

电感耦合等离子体质谱法在食品中重金属检测中的应用

宋敏^{1*}, 李蓓²

(1. 新疆维吾尔自治区食品药品检验所, 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆维吾尔自治区产品质量监督检验研究院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 重金属元素是食品安全领域重要的检测项目, 目前, 用于检测重金属的仪器主要有原子吸收光谱仪、原子荧光光谱仪、电感耦合等离子体发射光谱仪、电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)等。ICP-MS 具有线性范围宽、灵敏度高、精密度好、检出限低、可同时分析多种元素等优点, 广泛应用于医学、生物学、食品安全等多种领域。本文综述了近年来电感耦合等离子质谱法在食用油、面制品、乳及乳制品、水产品、果蔬及其他食品检测中的应用, 并对该领域的发展前景进行了展望, 以期 ICP-MS 技术测定食品中重金属的检测发展提供一定的参考价值。

关键词: 电感耦合等离子体质谱法; 食品检测; 应用

Application of inductively coupled plasma mass spectrometry in food detection of heavy metal

SONG Min^{1*}, LI Bei²

(1. Xinjiang Institute for Food and Drug Control, Urumqi 830000, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Product Quality Supervision and Inspection Institute, Urumqi 830000, China)

ABSTRACT: Heavy metal elements are important testing items in food safety field, the instruments for the detection of heavy metals include atomic absorption spectrometer (AAS), atomic fluorescence spectrometer (AFS), inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-AES), inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). ICP-MS has the advantages of wide linear range, high sensitivity, good precision, low detection limit, and can analyze many elements at the same time, so it is widely used in medicine, biology, food safety and other fields. This paper reviewed the application of inductively coupled plasma spectra in the detection of edible oils, flour products, dairy products, aquatic products, fruits and vegetables and other foods, and prospected the development prospect of this field. In order to provide a certain reference value for the determination and development of heavy metals in food by ICP-MS technology.

KEY WORDS: inductively coupled plasma mass spectrometry; food detection; application

*通讯作者: 宋敏, 实验师, 主要研究方向为食品检测。E-mail: songmin1005@163.com

*Corresponding author: SONG Min, Experimentalist, Xinjiang Institute for Food and Drug Control, No.100, Xinhua Road, Tianshan District, Urumqi 830000, China. Email: songmin1005@163.com

1 引言

电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)可以同时进行多元素测量,可以囊括地壳中的绝大部分元素,这项技术已从最初在地质科学研究的应用迅速发展成为一种强大的元素分析技术,广泛应用到生物与医学^[1,2]、农业^[3]、矿业^[4]、材料科学^[5]、环境科学^[6,7]和食品安全^[8-13]检测等多个领域。本文对电感耦合等离子体质谱在食用油、面制品、乳及乳制品、水产品、果蔬检测中的应用进行综述,以期对电感耦合等离子体质谱法在食品检测中的应用提供依据。

2 电感耦合等离子体质谱法在食品检测中的应用

2.1 在食用油检测中的应用

植物油在生产、加工及贮存过程中以及原料本身都有可能受到各种重金属的污染。重金属在人体中极易累积,不易排出,长时间累积会造成慢性中毒,严重影响人的身体健康。因此需要对食用油中的重金属进行检测,确保其安全性。

在食用油的检测中,通常要求检测痕量元素 Pb 和 As。在国家标准中用石墨炉原子吸收分光光度法测定铅的含量^[14],用原子荧光光谱法测定砷的含量^[15]。在样品量较大时,分开测定费时费力、效率低且操作繁琐。ICP-MS 可同时对 Pb 和 As 等多种元素进行测定。Ni 等^[16]采用 ICP-MS 同时测定茶花籽油中 Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、As、Zn、Cd、Pb,结果显示方法检出限为 0.03~1 $\mu\text{g/L}$,加标回收率在 84.3%~102.3%之间。张荣^[17]用 ICP-MS 测定沙棘籽油中 Fe、Se、Zn、K、Na、Ca、Mg、Cu、Mn、Pb、As、Hg、Cd 等 13 种元素的含量,回收率为 95.5%~102.8%,检出限为 0.008~3 $\mu\text{g/L}$ 。

ICP-MS 相比于传统的原子吸收分光光度计、原子荧光光谱仪来说,其测定结果、经济成本、时间成本等优势显而易见,众多关于 ICP-MS 的研究丰富了现有食用油中金属元素的检测方法,相信今后其在食用油中的应用必将更加广泛。

