

# 试纸法在食品安全快速检测中的研究进展

程楠<sup>1</sup>, 何景<sup>2</sup>, 董凯<sup>1,3</sup>, 罗云波<sup>1</sup>, 许文涛<sup>1,2,4,\*</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 农业部转基因生物食用安全监督检验测试中心, 北京 100083; 3. 北京福德安科技有限公司, 北京 100083; 4. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083)

**摘要:** 试纸法作为一种简便、高效、低成本的检测手段, 其发展为食品安全快速检测提供了有效的保障。本文从纸层析技术、化学比色技术、酶抑制技术、免疫分析技术、生物化学技术以及分子生物技术6个与试纸法结合的快速检测技术出发, 对试纸法的研究现状进行梳理; 以纸基微流控芯片、纳米颗粒标志物和试纸分析仪为例分析了典型的试纸法创新途径; 最后对试纸法未来的发展趋势进行展望。

**关键词:** 试纸法; 食品安全; 快速检测

## A Review on Research Progress of Test Strips for Rapid Food Safety Detection

CHENG Nan<sup>1</sup>, HE Jing<sup>2</sup>, DONG Kai<sup>1,3</sup>, LUO Yunbo<sup>1</sup>, XU Wentao<sup>1,2,4,\*</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Supervision, Inspection and Testing Center of Genetically Modified Organisms Food Safety, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China; 3. Fudean of Beijing Technology Co. Ltd., Beijing 100083, China; 4. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, Beijing 100083, China)

**Abstract:** As a simple, efficient and low-cost detection approach, test strips provide an effective guarantee for the rapid detection of food safety. This article reviews the development of test strips based on paper chromatography, chemical colorimetry, enzyme inhibition, immunoassay, biochemistry and molecular biological technology. The applications of innovative approaches such as microfluidic paper-based analytical devices, nano-material markers and paper analyzer in test strips are summarized. Finally, future prospects in this area are discussed.

**Key words:** test strip; food safety; rapid detection

中图分类号: TS201.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)01-0256-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201501049

近年来我国的重大食品安全事件屡见不鲜, 要解决这些食品安全问题, 就需要从农田到餐桌对食品的生产、加工、流通和销售等各个环节进行全程监控和管理。而现有的食品安全监督管理体系普遍建立在仪器分析的基础上, 不仅人力、物力消耗大, 时间成本高, 而且信息发布滞后, 导致监管部门很难对问题食品进行快速反映<sup>[1]</sup>。因此, 迫切需要大量能够满足现场、快速、准确、灵敏且成本低廉的食品安全分析检测技术。试纸法, 由于其制造和使用成本低、具有生物降解性和生物相容性、易涂层印迹、多孔纤维结构、凭借毛细管力无需其他外部动力、检测背景通常为白色便于化学比色和荧光检测等特点, 已成为一个非常令人关注的检测平台<sup>[2]</sup>。随着近几十年试纸法的不断发展, 与不同类型检测技术相结合的试纸可以对各种典型的食品污染物进行检测。

试纸法是根据经过特殊制备的试纸与待测成分进行

反应所显示的颜色、荧光或磁性变化对待测成分进行目视定性或者仪器定量分析的一种快速检测方法<sup>[2-3]</sup>。其制作方法比较简单, 通常是将配制好的反应液浸渍或涂划在纸基上, 并以适当的方式干燥而成试纸<sup>[4]</sup>。使用也很方便, 只需将待测物质滴加在试纸上或者将试纸的反应区浸没在待测溶液中即可完成检测, 使用者不需专门训练就能掌握。试纸法作为一种快速的现场检测方法, 具有制作简单、使用方便、价格低廉、灵敏性好、稳定性好、特异性强、反应迅速、无需设备、结果显示直观、一次性使用、不需检修维护等特点<sup>[5]</sup>, 在食品安全检测领域显示出良好的应用前景, 并有望成为最廉价的分析检测手段。

## 1 试纸法快速检测技术的发展与现状

目前, 与试纸法相结合的检测技术通常包括纸层析

收稿日期: 2014-03-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA101606)

作者简介: 程楠(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品安全快速检测。E-mail: GoodLuckChengNan@163.com

\*通信作者: 许文涛(1979—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品安全。E-mail: Xuwentao1111@sina.com

