

侧向流免疫检测食品中单增李斯特氏菌的研究进展

郦娟^{1,2}, 杨永^{1,2*}, 戴小芳^{1,2}, 陈琼^{1,2}, 晏涛^{1,2}, 熊杰^{1,2}

(1. 武汉食品化妆品检验所, 湖北 武汉 430000; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全), 湖北 武汉 430000)

摘要: 单增李斯特氏菌监测对于保护食品供应及公众健康至关重要。侧向流免疫测定操作简单、成本低、快速, 已被广泛应用于致病菌的即时检测。该文从样品制备和测定两方面概述应用于食品中单增李斯特氏菌检测的侧向流免疫测定检测方案, 重点介绍核酸侧向流免疫测定。等温核酸侧向流免疫测定结合其他富集和信号检测方式, 有望成为单增李斯特氏菌即时检测研发的新方向。

关键词: 单增李斯特氏菌; 食品; 侧向流免疫测定; 富集; 信号检测

Research Progress in Lateral Flow Immunoassay for Detection of *Listeria monocytogenes* in Food

LI Juan^{1,2}, YANG Yong^{1,2*}, DAI Xiao-fang^{1,2}, CHEN Qiong^{1,2}, YAN Tao^{1,2}, XIONG Jie^{1,2}

(1. Wuhan Institute for Food and Cosmetic Control, Wuhan 430000, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Edible Oil Quality and Safety for State Market Regulation, Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: The surveillance of *Listeria monocytogenes* is critical for protecting the food supply and public health. Lateral flow immunoassay, being simple, cost-saving, and fast, has been widely used in the real-time detection of pathogens. This paper summarizes the schemes of lateral flow immunoassay applied to the detection of *L. monocytogenes* in food from two aspects of sample preparation and determination, with emphasis on nucleic acid-based lateral flow immunoassay. The isothermal nucleic acid-based lateral flow immunoassays combined with other enrichment and signal detection methods are expected to become a new direction of the real-time detection of *L. monocytogenes*.

Key words: *Listeria monocytogenes*; food; lateral flow immunoassay; enrichment; signal detection

引文格式:

郦娟, 杨永, 戴小芳, 等. 侧向流免疫检测食品中单增李斯特氏菌的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(8): 219-224.

LI Juan, YANG Yong, DAI Xiaofang, et al. Research Progress in Lateral Flow Immunoassay for Detection of *Listeria monocytogenes* in Food[J]. Food Research and Development, 2023, 44(8): 219-224.

单增李斯特氏菌(*Listeria monocytogenes*)与伊氏(绵羊)李斯特氏菌(*Listeria ivanovii*)、英诺克李斯特氏菌(*Listeria innocua*)、斯氏李斯特氏菌(*Listeria seeligeri*)、威氏李斯特氏菌(*Listeria welshimeri*)、格氏李斯特氏菌(*Listeria grayi*)和默氏李斯特氏菌(*Listeria murrai*)同属于李斯特氏菌属, 但是仅单增李斯特氏菌与

人类李斯特氏菌病有关。

我国 GB 29921—2021《食品安全国家标准 预包装食品中致病菌限量》和 GB 31607—2021《食品安全国家标准 散装即食食品中致病菌限量》中规定食品中不得检出单增李斯特氏菌^[1-2]。冯月明等^[3]在对餐饮单位和网络外卖配送平台餐饮食品进行食源性致病菌监

基金项目: 国家市场监督管理总局科技项目(2020MK131); 湖北省市场监督管理局技术保障和科技计划项目(Hbsc-jg-JS2021007)

作者简介: 郦娟(1981—), 女(汉), 博士, 研究方向: 食品分子生物学和微生物检测。

* 通信作者: 杨永(1978—), 男(汉), 硕士, 研究方向: 食品质量安全。

测时发现样品中单增李斯特氏菌的检出率为7.27%。李海麟等^[4]在对进口生畜禽肉致病菌的监测中,发现单增李斯特氏菌检出率为5.97%。傅榆涵等^[5]在对散装熟肉制品的加工和销售环境的监测中,在生产车间中远离食品接触面的区域以及销售环境中均检出单增李斯特氏菌。可见,肉及肉制品、凉拌菜、即食熟制米面制品等食品和环境可能受到单增李斯特氏菌污染。单增李斯特氏菌对高盐、低温、酸性和低浓度氧气等环境具有较强的耐受性^[6-7],而食品和环境又存在相互污染的风险,故加强食品生产加工各环节单增李斯特氏菌的检测,具有重大意义。而对于原材料、即食食品等,即时检测显得更为重要。

