

# 快速筛选技术的评价验证

赵博, 张庆合\*, 李红梅

(中国计量科学研究院, 北京 100029)

**摘要:** 快速筛选技术是指包括样品制备在内, 能够在较短时间内出具检测结果的行为, 也称之为快速检测技术。随着我国食品安全问题广受关注, 快速筛选技术便成为研究的重点。快速检测目前主要应用于食品中农、兽药残留, 微生物致病菌, 营养成分, 不明污染物等针对食品安全的现场快速检测及常规检测。本文介绍了分子光谱法、免疫分析方法、酶抑制法和生物传感器等几种快速筛选技术的研究进展以及在食品安全检测等领域的应用。随着快速筛选技术的不断发展使得快速检测方法及其相关仪器产品种类越来越多且原理复杂, 快速检测方法的质量控制和方法验证显得尤为重要。本文重点阐述了快速筛选技术与方法的评价验证, 其主要技术参数包括: 敏感度、阴性和阳性界限值的准确性、选择性和特异性、检出限、定量限、重复性和再现性等, 并对其发展前景进行了展望。

**关键词:** 快速筛选技术; 食品安全; 发展应用; 评价验证

## Development and application of rapid screening technology and its evaluation and authentication profiles

ZHAO Bo, ZHANG Qing-He\*, LI Hong-Mei

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**ABSTRACT:** Rapid screening technology means, including sample preparation, a kind of technology to be able to issue the test results in a short time. It was also defined as rapid detection technology. It was mainly used in food, pesticide, veterinary drug residues, microbial pathogens, nutrients, and unknown contaminants, etc. Rapid screening technology had become the focus of research as well as the food safety in our country. Several technologies of the rapid screening method were mainly introduced, including molecular spectrometry, immunoassay, enzyme inhibition method, and biological sensors, etc. With the continuous development of rapid screening technology, rapid detection methods and related equipment products appeared more and more, and their quality control and validation method turned to be particularly important. In this paper, the development and application of the rapid screening technology in food safety were expounded as well as its evaluation methods. Its main technical parameters included sensitivity, the accuracy of the negative and positive threshold, selectivity and specificity, detection limit, quantitative limit, repeatability and reproducibility, etc. The development in the future was prospected as well.

**KEY WORDS:** rapid screening technology; food safety; development and application; evaluation authentication

随着食品、环境、公共安全等领域检测需求的快速发展, 常规化学及仪器检测技术已远不能满足现场快速判定

的需要, 尤其对于大批量样品的常规检测, 耗时长、成本高、前处理复杂。此时, 快速筛选技术便成为了研究的重点。

\*通讯作者: 张庆合, 博士, 研究员, 主要研究方向为分离科学与技术、食品安全等。E-mail: zhangqh@nim.ac.cn

\*Corresponding author: ZHANG Qin-He, Professor, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China. E-mail: zhangqh@nim.ac.cn

快速筛选技术指采用物理学、化学、生物学等原理或方法,在短时间内检测出被检物质是否处于正常状态,检测得到的结果是否符合标准规定值,被检物质本身是不是有毒、有害物质,由此而发生的操作行为也称之为快速检测。其特点是需要的检测时间相对较少,对仪器设备等条件的要求不高,能够携带到交易生产现场或在线实施检测。目前主要应用于食品中农、兽药残留,微生物致病菌,营养成分,不明污染物等针对食品安全的现场快速检测及常规检测。

## 1 快速筛选技术的分类及应用发展

按照快速筛选技术的方法原理分类,可将其主要分为以下几种类型:①经典分子光谱法;②免疫分析方法;③基于酶抑制的检测方法;④生物传感器;⑤其他快速检测仪器。

### 1.1 分子光谱分析法

分子光谱法是基于物质分子与电磁辐射作用时,物质内部发生了量子化能级之间的跃迁,测量由此产生的反射、吸收或散射辐射的波长和强度而进行分析的方法,称为分子光谱分析法。如紫外、可见分光光度法,分子荧光光谱法,近红外及拉曼光谱法,核磁共振波谱法等。分子光谱具有操作方法简单、检测速度快、光谱信息丰富、应用范围广、对环境污染小的优点,这使得其在快速检测、现场分析以及工业在线分析领域发展前景十分广阔。例如利用紫外分光光度法快速测定乳制品中硝酸盐含量<sup>[1]</sup>。分子荧光光谱法在食品安全领域中起到质量控制的作用<sup>[2]</sup>,还可鉴别食品的真伪。Sádecká等<sup>[3]</sup>采用前表面技术获得饮料的总荧光光谱和同步荧光光谱,结合主成分分析和聚类分析技术对饮料分类。分子荧光光谱法对检查药物残留及鉴别污染物也有着很好的应用<sup>[4]</sup>。近红外是一种新兴的快速光谱技术,广泛应用于农业、食品、制药等行业<sup>[5]</sup>,如水分子结合态的解析、淀粉的检测和水果内部品质的测定<sup>[6,7]</sup>。拉曼光谱技术具有样品无需前处理、时间短、灵敏度高等优点,在食品安全及农畜产品质量安全等检测中具有很好的应用前景<sup>[8,9]</sup>。随着分子光谱硬件以及化学计量学软件等技术的不断发展,分子光谱在食品安全分析中将发挥越来越重要的作用。

