

# 关于消除试纸条钩状效应问题的研究进展

秦一之, 吴苙铃, 崔曼, 蒋美燕, 刘定华

重庆医科大学附属大学城医院检验科, 重庆

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月9日

## 摘要

侧流免疫层析技术(Lateral Flow Immunoassay, LFIA)是一种快速、简便、成本效益高的检测技术, 广泛应用于医学检测、食品安全、环境监测等多个领域。其基于抗原抗体免疫反应, 通过试纸条的形式实现对特定生物分子的快速检测。尽管LFIA具有许多优点, 但也存在一些技术挑战, 譬如钩状效应会影响试纸条诊断灵敏度与检测范围。钩状效应作为临床检验中经常出现的现象越来越被广泛研究, 其是指由于抗原抗体比例不合适而导致假阴性的现象。本文基于目前领域中消除试纸条钩状效应的方法及最新进展, 总结并为读者提供了在设计试纸条方面新的思路与参考, 有助于试纸条的进一步研发与革新。

## 关键词

钩状效应, 侧流免疫层析技术, 试纸条, 免疫测定

# Research Progress on Eliminating the Hook Effect in Test Strips

Yizhi Qin, Jiangling Wu, Man Cui, Meiyang Jiang, Dinghua Liu

Department of Clinical Laboratory, University-Town Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: March 8, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 9, 2026

## Abstract

Lateral Flow Immunoassay (LFIA) is a rapid, simple and cost-effective detection technology, which is widely used in many fields such as medical testing, food safety and environmental monitoring. It is based on an antigen-antibody immune reaction and realizes rapid detection of specific biomolecules in the form of test strips. Although LFIA has many advantages, there are some technical challenges, such as the hook effect, which affects the diagnostic sensitivity and detection range of the test strips. The hook effect is increasingly widely studied as a frequent phenomenon in clinical testing, which refers to the phenomenon of false negatives due to inappropriate antigen-antibody ratios.

**This paper summarizes and provides readers with new ideas and references in designing test strips based on the current methods and recent advances in the field to eliminate the hooking effect, which can help further development and innovation of test strips.**

## Keywords

**Hook Effect, Lateral Flow Immunoassay, Test Strips, Immunoassay**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

侧流免疫层析技术(Lateral Flow Immunoassay, LFIA)是一种快速、简便、成本效益高的检测技术,广泛应用于医学检测、食品安全、环境监测等多个领域,在过去的二十多年中也受到越来越多的关注[1][2]。在医学方面,其基于抗原抗体免疫反应,可通过试纸条的形式实现对特定生物分子的快速检测,以达到较短时间内即可用肉眼或便携式仪器读出结果并出具相应的临床报告。但 LFIA 在实际应用中常常受到钩状效应(Hook Effect)的困扰,导致假阴性结果,严重影响检测的准确性和可靠性。

钩状效应是在免疫检测中使用双抗体夹心法时可能出现的一种现象。在一定浓度范围内,分析物(如抗原)的浓度与检测信号值成正比关系。但是,当分析物浓度超过某一界限后,信号值反而会随着浓度的增高而下降。这是由于过量的目标抗原同时与固相抗体和标记抗体结合所致。在此反应中,过量的目标抗原干扰了测试线上的夹心免疫测定,尽管输入了高浓度的目标抗原,仍会产生假阴性结果[3]-[5]。这种现象之所以被称为钩状效应,是因为浓度与信号值的整条曲线形似钩子。由于此现象的出现与抗原抗体比例不当有关[6],学界通常将抗体过量称为前带现象,抗原过量则称为后带现象[7]。

钩状效应现作为临床检验中经常出现的现象越来越被广泛研究,其对试纸条检测结果的影响主要体现在两个方面:一是导致假阴性结果,即高浓度样本被误判为阴性[8];二是影响定量分析的准确性,使得检测结果与真实浓度之间失去线性关系。这些问题严重限制了试纸条在临床诊断和定量检测中的应用,特别是在需要检测宽浓度范围的场合,如激素水平监测、传染病诊断等。

