

食品安全标准中电感耦合等离子体质谱技术在食品检验中的应用进展

陈晓敏, 蔡展帆, 章锦涵, 张佩霞, 周忆莲, 梁旭霞*

(广东省食品检验所, 广州 510435)

摘要: 本文介绍了电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)检测技术, 并将 ICP-MS 技术与传统无机分析技术进行比较, 发现 ICP-MS 技术具备多种分析优势, 基本克服了传统方法的大多数缺点, 是进行元素分析的理想方法。通过实际的查阅分析, 发现在近几年的食品安全标准的制定和修订中, 已逐步将 ICP-MS 检测方法增加到标准中, 使得该方法规范化标准化。在食品监管过程中, 食品安全标准中的 ICP-MS 检测技术已经广泛应用到食品检验中, 主要在食品中的重金属分析、元素形态分析、稀土元素分析和营养元素分析等方面应用。在实际的应用中, 发现食品安全标准在包装饮用水的检验中存在着标准使用不准确的问题, 并从合理使用标准方面提出了加强标准应用的建议。

关键词: 食品安全标准; 电感耦合等离子体质谱法; 食品检验

Application of inductively coupled plasma mass spectrometry in food inspection in food safety standards

CHEN Xiao-Min, CAI Zhan-Fan, ZHANG Jin-Han, ZHANG Pei-Xia,
ZHOU Yi-Liang, LIANG Xu-Xia*

(Guangdong Institute of Food Inspection, Guangzhou 510435, China)

ABSTRACT: This paper introduced the detection technology of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and compared ICP-MS with traditional inorganic analysis technology. It was founded that ICP-MS had many analytical advantages and basically overcome most of the disadvantages of traditional methods, which was an ideal way for elemental analysis. Through the practical analysis, it was found that in the formulation and revision of the food safety standards in recent years, the ICP-MS detection method had been gradually added to the standard, which made the method normalization and standardization. In the process of food supervision, ICP-MS detection technology in food safety standards had been widely used in food inspection, which included heavy metals, elemental form, rare earth elements and nutrient elements. In practical applications, there was a problem of inaccurate use of food safety standards in the inspection of packaged drinking water, and this article put forward some suggestions from the standard of rational use for strengthening the standard application.

KEY WORDS: food safety standard; inductively coupled plasma mass spectrometry; food inspection

*通讯作者: 梁旭霞, 博士, 主任技师, 主要研究方向为食品理化检验与食品安全。E-mail: liangxuxia@126.com.

*Corresponding author: LIANG Xu-Xia, Ph.D, Chief Technician, Guangdong Institute of Food Inspection, Guangzhou 510435, China. E-mail: liangxuxia@126.com.

1 引言

近年来,国内外食品安全问题时有发生,已经成为人们关注的热点,世界卫生组织将食品安全问题确定为全球公共卫生领域的研究重点^[1]。随着食品工业的发展,人们的生活得到了极大满足的同时,一些食品质量安全问题也随之暴露出来,如食品中的重金属污染、食品包装材料中有害元素的溶出、食品添加剂滥用以及食品中非法添加物的使用等都有可能对人类的健康造成巨大的损害。重金属污染食品,通过食物链进入人体,对健康造成无法逆转的巨大伤害。稀土元素具有一定的毒性,当稀土元素通过食物进入人体,在人体内积累可能会对人体健康产生多方面的不良后果。而食品中的某些微量元素,则具有一定的保健效果,因此准确有效地测定食品中无机元素的含量已经成为研究的热点^[2]。

自1984年第一台电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)问世以来,这项技术已从最初在地质科学研究的应用迅速发展应用到广泛应用于环境、半导体、医学、生物、冶金、石油、核材料分析等领域,被称为当代分析技术最激动人心的发展^[3]。ICP-MS所具有的高灵敏度、干扰少、超痕量检出限、多元素同时分析等诸多优点,使得其在当今前沿分析技术中具有无可替代的位置^[4]。

本文主要介绍ICP-MS技术,分析其近几年在食品安全标准中的变化和发展,并概述ICP-MS检测技术在食品中的重金属分析、元素形态分析、稀土元素分析和营养元素分析等方面的应用,总结食品安全标准中ICP-MS技术在使用过程中存在的问题并提出相应的建议。