2.2 在面制品检测中的应用

目前国家标准中面制品中铝的测定方法为分光光度法。杨建兴等^[18]用微波消解法对 53 份面制品进行前处理,铕作为 ICP-MS 的在线内标,测定铝含量。实验数据显示该方法检出限为 0.3 mg/kg,定量限为 1.0 mg/kg,线性相关系数为 0.9997,加标回收率为 94.6%~105.4%,测定结果的相对标准偏差为 0.3%~4.1%。表明该方法适用于面制食品中铝含量的测定。

孙宁^[19]对分光光度法和 ICP-MS 法 2 种测铝的方法进行对比,结果显示 2 种方法具有良好的相关性,准确度和

回收率都比较高,在统计学上无显著性差异。但分光光度法试剂消耗大,化学干扰因素多,操作繁琐,相比之下 ICP-MS 法试剂用量少,检出限低,稳定性好,检测效率高的优点变得尤为突出。

对于面制品中铝元素含量的测定结果,ICP-MS 与传统的分光光度法无显著性差异,结果准确可靠。这说明 ICP-MS 适合面制品中铝元素含量的测定,但 ICP-MS 法较分光光度法而言,更加快速、简便,检出限更低。证实 ICP-MS 可以为监测面制品中的铝含量提供可靠而快捷的方法。

2.3 在乳及乳制品检测中的应用

马兰等^[20]用 ICP-MS 和石墨炉原子吸收光谱 2 种方法对 19 个省份的 120 份液态乳中的铅进行测定,实验数据显示 2 种方法的测定结果无显著性差异,标准物质的测定值均在标示值范围内,验证了该方法和国家标准的石墨炉原子吸收法的相一致性。Chiara 等^[21]基于扇形场-电感耦合等离子体质谱联用法(fan field-inductively coupled plasma mass spectrometry, SF-ICP-MS),对牛奶和婴幼儿配方奶粉中的 As、Cd、Pb 进行测定和不确定度评价。As、Cd、Pb 的检出限分别为 3.04、0.49、0.62 ng/g,定量限分别为 9.12、1.46、1.85 ng/g,回收率分别为 102%、100.6%、97.65%,三者的重复性分别为 3.5%、4.9%、5.7%,再现性分别为 4.3%、5.0%、5.1%。陈学武等^[22]用 ICP-MS 同时对婴幼儿奶粉中 Mn、Cu、Be、Cr、Co、Ni、Cd、Sb、Ba、Pb 10 种微量元素进行了元素测定。10 种元素测定的检出限范围为 0.01~0.88 mg/kg,低、中、高 3 个加标水平平均回收率为 84.0%~104.6%,相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)范围为 0.2%~4.8%。

无论是 ICP-MS 还是其联用技术,均具有检出限低、简单快速、准确可靠的优点,且准确度和精密度满足定量分析要求,完全可以满足乳及乳制品中微量元素元素的测定要求。

2.4 在水产品检测中的应用

近年来,随着工业的发展和人口的增长,每年有大量的工业废水和生活污水被排放到江河湖海中,水体受到污染。水中生物对有害的金属元素具有较强的富集作用,水产品中的重金属通过食物链进入人体,并不断积累,严重危害人体健康。因此建立快速简便的检测方法显得尤为重要,为此众多学者对此进行了研究。

曾海英等^[23]建立了微波消解样品前处理,ICP-MS 法测定水产品中 Hg、As、Pb、Cd、Sn、Se、Zn、Al、Sb、Fe、Cr、Mn、Cu、Ti、Ni、Na、Mg、Ca、Li、Be、V、Mn、Co、U、Rb、Sr、Ag、Cs、Mo、B、Ba、Tl、K 33 种元素的分析方法,通过氦气碰撞模式避免基体对结果的干扰,并用 7 种元素作为内标校正消除基体抑制的干扰,

