

# 食品中重金属检测方法研究进展

张宏康<sup>1</sup>, 王中媛<sup>2\*</sup>, 许佳璇<sup>1</sup>, 林小可<sup>1</sup>, 李蔼琪<sup>1</sup>

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广州 510225; 2. 国家海洋局南海环境监测中心, 广州 510300)

**摘要:** 镉、铬、铅、砷和汞等重金属元素在人体内蓄积到一定浓度时, 可危害中枢神经、血液及各器官, 导致各种疾病, 甚至癌症。食品安全直接关系人民健康, 食品中重金属含量超标事件时有发生, 对人们的身体健康有潜在的威胁, 因此对于食品中重金属含量的检测十分必要。本文综述了常用的检测食品中重金属含量的方法, 包括: 原子荧光光谱法、X 射线荧光光谱法、电感耦合等离子体-质谱法、电感耦合等离子体-原子发射光谱法、原子吸收光谱法等, 简述其优缺点, 并介绍各种检测方法检测食品中重金属含量的应用实例, 以期对检测重金属的发展提供一定的参考价值, 以更好地做好食品安全和维护人民健康, 并且对重金属检测方法的发展作出展望。

**关键词:** 食品; 重金属; 检测方法

## Research progress on analysis technologies of heavy metals in foods

ZHANG Hong-Kang<sup>1</sup>, WANG Zhong-Yuan<sup>2\*</sup>, XU Jia-Xuan<sup>1</sup>, LIN Xiao-Ke<sup>1</sup>, LI Ai-Qi<sup>1</sup>

(1. College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;  
2. South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China)

**ABSTRACT:** Cd, Cr, Pb, As, Hg and other heavy metal elements do great harm to human health. They can lead to variety of diseases, even cancer. The content of heavy metal in food often exceeds standards, and it is a threat to human health. Therefore, the detection of heavy metal content in food is necessary. This article provided an overview of commonly used detection method for heavy metal content in food, such as atomic fluorescence spectrometry, X-ray fluorescence spectrometer, inductive coupling plasma-mass spectrometry, inductive coupling plasma-atomic emission spectrometry and atomic fluorescence spectrometry, and their characteristics were introduced, outlining their strengths and weaknesses. Application examples about detection of heavy metals in food by these methods were introduced, so as to provide a reference for the detection of heavy metals in food. The development of detection methods for heavy metals was also prospected.

**KEY WORDS:** food; heavy metals; detection methods

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406093)、国家海洋局青年基金项目(2013513)、国家海洋局南海分局局长基金项目(1328)、广东省教育厅科技创新项目(2013KJCX0103)、广东省科技计划项目(2013B090600033)、广东省科技计划项目(2016A020210138)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (41406093), Youth Fund of State Oceanic Administration(2013513), Director Fund of NCSB(1328), Educational Commission of Guangdong Province Technology Project (2013KJCX0103), Guangdong Province Science and Technology Plan Project (2013B090600033) and Guangdong Province Science and Technology Plan Project (2016A020210138)

\*通讯作者: 王中媛, 博士, 工程师, 主要研究方向为流动注射与高灵敏度检测器联用的应用研究。E-mail: zhongyuan764@126.com

\*Corresponding author: WANG Zhong-Yuan, Ph.D., Engineer, South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China. E-mail: zhongyuan764@126.com

## 1 引言

目前,在人体内发现的元素已有 81 种,如铁、锌、钙等人体必需元素。但也有一部分元素即使少量存在于人体中,也可能对人体带来一定的伤害,如重金属元素。这些元素以一定浓度存在于大自然中,但由于不断的人类活动以及工业发展等原因,它们不断进入大气、土壤、水中,最后进入到生物体内,累积到一定浓度便会对生物体造成难以挽回的伤害。人类重金属中毒的主要途径往往是通过摄食,当食物中含有超标的重金属,在人体内积蓄,达到一定浓度,便会对机体造成伤害,轻则中毒,重则可能引起死亡。比如,当摄入过量的镉,可能导致钙代谢紊乱,引起高血压等危害<sup>[1]</sup>。常见的重金属中毒有镉、汞、铅等,国内的“镉大米”事件、“雀巢奶粉重金属超标”事件、“红心鸭蛋”等食品安全相关隐患事件层出不穷。

重金属是指比重大于 4 或 5 的金属,大约有 45 种,如汞、铜、铅、镉、铁、锌、锰、钙、铬等<sup>[2]</sup>。有些重金属通过食物进入人体,干扰人体正常生理功能,危害人体健康,被称为有毒重金属,这类金属元素主要有:汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、砷(As)、锌(Zn)、锡(Sn)等<sup>[3]</sup>。食物的安全性关系到人类的生命健康。因此,对于食品的安全性我们要严格把关,尤其是食品中含有的重金属元素。