2 ICP-MS的概述

2.1 基本原理

ICP-MS是以独特的接口技术将电感耦合等离子体

(inductive coupled plasma, ICP)的高温电离特性与四极杆质量分析器(quadrupole mass analyser, MS)的快速灵敏扫描的优点相结合而形成一种元素和同位素分析技术^[5]。ICP起到离子源的作用,利用在电感线圈上施加强大功率的高频射频信号在线圈内部形成高温等离子体,并通过气体的推动,保证了等离子体的平衡和持续电离,高温的等离子体使大多数样品中的元素都电离出一个电子而形成了一价正离子。质谱是质量筛选和分析器,通过选择不同质荷比(m/z)的离子,检测某个离子的强度,从而分析计算出该元素的含量^[4]。

2.2 食品安全标准中无机分析技术的特点分析

食品安全标准中有多种常规的无机分析技术:ICP-MS、电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES)、火焰原子吸收法(flame atomic absorption spectroscopy, FAAS)、石墨炉原子吸收法(graphite furnace atomic absorption spectroscopy, GFAAS)等,各种分析技术有着自身独特的优势,现将ICP-MS与常规的无机分析技术进行比较^[6]见表1。

如表1所示,通过ICP-MS与常用的多种无机传统分析技术进行比较,可得到ICP-MS技术具备检出限低、动态线性范围宽、干扰少、分析精密度高、分析速度快、可进行多元素同时测定以及可提供精确的同位素信息等分析特性,该方法基本克服了传统方法的大多数缺点,是进行样品中微量元素分析的理想方法。

3 食品安全标准中的ICP-MS技术的变化

近年来发展最快的无机痕量、超痕量元素分析技术主要是电感耦合等离子体质谱法,该方法基本克服了传统方法的大多数缺点,逐渐成为痕量元素检测的最有力工具之一^[7]。近几年我国的食品安全标准制定和修订中,已逐步将该方法增加到我国的食品安全标准中。

表1 无机分析技术的比较
Table 1 Comparison of inorganic analysis techniques

技术 特性	ICP-MS	ICP-AES	FAAS	GFAAS
检出限	低(ppb-ppt级)	较低(ppb-ppm级)	较低(ppb级)	较低(ppb级)
分析能力(线性动态范围)	8个数量级	6个数量级	3个数量级	2个数量级
光(质)谱干扰	少	多	很少	少
精密度(RSD)	<4%	1%~5%	1%~2%	1%~10%
可测元素种类	>80	>70	>60	>50
样品用量	约0.02~2 mL/min	约1~2 mL/min	约4~8 mL/min	约0.2~1 mL/min
同位素分析	能	不能	不能	不能
多元素同时分析	能	能	不能	部分能

(1) 2015 年 9 月发布的 GB 5009.11-2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》^[8]: 增加了食品中总砷测定的电感耦合等离子体质谱法, 并将其作为总砷测定第一法; 增加了食品中无机砷的液相色谱 (liquid chromatography, LC)-电感耦合等离子体质谱法 (LC-ICP-MS)。

(2) 2016 年 12 月发布的 GB 8538-2016《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》^[9]: 将 GB/T 8538-2008 中附录 A.2 饮用天然矿泉水多种元素的检验方法 电感耦合等离子体质谱法列入标准正文中第 11.2 项。

(3) 2016 年 12 月发布的 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[10], 整合了食品多元素检测方法, 增加了电感耦合等离子体质谱法作为第一法;

(4) 2017 年 4 月, 根据《中华人民共和国食品安全法》和《食品安全国家标准管理办法》规定, 经食品安全国家标准审评委员会审查通过, 发布了《食品安全国家标准 食品中铅的测定》(GB 5009.12-2017)^[11]等 9 项食品安全国家标准。在此次发表的食品安全标准中, 关于食品中铅、锌、硒、铜、钾、钠、铝、镁、锰等多项元素的测定标准中都增加了电感耦合等离子体质谱法。

通过分析食品安全标准的制定和修订的变化, 可以看出 ICP-MS 技术越来越规范化和标准化。同时说明在我国食品安全标准的发展过程中, 相关部门深刻地认识到该技术的对食品检验的重要性。

4 ICP-MS 技术在食品检验中的应用

2015 年新修订的食品安全法规定, 检验人员应当依照有关法律、法规的规定, 并按照食品安全标准和检验规范对食品进行检验^[12]。食品安全监管过程中, 食品安全标准是食品检验的重要依据, ICP-MS 检测技术在食品安全标准中已逐步增加, 在食品检验中该技术应用的范围也日益增大。

4.1 食品中重金属含量的测定

食品中重金属残留的常规检测方法主要有 GFAAS、原子荧光法 (atomic fluorescence spectrometry, AFS)、ICP-AES 和 ICP-MS^[13-15]。GFAAS 可检测食品中的铅、镉、铬等, AFS 能检测食品中的砷、锡、汞、铊等^[16], 但是这些方法只能测定单一元素, 而不能多元素同时测定; 线性范围窄, 对某些元素测定的灵敏度较低; 基体干扰比较严重, 重现性较差; 分析周期长, 麻烦费时^[6];