在临床诊断中,钩状效应可能导致严重的误诊风险。例如,在妊娠检测中,高浓度的人绒毛膜促性腺激素(human Chorionic Gonadotropin, hCG)可能因钩状效应而显示为阴性结果,这不仅会影响孕妇的早期诊断,还可能延误必要的医疗干预[9][10]。在传染病诊断中,如 HIV 或乙型肝炎病毒的检测,钩状效应可能导致高病毒载量的样本被误判为阴性,从而延误治疗并增加疾病传播的风险[11]。此外,钩状效应还影响了试纸条在定量检测中的应用。在肿瘤标志物检测中,如前列腺特异性抗原(Prostate-Specific Antigen, PSA)的检测,钩状效应可能导致高浓度样本的检测结果被低估,从而影响肿瘤的分期和治疗方案的选择[12]。在激素水平监测中,如甲状腺激素或性激素的检测,钩状效应可能导致检测结果与真实浓度之间的非线性关系,影响医生对患者病情的准确判断和治疗方案的调整[13]。因此,消除钩状效应不仅是提高试纸条检测准确性的关键,也是推动其在临床诊断和定量检测中更广泛应用的必要条件。

近年来,学术界针对消除试纸条中的钩状效应问题已提出了多种创新性解决方案,并取得了显著进展。例如,最常见的稀释法,即将原始样本用适当的缓冲液或稀释液进行一定比例的稀释,使目标分析物的浓度降至检测方法的线性范围内,从而确保检测信号的准确性和可靠性[14][15]。这种方法虽然有效,

却不可避免地增加了操作步骤, 不仅延长了检测时间, 还提高了人工成本和试剂消耗, 这与 LFIA 所追求的简便、快速、低成本的优势相悖, 限制了其在即时检测(Point-of-Care Testing, POCT)场景中的应用潜力。因此, 尽管稀释法在实验室环境中具有一定的实用性, 但在实际临床或现场检测中, 仍需探索更加高效、便捷的替代方案。此外, 有学者提出将微流控技术应用于试纸条检测中, 以解决钩状效应问题[16]。微流控技术通过在芯片上实现精确的样品和试剂控制, 能够自动化完成样本稀释和多步反应流程, 从而有效避免钩状效应的发生。这种技术不仅提高了检测的准确性和可靠性, 还显著减少了人工操作步骤, 保持了试纸条检测的简便性和快速性, 为 POCT 提供了更为高效和可靠的解决方案。另外, Chen 提出了一种通过与级联信号转导系统相结合从而消除钩状效应的方法, 该方法的核心在于利用级联信号放大机制, 显著拓宽了试纸条的检测线性范围, 同时大幅降低了钩状效应的发生概率。具体而言, 该方法通过引入  $\beta$ -内酰胺酶介导的级联反应, 将目标物的检测转化为酶促反应产物的间接检测, 从而避免了高浓度目标物直接竞争结合导致的信号抑制。这种设计不仅提高了检测的灵敏度和特异性, 还为复杂样品中高浓度目标物的准确检测提供了新的技术路径, 具有重要的理论意义和实际应用价值[17]。

除以上提到的种种解决方案, 学术界还提出了多种消除钩状效应的创新方法, 其中一种重要策略是通过优化试纸条的结构设计来避免钩状效应的发生。本文系统梳理了当前领域内通过改进试纸条结构从而消除其钩状效应的主要方法及其最新研究进展, 为试纸条的设计与优化提供了新的思路和理论参考。通过对传统方法的深入分析和新型技术的全面探讨, 总结了现有解决方案的优缺点, 同时提出了未来可能的研究方向。本文旨在为相关领域的研究人员提供有价值的参考, 以期促进试纸条技术在医学诊断、环境监测和食品安全等领域的更广泛应用。

## 2. 通过改进试纸条结构从而减少钩状效应的研究

### 2.1. 设置多条检测线

Gao 等人[18]提出一种通过增加检测线数量来扩宽试纸条检测范围并消除钩状效应的策略。其在传统的两条线(T 线: 检测线, C 线: 控制线)基础上, 增加一条竞争性抗原线, 形成所谓的三线法。这种方法通过引入第三条线(通常称为竞争线或参考线), 能够有效扩展检测的动态范围并减少钩状效应的影响。

该团队首先分别设计出用于固定捕获抗体, 用于结合目标分析物 - 标记抗体复合物的 T 线、固定二抗或其他对照物质, 用于验证试纸条的有效性的 C 线以及固定竞争性抗原或低亲和力抗体, 用于在高浓度目标分析物存在时提供额外的信号参考的竞争线。

根据该团队的实验验证, 该三线试纸条在不同目标分析物浓度下表现出以下特征: 1) 低浓度样本: 目标分析物浓度较低时, 大部分目标分析物 - 标记抗体复合物与 T 线结合, T 线显色明显, 竞争线不显色或显色较弱。2) 中等浓度样本: 目标分析物浓度适中时, 部分复合物与 T 线结合, 部分与竞争线结合, T 线和竞争线均显色。3) 高浓度样本: 目标分析物浓度较高时, T 线因钩状效应可能显色减弱或消失, 但竞争线会显色明显, 通过竞争线的信号可以推断目标分析物的实际浓度。