对食品中重金属的检测,常用的方法有原子吸收光谱法(atomic absorption spectrometry, AAS)、原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, AFS)、电感耦合等离子体-质谱法(inductive coupling plasma-mass spectrometry, ICP-MS)、X 射线荧光光谱法(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)、电感耦合等离子体-原子发射光谱法(inductive coupling plasma-atomic emission spectrometry, ICP-AES)等<sup>[4-14]</sup>。本文将综合阐述几种常用的检测食品中重金属含量的方法,对其特点作介绍,简述其优缺点,并且对重金属检测方法的发展作出了展望,以期对检测重金属的发展提供一定参考价值。

## 2 检测食品中重金属常用方法研究进展

### 2.1 原子荧光光谱法

原子荧光光谱法(AFS)是介于原子发射光谱(AES)和原子吸收光谱(AAS)之间的光谱分析技术,它的基本原理是基态原子(一般蒸汽状态)吸收合适的特定频率的辐射而被激发至高能态,而后激发过程中以光辐射的形式发射出特征波长的荧光。该法的优点是灵敏度高,目前已有 20 多种元素的检出限,优于原子吸收光谱法和原子发射光谱法,且谱线简单,主要用于金属元素的测定,能用于样品中超痕量金属元素的检测<sup>[15,16]</sup>。

王志嘉等<sup>[17]</sup>采用微波消解法结合原子荧光光谱法来

检测中药材中的铅、汞、砷、镉、锑的含量,并对测定方法进行了方法学考察。该方法的建立改变了以往要采用不同方法来检测不同元素的繁琐,简便快速,且仪器价格低廉,检测结果灵敏度高,取得令人满意的效果。

刑俊波等<sup>[18]</sup>采用湿法消解样品、双道氢化物发生原子荧光法来同时测定食品中砷和汞,该方法具有简便、快捷、灵敏度高等优点,为测定蛋及蛋制品中砷和汞的含量提供可行的方法。叶惠焯等<sup>[19]</sup>采用氢化物发生-湿法消解-原子荧光光谱法的方法来测定 3 批不同采收期湘葛一号样品中 As、Hg 和 Pb 的含量,该方法具有快速、准确、简便等特点,为快速检测其他药食性植物中含有的微量重金属提供了一定的参考。

原子荧光光谱法适用于冶金、地质、石油、农业、生物医学、地球化学、材料科学、环境科学等各个领域内重金属含量的检测,应用范围相当广泛,且其发射光谱简单,灵敏度比原子吸收光谱高,且线性范围宽,能同时进行多种元素的测定,在快速检测方面以及痕量、超痕量重金属方面皆能应用得上,亦取得较为令人满意的效果。但其对于复杂基体样品的测定则比较困难,容易受到干扰,实验结果不够准确。

### 2.2 X 射线荧光光谱法

X 射线荧光光谱法具有测量的再现性好、便于进行无损分析、分析速度快、应用范围广等优点。除用于物质成分分析外,还可用于原子的基本性质如氧化数、离子电荷、电负性和化学键等的研究<sup>[20]</sup>。对于 X 射线荧光光谱法在检测重金属方面的应用,刘燕德等<sup>[20]</sup>做出了相关的研究,解释了 X 射线荧光光谱技术是利用样品对 X 射线的吸收随样品中的成分及其多少而变化来定性或定量测定样品中成分的一种方法,分析 X 射线荧光光谱技术存在的关键问题,同时提出了 X 射线荧光光谱技术的进一步研究方向。彭新凯等<sup>[21]</sup>通过 X 射线荧光法测定大米中镉含量,得出 X 射线荧光光谱仪检出限和定量限能够满足大米中镉的检测的标准要求,此方法快速、简捷,且操作简单,为食品原料验收和监管提供了有力的技术支撑。

X 射线荧光光谱法适用于炼钢、有色金属、水泥、陶瓷、石油、玻璃等行业样品中重金属元素含量的检测,主要适用于样品中常量到微量组分分析。X 射线荧光光谱法有着测量速度快、灵敏度高、分析范围较宽等特点,但其难于作绝对分析,所以定量分析需要标样,对轻元素的灵敏度要低一些。

### 2.3 电感耦合等离子体-质谱(ICP-MS)法

电感耦合等离子体-质谱法是以等离子体为离子源的一种质谱型元素分析方法,它具有检出限低、灵敏度高、准确性高、干扰少、可进行同位素分析等众多优点,线性范围广,可分析几乎所有存在于地球上的元素,被公认为