由于 ICP-MS 自身的优势, 目前其在食品安全领域得到了广泛的应用, ICP-MS 测定食品中重金属含量是近些年新兴起的先进检测手段^[17,18]。陈国友等^[1]应用 ICP-MS 法测定食品中的 As、Cd、Hg、Pb, 应用 AFS 法测定 As、Hg, 应用 GFAAS 法测定 Cd、Pb, 并对这 3 种测定方法进行对

比研究, 结果表明 AFS、GFAAS 法是单一元素分析, 虽然保证了测定结果准确、可靠, 但线性范围窄, 部分样品需要稀释, 分析周期较长。ICP-MS 法线性动态范围宽, 不必稀释样品, 适合批量样品多元素同时分析。夏拥军等^[19]通过实验探讨了电感耦合等离子体质谱法和原子吸收光谱法对西洋参中镉的测定, 结果表明 2 种方法都具有操作简单、准确度高、精密度好等特点, 均可运用于西洋参的日常检测。相比较而言, 与原子吸收光谱法相比, 电感耦合等离子体质谱法具有更宽的测定范围、检出限更低、精密度更好的优点。黄增等^[20]应用 GFAAS 与 ICP-MS 同时测定大米中铅、镉和铬 3 种重金属含量, 从分析方法的准确度、精密度等方面比较 2 种方法的优缺点。结果表明 2 种方法对大米中铅、镉、铬的测定均具有良好的准确度和精密度, 但 ICP-MS 的测定结果更接近样品真实值, 且可同时测定多种元素, 更适用于实验样品待测项目较多时的实验任务。Beltrami 等^[21]用 ICP-MS 对小麦、面粉等食品原材料进行了定性和定量研究, 发现这些微量最多的是铁和钛元素, 而铜和锌元素则很少, 研究结果显示食品原材料中的金属离子浓度高于食品中的浓度, 并认为这些金属微粒是谷物的内部污染物之一, 这表明了 ICP-MS 技术对于食品中重金属的检测有着重要的作用。

ICP-MS 技术具有高灵敏度、基体干扰少、检出限低、线性范围宽、可以多元素同时测定等优点, 已经成为食品中重金属检测强有力的技术手段^[12]。

4.2 食品中元素的形态分析

对于食品中重金属的检测来说, 仅仅检测元素的总含量是不够的, 因为同一元素的不同形态可能具有完全不同的化学性质和毒理性^[22], 例如: 砷的化合物分为有机砷和无机砷, 而砷的毒性大小主要取决于无机砷的含量, 无机砷的毒性与砷的形态有密切关系, 无机砷中三价砷的毒性远远大于五价砷, 能对人体造成巨大危害^[23-25]。汞及其化合物的毒性依赖于其浓度及化学形态, 有机汞化合物常在农业中用作杀虫剂和杀菌剂, 无机汞能在微生物作用下, 转化为毒性更强的有机汞(主要为甲基汞)^[26]。由于不同形态金属化合物的毒性有差异, 因此进行其形态分析检测比测定总元素含量更有意义。

目前将气相色谱(gas chromatography, GC)、高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)、离子色谱(ion chromatography, IC)等分离技术与 ICP-MS 结合联用, 并广泛应用于食品中元素的形态分析。王林裴等^[26]建立了高效液相色谱与电感耦合等离子体质谱联用法测定水产制品中甲基汞、乙基汞及无机汞的分析方法, 在 5 min 内可以实现甲基汞、乙基汞、无机汞的分离, 上述 3 种汞形态的检出限分别为 0.1、0.2、0.2 $\mu\text{g/L}$, 相对标准偏差($n=7$)均 $\leq 5\%$, 并进行回收实验, 3 种汞形态测得回收率在

82.4%~99.6%之间。结果表明该方法具有快速、准确、灵敏度高优点,可作为水产及其制品中汞化合物的快速分离及分析测定。姚晶晶等^[27]建立了离子色谱-等离子体质谱法测定水果中的5种砷形态的方法,该方法通过加标回收考察了方法的准确度,加标回收率在82.4%~128.6%之间,精密度RSD($n=5$)均 $\leq 5\%$ 。结果表明该方法具有检出限低、精确度高优点,可应用于实际水果中砷形态的分析测定。Leiterer等^[28]建立了离子色谱-电感耦合等离子体质谱法(IC-ICP-MS)测定牛奶中碘形态化合物的方法,发现碘化物是牛奶中碘的主要存在形式,除了微量的碘酸盐外,还可能存在一些有机碘化合物,这为碘的形态研究提供了一定的技术支持。