### 1.2 免疫分析法

免疫分析法是利用抗原抗体特异性结合反应检测各种物质的分析方法。免疫分析方法包括放射免疫、酶联免疫、荧光免疫、化学发光免疫和胶体金标免疫等。其中酶联免疫检测技术(ELISA)和胶体金检测试纸条使用广泛。

20世纪80年代开始,农药的免疫检测技术作为快速筛选检测方法得到了快速发展。目前几乎所有农药类别都建立了ELISA法,检测样本以农产品、食品、饲料和环境

样本为主<sup>[10,11]</sup>。ELISA技术不断发展以及全自动酶标分析仪的应用,使其特异度与敏感度有很大提高,在食品检测及农药残留等领域中的应用大大扩展<sup>[12,13]</sup>。如对拟除虫菊酯类单一农药残留和多残留酶免疫分析方法的研究<sup>[14]</sup>。

胶体金免疫层析技术近几年在食品检测领域中发展较快。国内近几年在食品检测中,如食品质量控制,食品安全检测等领域应用较为广泛<sup>[15]</sup>。邓省亮等<sup>[16]</sup>应用胶体金免疫层析技术建立了一种快速检测食品中黄曲霉毒素B1的方法。杜宗绪<sup>[17]</sup>在文章中综述了胶体金免疫层析技术在牛奶中14种 $\beta$ -内酰胺类抗生素、5种四环素类抗生素、1种氨基糖苷类抗生素、1种氯霉素类抗生素、2种大环内酯类抗生素、12种磺胺类抗生素和11种氟喹诺酮类抗生素残留检测的应用。随着科学技术的发展,胶体金免疫层析技术的发展潜力巨大,且市场和应用前景广阔。在未来的食品检测中,胶体金免疫层析技术将会成为重要的技术手段,并将引起世界各国的广泛重视。

### 1.3 基于酶抑制的检测方法

酶抑制快速检测技术前处理简单、检测时间短、不需昂贵的仪器、易于掌握推广,特别适合现场检测以及大批样品的筛选。但是酶抑制法测定样品和农药种类有限,并且该方法使用的酶、底物、显色剂有一定的特异性,需控制的条件比较多,易出现假阳性或假阴性现象<sup>[18]</sup>。

由于该方法对所测样品的前处理要求简单,多数样品可直接用于测试,在我国得到了较快的推广应用。例如酶抑制法快速检测有机磷农药残留<sup>[19]</sup>,通过酶抑制率法指导快速、准确的完成农药残留速测<sup>[20]</sup>等。针对采用酶抑制法检测大蒜中有机磷和氨基甲酸酯类农药残留存在假阳性的问题,王文等<sup>[21]</sup>提出了一种改进后的检测方法。对空白大蒜样品、农药水溶液样品分别进行不同pH值条件下的检测实验。另外,谢俊平等<sup>[22]</sup>概述了酶抑制法快速检测食品中重金属的原理和方法,避免了传统重金属检测方法难以用于现场检测的尴尬。Shukor<sup>[23]</sup>提出了另一种新的检测蛋白酶——丝氨酸蛋白酶。

### 1.4 生物传感器

生物传感器是将生物识别元件和信号转换元件紧密结合,从而检测目标化合物的分析装置<sup>[24]</sup>。近些年,国内外对于生物传感器在农药残留检测领域中具有一定的研究进展。根据不同原理,检测农药残留生物传感器的种类很多,如基于酶抑制原理的生物传感器、有机磷水解酶生物传感器、免疫传感器、基于人工模拟生物分子的生物传感器和全细胞传感器等<sup>[25]</sup>,当然其优缺点也各不相同。

抗生素滥用导致的细菌耐药性的增强,给人类生活带来巨大挑战。生物传感器凭借其优点,在抗生素研究领域也有着重要的应用价值<sup>[26]</sup>。Fernández等<sup>[27]</sup>报道了使用表面等离子共振装置检测牛奶中不同种类抗生素的方法。他们