最强有力的痕量超痕量无机元素分析技术,在食品分析与检验中应用十分广泛<sup>[22]</sup>。

刘维明等<sup>[23]</sup>选取甘蔗汁作为研究对象,使用电感耦合等离子体-质谱法测定甘蔗汁中的有害重金属元素,该方法简便、快速、准确,适用于测定甘蔗汁中的微量重金属元素,同时可为分析含有机质高、糖分高、黏稠的样品提供技术参考。李湘等<sup>[24]</sup>利用电感耦合等离子体-质谱法测定染铅猪仔的血铅、尿铅含量,为进一步探讨研究铅暴露程度与人体铅中毒水平的关系提供了技术支持。夏拥军等<sup>[25]</sup>建立电感耦合等离子体-质谱法来快速、准确测定进口葡萄酒中18种元素的方法。采用此种方法的仪器自动化程度高,大大节省了时间和精力,有着高效、快速、准确的特点,适用于快速检测。

电感耦合等离子体-质谱法适用于各类药品中从痕量到微量的元素分析,尤其是痕量重金属元素的测定,可分析几乎地球上所有的元素,将来也将更多地应用发展此项技术。其具有灵敏度高、速度快等优点,可在几分钟内完成几十个元素的定量测定,谱线简单,也可同时对多种元素进行测定,但该仪器价格较为昂贵,样品的前处理较为繁琐。

#### 2.4 电感耦合等离子体-原子发射光谱(ICP-AES)法

电感耦合等离子体-原子发射光谱法是以电感耦合等离子炬为激发光源的一类光谱分析方法,它是一种由原子发射光谱法衍生出来的新型分析技术<sup>[30]</sup>。当样品经处理制成溶液后,由超雾化装置变成全溶胶由底部导入管内,经轴心的石英管从喷嘴喷入等离子体炬内。样品气溶胶进入等离子体焰时,绝大部分立即分解成激发态的原子、离子状态。当这些激发态的粒子回收到稳定的基态时要放出一定的能量(表现为一定波长的光谱),测定每种元素特有的谱线和强度,和标准溶液相比,就可以知道样品中所含元素的种类和含量。由于其检测限低,精密度高以及多种元素可同时测定等优点,得到了广泛的应用且迅速发展<sup>[26-29]</sup>。

叶润等<sup>[31]</sup>建立微波消解-电感耦合等离子体-原子发射光谱法测定大米中铜、锰、铁、锌、钙、镁、钾、钠8种元素的方法。实验结果准确度、精确度均很高。林立等<sup>[32]</sup>采用微波消解-电感耦合等离子体-原子发射光谱法测定了不同食品中总砷的含量,对微波消解样品前处理条件和仪器参数进行了选择和优化。实验方法测得的结果与标准值或参考值吻合。郭丽萍等<sup>[33]</sup>采用微波消解前处理技术,结合电感耦合等离子体-原子发射光谱法对茶叶中5种重金属元素镉、铬、铜、铅、锌的含量进行了测定。实验采用的消解体系亦是硝酸-过氧化氢的消解体系,该方法具有检出限低、快速简便、操作简单等优点。

电感耦合等离子体-原子发射光谱法适用于各种样品中重金属的检测,也被广泛应用于石、矿石等样品中重金

属的检测,由以上实验中可得出该法有着准确度高和精密度高、检出限低、测定快速、线性范围宽等优点,其亦可同时测定多种元素等,在灵敏度上比电感耦合等离子体-质谱仪略低,仪器价格也是较为昂贵。其不足主要在于光谱干扰信号往往伴随着分析信号,因此可能影响实验结果的准确性。

#### 2.5 原子吸收光谱法

原子吸收光谱(atomic absorption spectroscopy, AAS)法是基于气态的基态原子外层电子对紫外光和可见光范围的相对应原子共振辐射线的吸收强度来定量被测元素含量为基础的分析方法,是一种测量特定气态原子对光辐射的吸收的方法。近年来被广泛用于食品中重金属含量的测定,该方法与传统化学分析方法相比具有灵敏度更高、测定结果更准确等优点。

曹璐等<sup>[34]</sup>综述使用原子吸收法测定蔬菜、粮食、海产品和饮品中的铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)和砷(As)等重金属元素的研究进展,并且对使用火焰原子吸收(FAAS)、石墨炉原子吸收(GFAAS)和氢化物发生原子吸收(HGAAS)等方法测定不同元素的准确性、灵敏度和回收率等进行评述。原子吸收法多年来被广泛应用于食品中重金属的检测,具有灵敏度高、测定元素种类多、选择性高等优点,是测定微量金属元素的首选。