ICP-MS联用技术与单一的检测技术相比,在灵敏度、准确度和分析速度等方面都有很大的改善,该技术在元素的化学形态的定性和定量分析活动中发挥了重要作用^[29,30]。

4.3 食品中稀土元素的分析

稀土是具有生理活性的化学元素,这些稀土元素因特殊的电子构型和镧系收缩现象,而具有相近的物理和化学性质^[31,32]。但稀土元素是重金属元素,具有一定的毒性,当稀土元素通过食物在人体内积累可能会对产生多方面的不良后果^[33,34]。

目前ICP-MS法在测定稀土元素方面显示了其优良特性,是痕量稀土元素分析中最具竞争优势和发展潜力方法,已被广泛用于稀土的测定。蔡榛妮等^[35]建立电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定桂花茶中15种稀土元素的方法,实验结果表明,15种稀土元素的线性良好,相关系数大于0.9993,检出限在12.74~30.45 ng/L,方法精密度(RSD)在0.9%~7.1%范围内,回收率在89.7%~111.2%范围内;蔡江帆等^[36]应用微波消解-ICP-MS法测定了紫菜中16种稀土元素,通过在线引入内标溶液,在0~2.00 $\mu\text{g/L}$ 范围内检测信号与稀土元素含量之间呈现良好的线性关系,相关系数均大于0.9999,相对标准偏差RSD均小于3.3%。郭徐魁等^[37]结合微波消解和ICP-MS检测技术,开发一种测试不同类别茶叶中稀土元素的检测方法,实验结果表明,ICP-MS测定稀土元素的方法检出限为0.3~18.3 ng/L,在所测定的浓度范围内线性关系良好,相关系数大于0.9993;不同类别茶叶添加试验,回收率80.1%~115.7%,相对标准偏差为0.4%~9.2%,该方法准确度高,操作简单,是检测不同类别茶叶中稀土含量的有效方法。

目前我国的各方面研究结果均表明ICP-MS法方便快捷、线性好、检出限低、准确度高,适用于食品中痕量稀土元素的快速测定^[38,39]。

4.4 食品中营养元素的分析

食品里存在多种营养元素,如钾、钠、钙、镁、铁、锌、铜、硒等,这些微量元素与人类的生存和健康密切相

关^[40]。日常检测中采用的常规检测方法大部分需单个元素进行分析,速度慢;在对微量元素的分析中,有些元素含量很低,而且成分复杂,干扰因素也比较多,经常难以得到准确结果,而且无法同时分析多种元素,因此对食品中微量元素的测定方法的选择性和灵敏度的要求就比较高^[41]。

ICP-MS法是灵敏度高、选择性强、干扰少的分析测试手段,近年来其在食品中微量元素检测中得到了大量的应用^[42,43]。彭荣飞等^[44]建立了ICP-MS同时测定婴幼儿奶粉中常量元素K、Na、Mg、Ca,微量元素Cu和Zn以及痕量元素As和Pb的分析方法,方法的检出限均0.001~1.2 mg/kg,精密度均优于3.5%,回收率为95.0%~103%。结果表明这个方法简单、快速、准确,可用ICP-MS同时测定婴幼儿奶粉中常量、微量和痕量元素。李曼曼等^[45]采用ICP-MS建立盐地碱蓬籽油中人体所必需的13种微量元素锂、硼、钒、铬、锰、铁、钴、镍、铜、锌、砷、锶和锡的测定方法,结果表明各元素的检出限在0.009~0.871 g/L之间,回收率在93.29%~104.28%之间,该方法具有简单、快速、检出限低、准确度高、精密度高等优点,是一种测定盐地碱蓬籽油中必需微量元素的有效分析方法。Nour等^[46]对红葡萄干和黑葡萄干中的矿质元素等营养物质进行了研究,发现这2种食品都含有丰富的钙、镁、钾、铁、锌等营养元素,其中黑葡萄干含有的钙和镁元素明显多于红葡萄干。

5 实际应用的经验和建议

在食品监管中,以食品安全标准为依据进行食品检验工作,通过实际的应用,发现食品安全标准在食品检验中应用存在一定的问题:食品检验工作中发现针对包装饮用水这类特殊样品的执行标准存在使用不准确的情况。

根据国家食品安全监督抽检实施细则(2017年版)的要求,对包装饮用水中的元素的检验:铅采用GB 5009.12标准检验,镉采用GB 5009.15标准检验,总砷采用GB 5009.11标准检验。这3个标准检验方法适用于大部分的食品样品,样品需经过消解稀释定容才能进行测定,包装饮用水无需经过消解处理。在食品监管过程中,未考虑到样品的特殊性,造成检验使用的执行标准不准确。