GB 4789.30—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 单核细胞增生李斯特氏菌检验》中单增李斯特氏菌的检测是采用基于增菌培养和生化鉴定的传统微生物检测方法,耗时长且对检测人员要求较高。为了解决检测时效问题,基于酶联免疫、生物传感器、噬菌体和核酸扩增的替代检测方法被逐渐开发^[8-14]。目前,侧向流免疫测定技术被广泛应用于现场检测。该技术操作简单,分析时间短(10 min~15 min),可通过肉眼或者仪器直接判读结果,对检测人员要求不高,再加上成本低以及便携,非常适合用于现场检测,其主要缺点是灵敏度相对低。然而,方法的特异性、灵敏度和检测时间取决于待测样品的复杂性、抑制因子、背景微生物以及目标物的初始浓度等因素。

由于大多数即食食品样品的单增生李斯特菌含量较低,因此针对GB 29921—2021《食品安全国家标准 预包装食品中致病菌限量》、GB 31607—2021《食品安全国家标准 散装即食食品中致病菌限量》和《应用食品卫生一般原则控制食品中单核细胞增生李斯特氏菌的指南》中不得检出或者<100 CFU/25 g的限量要求^[1-2,15],需要进行富集以使细菌细胞的数量增加到可检测水平。但是基于培养的富集步骤会增加检测时间。研究人员从样品制备、培养富集和检测方案的整体流程各方面进行改进,以获得可靠和准确的结果。

本文深入讨论基于侧向流动免疫分析的单增李斯特氏菌检测方案,以期建立更加灵敏高效的单增李斯特氏菌检测方法提供参考。

1 侧向流免疫测定技术的原理

侧向流免疫测定组件通常包括样品垫、结合垫、硝酸纤维素膜、吸收垫和背胶卡。其中结合垫包被标记探针,硝酸纤维素膜上设置了固定有相应抗体/抗原的检测线(T线)和控制线(C线)。抗原的第一个识别抗体为标记抗体(通常为单克隆抗体),与纳米粒子结合制备免疫探针;第二个识别抗体(多克隆抗体)放置

在T线;过量的标记探针被C线上的抗体固定^[16]。当待测样品中有目标物时,与固定在结合垫的单克隆抗体标记的免疫探针结合,形成目标物-抗体复合物。然后在毛细作用下迁移到检测区,与T线处的第二个抗体结合,形成抗体-目标物-抗体复合物,从而固定在T线,显示出免疫信号;剩余的溶液继续层析到C线,与特异性抗体反应,显示出免疫信号,最终显示出两条检测信号,即阳性结果。当待测样品中没有目标物时,仅在C线出现免疫信号,即为阴性结果。C线出现免疫信号表明检测有效。

侧向流免疫测定结果可通过肉眼观察或者仪器判读,进行定量或半定量检测。研究者们从标记材料、标记方式、检测结果展示多样化(目视化、荧光、磁定量、表面增强拉曼散射、基于纳米酶的检测等)等方面进行优化,不断提高检测灵敏度和扩大应用范围。

2 侧向流免疫测定技术在单增李斯特氏菌检测中的应用

大多数食品样品的单增生李斯特菌含量较低,直接进行测定时,侧向流免疫测定的灵敏度通常不能满足检测要求,故需要进行富集以使细胞数量增加到可检测水平。因此,侧向流免疫测定技术应用于食品中单增李斯特氏菌检测的整体方案包括样品制备和侧向流免疫测定2个步骤。

2.1 样品制备

样品制备包括样品前处理和富集,这个步骤可以增加目标菌的浓度、减弱对于背景微生物菌群和抑制剂的影响,使在食品生产、加工、储存或消毒灭菌过程中损伤的微生物在一定程度上复苏。