何佩雯等<sup>[35]</sup>采用原子吸收光谱法来测定三七、葛根、虎杖、丹参、川芎、当归、黄连、大黄、苦参9种中药材中镉、铬、铅、砷和汞的含量。实验得出该方法具有快速、干扰少、精密度高等优点,能基本满足中药材中重金属含量的测定。张辉等<sup>[36]</sup>采用硝酸-高氯酸消解蔬菜样品,分别采用火焰原子吸收光谱法来测定蔬菜中铁、锰和铜和采用石墨炉原子吸收光谱法来测定蔬菜中的铅和镉。此方法具有操作简单、仪器自动化程度高等优点。余磊等<sup>[37]</sup>用浓硝酸-过氧化氢处理样品,分别用火焰原子吸收光谱法来测定茶叶中Fe、Cu、Ca、Mn、Zn5种微量元素、用石墨炉原子吸收光谱法测定茶叶中Pb、Cd。实验结果表明本方法的精密密度良好,且简单便捷,适用于测定茶叶中的微量金属元素。

原子吸收光谱法是检测食品中重金属最常用的检测方法,因此其检测技术也发展得相当成熟,且操作简便。其在地质、冶金、机械、化工、农业、食品、轻工、生物医药、环境保护、材料科学等各个领域有广泛的应用,主要适用样品中微量及痕量、超痕量组分分析,有着灵敏度高、准确度高优点,不足则在于不能同时进行多种元素的检测,也因此效率有所下降,对于难熔元素和非金属元素的检测困难。

#### 2.6 各类方法的适用场所、特点以及局限性小结

各类方法的适用场所、特点以及局限性见表1。

表 1 各类检测方法的适用场合以及优缺点<sup>[38-41]</sup>  
 Table 1 The applicable occasions, advantages and disadvantages of each kind of detection methods

方法	类目	适用场合	优点	局限性
原子吸收光谱法		地质、冶金、机械、化工、农业、食品、轻工、生物医药、环境保护、材料科学等。该法主要适用样品中微量及痕量、超痕量组分分析。	抗干扰能力强, 操作简便, 准确度高, 分析速度快, 灵敏度高, 技术成熟, 且分析范围广, 选择性强。	不能进行多元素分析, 难熔元素、非金属元素测定困难。
原子荧光光谱法		冶金、地质、石油、农业、生物医学、地球化学、材料科学、环境科学等各个领域内获得了相当广泛的应用。	发射线谱简单, 灵敏度比原子吸收光谱法高, 线性范围宽, 能同时进行多种元素的测定, 预处理简单。	对于复杂基体的样品测定比较困难, 在使用上不及原子吸收法普遍。
X 射线荧光光谱法		炼钢、有色金属、水泥、陶瓷、石油、玻璃等行业样品均可应用。该法主要适用于样品中常量到微量组分分析。	重现性好, 测量速度快, 灵敏度高, 分析快速, 分析的元素范围广, 荧光 X 射线谱线简单, 预处理简单, 分析浓度范围较宽, 从常量到微量都可分析, 对重元素的检测限可达 ppm 量级, 分析样品不被破坏, 可同时测定多种元素。	难于作绝对分析, 所以定量分析需要标样, 对轻元素的灵敏度要低一些。
电感耦合等离子体质谱法		适用于各类药品中从痕量到微量的元素分析, 尤其是痕量重金属元素的测定。灵敏度高, 可分析几乎地球上所有的元素。	灵敏度高, 速度快, 可在几分钟内完成几十个元素的定量测定, 谱线简单, 干扰相对于光谱技术要少。样品的制备和引入相对于其他质谱技术简单, 既可用于元素分析, 还可进行同位素组成的快速测定, 可同时测定多种元素, 线性范围宽, 精密度准确度高, 检出限可很低, 达 ppt 级。	样品前处理繁琐, 易受其他元素干扰, 机器设备昂贵。
电感耦合等离子体发射光谱法		广泛用于环境样品及岩石、矿物、金属等样品中数十种元素的测定。	准确度高和精密度高, 检出限低, 测定快速, 线性范围宽, 可同时测定多种元素等优点, 灵敏度比 ICP-MS 略低。	机器设备昂贵, 光谱干扰信号往往伴随分析信号, 影响实验结果的准确度。

### 3 展 望

食品作为我们日常消费中的重要一部分, 其安全性应当得以重视。然而近年来食品中重金属含量超标事件层出不穷, 严重打击着消费者的信心。因而, 建立健全食品安全法规, 并建立起一套严格有效的食品检测体系十分重要。

由于食品种类繁多, 相关标准和法规的制定需要借助大量的检测实验和更先进的检测手段<sup>[42-48]</sup>。为了能更准确和快速地测定样品中的金属元素, 检测方法往往不是单一的, 而是根据待测样品的特性来选择合适的方法, 对于不同的食品以及要检测的不同元素, 也要采取不同的方法, 常常会使用不同方法的联用, 比如原子吸收法也常常联用其他检测手段, 其中就有与毛细管电泳等联用<sup>[49]</sup>。