技术、化学比色技术、酶抑制技术、免疫分析技术、生物化学技术和分子生物学技术,常见的食品安全快速检测试纸主要有纸色谱、化学比色试纸、酶抑制试纸、免疫层析试纸、微生物试纸和核酸层析试纸等。

### 1.1 纸层析技术

纸层析技术又称纸色谱法,是试纸法最初的体现形式,早在20世纪40年代前后就出现了,直到1952年Martine和Synge因此项发明被授予“诺贝尔化学奖”后实现了纸色谱发展很大的突破<sup>[6]</sup>。在20世纪末21世纪初的20多年间,纸色谱在分析检测领域已经有了非常广泛的应用,从对有机物的检验发展到对无机物的检验,从定性检验发展到定量检验<sup>[7]</sup>。

纸色谱是用滤纸作为反应载体,将待测溶液用点样器或者毛细管滴加在纸上并视为固定相,在纸层析的作用下作为展开剂的有机溶剂进行移动,同时待测溶液也会随着展开剂的移动而移动,并且在水和有机溶剂两相之间待测溶液中的各组分进行溶解分配,各组分经过展开后在纸上形成互相分离的斑点。定性检测是通过把各组分的移动距离(Rf值)与已知样的移动距离进行比较;而定量检测则是将组分点取下来并用溶剂溶出,采用比色法或分光光度法来进一步完成定量<sup>[7]</sup>。例如,纸色谱目前可用于快速检测食品中的机磷农药<sup>[8]</sup>、金属离子<sup>[9]</sup>、氨基酸<sup>[10]</sup>、苏丹红<sup>[11]</sup>等物质。

### 1.2 化学比色技术

化学比色技术是指食品中待测物质与试纸上特定的化学试剂发生特异性的化学显色反应,继而将显色结果与标准比色卡进行颜色比对,从而实现定性或者半定量检测<sup>[5]</sup>。化学比色试纸的优点是制作成本低廉、生产周期较短、操作相对简便、显色反应迅速和结果显示直观等。不足之处是化学比色技术的灵敏度不高,很难对待测物质进行痕量检测;此外,此类方法非常依赖待测物质自身的化学反应条件,因此容易在检测过程中受到外部环境的干扰<sup>[4]</sup>。目前,化学比色试纸是应用最为广泛、技术最为成熟的快速检测方法,被普遍应用于食品中非法添加物质和农产品中化学有害物质的现场检测,如用化学比色试纸快速检测食品中的过氧化氢<sup>[12]</sup>、亚硝酸盐<sup>[13]</sup>、尿素<sup>[14]</sup>、工业碱<sup>[15]</sup>、二氧化硫<sup>[16]</sup>等物质。

### 1.3 酶抑制技术

酶抑制技术是以待测物质对酶的抑制作用为基础的一种快速检测方法,主要适用于重金属检测和农药残留检测,通常使用脲酶进行重金属检测<sup>[17]</sup>,使用植物酯酶、动物酯酶或胆碱酯酶进行农药残留检测<sup>[18]</sup>。其测定原理是作为底物的待测物质与相应酶的活性中心进行结合,从而使酶的性质和结构发生改变导致其活性降低,继而通过可识别的变化来实现对待测物质的检测,最常见的是通过颜色的变化进行判断。酶抑制试纸通常是将

酶和作为底物的待测物质分别固定在两片试纸上,然后使两片试纸相互接触,待测物质对酶的抑制作用会发生催化反应同时出现颜色的变化,据此对待测物质进行目视定性或定量的检测。这种方法具有操作简单、成本低廉等突出优势,适用于监管部门在农贸市场和超市等食品集散地进行现场快速检测。但由于在灵敏度和保存期等方面存在一定的局限性,假阳性和假阴性率较高,尤其在检测生姜、葱、蒜等农产品时容易受到干扰,因此只能在食品安全检测中作为初步筛选的依据。目前,欧美国家已将其作为田间实地检测和农药残留情况普查的基本手段,但是在我国应用的并不广泛<sup>[5]</sup>。