可提高测定结果的精密度和准确性。

不同形态的元素毒性不同。不同形态的砷、汞由于理化性质不同导致其毒性不同。因此如何快速准确测定砷、汞形态对水产品中砷、汞的安全风险评估至关重要。李智明^[24]利用高效液相色谱和电感耦合等离子体质谱联用仪对水产中砷的5种形态进行测定。液相部分采用pH 8.25的磷酸氢二铵为流动相,ICP-MS采用He气碰撞模式,排除几乎所有的多原子离子干扰,可将亚砷酸、砷酸、一甲基砷化合物、二甲基砷化合物、砷甜菜碱5种形态的砷完全分离,耗时仅15 min,标准曲线线性良好,无机砷的检出限为0.002 mg/kg,稳定性好,精密度、准确度、灵敏度均符合要求,完全能满足现阶段对无机砷的检测要求。陈岩等^[25]建立了盐酸辅助提取,利用高效液相色谱和电感耦合等离子体质谱联用仪(high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry, HPLC-ICP-MS)测定水产品中汞形态的分析方法。5 min实现3种形态汞的完全分离,线性范围为0~100 $\mu\text{g/L}$ ($r \geq 0.9993$),检出限为0.11~0.19 $\mu\text{g/L}$,加标回收率为79.84%~92.76%。

ICP-MS不仅可以同时测定水产品中多种金属元素,还可以通过与液相色谱联用技术对砷、汞等进行形态分析,且各项技术指标均符合要求。

2.5 在果蔬测定中的应用

Fernanda等^[26]建立了ICP-MS测定苹果汁和橙汁中砷的方法,以硝酸和过氧化氢为体系进行微波消解,ICP-MS采用碰撞模式消除干扰,检出限为0.013 $\mu\text{g/L}$,回收率为88%~109%。

刘慧等^[27]建立了ICP-MS法和在线内标法同时测定果蔬中Pb、As、Cd、Cu、Cr5种重金属元素及Na、K、Ca、Zn、Se、Mg、Fe、Mn8种微量元素的方法,13种元素的标准曲线的相关系数 $r \geq 0.9991$,重金属元素的检出限为0.5 $\mu\text{g/L}$,微量元素的检出限为10 $\mu\text{g/L}$ 。13种元素的加标回收率为79.2%~91.6%,相对标准偏差小于5%。

研究表明ICP-MS技术在果蔬产品中重金属检测已普及开来,可用于果蔬中多种重金属元素的同时测定,且测试结果较为满意,相信ICP-MS技术在该领域的应用会越来越广泛。

2.6 在其他食品检测中的应用

Mauro等^[28]用ICP-MS测定了散养鸡鸡蛋中的As、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mo、Mn、Ni、Pb、Sb、Se、Sn、Sr、Tl、U、V、Zn19种元素。Shao等^[29]用ICP-MS测定了的大米中的潜在有毒元素Cd、Cr、Pb。José等^[30]用微波消解前处理,ICP-MS测定大豆及其制品中的溴、氯、碘,检出限分别为0.03、1.2、0.002 $\mu\text{g/g}$ 。聂西度等^[31]经过方法优化,应用碰撞反应系统和炬屏蔽系统校正了质谱工

作过程中的多原子离子干扰,利用5%甲醇在等离子体中的增敏效应改善了难电离元素质谱分析的灵敏度,获得了仪器的最佳质谱工作参数,建立电感耦合等离子体质谱法测定坚果中Li、Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Sr、Mo、Ag、Cd、Sn、Sb、Ba、Hg、Tl、Pb24种微量元素的分析方法,具有准确度高、精密度好的优势,可用于坚果的质量评价和安全评估。ICP-MS也广泛应用于茶叶^[32]、肉^[33]、生活饮用水^[34]、酒^[35,36]、调味品^[37]等食品中及保健食品^[38]多种元素的测定。

多个研究均突显出了ICP-MS在食品领域中金属元素分析的优势,可以为食品中重金属的检测提供有力的技术支撑,而且ICP-MS检测技术的快速、准确、可靠和多元素可同时检测等特点将为其在食品领域中元素的检测发挥不可缺少的作用。

3 总 结

由于ICP-MS的优势明显,使其成为测定食品中多种元素的首选方法。众多学者也为此进行了深入研究,研究结果都表明ICP-MS也适用于测定食品中多种元素的测定^[39,40],具有线性范围宽、灵敏度高、精密度好、检出限低、进样技术简单、质量扫描速度快、运行周期短、所提供离子信息受干扰程度小^[41-44]、节约经济成本和时间成本等优点,该法与国标方法所用的原子吸收分光光度计、紫外分光光度计等实验结果无显著性差异^[18,20]。2016年12月23日中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会、国家食品药品监督管理总局发布GB5009.268-2016《食品安全国家标准食品中多元素的测定》^[45],并于2017年6月23日实施。该标准的第一法便为电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),明确了该法适用于食品中B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Mo、Cd、Sn、Sb、Ba、Hg、Tl、Pb的测定,由此可见ICP-MS越来越受到重视,在以后的国标方法修改时,ICP-MS有望替代原子吸收光谱仪、原子荧光光谱、及电感耦合等离子体发射光谱等,成为食品中多元素测定的不二选择。另外,随着科学技术的进步和广大科研工作者的研究深入,ICP-MS必将在未来的食品分析领域发挥更加重要的作用,其联用技术的突破与创新也必将成为未来发展的趋势。