发明出一种小巧、便携式的 6 通道传感器用于现场检验。

### 1.5 其他快速检测设备

太赫兹光谱技术是介于微波和红外之间的远红外光谱分析技术。太赫兹波的透视性、安全性和光谱分辨本领等特性,使太赫兹光谱技术在物理、化学、无损检测、通信、生物医学、安全等方面都有着广阔的应用前景。

秦建平<sup>[28]</sup>提出了利用太赫兹时域光谱技术对不同等级面粉和过氧化苯甲酰进行检测的方法,通过实验证明太赫兹时域光谱检测方法具有检测周期短、检测精度高、操作简单等特点。戴浩等<sup>[29]</sup>利用太赫兹时域光谱(terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS)技术在常温下研究了 6 种临床常用抗生素类药物,获得了它们的太赫兹吸收光谱。

随着快速筛选技术的不断发展使得快速检测方法及其相关仪器产品种类越来越多,且原理复杂,因此快速检测方法的质量控制<sup>[30]</sup>和方法验证显得尤为重要。

## 2 快速筛选技术的评价验证

方法验证评价的主要技术参数体现在灵敏度与稳定性、阴性和阳性界限值的准确性、选择性和特异性、检出限、定量限、重复性和再现性等。目前,国内外对检测方法的评价验证的研究逐渐成为热点,且对评价验证的要求或指导性说明也越来越广泛<sup>[31]</sup>。

评价验证可分为定性和定量分析<sup>[32-34]</sup>,其中最普遍且应用最广的主要技术参数见表 1。

表 1 定性定量分析常见技术参数  
Table 1 Common technical parameters of qualitative and quantitative analysis

定性分析	定量分析
假阴性/假阳性率	精密度和准确度
敏感度和特异度	敏感度和特异度
选择性	选择性
检测限	检测限
临界值	线性和范围
不确定区间	不确定度
稳定性	稳定性

定性与定量评价技术参数的主要区别在于:采用定性检测评价一般只需要提供对检测结果的一个判断,如假阴性或假阳性,不需要提供具体数值;而定量检测评价需要提供具体的检测限以上的检测数据。

### 2.1 假阴性/假阳性率

在样品检测中,由于各种因素干扰使得本应为阴/阳性反应的样品呈现出阳/阴性反应的数量占总样品量的百分数。

表 2 检测结果的表示

Table 2 The representation of test results

实际状态	检测结果		合计
	阳性	阴性	
阳性	a	b	a+b
阴性	c	d	c+d
合计	a+c	b+d	a+b+c+d

假阴性率与敏感度相对应,即敏感度=1-假阴性率=c/(a+c)。假阳性率与特异度相对应,即特异度=1-假阳性率=b/(b+d)。

### 2.2 敏感度

#### 2.2.1 定义

指某方法对单位浓度或单位量待测物质变化所致的响应量变化程度,它可以用仪器的响应量或其他指示量与对应的待测物质的浓度或量之比来描述。在实际工作中常以校准曲线的斜率度量敏感度。

在一定试验条件下,一个方法的敏感度具有相对稳定性,但敏感度可因试验条件的改变而发生变化<sup>[35,36]</sup>。

#### 2.2.2 评价方法

根据敏感度的定义对其进行表示,可以将仪器响应量与待测物质的浓度或量通过校准曲线定量地联系起来。校准曲线的直线部分公式(1)如下:

$$A = kc + a \tag{式 1}$$

式(1)中:  $k$  为方法的敏感度,  $k$  越大,方法敏感度越高;  $c$  为待测物质的浓度;  $a$  为校准曲线的截距;  $A$  为仪器的响应量。

### 2.3 准确度

#### 2.3.1 定义

准确度指在一定测量条件下测量值与被测定量的真值之间的一致性。反映一个分析方法或分析测量系统的误差,用准确度来表示,这是一个综合指标,包括了系统误差和随机误差。准确度用绝对误差或相对误差表示,其决定着这个分析结果的可靠性<sup>[37,38]</sup>。计算公式如下:

$$E = x - A \tag{式 2}$$

$$\text{相对误差}(\%) = \frac{x - A}{A} \times 100 \tag{式 3}$$

式(2)、式(3)中:  $E$  为误差,  $x$  为测定值,  $A$  为真值。合理的表示准确度应该是测定值  $x$  与真值  $A$  之间的差异。同一个样品无限次测定的均值将接近于确切的测定值  $x$ ,实际工作中只能用有限测定次数就均值  $x$  来估计测定值  $x$ ,因此反映准确度的误差是总误差,即主要由系统误差和随机误差决定。因此,改善分析的精密度和尽可能消除分析过程中的系统误差,是提高分析数据可靠性的主要措施。