根据国家食品安全监督抽检实施细则(2017年版)的要求,对包装饮用水中的元素的检验,总砷测定采用GB 5009.11标准中ICP-MS检测方法,该标准中ICP-MS检测方法的定量限为0.010 mg/L;以GB 2762-2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[47]为判定依据,包装饮用水的限量值为0.010 mg/L,出现了定量限等于限量值的特殊情况,检测结果只能表达为未检出或者不合格。在现有的食品检验工作发现有部分包装饮用水中的总砷含量为

0.004~0.008 mg/L 的水平, 属于较高风险的样品, 需要进行严格的监测, 才能确保食品安全, 但是由于检测标准未正确使用, 无法对较高风险的样品进行监测, 使食品监管存在一定漏洞。

目前包装饮用水产品的检测方法有 GB/T 5750.6-2006 《生活饮用水标准检验方法 金属指标》^[48] 和 GB 8538-2016 《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》^[9]。这 2 个检验标准中均有 ICP-MS 多元素检验方法, 检出限低, 检测速度快, 能一次性检测包装饮用水中多个元素项目。根据标准的适用性, 要正确使用标准, 并提高检测工作效率, 建议在食品监管过程中采用 GB/T 5750.6 和 GB 8538 为包装饮用水的检验标准, 并将 ICP-MS 多元素测定方法作为检测方法。

6 结 论

由于 ICP-MS 具有灵敏度高、干扰少、准确度高、线性范围宽等一些独到的优点, 其在食品中重金属、稀土元素和营养元素的分析中得到了广泛的应用。同时, 将 ICP-MS 与其他分离技术(如 GC、HPLC 等)联用的分析技术得到大量的研究, 并在元素的形态分析方面取得了一定的进展。随着 ICP-MS 技术在食品无机元素分析的研究中不断深入, ICP-MS 将在我国食品质量安全领域发挥更大的作用^[49]。

随着人们生活水平的提高, 食品质量与安全得到越来越多的重视, 食品安全检测技术也得到迅猛发展。食品安全标准是食品检验的重要依据, 我国的食品安全标准需要关注安全的目的性更强, 制修订更加规范, 充分发挥出食品安全标准在食品安全管理中的技术支撑作用, 成为食品安全管理新形势下实践研究的重要内容^[50]。