由于食品基质复杂,难以有适用于所有类别食品的样本制备方法。总体而言,样品制备步骤包括在容器中混合均质样品,肉汤增菌(一次增菌或二次增菌)以及通过物理(离心、过滤)、化学(两相分配)、吸附(离子交换)、电物理操作(利用吸引力和排斥力)、亲和分离(通过基于抗体、适配体、凝集素的配体-受体相互作用等)或其组合方法进行分离或浓缩目标物^[17-20]。富集的样品通常还需进行热处理,从而灭活微生物以保护生物安全。由于热灭活的变性抗原通常用于抗体生成,热处理还可以促进与目标物与特异性抗体的反应。其中离子交换和免疫磁珠分离(immunomagnetic separation, IMS)富集具有很好的应用前景。

Hahm等^[19]开发了一种便携式的富集装置,用于基于侧向流免疫测定的食源性致病菌的检测。该装置包括2个组件:富集室和离子交换过滤膜。富集室中加入食品样品,离子交换过滤膜去除样品颗粒和离子物质。用30 mL增菌液稀释3 g样品,加入到盛有稀释液

的富集室,孵育8 h~16 h后过滤,取100 μ L洗脱液直接用于侧向流免疫测定。用此方检测单增李斯特氏菌,在培养12 h~16 h之后的灵敏度可达 3.2×10^2 mL。

IMS富集可应用于培养前、中和后期。用特异性抗体标记磁珠或纳米颗粒,与样品结合后,再收集磁珠。浓缩后,附着在磁性颗粒上的目标物可以直接应用于侧向流免疫测定或者后续制备步骤(例如DNA的提取)。磁珠富集的细菌具体数目可用李斯特氏菌特异性选择培养基计数,或提取DNA后通过基因扩增结果来计算。应用IMS富集进行复杂食品基质中单增李斯特氏菌的分离和浓缩,可以缩短增菌时间和提高灵敏度^[8,21-24]。将IMS富集应用到荧光免疫色谱检测,较传统方法灵敏度提高了40倍^[23],将IMS富集应用到核酸侧向流免疫测定时,目标物的回收效率可以达到90%^[24]。

2.2 侧向流免疫测定技术

2.2.1 侧向流免疫测定

2.2.1.1 抗体选择

侧向流免疫测定检测单增李斯特氏菌,其特异性和敏感性很大程度取决于使用的单克隆(monoclonal antibody, mAbs)和多克隆(polyclonal antibody, pAbs)抗体。mAb通常用作与标记分子偶联的抗体。pAb通常用在T线上作为分析物的捕获剂。

2.2.1.2 标记材料与信号检测

标记材料通常具有灵敏度高、成本低、没有或低非特异性结合、稳定性强、可在合适的动态范围内产生信号的特点^[25]。标记材料大致可分为彩色、发光与其他类标记材料。

彩色标记的颜色可以用肉眼读取;如果使用可自动记录结果的设备,还可以最大限度地减少对结果判定的主观性^[26]。常见的彩色标记材料有金纳米粒子、碳纳米粒子和银纳米粒子(silver nanoparticle, AgNP)等^[27-28]。目前的商业化产品中多是基于AuNP的侧向流免疫试纸条。AuNP显示鲜明的红色,无需进一步操作来增强其可视性。

发光标签可以通过仪器读出荧光信号得出结果,常用的发光材料包括荧光染料(钨螯合物、花青、罗丹明)、量子点和上转换纳米颗粒等^[29-32]。涂有上述标记的纳米颗粒可以增强拉曼散射特征,用于分析物检测^[33]。已经开发有基于荧光钨螯合胶乳粒子的荧光免疫色谱法的检测系统,用于检测牛奶、猪肉和香肠样品中的单增生李斯特氏菌。Li等^[22]将IMS与荧光免疫色谱法相结合,总检测时间为3 h,检出限为 1×10^4 CFU/mL。该方法显著降低了检出限并减弱了来自不同食品基质的干扰。表面增强拉曼光谱可以通过使用高功率拉曼激光器和适当的拉曼光谱仪在窄光谱带宽下检测吸附在金属表面上的单个分子^[33]。Wu等开发了一种基