### 1.4 免疫分析技术

免疫分析技术是以医学中的血清学检测手段为基础,利用抗原与抗体之间反应的高度专一性来完成检测<sup>[19]</sup>。免疫层析试纸有夹心法、竞争法和间接法3种,以夹心法为例,其原理是将待测物质的特异性抗体交联到有色物质(如纳米金)上以及试纸条(检测线)上,当“有色物质—抗体”和抗原结合后,该复合物再与纸上包被的抗体相结合,形成类似于三明治的夹心结构。通过观察检测线和控制线颜色的变化实现目视定性检测,根据检测线颜色的深浅与待测物的含量呈正比的原则进行定量的检测,如果没有待测物则只有控制线有颜色<sup>[20]</sup>。

免疫分析技术广泛用于检测农兽药残留<sup>[21-22]</sup>、微生物<sup>[23]</sup>及转基因食品<sup>[24]</sup>,这种技术灵敏度和特异性都比较高,适合于监管部门在现场进行初筛检测;其不足之处在于这种方法的广谱性很难实现,因为抗原和抗体之间反应专一性较强,这就需要针对不同的待测物质建立专门的检测试剂和条件;并且检测结果的准确程度还要取决于在加工过程中食品中的抗原成分是否遭到破坏。目前,国外利用免疫分析技术研发的试纸条已经商业化,如美国Charm Science公司研发的ROSA系列免疫层析胶体金试纸条,可以用于检测牛奶中各种抗生素残留<sup>[25]</sup>。

### 1.5 生物化学技术

生物化学技术与试纸法的结合主要应用于食源性致病菌等微生物的检测。这种微生物试纸法通常由双层薄膜组成,一层是印有网格的聚丙烯薄膜,另一层是覆盖有培养基和显色物质的聚乙烯薄膜。待测样品经过处理后不需要增菌可直接接种在微生物试纸上,在适宜的温度下进行培养,待检微生物生长产生的特异性酶和已固定的显色物质之间发生反应,就形成了不同颜色的菌落,通过对待测微生物的菌落进行计数即可实现快速检测<sup>[26]</sup>。

这种生物化学技术检测微生物最大的优点是省却了繁重的准备和收尾工作,缩短了检测时间,有助于提高微生物检测效率。另外,其检测原理是活细胞技术,符

合国内有关食品安全和卫生质量控制标准法规的要求,使检测结果更易于被大众所接收<sup>[27]</sup>。不足之处是目前的显色系统比较单一而无法针对所有微生物进行有区别地计数;以及培养基或显色物质在试纸尚分布不均匀而导致微生物生长分布或显色不均匀。目前,国内虽有微生物试纸的生产厂家,但是产品质量参差不齐,检测结果不能得到普遍认同。较成熟的微生物检测试纸主要依靠进口,如美国3M公司研发的Perrifilm™Plate系列微生物测试片,可分别准确检测菌落总数、大肠菌群计数、霉菌和酵母计数<sup>[28]</sup>。

### 1.6 分子生物学技术

分子生物学技术与试纸法的结合使待检物质达到了基因分子水平。近年来,核酸层析试纸和基因芯片成为了国内外研究的热点。核酸层析试纸是将分子生物学中的核酸扩增技术和层析试纸方法结合在一起的一种技术,从而既有核酸扩增的高灵敏度,又有层析试纸操作简便、价格低廉的优点<sup>[29]</sup>。基因芯片是随着基因技术和材料科学不断发展而衍生出的一种可以迅速检测基因序列及表达信息的一种技术。该技术原理是通过已知序列与未知序列进行杂交,并对每一杂交信号进行处理分析,从而得出未知序列信息<sup>[30]</sup>。使用核酸分子水平的试纸进行检测,其优点在于检出限量低、检测周期短、检测效率高、能够实现多重检测,并且解决了检测深加工产品的难题。不足之处在于检测费用仍偏高,且前期需要大量已测序的DNA片段信息。分子生物学技术与试纸法的结合具有很大的发展前景和应用价值,目前已经应用于检测食品中致病菌<sup>[31]</sup>、病毒<sup>[29]</sup>、MicroRNA<sup>[32]</sup>和转基因成分<sup>[33]</sup>等。