与传统的双线试纸条相比, 该团队研发的三线试纸条展现出显著的优势。其中, 新增的竞争线在高浓度样本检测中提供了额外的信号参考, 能够有效识别并校正由钩状效应引起的假阴性结果。这一创新设计显著拓宽了检测的浓度范围, 成功避免了单一检测线在高浓度样本下出现的信号饱和问题。此外, 该方法无需复杂的样本预处理或稀释步骤, 充分保留了试纸条操作的简便性和快速性, 使其在实际应用中更具实用价值和推广前景。

然而, 尽管三线试纸条在技术上取得了重要突破, 在实际应用中仍面临着众多挑战: 譬如, 需要选择与目标分析物具有适当亲和力的竞争性抗原或抗体, 以确保竞争线的信号与目标分析物浓度呈正相关。

同时,该方法也需要能够同时读取多条检测线信号的设备,以提供准确的定量分析结果。另外,在生产该试纸条的过程中,还需严格控制试纸条的生产工艺和质量,确保各条检测线的稳定性和一致性。

综上所述,尽管三线试纸条在技术上展现了显著优势,但由于其在竞争性材料选择、设备开发和生产工艺方面的复杂性,目前仍难以完全满足商业化需求。未来,通过进一步优化材料性能、开发低成本读取设备以及改进生产工艺,三线试纸条有望在医学诊断、环境监测和食品安全等领域实现更广泛的应用。

## 2.2. 引入中间垫法

He 等人[19]提出在传统的试纸条中引入中间垫,可以有效控制标记抗体的释放时间,从而避免钩状效应的发生。其设计的中间垫层通常通过化学或物理方法处理而成,具有可调节的孔隙率和浸润速度。这种设计通过延缓标记抗体的释放,使得未标记的目标分析物能够优先与检测线上的捕获抗体结合,从而避免高浓度目标分析物直接竞争结合导致的信号抑制。随后,标记抗体被释放并与目标分析物结合,形成稳定的检测信号,显著减少了钩状效应的影响。

该团队在传统试纸条的样品垫和结合垫之间创新性地引入了一种经过饱和蔗糖溶液处理的中间垫层。当目标分析物加入样品垫后,首先通过中间垫层,该垫层具有反应调节功能,其较慢的垂直流速能够延迟标记抗体的释放。由于中间垫层的调节作用,高浓度目标分析物对检测线的竞争性结合被有效缓解,从而避免了钩状效应的发生。

这种方法的优点首先在于无需额外的人工操作步骤,保持了试纸条操作的简便性和快速性,适用于POCT。另一方面,该团队设计的经饱和蔗糖溶液处理后的中间垫的制备材料成本较低,适合大规模生产。此外,通过该中间垫层的反应调节,在无需额外的样本预处理步骤的同时,有效避免了高浓度目标分析物直接竞争结合检测线,既显著提高了检测的准确性和可靠性,又保持了试纸条操作的简便性和快速性。

然而,该方法在实际应用中仍面临若干技术挑战,需要更深入的探讨。首先,中间垫的处理参数,尤其是蔗糖浓度,对标记抗体的释放动力学具有非线性影响。蔗糖浓度与标记抗体的释放速率并非简单的线性关系:当蔗糖浓度低于某一阈值时,对标记抗体的延迟释放效应不显著;而浓度过高则可能导致标记抗体过度滞留,甚至完全无法释放,造成假阴性结果。这种非线性的剂量-效应关系使得参数优化过程复杂化,需要针对每个特定的标记抗体-分析物组合进行精细的梯度实验,增加了研发周期和成本。

其次,中间垫处理的批间差控制是产业化过程中的另一大难题。饱和蔗糖溶液的浸涂均匀性、干燥过程的温湿度控制,都会影响垫层表面形成的糖膜厚度与微观结构。微小的工艺波动(如干燥速率过快导致糖膜结晶不均匀)就可能导致不同批次间标记抗体释放动力学产生显著差异,进而影响检测结果的稳定性和重现性。这对于需要严格质量控制的体外诊断试剂生产而言,是一个不容忽视的挑战。

此外,长期储存对中间垫层性能稳定性的影响同样值得关注。经蔗糖处理的垫层具有较强的吸湿性,在高温高湿环境下储存时,糖膜可能发生潮解或重结晶,导致其微观结构改变,从而丧失对标记抗体释放的精准调控能力。因此,如何优化冻干保护剂的配方(如添加海藻糖等高玻璃化转变温度的稳定剂)以及开发适配的包装体系(如铝箔袋配合干燥剂),以确保试剂条在货架期内的性能稳定,是该技术走向实际应用前必须解决的工程学问题。