于表面增强拉曼散射多重检测方法,用于特异性检测单核细胞增生李斯特菌和鼠伤寒沙门氏菌,在牛奶样品中检出限为75 CFU/mL^[33]。

磁性纳米颗粒(magnetite nanoparticles, MNPs)与酶都属于其他类标记材料。使用MNPs是基于磁场下免疫复合物的磁信号检测。用磁阻式、磁感应式和磁粉定量阅读器可以检测固定在T线和C线上的磁性检测剂的杂散场边缘(磁阻式)、阻抗、谐振频率和自感(磁感应式)的变化以及非线性磁响应^[34-35]。Shi等开发了一种基于超顺磁性颗粒的侧向流免疫测定方法用于检测猪肉、鸡肉、鱼、巧克力和其他食品样品中的单增李斯特氏菌,将单克隆抗体与羧基功能化的超顺磁性颗粒结合,整个检测时间为48 h,检出限为 10^4 CFU/mL^[36]。

基于酶的侧向流免疫测定是基于酶催化底物产生有色副产物的原理。例如,过氧化物酶可催化过氧化物(H_2O_2)和3,3'-二氨基联苯胺(diaminobenzidine, DAB)或3,3',5,5'-四甲基联苯胺(tetramethylbenzidine, TMB)形成显色终产物^[27,35]。抗体可以用各种酶标记,例如辣根过氧化物酶(horseradish peroxidase, HRP)、碱性磷酸酶、半乳糖苷酶,并且在存在适当底物的情况下,形成彩色线^[37]。Cho等^[21]建立了一种用于检测单增李斯特氏菌的基于酶的侧向流免疫测定方法,以HRP-MNP偶联抗体,将TMB作为底物。检测样品为人工污染的牛奶,将样品进行2 h增菌后用IMS进行浓缩,然后进行侧向流免疫测定,检出限约为100 CFU/mL。Kim等^[38]将基于酶的侧向流免疫测定与自动化免疫磁珠分离系统结合进行单增李斯特氏菌的检测,其菌液检出限为 6.6×10^3 CFU/mL。其中,IMS采用生物素化的单克隆抗体偶联链霉亲和素磁珠,检测剂采用HRP偶联单克隆抗体。

2.2.2 核酸侧向流动免疫测定

聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)和等温扩增与侧向流免疫测定相结合,利用核酸-抗体相互作用和特异性标记的双链DNA,就形成了核酸侧向流动免疫测定技术。近年来,核酸侧向流免疫测定也应用于单增李斯特氏菌的检测。

检测原理为扩增引物用两个不同标记(例如生物素和荧光素)标记,探针用能与扩增引物标记物之一结合的物质(如链霉亲和素)标记。T线包埋有能特异性识别抗扩增产物标记物抗体(如荧光素抗体),C线包埋有能与探针特异性识别的物质。当样品中存在目标DNA时,在T线和C线都会产生条带。当样品中无目标DNA时,仅有C线产生条带。

2.2.2.1 PCR-核酸侧向流动免疫测定

PCR-核酸侧向流动免疫测定被用于检测和区分单增李斯特氏菌和其他李斯特菌属^[39]。对于单增李斯

特氏菌,使用生物素和地高辛(digoxin, DIG)标记的特异性引物进行扩增。对李斯特氏菌属采用生物素和荧光素(fluorescein isothiocyanate, FITC)标记的特异性引物进行扩增。采用亲和素标记碳纳米颗粒作为标记材料。

2.2.2.2 等温扩增-核酸侧向流动免疫测定

等温扩增无需 PCR 仪即可实现在引物和/或酶中置换双链 DNA^[40-45],包括环介导等温扩增(loop mediated isothermal amplification, LAMP)^[40-41]、多重交叉置换扩增(multiple cross permutation amplification, MCDA)^[42-43]和重组酶聚合酶扩增(recombinase polymerase amplification, RPA)^[44-46]。各种等温扩增的区别在于所需引物数目、酶和反应温度的不同。RPA 需要 1 对引物, LAMP 需要两对或多对引物,而 MCDA 需要多达 10 条引物。LAMP 通常使用 Bst DNA 聚合酶, MCDA 使用 Φ 29 DNA 聚合酶,而 RPA 使用 DNA 聚合酶 I 之外还需要其他酶。LAMP 和 MCDA 反应温度通常在 60 °C~65 °C 之间, RPA 反应温度在 37 °C~42 °C 之间。