## 2 试纸法创新研究

近年来,试纸法研究的创新点主要集中在载体材料的改良、标志物的选择和对待测物进行定量检测等方面。

### 2.1 载体创新:纸基微流控芯片

自从20世纪90年代瑞士科学家Manz提出微型全分析系统的概念<sup>[34]</sup>以来,微流控芯片作为其中的核心技术已经逐渐发展为世界上最先进的科学技术之一。纸质微流控芯片是由Martinez等<sup>[35]</sup>于2007年首次提出,并在近期得到迅速发展的新型微流控芯片。该微流控芯片以滤纸作为载体材料,制作技术有光刻技术、喷墨印刷技术、蜡印刷技术、打印PDMS和等离子体氧化等,制作的成品可以对待检样品进行高效的分析检测。纸质微流控芯片具有成本低、制备简单、无需复杂设备等优点,并更趋近微型化、集成化、多功能化,所以非常适合在资源匮乏的情况下使用<sup>[36]</sup>。

目前,纸基微流控芯片主要分为3类:平面二维纸

基微流控芯片<sup>[36]</sup>、二维纸基ELISA板<sup>[37]</sup>和三维纸基微流控芯片<sup>[38]</sup>。Martinez等<sup>[35]</sup>用憎水性的聚合物在亲水性的纸上光刻分界限从而形成二维纸基微流控通道,提供了在同一平台上同时检测蛋白质和葡萄糖的分析方法,并且通过更改适当的检测试剂,还可以进一步适用于其他物质的测定。继而该研究小组研发了二维纸基ELISA板,它可以取代传统的较为昂贵的ELISA板<sup>[37]</sup>,并且更容易储存,与塑料孔板实验方法兼容,实验后可以将实验结果直接归档保存。该研究小组还通过用双面胶把多个蜡染纸黏合在一起的方式,首次研发出了三维纸质微流控芯片<sup>[38]</sup>,该装置有4个互不干扰的独立通道,可以在一个纸基芯片上同时分析多种化合物,对于有多重分析任务的现场快速检测表现出很强的实用性和优越性。Liu Hong等<sup>[39]</sup>研发一个以三维折纸为基础的微流控芯片,简化了Martinez团队制做过程中的多个步骤。Lewis等<sup>[40]</sup>用蜡染技术来制造高通量的三维纸基微流控芯片,1h内可以制造出数以百计的纸基微流控芯片。可见,由于纸基微流控芯片具有生产成本低、成产周期短、检测速率快、所需样品的体积小、携带方便、可一次性使用、可进行多重检测等优点,已经被越来越多地关注和研究,拥有很好的发展前景。

### 2.2 标识创新:纳米颗粒标志物

纳米颗粒又称超微颗粒或纳米尘埃,是指颗粒大小为纳米级(一般在1~100 nm之间)的粒子,其性能不同于正常粒子,具有比表面积大,光、热、磁敏感等特征,具有重要的科学研究价值和应用前景<sup>[41]</sup>。目前已经应用于试纸法的纳米颗粒标志物包括有机纳米粒子、胶体金、镧系元素、量子点、纳米磁性颗粒、碳纳米管等几大类。

有机纳米粒子具有良好的光学特性,是早期应用于试纸法中的一类标志物,如异硫氰酸酯荧光素,其荧光分子中的异硫氰酸与蛋白质中的氨基相结合,以结合物中的荧光素为检测对象实现对标记蛋白的检测<sup>[42]</sup>。但因为这种方法检测灵敏度低、光化学稳定性差,过于依赖粒子本身的化学发光集团,不具备无机纳米粒子可调控波长的尺寸效应,故应用上正逐渐被新的标志物所取代。

胶体金又称金溶胶,是指金颗粒在水中依靠静电斥力形成稳定的多相不均匀体系<sup>[43]</sup>,由于其电子密度高,在不影响生物分子活性的前提下可以吸附生物大分子,且呈现出橘红色到紫红色等不同的明亮色彩,故可作为标志物精确定位多种大分子物质,包括蛋白质、多糖、核酸、激素等。以胶体金作为标志物制作的试纸是研究最早也是目前研究最广泛的,因此报道繁多,包括检测黄曲霉毒素<sup>[44]</sup>、副溶血性弧菌<sup>[45]</sup>、苏丹红<sup>[46]</sup>、MicroRNA<sup>[47]</sup>等物质,甚至许多已经实现大规模商品化,如检测各种兽药残留和农药残留金标试纸。