从检测的准确度上来考虑, 样品的处理过程也是非常重要的一个环节。从上述的实验中可看出, 测量食品中

的重金属元素时, 食品样品的处理多采用加强酸的微波消解方法。微波消解是国际上较为通用的先进消解方法, 它的样品处理少, 往往采用高温高压的全封闭方式, 用四氟乙烯材料的消解罐, 减少对待测元素的干扰, 且消耗少, 不损失待测元素的同时也减少了对环境的污染, 有着快速简便、有利于提高分析方法的准确度和精密度等特点。消解过程加入的强酸种类以及量对实验结果的准确度也有较大的影响, 因此在处理样品过程中也要考虑采用合理的强酸种类以及加入的量<sup>[50]</sup>。

在食品安全性日益受关注的情况下, 相信相关部门对于市场上食品的检测监督也会更加严格, 而检测食品中重金属的方法也会往更加快速高效、准确性高的方向发展。随着科技的发展以及科研人员的努力, 食品中重金属的检测方法将会有本质上的大提高。

## 参考文献

- [1] 容丽萍, 许园园, 蒋小云. 重金属中毒与儿童肾损伤[J]. 中国当代儿科杂志, 2014, 4: 325-329.  
Rong LP, Xu YY, Jiang XY. Heavy metal poisoning and renal injury in children [J]. Chin J Contemp Pediatr, 2014, 4: 325-329.
- [2] 苏帅鹏, 徐斐, 曹慧, 等. 重金属快速检测方法的研究进展[J]. 应用化工, 2013, 42(2): 355-359.  
Su SP, Xu F, Cao H, *et al.* Perspective in the rapid methods for the detection of heavy metals [J]. Appl Chem Ind, 2013, 42(2): 355-359.
- [3] 韩禹. 重金属对食品的污染危害及控制污染的建议[J]. 吉林蔬菜, 2010, 4: 85-86.  
Han Y. Pollution harm of heavy metal for foods and suggestion of pollution control [J]. Jilin Veget, 2010, 4: 85-86.
- [4] 庄会荣, 刘长增, 陈继诚. 原子吸收光谱法测定铅的进展[J]. 理化检验(化学分册), 2003, 7: 430-433.  
Zhuang HR, Liu CZ, Chen JC, *et al.* Recent advances of AAS determination of lead in China [J]. PTCA, 2003, 7: 430-433.
- [5] 黄俭惠. 原子吸收光谱法测定镉的进展[J]. 矿产与地质, 2007, 6: 698-702.  
Huang JH. Evolution of Cd determination by atomic absorption spectrometry [J]. Miner Resour Geol, 2007, 6: 698-702.
- [6] 李冰, 杨红霞. 电感耦合等离子体质谱技术最新进展[J]. 分析实验室, 2003, 1: 94-100.  
Li B, Yang HX. Recent advances in inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chin J Anal Lab, 2003, 1: 94-100.
- [7] 聂西度. 碰撞/反应池—电感耦合等离子体质谱在食品分析中的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
Nie XD. Research on collision /reaction cell inductively coupled plasma mass spectrometry for analysis of food samples [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [8] 杨瑞春, 张伟, 袁鹏, 等. 电感耦合等离子体-质谱法测定食品中的总铬[J]. 分析实验室, 2013, 30(4): 1853-1855.  
Yang RC, Zhang W, Yuan P, *et al.* Determination of total chromium in foods by ICP-MS [J]. Chin J Spec Lab, 2013, 30(4): 1853-1855.
- [9] 王冬圻, 姜瞻梅, 田然, 等. 能量色散 X 射线荧光光谱法测定奶粉中的钙元素[J]. 食品科学, 2013, 34(24): 254-257.  
Wang DX, Jiang ZM, Tian R, *et al.* Determination of calcium in milk powder by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry [J]. Food Sci, 2013, 34(24): 254-257.
- [10] 李光, 李春野, 宋黎军, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定奶粉中的 9 种元素[J]. 卫生研究, 2006, 35(2): 225-227.  
Li G, Li CY, Song LJ, *et al.* Analysis of nine kinds of elements contents in the milk powder by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry [J]. J Hyg Res, 2006, 35(2): 225-227.
- [11] 谭芳维. 原子荧光光谱法测定食品中碘、铬及铋铊中汞的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.  
Tan FW. Determination of iodine, chromium in foods and mercury in antimony ingot by atomic fluorescence spectrometry [D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [12] 王玉兰. 原子荧光光谱法检测土壤样品中砷、汞形态的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