#### 2.3.2 评价方法

评价分析方法和测量系统的准确度,可以添加标准

物质测定回收率或测量基体标准物质等两种方法评价。回收率的测定是目前实验室中常用而又方便的确定准确度的方法,即在样品中加入标准物质,再测定其回收率<sup>[39,40]</sup>,但是由于基质匹配、提取等问题,会导致与实际测量结果不一致,另外通过多次回收试验还可发现检测方法的系统误差。测量基体标准物质方法能够根据结果评价分析的准确度。

其计算公式(4)如下:

$$P(\%) = \frac{x_1 - x_0}{m} \times 100 \quad (\text{式 } 4)$$

式(4)中:  $x_1$  为加标样品的测定值;  $x_0$  为未知样品的测定值;  $m$  为加入标准物质的量;  $P$  为加入的标准物质的回收率。

## 2.4 精密度、重复性、再现性和平行性

### 2.4.1 定义

精密度用于反映随机误差的大小,在一定条件下对同一被测物多次测定,将测定的结果与平均值进行比较,其偏离的程度即为精密度。

为了满足某些特殊需要,需要保证检测具有重复性、平行性和再现性。重复性,指在同一实验室内,当分析设备、分析人员和分析时间中至少有1项不相同,用同一分析方法对一样品进行的2次或2次以上独立测定结果之间的符合程度。

平行性,指在同一实验室中,当分析设备、分析人员和分析时间都相同时,用同一分析方法对一样品进行的双份或多份平行样测定结果之间的符合程度。

再现性,指用同一分析方法在不同实验室(分析设备、分析人员、分析时间不相同),对一样品进行的多次测定结果之间的符合程度。因此,室间精密度即再现性,而室内精密度即重复性及平行性的总和。

### 2.4.2 评价方法

通常由一整批分析结果中得到的精密度往往高于分散在一段时间里的结果的精密度<sup>[41,42]</sup>。精密度可因与测定有关的试验条件的改变而有所变动。因此,最好将组成固定的样品分成若干批,然后分散在一段适当长的时间里进行分析。必要时应取2个或2个以上的不同浓度水平的样品进行分析方法的精密度的检查。

分析结果的精密度与样品中待测物质的浓度有关。经常用分析标准溶液的办法(这与分析实际样品的精密度可能存在一定的差异),在质量保证和质量控制中,可了解分析方法的精密度。在对标准偏差作较好估计时,需要足够的测量次数。因为标准偏差的可靠程度受测量次数的影响,以准确确定某种方法的精密度。精密度与被测物的浓度有关,因此常用相对标准偏差表示<sup>[43]</sup>或标准差表示。

## 2.5 选择性和专一性

定量和定性分析中,混合物中一种成分的测量可能受到另一种成分的干扰。这说明这个方法对于所测量的组

分不具有选择性。当一种分析方法可以得出混合物中的各组分的准确分析结果,这个分析方法具有完全选择性。

一个选择性的方法是由一系列专一性的测量组成的。对于一个方法的选择性和专一性也可以有一个数量的描述。

## 2.6 检出限

### 2.6.1 定义

检出限是指对某一特定的分析方法在给定的置信水平内可以从样品中检测待测物质的最小浓度或最小量,即分析方法所能识别的极限。

### 2.6.2 评价方法

对于一般试验的规定:当空白测定次数  $n < 20$  时,检出限公式(5)如下:

$$L = 2\sqrt{t_f} S_b \quad (\text{式 } 5)$$

式(5)中:  $L$  为最小检出限;  $t_f$  为显著性水平为0.05(单测)自由度为  $f$  时的  $t$  值;  $S_b$  为空白平行测定正标准偏差;  $f$  为批内自由度;  $f = m(n - 1)$ ;  $n$  为平行测定个数;  $m$  为重复测定次数。

当空白测定次数  $n > 20$  时,计算公式(6)如下:

$$L = 4.6 \times S_b \quad (\text{式 } 6)$$

式(6)中:  $S_b$  为当  $n > 20$  时空白平行测定标准差;  $L$  为检出限。检出限为空白值正标准差的4.6倍给出置信水平为95%。

分光光度法的规定<sup>[44]</sup>:用分光光度法检测样品,以扣除空白值后的吸光值为0.01相对应的浓度值为检测限。

$$\frac{\text{检出限}(L)}{0.01} = \frac{\text{标准质量}}{\text{标准吸光度} - \text{空白吸光度}}$$

$$\text{检出限}(L) = \frac{\text{标准质量} \times 0.01}{\text{标准吸光度} - \text{空白吸光度}}$$

## 2.7 定量限

### 2.7.1 定义

是指样品中被测物能被定量测定的最低量,其测定结果应具有一定的准确度。定量限体现了分析方法是否具备灵敏的定量检测能力。杂质定量试验,需考察方法的定量限,以保证含量很少的杂质能够被准确测出。