镧系元素属于过渡元素,是指元素周期表中原子序数在57~71之间的所有元素。将两种不同的镧系元素离子分别作为“光吸收子”和“发射子”,将其掺入到作为“主基质”的陶瓷颗粒之中,会构成一类可以产生荧光的上转换磷光颗粒<sup>[48]</sup>。Hong Wenyan等<sup>[49]</sup>研制的以上转换磷光颗粒为标志物的试纸其灵敏度和定性的结果可以和免疫学中的经典实验——酶联免疫吸附实验相媲美。可见,将镧系元素应用与试纸中具有较为理想的检测限和稳定性,故其应用研究发展的十分迅速。

量子点又称为荧光半导体纳米颗粒,主要包括主族II~IV(如CdSe),III~V(如InP)、副族化合物以及Si等元素组成的纳米颗粒,颗粒直径约1~10 nm,因其外观形态好似一颗极小的点状物而得名。目前通常用来作为标志物的一种核壳结构的量子点,它不仅具有较好的光化学稳定性,而且也具备了较高的发光量子产率(30%~50%)<sup>[50]</sup>。目前,以量子点为标志物的试纸尚处于研究阶段,在国内外有一定数量的相关报道,如Petryayeva等<sup>[51]</sup>可在5 min内对蛋白酶进行定量检测,最低检测线达1~2 nmol/L。

纳米磁性颗粒又称超顺磁颗粒,兼具磁性粒子和纳米材料的双重优势,包括超顺磁性、比表面积大和粒径小等特点,是近年来新兴的一种纳米材料。典型的标志物是以磁性材料(如四氧化三铁等)作为固相载体,在其表面引入活性基团,通过偶联反应与酶、抗体等生物分子结构结合,可对待测物质进行快速、定量的检测<sup>[52]</sup>,但因为磁性颗粒在层析过程中易发生团聚等现象<sup>[53]</sup>,使纳米磁性颗粒作为试纸标志物的报道尚不多见。

碳纳米管又称巴基管,是一种具有空间拓扑结构的量子材料,其结构可看成是弯曲的石墨六角形网格结构。它具有一般纳米粒子的量子效应,且比表面积大、电导率高、机械强度高,其明显的黑色更加有利于在定性或半定量检测中被肉眼清晰辨识<sup>[54]</sup>。不过技术难点在于很难去除碳纳米管中混杂的石墨碳、无定型碳碎片等杂质,相关的文献也有限<sup>[55]</sup>,可见该项研究仍处于早期阶段。

### 2.3 定量创新:试纸分析仪

研究初期,试纸法只能定性检测,即只有“阴性/阳性”的结论。随着研究的不断发展,在标准比色卡引进后,试纸法既可以进行目视定性检测,又可以半定量分析<sup>[56]</sup>。而在新型配套微型测量读取仪相继出现以后,试纸法定量结果的精确度得到大幅度提高,从而使试纸法发展为可根据需要直接进行定量检测的分析方法<sup>[57]</sup>。这些配套的试纸分析仪既有较高的灵敏度,能够满足一般检测要求又具有体积小、质量轻、便携、快速、成本低、能够独立处理数据、对人员要求不高等优点,有着广阔的市场前景和发展空间。

目前,国内外试纸分析仪分为针对光学信号、荧光信号和磁学信号3种。其中,以光学信号的试纸分析仪居多,主要有3种:利用光敏电阻测量试纸反射光光强获取试纸反应信号;采用反射型光纤传感器获取反应信号;以及利用图像传感器采集试纸图像并分析反应信号强度<sup>[58]</sup>。如德国默克公司生产的一种试纸分析仪,就是利用光敏电阻测量试纸反射光光强获取试纸反应信号的一款仪器。该仪器的反射仪侧面设计有一个可供插入试纸条的小门和一个可以让光线通过的小窗口,当光线照射到试纸条上后,一部分被试纸条吸收,另一部分被反射到CDS光电池上,然后通过微安计来检测电流,继而转化为待测物质的浓度直接显示在显示器上,可以快速、直观地完成定量检测<sup>[56]</sup>。