Wang YL. Study of speciation of arsenic and mercury in soil sample by atomic fluorescence spectroscopy [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [13] 王小强, 侯晓磊, 杨惠玲. 电感耦合等离子体发射光谱法同时测定铅锌矿中银铜铅锌[J]. 岩矿测试, 2011, 5: 576-579.  
Wang XQ, Hou XL, Yang HL. Simultaneous quantification of silver, copper, lead and zinc in lead-zinc ores by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry [J]. Rock Min Anal, 2011, 5: 576-579.
- [14] 郑国经. 电感耦合等离子体原子发射光谱分析仪器与方法的新进展[J]. 冶金分析, 2014, 11: 1-10.  
Zheng GJ. New advances in inductively coupled plasma atomic emission spectrometric instruments and methods [J]. Metal Anal, 2014, 11: 1-10.
- [15] 李日升. 原子荧光测汞仪的研制及多元素原子荧光同时测定方法研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.  
Li RS. Development of atomic fluorescence mercury analyzer and methods review of atomic fluorescence spectrometry simultaneously measured the multiple elements [D]. Xi'an: Northwest University, 2012.
- [16] 李刚, 胡斯宛, 陈琳玲. 原子荧光光谱分析技术的创新与发展[J]. 岩矿测试, 2013, 3: 358-376.  
Li G, Hu SX, Chen LL. Innovation and development for atomic fluorescence spectrometry analysis [J]. Rock Miner Anal, 2013, 3: 358-376.
- [17] 王志嘉, 尤海丹, 吴志刚. 微波消解-原子荧光光谱法测定中药材中铅、镉、砷、汞、铋的含量[J]. 沈阳药科大学学报, 2008, 25(5): 388-392.  
Wang ZJ, You HD, Wu ZG. Determination of heavy metals in the traditional Chinese medicines by microwave digestion-atomic fluorescence spectrometry [J]. J Shenyang Pharm Univ, 2008, 25(5): 388-392.
- [18] 邢俊波, 曹红, 王国佳. 湿法消解-氢化物发生原子荧光法测定蛋及蛋制品中微量砷和汞[J]. 当代医学, 2011, 17(24): 32-33.  
Xing JB, Cao H, Wang GJ. Determination arsenic and mercury in eggs and egg product by wet digestion -atomic fluorescence spectrometry [J]. Contemp Med, 2011, 17(24): 32-33.
- [19] 叶惠焯, 谭舟, 刘向前, 等. 湿法消解-原子荧光光谱法测定湘葛一号中的砷、汞、铅[J]. 食品科学, 2014, 4: 151-154.  
Ye HX, Tan Z, Liu XQ, *et al.* Determination of arsenic, mercury and lead in radix puerariae by atomic fluorescence spectrophotometry with wet digestion [J]. Food Sci, 2014, 4: 151-154.
- [20] 刘燕德, 万常澜, 孙旭东, 等. X 射线荧光光谱技术在重金属检测中的应用[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 605-611.  
Liu YD, Wan CL, Sun XD, *et al.* Application of X-ray fluorescence spectrometer technique in detection of heavy metal [J]. Laser Infrared, 2011, 41(6): 605-611.
- [21] 彭新凯, 汪辉, 袁良经. X-射线荧光光谱仪快速筛查大米中镉的含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2014, 26(6): 551-554.  
Peng XK, Wang H, Yuan LJ. Rapid screening of cadmium in rice by X-ray fluorescence spectrometer [J]. Chin J Food Hyg, 2014, 26(6): 551-554.
- [22] 李金英, 石磊, 鲁盛会, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)及其联用技术研究进展[J]. 中国无机分析化学, 2012, 2: 1-5.  
Li JY, Shi L, Lu SH, *et al.* Progress of inductively coupled plasma mass spectrometry and its hyphenated techniques [J]. Chin J Inorg Anal Chem, 2012, 2: 1-5.
- [23] 刘维明, 刘永智, 王晓飞, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定甘蔗汁中重金属的研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(18): 5950, 5973.  
Liu WM, Liu YZ, Wang XF, *et al.* Determination of heavy metals in sugar