参 考 文 献

- [1] 陈国友, 杜英秋, 李宛, 等. 应用 ICP-MS、AFS、GFAAS 测定食品中 As、Cd、Hg、Pb 方法的对比研究[J]. 质谱学报, 2009, 30(4): 223-228. Chen YG, Du YQ, Li W, *et al.* Method comparison to determination of As, Cd, Hg and Pb in food by ICP-MS, AFS, GF-AAS [J]. J Chin Mass Spectrom Soc, 2009, 30(4): 223-228.
- [2] 冯先进, 屈太原. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)最新应用进展[J]. 中国无机分析化学, 2011, 1(1): 46-52. Feng XJ, Qu TY. The latest application progress of inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chin J Inorg Anal Chem, 2011, 1(1): 46-52.
- [3] 陈登云. ICP-MS 技术及其应用[J]. 现代仪器, 2001, (4): 8-11. Chen DY. ICP-MS and its application [J]. Mod Instrum, 2001, (4): 8-11.
- [4] 刘长江, 韩梅, 贾娜. 电感耦合等离子体-质谱(ICP-MS)技术及其应用[J]. 广东化工, 2015, 42(11): 148-149. Liu CJ, Han M, Jia N. Technology and application of inductively coupled plasma spectrometry [J]. Guangdong Chem Ind, 2015, 42(11): 148-149.
- [5] 张更宇, 崔世荣. ICP-MS 的最新应用及未来发展[J]. 科技资讯, 2016, (10): 1-4. Zhang GY, Cui SR. Latest applications of ICP-MS and future prospects [J]. Sci Tech Inform, 2016, (10): 1-4.
- [6] 邓晓庆. FAAS、GFAAS、ICP-AES 和 ICP-MS 4 种分析仪器法的比较[J]. 云南环境科学, 2006, 25(4): 56-57. Deng XQ. Compare of four analytical apparatus of FAAS, GFAAS, ICP-AES and ICP-MS [J]. Yunnan Environ Sci, 2006, 25(4): 56-57.
- [7] 王霞, 王经顺, 刘雷, 等. ICP-MS 法同时测定饮用水中多种元素[J]. 环境研究与监测, 2011, 24(3): 1-2. Wang X, Wang JS, Liu L, *et al.* ICP-MS method for determination of multiple elements in drinking water at the same time [J]. Environ Study Monit, 2011, 24(3): 1-2.
- [8] GB 5009.11-2014 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定[S]. GB 5009.11-2014 National food safety standards-Determination of total arsenic and inorganic arsenic in food [S].
- [9] GB 8538-2016 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法[S]. GB 8538-2016 National food safety standards-Test method for natural mineral water for drinking [S].
- [10] GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S]. GB 5009.268-2016 National food safety standards-Determination of multiple elements in food [S].
- [11] GB 5009.12-2017 食品安全国家标准 食品中铅的测定[S]. GB 5009.12-2016 National food safety standards-Determination of lead in food [S].
- [12] 郭建红. 食品检验中存在的食品安全标准问题及建议[C]. 杭州: 中国标准化论坛, 2015. Guo JH. The problems and advice to food safety standards in food inspection [C]. Hangzhou: The 12th China standardized BBS proceedings, 2015.
- [13] 苏春风. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定再生锌原料中铜、铅、铁、镉、镉、砷、钙、铝[J]. 中国无机分析化学, 2016, 6(1): 53-58. Su CF. Determination of copper, lead, iron, indium, cadmium, arsenic, calcium and aluminum, contents in regenerated zinc materials by inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. Chin J Inorg Anal Chem, 2016, 6(1): 53-58.
- [14] 马丽. 火焰原子吸收光谱法测定铜原矿尾矿中的镉[J]. 中国无机分析化学, 2016, 6(4): 48-51. Ma L. Determination of cadmium in copper original tailings by flame atomic absorptions spectrometry [J]. Chin J Inorg Anal Chem, 2016, 6(4): 48-51.
- [15] 刘建军, 王玉功, 倪能, 等. 电感耦合等离子体质谱 ICP-MS 法测定农产品土壤中铅、镉、铬消解方法的改进[J]. 中国无机分析化学, 2016, 6(1): 10-13. Liu JJ, Wang YG, Ni N, *et al.* Digestion method improvement on the determination of lead, cadmium and chromium in agricultural soil by ICP-MS [J]. Chin J Inorg Anal Chem, 2016, 6(1): 10-13.
- [16] 史潜玉, 刘立, 柯润辉, 等. ICP-MS 在食品质量安全领域应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(12): 118-128. Shi QY, Liu L, Ke RH, *et al.* Research progress on the application of ICP-MS in food quality and safety [J]. Food Ferment Ind, 2012, 38(12): 118-128.
- [17] 刘丽萍, 毛红, 张妮娜, 等. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定运