参考文献

- [1] 汤盛翔,孟达,吴次南. ICP-OES与ICP-MS测定人体汗液的5种微量元素金属元素[J]. 山地农业生物学报, 2015, 34(5): 38-41.
- [2] Tang SX, Meng D, Wu CN. Determination of five heavy trace metal elements in human sweat by ICP-OES and ICP-MS [J]. J Mount Agric Biol, 2015, 34(5): 38-41.
- [2] 金永久,李明,曹晓玲,等. 基于ICP-MS探讨血液透析患者与正常人全血中矿物元素含量的差异[J]. 现代检验医学杂志, 2016, 31(6):

- 112–114.
- Jin YJ, Li M, Cao XL, *et al.* Study on differences in mineral elements in blood between post-dialysis patients and healthy human beings [J]. *J Mod Lab Med*, 2016, 31(6): 112–114.
- [3] Persson DP, Hansen TH, Laursen KH, *et al.* ICP-MS and LC-ICP-MS for analysis of trace element content and speciation in cereal grains [J]. *Plant Metabol*, 2012, 806(5): 193–211.
- [4] 陆海川, 黄艳波, 杨旭. GFAAS 和 ICP-MS 测定化探样品中的痕量金[J]. *黄金*, 2016, 37(6): 83–86.
- Lu HC, Huang YB, Yang X. Determination of trace gold in geochemical samples by GFAAS and ICP-MS [J]. *Gold*, 2016, 37(6): 83–86.
- [5] 章海啸, 吴丽君, 陈春旭, 等. ICP-MS 测工业原材料氯化钽中的 As 含量[J]. *中国测试*, 2015, 41(21): 160–162.
- Zhang HX, Wu LJ, Chen CX, *et al.* Determination of as content in neodymium chloride industrial raw materials by ICP-MS [J]. *Chin Measure Test*, 2015, 41(21): 160–162.
- [6] 邹晓雯, 高博, 周怀东, 等. 应用 ICP-MS 测定城市道路尘土中铂族元素[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(4): 1202–1204.
- Zou XW, Gao B, Zhou HD, *et al.* Determination of platinum group elements in city roadside dusts by ICP-MS [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2016, 36(4): 1202–1204.
- [7] Karadas C, Kara D, Fisher A. Determination of rare earth elements in seawater by inductively coupled plasma mass spectrometry with off-line column preconcentration using 2,6-diacetylpyridine functionalized amberlite XAD-4 [J]. *Anal Chim Acta*, 2011, 68, 9(2): 184–189.
- [8] 张晶, 李雪影, 徐辉, 等. 电感耦合等离子体在食品分析检测中的应用[J]. *包装与食品机械*, 2014, 32(5): 62–66.
- Zhang J, Li XY, Xu H, *et al.* Application on detection and analysis in food by inductively coupled plasma [J]. *Pack Food Mach*, 2014, 32(5): 62–66.
- [9] Leiterer M, Truckenbrodt D, Franke K. Determination of iodine species in milk using ion chromatography sepa-rate and ICP-MS detection [J]. *Eur Food Res Technol*, 2001, 213(2): 150–153.
- [10] 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 products [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2011, 401(4): 1401–1409.
- [11] Crews HM. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) for the analysis of trace element contaminants in foods [M]. *US: Progress in Food Contaminant Analysis Springer*, 1996.
- [12] Claudia A, Ponce DL, Maria MB, *et al.* Trace element determination in vitamin E using ICP-MS [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2002, 372(2): 230–234.
- [13] Vanize CC, Rochele SP, Carla AH, *et al.* Feasibility of ultra-trace determination of bromine and iodine in honey by ICP-MS using high sample mass in microwave-induced combustion [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2015, 407(26): 7957–7964.
- [14] GB 5009.12 食品安全国家标准 食品中铅的测定[S].
- GB 5009.12 National standard for food safety-Determination of arsenic in food [S].
- [15] GB5009.11 食品安全国家标准 食品中砷的测定[S].
- GB 5009.11 National standard for food safety Determination of lead in food [S].