- cane juice by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, 42(18): 5950, 5973.
- [24] 李湘, 余晶晶, 李冰, 等. 电感耦合等离子体光谱法测定染铅猪仔的血铅、尿铅含量[J]. *实验分析室*, 2011, 30(8): 88–91.  
Li X, Yu JJ, Li B, *et al.* Determination of Pb element in blood and urine of lead-exposed pigs by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2011, 30(8): 88–91.
- [25] 夏拥军, 张慧, 舒永兰, 等. 电感耦合等离子体-质谱法测定进口葡萄酒中的18种元素[J]. *食品与发酵科技*, 2015, 51(3): 87–90.  
Xia YJ, Zhang H, Shu YL, *et al.* Determination Method of 18 Metals in Wine by ICP-MS [J]. *Food Ferment Technol*, 2015, 51(3): 87–90.
- [26] 霍江莲, 刘孟刚, 楼国柱. 电感耦合等离子体发射光谱法测定茶叶中的5种稀土元素[J]. *食品科学*, 2009, 6: 226–228.  
Huon JL, Liu MG, Lou GZ. Determination of five rare earth elements in tea by inductive coupling plasma-optical emission spectrometry [J]. *Food Sci*, 2009, 6: 226–228.
- [27] 其其格, 赵源, 高娃, 等. 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)法测定牛奶及奶制品中的微量元素[J]. *中国乳品工业*, 2009, 2: 61–64.  
Qi QG, Zhao Y, Gao W, *et al.* Detection of trace elements in the milk and milk products by ICP-AES [J]. *Dairy Ind*, 2009, 2: 61–64.
- [28] 邓泽英, 李京晶. 应用电感耦合等离子体发射光谱法对食品中铝含量测定方法的研究[J]. *食品科技*, 2008, 9: 248–250.  
Deng ZY, Li JJ. Determination of aluminum in food by inductively couple plasma atomic emission spectrometry [J]. *Food Sci Technol*, 2008, 9: 248–250.
- [29] 李光, 李春野, 宋黎军, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定奶粉中的9种元素[J]. *卫生研究*, 2006, 2: 225–227.  
Li G, Li CY, Song LJ, *et al.* Analysis of nine kinds of elements contents in the milk powder by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry [J]. *J Hyg Res*, 2006, 2: 225–227.
- [30] 程晓宏, 杨清华, 陈峰, 等. 食品安全中重金属检测方法的研究进展[J]. *江苏预防医学*, 2015, 26(3): 56–58.  
Cheng XH, Yang QH, Chen F, *et al.* The research progress of heavy metals in food safety detection method [J]. *Jiangsu J Prev Med*, 2015, 26(3): 56–58.
- [31] 叶润, 刘芳竹, 刘剑, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定大米中铜、锰、铁、锌、钙、镁、钾、钠8种元素[J]. *食品科学*, 2012, 35(6): 117–120.  
Ye R, Liu FZ, Liu J, *et al.* Determination of contents of Cu, Mn, Fe, Zn, Ca, Mg, K and Na in rice using microwave digestion and inductively coupled plasma-optical emission spectrometry [J]. *Food Sci*, 2012, 35(6): 117–120.
- [32] 林立, 杨彦丽, 周谄非, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法分析食品中的总硼[J]. *岩矿测试*, 2008, 1: 21–24.  
Lin L, Yang YL, Zhou AF, *et al.* Determination of total boron in foods by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry with microwave digestion sample preparation [J]. *Rock Miner Anal*, 2008, 1: 21–24.
- [33] 郭丽萍, 唐娟. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定茶叶中的微量元素[J]. *食品科技*, 2013, 5: 303–307.  
Guo LP, Tang J. Determination of trace elements in tea by microwave digestion and inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy [J]. *Food Sci Technol*, 2013, 5: 303–307.
- [34] 曹琰, 赵丽娇, 钟儒刚. 原子吸收光谱法测定食品中重金属含量的研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 7: 304–309.  
Cao J, Zhao LJ, Zhong RG. Progress in determination of heavy metals in foods by atomic absorption spectrometry [J]. *Food Sci*, 2012, 7: 304–309.
- [35] 何佩雯, 杜钢, 赵海誉, 等. 微波消解-原子吸收光谱法测定9种中药材中重金属含量[J]. *药物分析杂志*, 2010, 9: 1707–1712.  
He PW, Du G, Zhao HY, *et al.* Determination of five heavy metals in nine Chinese medicines by atomic absorption spectrometry coupled with microwave digestion [J]. *Chin J Pharm Anal*, 2010, 9: 1707–1712.
- [36] 张辉, 唐杰. 原子吸收光谱法测定蔬菜中的铁、锰、铜、铅和镉[J]. *光谱实验室*, 2011, 1: 72–74.  
Zhang H, Tang J. Determination of Fe, Mn, Cu, Pb and Cd in vegetables by atomic absorption spectrometry [J]. *Chin J Spect Lab*, 2011, 1: 72–74.
- [37] 余磊, 彭湘君, 李银保, 等. 原子吸收光谱法测定茶叶中7种微量元素[J]. *光谱实验室*, 2006, 5: 962–965.  
Yu L, Peng XJ, Li YB, *et al.* Determination of seven trace elements in tea samples by atomic absorption spectrometry [J]. *Chin J Spect Lab*, 2006, 5: 962–965.
- [38] 骆新峥. 食品中常见的重金属污染及检测技术研究进展[J]. *质量技术监督研究*, 2010, 6: 39–43, 49.  
Luo XZ. Application of PSO and time-based sequence analysis in intrusion detection [J]. *Qual Technol Sup Res*, 2010, 6: 39–43, 49.
- [39] 王玉红, 王延凤, 陈华, 等. 海水中重金属检测方法研究及治理技术探索[J]. *环境科学与技术*, 2014, S1: 237–241, 362.  
Wang YH, Wang YF, Chen H, *et al.* Detect methods of heavy metals in seawater and treatment technology exploration [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, S1: 237–241, 362.
- [40] 冷进松, 高雪梅, 王鑫磊. 食品中重金属污染的危害及其检测技术研究进展[J]. *农产品加工*, 2015, 23: 50–53.  
Leng JS, Gao XM, Wang LX. Hazards of heavy metal pollution in food and progress in study on analysis technologies [J]. *Farm Prod Proc*, 2015, 23: 50–53.
- [41] 袁敏, 武建超, 于劲松, 等. 水中重金属检测方法的研究进展[J]. *应用化工*, 2015, 4: 724–728.  
Yuan M, Wu JC, Yu JS, *et al.* Progress on detection methods of heavy metals in water [J]. *Appl Chem Ind*, 2015, 4: 724–728.
- [42] 祁胜媚. 农产品质量安全管理体系建设的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011.  
Qi SM. Construction of the system of quality safety management of agricultural products [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011.
- [43] [43] Suturović Z, Kravić S, Milanović S, *et al.* Determination of heavy metals in milk and fermented milk products by potentiometric stripping analysis with constant inverse current in the analytical step [J]. *Food Chem*, 2014, 155: 120–125.
- [44] Behbahani M, Hassanlou PG, Amini MM, *et al.* Application of solvent-assisted dispersive solid phase extraction as a new, fast, simple and reliable preconcentration and trace detection of lead and cadmium ions in fruit and water samples [J]. *Food Chem*, 2015, 187: 82–88.
- [45] Mohammad HM, Mitra AD, Mahmoud RS, *et al.* Solid phase extraction of trace amounts of silver, cadmium, copper, mercury, and lead in various food samples based on ethylene glycol bis-mercaptopropionate modified 3-(trimethoxysilyl)-1-propanethiol coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles [J]. *Food Chem*, 2014, 151: 300–305.
- [46] Akinyele IO, Shokunbi OS. Comparative analysis of dry ashing and wet