Wachiralurpan 等^[40]建立了一种用于单核细胞增生李斯特菌检测的 LAMP-核酸侧向流动免疫测定方法。该方法针对 *plcB* 和 *hly* 基因分别设计引物和探针,用生物素标记引物,用 FITC 标记探针。用 AuNP 和链霉亲和素标记的抗 FITC 抗体分别作为检测剂和捕获剂。该方法检测时间为 1.5 h,在鸡肉中的检出限为 2.82 CFU/mL。

MCDA 使用 10 条引物(2 条置换引物、2 条交叉引物和 6 条扩增引物),在 dsDNA 置换和引物结合后, Φ 29 DNA 聚合酶与单链 DNA 强烈结合以进行等温扩增^[46]。Wang 等^[45]将 *iap* 和 *hly* 为目标基因,设计一组 10 个引物,用生物素和 DIG 标记引物,分别以抗生物素蛋白-AuNP 和抗 DIG 抗体作为检测剂和捕获剂,可在 1 h 内获得结果。

RPA-核酸侧向流动免疫测定用于单增李斯特氏菌的检测也有报道。研究人员以 *hly* 基因为目标基因设计引物,用生物素和 DIG 标记引物,分别用 AuNP 和链霉亲和素标记的抗 DIG 抗体作检测剂和捕获剂。整个检测过程需约 6 h,不同食品样品的检出限在 19 CFU/mL 到 36 CFU/mL 之间^[42,44]。Liu 等^[47]建立了一种基于 RPA 和表面增强拉曼的核酸侧向流动免疫测定方法,用于检测牛奶、鸡胸肉和牛肉样品中的单增李斯特菌和肠炎沙门氏菌。用生物素和 FITC(检测单增李斯特氏菌)/DIG(检测沙门氏菌)标记引物,以抗 FITC 和抗 DIG 抗体作为捕获剂。检测可在 30 min 内完成,对于单增李斯特氏菌的检出限为 19 CFU/mL。

3 总结与展望

单增李斯特氏菌是一种人畜共患病原菌,由于其

对环境的适应性强,广泛存在于乳制品、肉类、冷冻饮品、水果和蔬菜,以及环境和食品接触表面。侧向流免疫测定由于其便携和易操作性,在生产加工过程中及销售前的食品安全确定性检测中具有很大优势。假阴性可能会对公共卫生产生重大影响,而假阳性结果可能会导致食品行业损失巨额资金,故检测技术的改进目标是要在灵敏度和检测时间中取得最好的平衡。

本文介绍了侧向流免疫测定技术在食品中单增李斯特氏菌检测中的应用情况,分别从样品制备富集和检测两方面进行阐述,其中重点聚焦核酸侧向流免疫测定技术。由于分子技术更敏感,可以缩短基于培养的富集步骤,以减少检测总时间,核酸侧向流免疫测定成为食源性致病菌检测的新方向。可用核酸侧向流免疫测定筛选出阴性样本,阳性样品用传统培养法进行进一步确认。其中等温扩增技术的应用,可以免除核酸扩增仪等昂贵设备的使用。同时可将免疫磁珠分离等样品制备方法加以整合,有望建立同时满足时效性和灵敏度的检测方法。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 预包装食品中致病菌限量: GB 29921-2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration. National food safety standard Limit of pathogen in prepackaged foods: GB 29921-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [2] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 散装即食食品中致病菌限量: GB 31607-2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration. National food safety standard Limits of pathogenic bacteria in bulk ready-to-eat food: GB 31607-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [3] 冯月明, 蒋会婷, 彭鑫, 等. 北京市密云区餐饮食品中食源性致病菌监测结果分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2691-2694.
FENG Yueming, JIANG Huiting, PENG Xin, et al. Analysis of monitoring results of foodborne pathogenic bacteria in catering food in Miyun district in Beijing[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(7): 2691-2694.
- [4] 李海麟, 刘于飞, 张维蔚, 等. 2019 年广州市售食品中食源性致病菌监测结果分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9396-9401.
LI Hailin, LIU Yufei, ZHANG Weiwei, et al. Analysis of monitoring results of foodborne pathogenic bacteria in foods sold in Guangzhou in 2019[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(24): 9396-9401.
- [5] 傅榆涵, 厉建军, 张建梅, 等. 散装熟肉制品中单增李斯特菌污染状况分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(9): 2911-2917.
FU Yuhuan, LI Jianjun, ZHANG Jianmei, et al. Analysis of *Listeria monocytogenes* contamination in bulk cooked meat products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(9): 2911-2917.