### 2.7.2 评价方法

常用信噪比法确定定量限<sup>[45,46]</sup>。一般以信噪比为10:1时相应的浓度或注入仪器的量确定定量限。

直观法:直观评价可以用于非仪器分析方法,也可用于仪器分析方法。定量限一般通过对一系列含有已知浓度被测物的试样进行分析,在准确度和精密度都符合要求的情况下,来确定被测物能被定量的最小量。

信噪比法:用于能显示基线噪音的分析方法,即把已知低浓度试样测出的信号与噪声信号进行比较,计算出可检出的最低浓度或量。一般可信噪比为10:1。

其他方法有基于工作曲线的斜率和响应的标准偏差进行计算的方法等。无论用何种方法,均应用一定数量的试样,其浓度为近于或等于定量限,进行分析,以可靠地

测定定量限。

### 3 快速筛选技术的展望

随着对食品安全问题的日益凸现和重视, 复杂的前处理过程以及复杂的仪器分析方法已无法满足大量样品快速、及时检测的需求。同时, 随着检测领域的发展, 检测工作也不能仅仅停留在实验室范围内进行, 应扩展到生产、加工等多个环节上。简洁、快速、敏感度高、高通量且低成本的仪器及分析方法, 成为了检测技术中必然的趋势和发展方向。因此, 快速筛选技术在今后的科研领域中有着举足轻重的地位<sup>[47,48]</sup>, 主要表现在:

1) 检测速度的要求不断提高: 随着我国经济的快速发展, 商品经济迅猛且食品安全事件频发, 对现场快速检测有着比较特殊的需求。样品量的增多以及检测现场条件的要求等都需要在保证检测精度的前提下在短时间内完成检测结果<sup>[49]</sup>。

2) 检测敏感度的要求不断提高: 随着食品安全问题的倍受重视, 人们对食品中有毒、有害物质的限制也越来越严格。因此, 快速检测方法的敏感度应与普通分析仪器的敏感度相同甚至更高。

3) 检测仪器的便携化、微型化: 在实际监测工作中, 需要检测的产品、半成品以及生产环节很多, 全部采集样品送往实验室检测并不现实。因此, 要求检测方法的快速简便及现场的可操作程度, 必然要求检测仪器的便携式、微型化, 且操作方法简单方便。从而真正体现筛选技术的快速、准确、方便等优势。

采用快速筛选的方法, 能够增加样品检测量, 扩大食品安全控制范围, 同时对快速检测检出的有毒、有害阳性样品或超出国家卫生安全标准的样品再送往实验室做进一步检测<sup>[50]</sup>, 既提高了监测效率, 又减轻了实验室的工作压力, 合理利用了实验室资源。