- [16] Ni ZL, Tang FB, Yu Q, *et al.* Determination of trace elements in camellia oil by vortex-assisted extraction followed by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Food Anal Method*, 2016, 9(5): 1134–1141.
- [17] 张荣. ICP-MS 法测定沙棘籽油中 13 种微量元素[J]. *国际沙棘研究与开发*, 2014, 12(1): 10–13.
- Zhang R. Determination of 13 trace elements in seabuckthorn seeds by ICP-MS [J]. *Global Seabuckthorn Res Dev*, 2014, 12(1): 10–13.
- [18] 杨建兴, 董川. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定面粉食品中的铅[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(17): 149–151.
- Yang JX, Dong C. Determination of aluminum in flour products by ICP-MS with microwave digestion [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2016, 22(17): 149–151.
- [19] 孙宁. 分光光度法与 ICP-MS 法测定面粉制品中铝含量[J]. *粮油食品科技*, 2017, 25(1): 51–53.
- Sun N. Determination of aluminum content in flour products by spectrophotometry and ICP-MS [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2017, 25(1): 51–53.
- [20] 马兰, 岳兵, 赵馨, 等. 液态乳中铅测定的 ICP-MS 和 AAS 方法比较[J]. *中国乳品工业*, 2015, 43(11): 36–38.
- Ma L, Yue B, Zhao X, *et al.* Comparison of ICP and AAS for determining lead in liquid milk [J]. *Chin Dairy Ind*, 2015, 43(11): 36–38.
- [21] Chiara F, Beatrice B. Validation, uncertainty estimation and application of a sector field ICP MS-based method for As, Cd and Pb in cow's milk and infant formulas [J]. *Microchim Acta*, 2008, 162(1–2): 43–50.
- [22] 陈学武, 袁艳艳, 曹丽玲. ICP-MS 同时测定婴幼儿奶粉中 10 种微量元素[J]. *食品工业*, 2015, 36(7): 289–291.
- Chen XW, Yuan YY, Cao LL. Determination of 10 trace metal elements in the infant milk powder by ICP-MS [J]. *The Food Ind*, 2015, 36(7): 289–291.
- [23] 曾海英, 王家磊, 沈萍萍, 等. 微波消解-ICP-MS 法测定食品、水产品 & 动物组织中 33 种金属元素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(3): 954–960.
- Zeng HY, Wang JL, Shen PP, *et al.* Determination of 33 kinds of metallic elements in food aquatic products animal tissues by microwave digestion and ICP-MS method [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(3): 954–960.
- [24] 李智明. HPLC-ICP-MS 测定水产品中五种砷形态[J]. *科技创新与应用*, 2016, (30): 43–44.
- Li ZM. Determination of arsenic species in aquatic products by HPLC-ICP-MS [J]. *Technol Inno Appl*, 2016, (30): 43–44.
- [25] 陈岩, 刘永涛, 赵晓丽, 等. HPLC-ICP-MS 联用技术测定水产品中的汞形态[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(23): 129–133.
- Chen Y, Liu YT, Zhao XL, *et al.* Determination of mercury species in aquatic products by HPLC-ICP-MS [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(23): 129–133.
- [26] Fernanda C, Pinheiro, Clarice DB, *et al.* Determination of arsenic in fruit juices using inductively coupled plasma tandem mass spectrometry (ICP-MS/MS) [J]. *Food Anal Method*, 2017, 10(4): 992–998.
- [27] 刘慧, 钱强, 金尉, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定果蔬中 13 种金属元素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(11): 4672–4676.
- Liu H, Qian Q, Jin W, *et al.* Determination of 13 kinds of metal elements in fruits and vegetables by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(11): 4672–4676.
- [28] Mauro E, Stefania C, Eugenio C, *et al.* Trace elements in free-range hen eggs in the Campania region (Italy) analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. *Environ Monit Assess*, 2016,