- [6] ROBERTS B N, CHAKRAVARTY D, GARDNER J C 3rd, et al. *Listeria monocytogenes* response to anaerobic environments[J]. Pathogens (Basel, Switzerland), 2020, 9(3): 210.
- [7] HORN N, BHUNIA A K. Food-associated stress primes foodborne pathogens for the gastrointestinal phase of infection[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1962.
- [8] SHIM W B, CHOI J G, KIM J Y, et al. Enhanced rapidity for qualitative detection of *Listeria monocytogenes* using an enzyme-linked immunosorbent assay and immunochromatography strip test combined with immunomagnetic bead separation[J]. Journal of Food Protection, 2008, 71(4): 781–789.
- [9] JAAKOHUHTA S, HÄRMÄ H, TUOMOLA M, et al. Sensitive *Listeria* spp. immunoassay based on europium(III) nanoparticulate labels using time-resolved fluorescence[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 114(3): 288–294.
- [10] DAVIS D, GUO X, MUSAVI L, et al. Gold nanoparticle-modified carbon electrode biosensor for the detection of *Listeria monocytogenes*[J]. Industrial Biotechnology, 2013, 9(1): 31–36.
- [11] OHK S H, KOO O K, SEN T, et al. Antibody-aptamer functionalized fibre-optic biosensor for specific detection of *Listeria monocytogenes* from food[J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 109(3): 808–817.
- [12] MARTELET A, L'HOSTIS G, NEVERS M C, et al. Phage amplification and immunomagnetic separation combined with targeted mass spectrometry for sensitive detection of viable bacteria in complex food matrices[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(11): 5553–5560.
- [13] RICHTER Ł, JANCZUK-RICHTER M, NIEDZIÓŁKA-JÖNSSON J, et al. Recent advances in bacteriophage-based methods for bacteria detection[J]. Drug Discovery Today, 2018, 23(2): 448–455.
- [14] GHOLIPOUR S, NIKAEEN M, FARHADKHANI M, et al. Survey of *Listeria monocytogenes* contamination of various environmental samples and associated health risks[J]. Food Control, 2020, 108: 106843.
- [15] LUCHANSKY J B, CHEN Y H, PORTO-FETT A C S, et al. Survey for *Listeria monocytogenes* in and on ready-to-eat foods from retail establishments in the United States (2010 through 2013): Assessing potential changes of pathogen prevalence and levels in a decade[J]. Journal of Food Protection, 2017, 80(6): 903–921.
- [16] 雷蕾. 棒状 β -FeOOH 纳米类过氧化物模拟酶的可控制备及在免疫层析中的应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
- LEI Lei. Controllable preparation of rod-shaped β -FeOOH nanoperoxidase mimics and its application in immunochromatography [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.
- [17] BREHM-STECHER B, YOUNG C, JAYKUS L A, et al. Sample preparation: The forgotten beginning[J]. Journal of Food Protection, 2009, 72(8): 1774–1789.
- [18] LI X, XIMENES E, AMALARADJOU M A R, et al. Rapid sample processing for detection of food-borne pathogens via cross-flow microfiltration[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(22): 7048–7054.
- [19] HAHM B K, KIM H, SINGH A K, et al. Pathogen enrichment device (PED) enables one-step growth, enrichment and separation of pathogen from food matrices for detection using bioanalytical platforms[J]. Journal of Microbiological Methods, 2015, 117: 64–73.
- [20] ANDREW G, Gehring. . Mixed culture enrichment of *Escherichia coli* O157: H7, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica*, and *Yersinia enterocolitica*[J]. Food Control, 2012, 26(2): 269–273.
- [21] CHO I H, IRUDAYARAJ J. Lateral-flow enzyme immunoconcentration for rapid detection of *Listeria monocytogenes*[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 405(10): 3313–3319.
- [22] LI Q R, ZHANG S, CAI Y X, et al. Rapid detection of *Listeria monocytogenes* using fluorescence immunochromatographic assay combined with immunomagnetic separation technique[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(7): 1559–1566.
- [23] KANT K, SHAHBAZI M A, DAVE V P, et al. Microfluidic devices for sample preparation and rapid detection of foodborne pathogens [J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(4): 1003–1024.
- [24] LI F L, LI F, LUO D, et al. Biotin-exposure-based immunomagnetic separation coupled with nucleic acid lateral flow biosensor for visibly detecting viable *Listeria monocytogenes*[J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1017: 48–56.
- [25] JAZAYERI M H, AMANI H, POURFATOLLAH A A, et al. Various methods of gold nanoparticles (GNPs) conjugation to antibodies[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2016, 9: 17–22.
- [26] FAULSTICH K, GRULER R, EBERHARD M, et al. Handheld and portable reader devices for lateral flow immunoassays [M]//Lateral Flow Immunoassay. Totowa, NJ: Humana Press, 2008: 1–27.
- [27] SHAN S, LAI W H, XIONG Y H, et al. Novel strategies to enhance lateral flow immunoassay sensitivity for detecting foodborne pathogens[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(3): 745–753.
- [28] MA S, HE J, GUO M Z, et al. Ultrasensitive colorimetric detection of triazophos based on the aggregation of silver nanoparticles[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 538: 343–349.
- [29] SAJID M, KAWDE A N, DAUD M. Designs, formats and applications of lateral flow assay: A literature review[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2015, 19(6): 689–705.
- [30] BANERJEE R, JAISWAL A. Recent advances in nanoparticle-based lateral flow immunoassay as a point-of-care diagnostic tool for infectious agents and diseases[J]. The Analyst, 2018, 143(9): 1970–1996.
- [31] BURCU E, Bahadır. Lateral flow assays: Principles, designs and labels[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2016, 82: 286–306.
- [32] GONG X Q, CAI J, ZHANG B, et al. A review of fluorescent signal-based lateral flow immunochromatographic strips[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2017, 5(26): 5079–5091.
- [33] WU Z Z. Simultaneous detection of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium* by a SERS-based lateral flow immunochromatographic assay[J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(5): 1086–1091.
- [34] NGUYEN V T, SONG S, PARK S, et al. Recent advances in high-sensitivity detection methods for paper-based lateral-flow assay[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2020, 152: 112015.
- [35] MOYANO A, SERRANO-PERTIERRA E, SALVADOR M, et al. Carbon-coated superparamagnetic nanoflowers for biosensors based on lateral flow immunoassays[J]. Biosensors, 2020, 10(8): 80.
- [36] SHI L, WU F, WEN Y M, et al. A novel method to detect *Listeria monocytogenes* via superparamagnetic lateral flow immunoassay[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2015, 407(2): 529–535.
- [37] YENI F, ACAR S, POLAT Ö G, et al. Rapid and standardized methods for detection of foodborne pathogens and mycotoxins on fresh produce[J]. Food Control, 2014, 40: 359–367.
- [38] KIM H S, CHO I H, SEO S M, et al. *In situ* immuno-magnetic concentration-based biosensor systems for the rapid detection of *Listeria monocytogenes*[J]. Materials Science and Engineering: C, 2012, 32(2): 160–166.
- [39] BLAŽKOVÁ M, KOETS M, RAUCH P, et al. Development of a nu-