- 动员食品中铅、砷、镉、铜[J]. 质谱学报, 2006, 27(2): 90-93.
- Liu LP, Mao H, Zhang NN, *et al.* Determination of copper, arsenic, cadmium, lead in athletic food by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Chin Mass Spectrom Soc*, 2006, 27(2): 90-93.
- [18] 刘江晖, 周华. ICP-MS 法同时测定食品中 8 种微量有害元素的方法研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2004, 14(1): 2-4.
- Liu JH, Zhou H. Simultaneous determination of 8 trace toxic elements in food by ICP-MS [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2004, 14(1): 2-4.
- [19] 夏拥军, 曹文忠. 电感耦合等离子体质谱 ICP-MS 法与原子吸收光谱 AAS 法测定西洋参中的镉[J]. 中国无机分析化学, 2017, 7(4): 28-32.
- Xia YJ, Cao WZ. Determination of cadmium in Genseng by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and atomic absorptions spectrometry [J]. *Chin J Inorg Anal Chem*, 2017, 7(4): 28-32.
- [20] 黄增, 黄红铭, 何东明, 等. GFAAS 和 ICP-MS 对比测定大米中三种重金属含量[J]. 广州化学, 2018, 43(1): 1-5.
- Huang Z, Huang HM, He DM, *et al.* Comparison of GFAAS and ICP-MS to determine heavy metal elements in the rice [J]. *Guangzhou Chem*, 2018, 43(1): 1-5.
- [21] Beltrami D, Calestani D, Maffini M, *et al.* Development of a combined SEM and ICP-MS approach for the qualitative and quantitative analyses of metal microparticles and sub-microparticles in food product [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2011, 401: 1401-1409.
- [22] Kaise T, Oya-Ohta Y, Ochi T, *et al.* Toxicological study of organic arsenic compound in marine algae using mammalian cell technique [J]. *Food Hyg Soc Jpn*, 1996, 37, 135-141.
- [23] 彭海亮. 基于 ICP-MS 和 LC-AFS 技术检测籼稻谷总砷中无机砷的含量及其形态[J]. 现代食品, 2013, (45): 126-128.
- Peng HL. Based on ICP-MS and LC-AFS technology to detect the inorganic arsenic content and its morphology of total arsenic in Indica rice [J]. *Mod Food*, 2013, (45): 126-128.
- [24] 叶蔚云, 周立艳, 陈锐芳, 等. 凉茶中总砷和无机砷的测定[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(8): 15-17.
- Ye WY, Zhou LY, Chen RF, *et al.* Determination of total arsenic and inorganic arsenic in herbal tea [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2008, 18(8): 15-17.
- [25] 路子显. 粮食重金属污染对粮食安全、人体健康的影响[J]. 粮食科技与经济, 2011, 36(4): 14-17.
- Lu ZX. Effects of heavy metal pollution on food security and human health [J]. *Food Technol Econ*, 2011, 36(4): 14-17.
- [26] 王林裴, 华向美, 彭新然, 等. 微波消解-HPLC-ICP-MS 法测定水产及其制品中的汞形态[J]. 轻工科技, 2017, (10): 16-19.
- Wang LF, Hua XM, Peng XR, *et al.* Determination of mercury in aquatic products by microwave digestion-HPLC-ICP-MS method [J]. *Light Ind Sci Technol*, 2017, (10): 16-19.
- [27] 姚晶晶, 彭立军, 崔文文, 等. IC-ICP-MS 测定水果中的 5 种砷形态[J]. 绿色科技, 2017, (20): 27-28.
- Yao JJ, Peng LJ, Cui WW, *et al.* Determination of five arsenic species in fruit by IC-ICP-MS [J]. *J Green Sci Technol*, 2017, (20): 27-28.
- [28] Leitterer M, Truckenbrodt D, Franke K. Determination of iodine species in milk using ion chromatographic separation and ICP-MS detection [J]. *Eur Food Res Technol*, 2001, 213: 150-153.
- [29] 吕超, 刘丽萍, 董慧茹, 等. 盐酸提取-液相色谱-原子荧光联用技术检测水产品中甲基汞等汞化合物[J]. 分析试验室, 2010, 29(2): 64-68.
- Lv C, Liu LP, Dong HR, *et al.* Hydrochloric acid extract-mercury speciation analysis by high performance liquid chromatography coupled atomic fluorescence spectrometry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2010, 29(2): 64-68.
- [30] 刘庆阳, 何滨, 胡敬田, 等. 高效液相色谱与原子荧光光谱联用分析海产品中的甲基汞[J]. 分析试验室, 2009, 28(5): 41-44.
- Liu QY, He B, Hu JT, *et al.* Determination of methylmercury in seafood using high performance liquid chromatography coupled with atomic fluorescence spectrometry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2009, 28(5): 41-44.
- [31] 刘燕, 周轶平, 罗敏, 等. 稀土配合物抗肿瘤活性研究进展[J]. 中国稀土学报, 2014, 32(2): 143-155.
- Liu Y, Zhou YP, Lou M, *et al.* Advances for antitumor activity of rare earth complexes [J]. *J Chin Rare Earth Soc*, 2014, 32(2): 143-155.
- [32] Hirano S, Suzuki KT. Exposure, metabolism, and toxicity of rare earths and related compounds [J]. *Envi-Ron Health Perspect*, 1996, 104(1): 85-95.
- [33] 夏青, 刘会雪, 杨晓达, 等. 稀土神经毒性研究[J]. 中国科学(化学), 2012, 42(9): 1308-1314.
- Xia Q, Liu HX, Yang XD, *et al.* The neural toxicity of lanthanides: An update and interpretations [J]. *Sci China (Chem)*, 2012, 42(9): 1308-1314.
- [34] Muller C, Chantrel F, Faller B. A confusional state associated with use of lanthanum carbonate in a dialysis patient [J]. *Nephrol Dial Transplant*, 2009, 24(10): 3245-3247.
- [35] 秦榛妮, 黄俊杰. 微波消解-ICP-MS 法测定桂花茶中 15 种稀土元素[J]. 轻工科技, 2017, (3): 107-108.
- Qing SN, Huang JJ. Determination of 15 rare earth elements in sweet olive tea by ICP-MS with microwave digestion [J]. *Light Ind Sci Technol*, 2017, (3): 107-108.
- [36] 蔡江帆, 王志洪. 微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法同时测定紫菜中 16 种稀土元素[J]. 中国无机分析化学, 2017, 7(3): 19-24.
- Cai JF, Wang ZH. Determination of 16 rare earth elements in laver by ICP-MS with microwave digestion [J]. *Chin J Inorg Anal Chem*, 2017, 7(3): 19-24.
- [37] 郭徐魁, 黄志良, 陈其忠, 等. ICPMS 测定不同类别茶叶中的稀土元素[J]. 农产品加工(学刊), 2014, 5(5): 66-77.
- Guo XK, Huang ZL, Chen QZ, *et al.* Determination of rare earth in different type tea by ICP-MS [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2014, 5(5): 66-77.
- [38] 刘平, 董速伟, 李安运, 等. ICP-MS 在稀土元素分析中的应用[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(3): 83-87.
- Liu P, Dong SW, Li AW, *et al.* The applications of ICP-MS in analyzing rare earth elements [J]. *Nonferrous Metals Sci Eng*, 2011, 2(3): 83-87.
- [39] 林文业, 黄一凡, 黄文琦, 等. 等离子体质谱法测定大米、茶叶中痕量稀土元素[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(11): 41-45.
- Lin WY, Huang YF, Huang WY, *et al.* Simultaneous determination of 15 kinds of trace rare earth elements concentration in rice and tea by ICP-MS [J]. *Guangdong Trace Elem Sci*, 2008, 15(11): 41-45.
- [40] 程发良, 宁满霞, 莫金垣, 等. 荔枝果实中微量元素测定的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(4): 676-678.
- Cheng FL, Ning MX, Mo JY, *et al.* Determination of trace elements in lychee of different growth period [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2002, 22(4): 676-678.
- [41] 毛红, 刘丽萍, 张妮娜, 等. 应用 ICP-MS 与 AAS 测定食品中铅、镉、