#### 参考文献

- [1] 林静佳, 胡国媛, 李荔等. 紫外分光光度法快速测定乳制品中硝酸盐含量[J]. 中国卫生检验杂志, 2012, 22(8): 1757-1763.  
Lin JJ, Hu GY, Li L, *et al.* Rapid determination of nitrate content in dairy products by UV - spectrophotometric method [J]. Chin J Health Lab Tech, 2012, 22(8): 1757-1763.
- [2] Gatellier PH, Santé-Lhoutellier V, Portanguen SA. Use of meat fluorescence emission as a marker of oxidation promoted by cooking [J]. Meat Sci, 2009, 83(4): 651-656.
- [3] Sádecká J, Tóthová PM. Classification of brandies and wine distillates using front face fluorescence spectroscopy [J]. Food Chem, 2009, 117( 3): 491-498.
- [4] 孙艳辉, 吴霖生, 张余, 等. 分子荧光光谱技术在食品安全中的应用[J]. 食品工业科技, 2011, 32(5): 436-439.  
Sun YH, Wu SS, Zhang C, *et al.* Application of molecule fluorescence spectroscopy in food safety [J]. Sci Tech Food Ind, 2011, 32(5): 436-439.
- [5] 袁天军, 王家俊, 者为, 等. 近红外光谱法的应用及相关标准综述[J]. 中国农学通报, 2013, 29(20): 190-196.
- [6] Yun TJ, Wang JJ, Zhe W, *et al.* The Review of Application and Standards of Near Infrared Spectrometry [J]. Chin Agr Sci Bull, 2013, 29(20): 190-196.
- [6] 傅露萍, 应义斌, 刘燕德, 等. 水果坚实度的近红外光谱检测分析试验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(6): 1038-1041.  
Fu XP, Ying YB, Liu YD, *et al.* Detection of pear firmness using near infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2006, 26(6): 1038-1041.
- [7] 刘燕德, 高荣杰, 孙旭东. 便携式水果内部品质近红外检测仪研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2874-2878.  
Liu YD, Gao RJ, Sun XD. Review of portable NIR instruments for detecting fruit Interior quality [J]. Spectrosc Spect Anal, 2010, 30(10): 2874-2878.
- [8] 郑晓春, 彭彦昆, 李永玉, 等. 拉曼光谱技术在农畜产品品质安全检测中的进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5 (3): 665-673.  
Zheng XC, Peng YK, Li YY, *et al.* Advancement of Raman spectroscopy technique in detection of agro-products'quality and safety [J]. J Food Saf Qual, 2014, 3(5): 665-673.
- [9] 刘燕德, 刘涛, 孙旭东, 等. 拉曼光谱技术在食品质量安全检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 11(30): 3007-3012.  
Liu DY, Liu T, Sun XD, *et al.* Application of Raman spectroscopy technique to food quality and safety determination [J]. Spectrosc Spect Anal, 2010, 30 (11): 3007-3012.
- [10] 刘冰, 魏松红, 尹晓东, 等. 农药残留酶联免疫吸附分析技术研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(21): 6484-6515.  
Liu B, Wei SH, Yin XD, *et al.* Progress of enzyme-linked immunosorbent analysed in pesticide residue [J]. J Anhui Agr Sci, 2007, 35(21): 6484-6515.
- [11] 刘凤翥, 苏海涛, 贾军燕, 等. 酶联免疫法在农药残留检测中的应用[J]. 农业工程技术, 2013, 6: 38-42.  
Liu FZ, Su HT, Jia JY, *et al.* Application of enzyme-linked immunosorbent analysed in pesticide residue [J]. Agr Eng Tech, 2013, 6: 38-42.
- [12] 杜小粉, 董全. 酶联免疫吸附分析技术及其在食品农药残留检测中的应用[J]. 食品科学, 2009, 30(17): 330-333.  
Du XF, Dong Q. Application of enzyme-linked immunosorbent assay in detection of pesticide residues in foods [J]. Food Sci, 2009, 30(17): 330-333.
- [13] 张国范. 酶联免疫分析法在食品农药残留检测中的应用[J]. 中国医药指南, 2013, 11(28): 595-596.  
Zhang GF. Application of enzyme-linked immunosorbent assay in detection of pesticide residues in foods [J]. China Med Guide, 2013, 11(28): 595-596.
- [14] 王春梅, 程敬丽, 刘毅华, 等. 拟除虫菊酯类农药酶免疫分析方法研究进展[J]. 农药学学报, 2008, 10(1): 15-22.  
Wang CM, Cheng JL, Liu YH, *et al.* Progress of enzyme immunoassays for pyrethroids insecticides [J]. Chin J Pest Sci, 2008, 10(1): 15-22.
- [15] 吴刚, 姜瞻梅, 霍贵成, 等. 胶体金免疫层析技术在食品检测中的应用 [J]. 食品工业科技, 2007, 28(12): 216-218.  
Wu G, Jiang ZM, Huo GC, *et al.* Application of colloidal gold immunochromatography assay on food [J]. Sci Tech Food Ind, 2007, 28(12): 216-218.