- cleic acid lateral flow immunoassay for simultaneous detection of *Listeria* spp. and *Listeria*[J]. European Food Research and Technology, 2009, 229(6): 867–874.
- [40] WACHIRALURPAN S, SRIYAPAI T, AREEKIT S, et al. Development of a rapid screening test for *Listeria monocytogenes* in raw chicken meat using loop-mediated isothermal amplification (LAMP) and lateral flow dipstick (LFD)[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(11): 3763–3772.
- [41] MOKHTAR K, HANAPI I, MANAF A, et al. Loop mediated isothermal amplification; A review on its application and strategy in animal species authentication of meat based food products[J]. International Food Research Journal, 2019, 26(1): 1–10.
- [42] WANG Y, LI H, WANG Y, et al. Development of multiple cross displacement amplification label-based gold nanoparticles lateral flow biosensor for detection of *Listeria monocytogenes*[J]. International Journal of Nanomedicine, 2017, 12: 473–486.
- [43] KIM J, EASLEY C J. Isothermal DNA amplification in bioanalysis: Strategies and applications[J]. Bioanalysis, 2011, 3(2): 227–239.
- [44] DU X J, ZANG Y X, LIU H B, et al. Recombinase polymerase amplification combined with lateral flow strip for *Listeria monocytogenes* detection in food[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(4): 1041–1047.
- [45] WANG Y, WANG Y, MA A J, et al. Rapid and sensitive isothermal detection of nucleic-acid sequence by multiple cross displacement amplification[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 11902.
- [46] NGOM B, GUO Y C, WANG X L, et al. Development and application of lateral flow test strip technology for detection of infectious agents and chemical contaminants: A review[J]. Analytical and Bio-analytical Chemistry, 2010, 397(3): 1113–1135.
- [47] LIU H B, DU X J, ZANG Y X, et al. SERS-based lateral flow strip biosensor for simultaneous detection of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica* serotype enteritidis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(47): 10290–10299.