随着电子信息的快速发展,人们可以随时随地以多种方式进行信息访问,其中智能手机是最常用的方法之一。许多研究<sup>[59-60]</sup>用智能手机、照相机或扫描仪记录试纸的显色区域,再用Adobe Photoshop分析显色区域的颜色,快速完成数据采集、信号处理、数据分析和得出结论等步骤。这种方法是通过图像传感器获取试纸图像,以图像测量原理为基础运用软件捕获试纸的颜色特征,利用统计数据分析并判定图像并得出定量的检测结果<sup>[58]</sup>。虽然图像传感器的分辨率对试纸图像的分析精度有一些影响,但是这种方法因具有成本低廉、操作简单、检测快速、便于携带等优势越来越受到人们的关注。

## 3 结语

试纸法作为一种快速、灵敏的检测手段,在食品安全现场检测领域展示出了良好的应用前景。在过去的20年中,世界各地许多科研团队为改善试纸的性能做出了很多的努力,如提高敏感性和特异性、加快响应时间、提高分析能力和降低成本等<sup>[61-62]</sup>。然而,国内研发和生产的试纸不仅种类十分有限,而且性能指标也远远达不到现场检测的需要<sup>[56]</sup>,如稳定性差,保存条件十分苛刻;保存期短,且无法适用于极端环境;灵敏度低,不能实现痕量检测的要求;特异性差,容易出现交叉反应等。因此,接下来对于试纸法的研究应该致力于对其优越的载体材料性能、多元的检测内容和形式、新型的显色剂和显色体系、精准的定量方法和仪器等方面,努力扩大试纸的检测范围,提高试纸的检测性能,为试纸法在食品安全快速检测领域的进一步发展提供更广阔的空间。另外,为了有效地将危害阻止在食品生产和流通环节,应该将试纸法推广并应用到食品企业生产加工、监管部门监督检查以及百姓的日常生活中,这样不仅有利于改善民众对食品安全现状的认知,更有助于提高政府公信力、促进社会和谐发展。