- [16] 邓省亮, 赖卫华, 许杨. 胶体金免疫层析技术快速检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(2): 232-236.  
Deng SL, Lai WH, Xu Y. Study on gold immunochromatography assay for rapid detection of aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. Food Sci, 2007, 28(2): 232-236.
- [17] 杜宗绪. 胶体金免疫层析技术在牛奶抗生素残留检测中的应用[J]. 山西农业科学, 2013, 41(7): 762-766.  
Du ZX. Application of Colloidal gold immunochromatography assay on milk antibiotic residues [J]. J Shanxi Agr Sci, 2013, 41(7): 762-766.
- [18] 王浩莲. 酶抑制法快速检测蔬菜中有机磷和氨基甲酸酯类农药残留[J]. 山西农业科学, 2011, 39(2): 156-158.  
Wang HL. Study on detection of organophosphorus pesticide residue in vegetables by enzyme inhibition method [J]. J Shanxi Agr Sci, 2011, 39(2): 156-158.
- [19] 邱朝坤, 刘晓宇, 任红敏, 等. 酶抑制法检测蔬菜中有机磷农药残留[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 40-42.  
Qiu CK, Liu XY, Ren HM, *et al.* The rapid detection of Enzyme inhibition method of the Organic phosphorus pesticide residues in vegetables [J]. Food Mach, 2010, 26(2): 40-42.
- [20] 李春焕. 酶抑制率法农残速测操作技术[J]. 陕西农业科学, 2013, (3): 274-235.  
Li CH. The operation of the rapid determination technology in pesticide residues of enzyme inhibition method [J]. Shanxi J Agr Sci, 2013, (3): 274-235.
- [21] 王文, 刘瑾, 盛伟楠, 等. 采用酶抑制法检测大蒜中农药残留的改进方法[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 135-139.  
Wang W, Liu J, Sheng WN, *et al.* An improved enzyme inhibition method for detection of peptide residues in garlic [J]. Food Sci, 2013, 34(12): 135-139.
- [22] 谢俊平, 卢新. 酶抑制法快速检测食品中重金属研究进展[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(8): 220-223.  
Xie JP, Lu X. Advances on the technique of rapid determination of heavy metals by enzyme inhibition in the contaminated foods [J]. Food Res Dev, 2010, 31(8): 220-223.
- [23] Shukor MY, Baharom NA, Masdor NA. The development of aninhibitive determination method for zinc using a serine protease [J]. J Environ Biol, 2009, 30(1): 17-22.
- [24] Guilbault GG, Pr avda M, Kreuzer M. Biosensors-42 years and counting [J]. Anal Lett, 2004, 37: 14481-14496.
- [25] 姚学鹏, 刘绍琴. 生物传感器用于农药残留检测的研究进展: 现状, 挑战及未来展望[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(1): 54-60.  
Yao XP, Liu SQ. Biosensors for detection of pesticide residues: current status, challenges and future perspectives [J]. J Food Saf Qual, 2013, 4(1): 54-60.
- [26] 顿文涛, 李勉, 毕庆生, 等. 用于抗生素检测的生物传感器研究进展[J]. 生物技术通报, 2013, (6): 71-74.  
Dun WT, Li M, Bi QS, *et al.* Research progress on biosensors for antibiotic detection [J]. Biotechnol Bull, 2013, (6): 71-74.
- [27] Fernández F, Hegnerová K, Piliarik M, *et al.* A label-free and portable multichannel surface plasmon resonance immunosensor for on site analysis of antibiotics in milk samples [J]. Biosen Bioelect, 2010, 26(4): 1231-1238.
- [28] 秦建平, 牛波, 张元, 等. 太赫兹波谱检测面粉增白剂的研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(2): 39-41.  
Qin JP, Niu B, Zhang Y, *et al.* Research on detecting flour brightener by terahertz spectrum [J]. Sci Technol Cereal Oil Food, 2013, 21(2): 39-41.
- [29] 戴浩, 徐开俊, 金随兵, 等.  $\beta$ -内酰胺类抗生素药物的太赫兹光谱[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 90-95.  
Dai H, Xu KJ, Jin BB, *et al.* Terahertz spectroscopy of  $\beta$ -lactam antibiotics [J]. Infra Laser Eng, 2013, 42(1): 90-95.
- [30] 王妮. 蔬菜与水果农残检测中的质量控制措施[J]. 现代农业科技, 2011, (9): 156-157.  
Wang T. The quality control measures of pesticide residues detection in vegetables and fruits [J]. Mod Agr Sci Tech, 2011, (9): 156-157.
- [31] 岳振峰, 张志旭. 日本食品中农药残留等检测方法评价指南[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(2): 323-327.  
Yue ZF, Zhang ZX. Japan guidance for the evaluation on the validity of the method for testing residues of pesticides and other substances in food [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(2): 323-327.
- [32] Prof F, Xavier RF, Itziar RC. Validation of qualitative analytical method [D]. Tarragona: Universitat Rovirai Virgili, 2006: 17-285.
- [33] 孟祥艳. 富铬酵母中铬的定量定性分析的研究概况[J]. 中国食品添加剂, 2007, (5): 157-160.  
Meng XY. Study on qualiyative and quantitative analysis of enriched brewer's yeast [J]. China Food Addit, 2007, (5): 157-160.
- [34] 王明华, 陈建华. 色谱技术在药物定性分析应用中的研究进展[J]. 抗感染药学, 2013, 10(4): 251-254.  
Wang MH, Chen JH. Research advances on application of chromatography in qualitative analysis of drugs [J]. Anti Infect Pharm, 2013, 10(4): 251-254.
- [35] 张书永. 免疫胶体金快速诊断技术的临床应用与质量控制[J]. 中国医学装备, 2013, 10(5): 37-39.  
Zhang SY. Application of immune colloidal gold technique in disease diagnosis and its quality control [J]. China Med Eq, 2013, 10(5): 37-39.
- [36] 孙国新. 紫外可见分光光度计的测光准确度[J]. 分析仪器, 1994, (3): 45.  
Sun GX. The metering accuracy of uv-vis spectrophotometer [J]. Anal Instrum, 1994, (3): 45.
- [37] 吴开华, 杜林峰. 电感耦合等离子体质谱法测定灌溉水中 7 种重金属及其定性分析[J]. 现代科学仪器, 2011, (1): 104-107.  
Wu KH, Du LF. The determination and qualitative analysis of heavy metals in irrigation water by ICP-MS [J]. Modern Sci Inst, 2011, (1): 104-107.
- [38] Brodsky A. Accuracy and detection limits for bioassay measurements in radiation protection. [D]. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1986.
- [39] 赵贵平, 蒋宏键. 蔬菜中 25 种农药残留的 LC-MS/MS-QTRAP 定量定性同时分析方法研究[J]. 分析测试学报, 2007, 26: 244-247.  
Zhao GP, Jiang HJ. Quantify and determination analysis of the twenty-five pesticide residues in vegetable by liquid chromatography-electrospray tandem quadrupole mass spectrometry with linear trap [J]. J Instrum anlysis, 2007, 26: 244-247.
- [40] 纪淑娟, 赵丽丽, 冯辉. 蔬菜有机磷农药残留快速检测方法的评价[J]. 中国蔬菜, 2001, (2): 6-8.  
Ji XJ, Zhao LL, Feng H. Evaluation of the rapid method for testing of organophosphorus pesidue in vegetable [J]. China Veg, 2001, (2): 6-8.
- [41] 黄志勇, 袁园, 吕禹泽. 蔬菜中有机磷农药残留的两种酶抑制快速检测方法的比较研究[J]. 食品科学, 2003, 24(8): 135-137.  
Huang ZY, Yuan Y, LV YZ. Study on two kinds of enzyme inhibition