- 铜方法研究及比较[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(11): 1954-2079.
- Mao H, Liu LP, Zhang NN, *et al.* Comparison between ICP-MS and AAS for determination of lead, cadmium and copper in food [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2007, 17(11): 1954-2079.
- [42] Koenig E. Advances in quantitative elemental analyses by laser ablation ICP-MS [J]. *Microsc Microanal*, 2008, 14(2): 1270-1271.
- [43] 刘江晖, 周华. ICP-MS 法同时测定食品中 8 种微量有害元素的方法研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2004, 14(1): 1-3.
- Liu JH, Zhou H. Simultaneous determination of 8 trace toxic elements in food by ICP-MS [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2004, 14(1): 1-3.
- [44] 彭荣飞, 侯建荣, 黄聪. 碰撞池 ICP-MS 同时测定婴幼儿奶粉中的常量、微量和痕量元素[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(12): 3166-3167.
- Peng RF, Hou JR, Huang C. Simultaneous determination of essential, trace, ultra trace elements in infants and young children milk powder by collision cell ICP-MS [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2010, 20(12): 3166-3167.
- [45] 李曼曼, 李红娟, 范业文, 等. ICP-MS 测定盐地碱蓬籽油中必需微量元素含量 [J]. 中国油脂, 2016, 41(10): 102-105.
- Li MM, Li HJ, Fang YW, *et al.* Determination of essential trace elements in Suaeda salsa seed oil by ICP-MS [J]. *Chin Oils Fats*, 2016, 41(10): 102-105.
- [46] Nour V, Trandafir I, Ionica M. Ascorbic acid, anthocyanins, organic acids and mineral content of some black and red currant cultivars [J]. *Fruits*, 2011, 66: 353-362.
- [47] GB 2762-2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- GB 2762-2012 National food safety standards—Maximum levels of contaminants in food [S].
- [48] GB/T 5750.6-2006 生活饮用水标准检验方法 金属指标[S].
- GB/T 5750.6-2006 Standard examination methods for drinking water-Metal parameters [S].
- [49] 张亚平, 张淑琼, 黄三发. ICP-MS 分析技术及其在微量元素碘测定中的应用[J]. 海峡预防医学杂志, 2008, 14(2): 17-20.
- Zhang YP, Zhang SQ, Huang SF. ICP-MS analysis technique and its application in the determination of trace element iodine [J]. *Strait J Prev Med*, 2008, 14(2): 17-20.
- [50] 张周建, 卢丹, 陈雨牵, 等. 食品安全标准在食品安全管理实践中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(4): 1514-1517.
- Zhang ZJ, Lu D, Chen YQ, *et al.* The application of food safety standards in food safety management practice [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(4): 1514-1517.

(责任编辑: 姜 珊)

作者简介



陈晓敏, 助理工程师, 主要研究方向为食品理化检验、食品无机分析。
E-mail: chenxiaomin206@163.com



梁旭霞, 博士, 主任技师, 主要研究方向为食品理化检验与食品安全。
E-mail: liangxuxia@126.com