加工编辑:孟琬星

收稿日期:2022-08-13

(上接第162页)

- [13] 应方, 梁苗苗, 李剑锋. 有机磷农药残留的表面增强拉曼光谱快速检测[J]. 光散射学报, 2019, 31(2): 131–135.
- YING Fang, LIANG Miaomiao, LI Jianfeng. Rapid detection of organophosphorus pesticide residues by surface enhanced Raman spectroscopy[J]. The Journal of Light Scattering, 2019, 31(2): 131–135.
- [14] 胡潇, 吴瑞梅, 朱晓宇, 等. 表面增强拉曼光谱结合二维相关谱快速检测茶叶中的毒死蜱残留[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0730001.
- HU Xiao, WU Ruimei, ZHU Xiaoyu, et al. Fast detection of chlorpyrifos residues in tea via surface-enhanced Raman spectroscopy combined with two-dimensional correlation spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0730001.
- [15] WU H X, LUO Y, HOU C J, et al. Rapid and fingerprinted monitoring of pesticide methyl parathion on the surface of fruits/leaves as well as in surface water enabled by gold nanorods based casting-and-sensing SERS platform[J]. Talanta, 2019, 200: 84–90.
- [16] XU Q, GUO X Y, XU L, et al. Template-free synthesis of SERS-active gold nanopopcorn for rapid detection of chlorpyrifos residues[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 241: 1008–1013.
- [17] YASEEN T, PU H B, SUN D W. Rapid detection of multiple organophosphorus pesticides (triazophos and parathion-methyl) residues in peach by SERS based on core-shell bimetallic Au@Ag NPs[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2019, 36(5): 762–778.
- [18] 蓝昊宁. 纳米银水凝胶 SERS 增强基底及生物传感器检测对氧磷[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- LAN Haoning. Nanosilver hydrogel surface enhanced Raman scattering biosensing technology for detection of paraoxon[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [19] EL ALAMI A, LAGARDE F, TAMER U, et al. Enhanced Raman spectroscopy coupled to chemometrics for identification and quantification of acetylcholinesterase inhibitors[J]. Vibrational Spectroscopy, 2016, 87: 27–33.
- [20] 吴燕, 彭芳, 吴斌, 等. 基于 SERS 技术的茶叶中乐果农药残留的快速检测[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(14): 160–163.
- WU Yan, PENG Fang, WU Bin, et al. Rapid detection of dimethoate pesticide residues in tea based on SERS technology[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(14): 160–163.
- [21] 朱晓宇, 艾施荣, 熊爱华, 等. SERS 结合快速前处理检测绿茶中毒死蜱农药残留[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 550–555.
- ZHU Xiaoyu, AI Shirong, XIONG Aihua, et al. Detection of chlorpyrifos residues in green tea using SERS and rapid pretreatment method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 550–555.

加工编辑:王艳

收稿日期:2022-01-13