- rapid detection methods of organophosphorus pesticide residues in vegetables [J]. *Food Sci*, 2003, 24(8): 135–137.
- [42] 鲍蕾. 黄曲霉毒素的生物积累及其检测技术质量控制标准体系研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- Bao L. Study of biological conditions of aflatoxin production and quality assurance in aflatoxin analysis [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [43] 孙国新. 药品检验对分光光度计的要求与评价 [J]. *分析测试仪器通讯*, 1997, 3(7): 150–153.
- Sun G. Demands and appraisal for UV/VIS spectrophotometer in drug control [J]. *Anal Test Instrum Commun*, 1997, 3(7): 150–153.
- [44] 郭盈芬, 农馥俏, 干宁军. 甘蔗中乐果、特丁磷农药残留的 ASE-HPLC-MS/MS-QTRAP 定量定性分析方法的建立 [J]. *标准科学*, 2014, (3): 52–54.
- Guo YQ, Nong FQ, Gan NJ. Determination of dimethoate and terbufos pesticide residues in sugarcane by ASE-HPLC-MS/MS-QTRAP [J]. *Stand Sci*, 2014, (3): 52–54.
- [45] 周小玲. 茶多糖的定量、定性及生物活性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- Zhou XL. Quantifying, characteristics and bioactivities of tea polysaccharide [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [46] 卢爱民, 曹德康, 李增德. 食品快速检测技术在日常卫生监督中的应用及发展方向 [J]. *现代科学仪器*, 2013, (2): 13–16.
- Lu AM, Cao DK, Li ZD. The application and development orientation of the fast detection technique of food in routine hygiene supervision [J]. *Mod Sci Instrum*, 2013, (2): 13–16.
- [47] Wang XW, Zhang L, Jin LQ, *et al.* Development and application of anligonucleotide microarray for the detection of food-borne bacterial pathogens [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2007, 76(1): 225–233.
- [48] Min JK, Jee YS, Yong TL. Development of a dipstick enzyme-linked immunosorbent assay for the organophosphorus insecticide parathion-methyl [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2006, 41(8): 927–932.
- [49] Singh SB, Kulshrestha G. Determination of Endosulfan Residues in Eggplant (*Solanum melongena*) by ELISA [J]. *J Environ Sci*, 2004, 39(3): 411–418.
- [50] Yang JY, Wang H, Jiang YM, *et al.* Development of an enzyme-linked immuno-sorbent assay (ELISA) method for carbofuran residues [J]. *Molecules*, 2008, 13(4): 871–881.

(责任编辑: 张宏梁)

### 作者简介



赵 博, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为食品安全。

E-mail: zhaobo@nim.ac.cn



张庆合, 博士, 研究员, 主要研究方向为分离科学与技术、食品安全等。

E-mail: zhangqh@nim.ac.cn