- 188(6): 326–326.
- [29] Shao YF, Chen Y, Liu J, *et al.* ICP-MS determination of potential toxic elements in soil and rice (*Oryzasativa* L.) and related health risk [J]. Food Anal Method, 2016, 9(12): 3501–3508.
- [30] José TPB, Clarissa MMS, Liliados SB, *et al.* Bromine, chlorine, and iodine determination in soybean and its products by ICP-MS after digestion using microwave-induced combustion [J]. Food Anal Method, 2013, 6(4): 1065–1070.
- [31] 聂西度, 符靛. 电感耦合等离子体质谱法测定坚果中微量元素[J]. 食品科学, 2013, 34(10): 227–230.
- Nie XD, Fu L. Determination of trace elements in nuts by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Food Sci, 2013, 34(10): 227–230.
- [32] 何霜, 李娜, 王志雄, 等. 基于微波消解的 ICP-OES/ICP-MS 法测定茶叶中 30 种矿物质元素[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 1–6.
- He S, Li S, Wang ZX, *et al.* Determination of 30 mineral elements in tea by microwave digestion coupled with ICP-OES/ICP-MS [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(12): 1–6.
- [33] 李爱军, 郑百芹, 庞学良, 等. 微波消解 ICP-MS 测定猪肉中 9 种金属元素[J]. 中国兽药杂志, 2015, 49(4): 42–45.
- Li AJ, Zheng BQ, Pang XL, *et al.* Determination of 9 kinds of metal elements in pork muscle by microwave digestion and ICP-MS [J]. China J Vete Med, 2015, 49(4): 42–45.
- [34] 徐辉. ICP-MS 测定生活饮用水中的金属元素分析[J]. 中国新技术新产品, 2017, (6): 55–55.
- Xu H. Determination of metal elements in drinking water by ICP-MS [J]. New Technol New Prod China, 2017, (6): 55–55.
- [35] 刘开庆, 张晓南, 曹红云, 等. 采用 ICP-MS 同时测定十七种酒中 8 种重金属元素的含量[J]. 广州化工, 2016, 44(20): 93–95.
- Liu HQ, Zhang XN, Cao HY, *et al.* Determination of 8 heavy metals in 17 kinds of liquors by ICP - MS [J]. Guangzhou Chem Ind, 2016, 44(20): 93–95.
- [36] 李燕, 王忠一, 鞠忠杰. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定葡萄酒中的多种元素[J]. 酿酒科技, 2016, 9(267): 113–115.
- Li Y, Wang ZY, Ju ZJ. Determination of multiple elements in grape wine by ICP-MS [J]. Liquor-Making Sci Technol, 2016, 9(267): 113–115.
- [37] 李冬. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法直接测定酱油中铅的研究[J]. 科学咨询, 2015, (45): 96.
- Li D. Direct determination of lead in soy sauce by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. Policy Manag, 2015, (45): 96.
- [38] 牟卫伟, 刘艳. ICP-MS 测定补钙类保健食品中的多种重金属元素残留[J]. 中国生化药物杂志, 2016, 36(5): 207–209.
- Mou WW, Liu Y. Residue determination of various metal elements in calcium health food by ICP-MS [J]. Chin J Biochem Pharm, 2016, 36(5): 207–209.
- [39] Liu CC, He SY, Shen K, *et al.* L-cysteine functionalized silica gel as an efficient adsorbent for the determination of heavy metals in foods by ICP-MS [J]. Food Anal Method, 2015, 8(7): 1785–1793.
- [40] Katarina J, Dragica MN, Željka VJ, *et al.* Mapping differential elemental accumulation in fish tissues: assessment of metal and trace element concentrations in wels catfish (*Silurus glanis*) from the Danube river by ICP-MS [J]. Environ Sci Poll Res, 2015, 22(5): 3820–3827.
- [41] 郭秋兰, 冯志强, 宋美英. 电感耦合等离子质谱在食品元素分析检测中的应用[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(5): 100–103.
- Guo QL, Feng ZQ, Song MY. The application of inductively coupled plasma mass spectra in food element analysis and testing [J]. Food Ferment Technol, 2015, 51(5): 100–103.
- [42] 张祥. ICP-MS 半定量法快速检测食品中微量重金属的方法研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(5): 107–108.
- Zhang X. ICP-MS method for rapid detection of trace metals in food [J]. J Anhui Agric Sci, 2016, 44(5): 107–108.
- [43] 刘虎生, 邵宏翔. 电感耦合等离子质谱技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- Liu HS, Shao HX. Inductively coupled plasma mass spectrometry and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [44] Sanz MA, Montes BM, Bettmer J, *et al.* ICP-MS for absolute quantification of proteins for heteroatom-tagged, targeted proteomics [J]. Trends Anal Chem, 2012, 40: 52–63.
- [45] GB5009.268-2016 食品安全国家标准食品中多元素的测定[S].
- GB 5009.268-2016 National standard for food safety-Determination of multielement in food [S].

(责任编辑: 武英华)

作者简介



宋敏, 硕士, 主要研究方向为食品检测。
E-mail: songmin1005@163.com