digestion methods for the determination of trace and heavy metals in food sample [J]. Food Chem, 2015, 173: 682-684.

[47] Liu B, Huang Q, Cai HJ, *et al.* Study of heavy metal concentrations in wild edible mushrooms in Yunnan province, China [J]. Food Chem, 2015, 188: 294-300.

[48] Tarighat MA. Orthogonal projection approach and continuous wavelet transform-feed forward neural networks for simultaneous spectrophotometric determination of some heavy metals in diet samples [J]. Food Chem, 2016, 192: 548-556.

[49] 肖艳. 原子吸收光谱联用技术的建立及应用研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2008.

Xiao Y. Study on the coupled technique of atomic absorption spectrometry and its application[D]. Guilin: Guangxi Normal University., 2008.

[50] 张磊, 王晓艳, 李波. 微波消解技术在金属分析中的应用[J]. 光谱实验室, 2010, 3: 953-957.

Zhang L, Wang XY, Li B. Application of microwave digestion technology

in metal analysis [J]. Chin J Spect Lab, 2010, 3: 953-957.

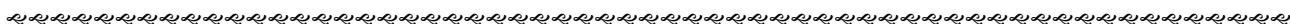
(责任编辑: 金延秋)

### 作者简介

张宏康, 副教授, 主要研究方向为食品质量与安全。  
E-mail: zhkuzhk@163.com



王中媛, 工程师, 主要研究方向为流动注射与高灵敏度检测器联用的研究。  
E-mail: zhongyuan764@126.com



## “功能性食品研究”专题征稿函

功能性食品是指具有功能性成分、可调节人体生理活动功能的食品。目前已研发的功能性食品主要包括: 增强人体体质(增强免疫能力, 激活淋巴系统等)的食品; 防止疾病(高血压、糖尿病、冠心病、便秘和肿瘤等)的食品; 恢复健康(控制胆固醇、防止血小板凝集、调节造血功能等)的食品; 调节身体节律(神经中枢、神经末梢、摄取与吸收功能等)的食品和延缓衰老的食品等。由于其特殊的营养和保健功能, 越来越得到人们的关注。

鉴于此, 本刊特别策划了“功能性食品研究”专题, 由南昌大学食品科学与技术国家重点实验室副主任邓泽元教授担任专题主编, 围绕功能性食品的营养研究、开发应用、安全质量控制等问题展开讨论, 计划在 2016 年 7 月出版。

鉴于您在该领域的成就, 本刊编辑部及邓教授特邀请您为本专题撰写稿件, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。综述、实验报告、研究论文均可, 请在 2016 年 6 月 30 日前通过网站或 Email 投稿。我们将快速处理并优先发表。

投稿方式:

网站: [www.chinafoodj.com](http://www.chinafoodj.com)

Email: [jfoodsq@126.com](mailto:jfoodsq@126.com)

《食品安全质量检测学报》编辑部