞争 ELISA 检测大米样品中的重金属镉[J]. 免疫学杂志, 2015, 31(6): 528-532.
- 郝代玲, 黄建芳, 杨浩, 等. 重金属铜的单抗的制备及免疫学检测方法的建立[J]. 食品工业科技, 2017, 38(19): 245-248, 255.