## 参考文献:

- [1] 张雪吟. 基于比色酶片与金标免疫层析试纸的食品安全快速检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 14-19.
- [2] PAROLO C, MERKOÇI A. Paper-based nanobiosensors for diagnostics[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(2): 450-457.
- [3] 王晶, 王林, 黄晓蓉. 食品安全快速检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 4-5.
- [4] 句立言, 王世平, 王勇. 食品安全快速检测技术应用进展[J]. *中国卫生工程学*, 2011, 10(2): 165-168.
- [5] 师邱毅, 纪其雄, 许莉勇. 食品安全快速检测技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 10-17.
- [6] WANG Shoumei, GE Lei, SONG Xianrang, et al. Paper-based chemiluminescence ELISA: lab-on-paper based on chitosan modified paper device and ax-screen-printing[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 31(1): 212-218.
- [7] 王端平. 纸表面化学发光法检测有机磷酸酯的研究[D]. 西安: 长安大学, 2012: 22-24.
- [8] 赖小康, 李扬发, 王瑞长. 滤纸色谱法快速定性检测样品中有机磷农药[J]. *中国卫生检验杂志*, 2010(12): 3545.
- [9] 韩红斐, 张尧, 李文娟. 壳聚糖改性纸色谱法分离金属离子的研究[J]. *太原师范学院学报: 自然科学版*, 2009(1): 116-118.
- [10] 于宏晓, 赵曰利, 徐海涛, 等. 氨基酸分析技术的研究进展[J]. *农产品加工: 学刊*, 2011(3): 44-47.
- [11] 周聪, 袁平, 陈波, 等. 色素的纳米纸色谱分离分析[J]. *高等学校化学学报*, 2011, 32(8): 1733-1736.
- [12] 程楠, 董凯, 何景, 等. 食品中过氧化氢残留快速检测试纸的研制与应用[J]. *农业生物技术学报*, 2013, 21(12): 1103-1112.
- [13] 张洁, 陈晓敏, 徐桂花, 等. 亚硝酸盐快速检测试纸的研制[J]. *食品科技*, 2010, 35(8): 344-346.
- [14] 杜雪, 田雨, 姜瞻梅, 等. 试纸法快速检测生乳中尿素含量的研究[J]. *食品工业*, 2012, 33(12): 163-165.
- [15] 王志琴, 王军, 张晓红, 等. 牛奶掺碱快速检测试纸的研制[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(8): 1651-1655.
- [16] 吉琅, 廖晴, 吕维, 等. 中药材中二氧化硫残留量快速测定方法[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2013, 19(10): 66-69.
- [17] 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): 220-224.
- [18] 邱静. 我国主要农药残留快速检测方法及产品现状分析[J]. *农产品质量与安全*, 2011, 17(5): 41-46.
- [19] 卢瑛, 郑世军. 免疫学技术在农业领域的应用[J]. *中国农业科技导报*, 2006, 8(5): 5-12.
- [20] 黄芬, 叶绍辉, 龚振明. 免疫层析快速诊断试纸条的制备及其应用[J]. *当代畜牧*, 2006(8): 20-22.
- [21] 孙秀兰, 杨婷婷, 张银志. 粮食中百草枯残留的金标免疫层析检测方法研究[J]. *分析测试学报*, 2010, 29(5): 507-510.
- [22] BAI Zhihong, LUO Yunbo, XU Wentao, et al. Development of a new fluorescence immunochromatography strip for detection of chloramphenicol residue in chicken muscles[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(15): 3743-3747.
- [23] 邵军军, 常惠芸. 胶体金免疫层析试纸条在病原体检测及医学诊断中的应用[J]. *实用诊断与治疗杂志*, 2008, 22(1): 39-40.
- [24] TERRY C F, HARRIS N, PARKES H C. Detection of genetically modified crops and their derivatives: critical steps in sample preparation and extraction[J]. *Journal of AOAC International*, 2002, 85(3): 768-774.
- [25] 章银良, 伍季, 鲍彤华. 牛奶中抗生素残留检测方法的研究现状[J]. *郑州轻工业学院学报: 自然科学版*, 2006, 21(4): 21-25.
- [26] 李洪, 龚涛, 达永淑, 等. 探讨影响大肠菌群快速纸片法的因素[J]. *职业卫生与病伤*, 2002, 17(3): 198-199.
- [27] 李宇, 姚卢悦. 菌落总数检测纸片法与国标方法的比较研究[J]. *食品工业*, 2012, 33(10): 157-159.
- [28] 范謙萍, 王婷, 梁炎. 快速检测纸片在食品微生物检测中的应用[J]. *中国医药指南*, 2008, 6(19): 48-49.
- [29] 曹成. 胶体金核酸层析检测 5 种检疫性植物病毒的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011: 14-17.
- [30] 霍金龙, 苗永旺, 曾养志. 基因芯片技术及其应用[J]. *生物技术通讯*, 2007, 18(2): 329-332.
- [31] CHOW W H A, MCCLOSKEY C, TONG Y, et al. Application of isothermal helicase-dependent amplification with a disposable detection device in a simple sensitive stool test for toxigenic *Clostridium difficile*[J]. *Journal of Molecular Diagnostics*, 2008, 10(5): 452-458.
- [32] HOU S Y, HSIAO Y L, LIN M S, et al. MicroRNA detection using lateral flow nucleic acid strips with gold nanoparticles[J]. *Talanta*, 2012, 99: 375-379.
- [33] 丁耀魁, 沈娟, 马黎黎. 快速检测试纸条法在大豆转基因检测中的应用[J]. *粮油食品科技*, 2010, 18(2): 45-46.
- [34] MANZ A, GRABER N, WIDMER H M. Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1990, 1(1): 244-248.
- [35] MARTINEZ A W, PHILLIPS S T, BUTTE M J, et al. Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007, 46(8): 1318-1320.
- [36] YAGER P, EDWARDS T, FU E, et al. Microfluidic diagnostic technologies for global public health[J]. *Nature*, 2006, 442: 412-418.
- [37] CARRILHO E, PHILLIPS S T, VELLA S J, et al. Paper microzone plates[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(15): 5990-5998.
- [38] MARTINEZ A W, PHILLIPS S T, WHITESIDES G M. Three-dimensional microfluidic devices fabricated in layered paper and tape[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(50): 19606-19611.
- [39] LIU Hong, CROOKS R M. Three-dimensional paper microfluidic devices assembled using the principles of origami[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(44): 17564-17566.
- [40] LEWIS G G, DITUCCI M J, BAKER M S, et al. High throughput method for prototyping three-dimensional, paper-based microfluidic devices[J]. *Lab Chip*, 2012, 12(15): 2630-2633.
- [41] LU Yi, LIU Juewen, MAZUMDAR D. Nanoparticles/dip stick[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2009, 535: 223-239.
- [42] OSWALD B, GRUBER M, BÖHMER M, et al. Novel diode laser-compatible fluorophores and their application to single molecule detection, protein labeling and fluorescence resonance energy transfer immunoassay[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2001, 74(2): 237-245.
- [43] MAYHEW T M, MÜHLFELD C, VANHECKE D, et al. A review of recent methods for efficiently quantifying immunogold and other nanoparticles using TEM sections through cells, tissues and organs[J]. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger*, 2009, 191(2): 153-170.
- [44] MASINDE L A, SHENG Wei, XU Xin, et al. Colloidal gold based immunochromatographic strip for the simple and sensitive determination of aflatoxin B1 and B2 in corn and rice[J]. *Microchimica Acta*, 2013, 180(9/10): 921-928.
- [45] SHENG Hongli, ZHANG Min, WU Renwei, et al. Development and evaluation of a colloidal gold immunochromatography strip for rapid detection of *Vibrio parahaemolyticus* in food[J]. *Journal of Food Quality*, 2012, 35(5): 366-371.
- [46] WANG Jia, WANG Zhanhui, LIU Jing, et al. Nanocolloidal gold-based immuno-dip strip assay for rapid detection of Sudan red I in food samples[J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(3/4): 1478-1483.

- [47] HOU S Y, HSIAO Y L, LIN M S, et al. MicroRNA detection using lateral flow nucleic acid strips with gold nanoparticles[J]. *Talanta*, 2012, 99: 375-379.
- [48] ZIJLMANS H, BONNET J, BURTON J, et al. Detection of cell and tissue surface antigens using up-converting phosphors: a new reporter technology[J]. *Analytical Biochemistry*, 1999, 267(1): 30-36.
- [49] HONG Wenyao, HUANG Lihua, WANG Haoran, et al. Development of an up-converting phosphor technology-based 10-channel lateral flow assay for profiling antibodies against *Yersinia pestis*[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2010, 83(2): 133-140.
- [50] BEHARI J. Principles of nanoscience: an overview[J]. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2010, 48(10): 1008-1019.
- [51] PETRYAYEVA E, ALGAR W R. Proteolytic assays on quantum-dot-modified paper substrates using simple optical readout platforms[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, 85(18): 8817-8825.
- [52] 郑静, 程圭芳, 冯婉娟, 等. 纳米金和磁性纳米颗粒在生物传感器中的应用[J]. *化学世界*, 2010, 51(5): 310-313.
- [53] 刘辉荣. 基于纳米磁性微球的免疫层析定量检测技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 76-77.
- [54] SAHA M S, LI Ruying, SUN Xueliang, et al. 3-D composite electrodes for high performance PEM fuel cells composed of Pt supported on nitrogen-doped carbon nanotubes grown on carbon paper[J]. *Electrochemistry Communications*, 2009, 11(2): 438-441.
- [55] ABERA A, CHOI J W. Quantitative lateral flow immunosensor using carbon nanotubes as label[J]. *Analytical Methods*, 2010, 2(11): 1819-1822.
- [56] 周焕英, 高志贤, 崔晓亮. 试纸法在食品水质及其它快速检测中的应用[J]. *解放军预防医学杂志*, 2003, 21(2): 148-151.
- [57] 房彦军, 周焕英, 杨伟群, 等. 试纸-光电检测仪快速测定食品中亚硝酸盐的研究[J]. *解放军预防医学杂志*, 2004, 22(1): 18-21.
- [58] 张峰. 基于图像测量的便携式金标试纸分析仪的研制[D]. 吉林: 吉林大学通信工程学院, 2005: 9-10.
- [59] SHAH P, ZHU Xuena, LI Chenzhong. Development of paper-based analytical kit for point-of-care testing[J]. *Expert Review of Molecular Diagnostics*, 2013, 13(1): 83-91.
- [60] XU Li, BALLERINI D R, WEI Shen. A perspective on paper-based microfluidics: current status and future trends[J]. *Biomicrofluidics*, 2012, 6(1): 11301-11313.
- [61] YAGER P, EDWARDS T, FU E, et al. Microfluidic diagnostic technologies for global public health[J]. *Nature*, 2006, 442: 412-418.
- [62] DUNGCHAI W, CHAILAPAKUL O, HENRY C. Electrochemical detection for paper-based microfluidics[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(14): 5821-5826.