不过,即使该方法在实际应用中仍有不足,但其在提升试纸条检测性能、扩展检测范围以及增强结果可靠性方面展现出的巨大潜力不容忽视。

## 2.3. 改变样品垫位置

Oh 等人[20]通过调整样品垫在试纸条结构中的具体位置,以优化目标分析物和标记抗体的结合过程,从而消除钩状效应。其核心思想是通过改变样品垫的位置,调节目标分析物和标记抗体的接触顺序和时

间,避免高浓度目标分析物直接竞争结合检测线,从而缓解信号抑制现象。

在传统试纸条中,样品垫通常位于试纸条的一端,样本通过样品垫后依次经过结合垫和检测线。该团队通过改变样品垫的位置,将样品垫置于结合垫与检测线中间,样本通过样品垫后,分别向两侧流动并经过结合垫和检测线。该改良后的试纸条,由于样品垫位置的优化,目标分析物和标记抗体的接触顺序和时间得到调节,有效避免了高浓度目标分析物直接竞争结合检测线,从而消除了钩状效应。

对比传统的试纸条,经 Oh 等人改良后的无钩状效应试纸条,虽然调整了试纸条的物理结构,但却不涉及额外的化学处理或复杂的工艺,在生产成本、方便快捷上具有显著优势。同时该方法无需对现有的检测体系进行大规模修改,故适用于多种类型的 LFIA 试纸条,具有良好的兼容性。

然而,该方案仍存在需要完善的地方,譬如,更改样品垫位置可能会改变目标分析物在试纸条上的流动速度,从而对检测时间产生一定影响。虽然这种方法仍然保持了试纸条操作的快速性,但在某些对时间要求极高的应用场景中,可能会受到一定限制,而且不同类型的样本(如血液、尿液、食品样本等)具有不同的物理和化学特性,更改样本垫位置的效果可能会因样本类型而异,需要针对具体应用进行优化。但不可否认的是,通过更改样品垫位置来消除钩状效应是一种具有潜力的优化策略,尤其适合对成本和操作简便性要求较高的应用场景。

### 3. 未来与前景

LFIA 作为一种快速、简便、价格低廉的检测方法,在医学诊断领域发挥着重要作用。其在传染病诊断、妊娠检测、心血管疾病标志物检测、肿瘤标志物筛查以及药物滥用检测等方面的应用,极大地提高了医疗诊断的效率和可及性。尽管如此,LFIA 仍面临着灵敏度相对较低、定量能力有限等方面的挑战[21]。

近年来,众多学者通过不断优化试纸条的结构和材料,已经取得了一些突破。例如,通过蔗糖溶液处理中间垫,可以有效阻碍标记抗体的流动,实现延时释放效果。此外,增加抗原线的方法也被证明简单有效,这些改进方法不仅提高了试纸条的检测灵敏度和特异性,还拓宽了其应用范围。然而,尽管取得了诸多突破,现有方法仍存在一些亟待改进的方面。

在未来,消除试纸条钩状效应的研究有望朝着以下几个方向发展:首先,新型标记材料的开发将继续受到关注。具有更高灵敏度、更宽动态范围的新型纳米材料,如金属有机框架材料、二维材料等,有望为钩状效应的消除提供新的解决方案。其次,微流控技术的应用或将为试纸条检测带来革命性变化。通过精确控制样品和试剂的流动,微流控技术可以实现更复杂的检测流程,如自动稀释、多步反应等,从而有效避免钩状效应的发生。此外,人工智能技术的引入将为试纸条设计和优化提供新的工具。机器学习算法可以快速筛选最优的抗体组合和反应条件,大大缩短试纸条开发周期,提高检测性能。此外,人工智能技术的引入为试纸条设计与结果判读开辟了新的路径,其应用不应仅限于抗体的高通量筛选。一个更具创新性和临床转化潜力的方向是,开发基于反应动力学曲线的钩状效应实时识别算法。传统的试纸条结果判读通常在固定时间点(终点法)进行,而钩状效应在高浓度样本中表现为信号先快速上升后急剧下降的动态过程。通过结合便携式成像设备(如智能手机相机)实时记录检测线和质控线显色全过程,人工智能算法可以提取并分析曲线的特征参数,如达到最大信号的时间、信号上升的初始速率以及平台期信号衰减的斜率。机器学习模型(如支持向量机或神经网络)经训练后,能够根据这些动态特征精准区分“真正的低浓度阴性样本”与“由钩状效应导致信号衰减的高浓度阳性样本”,即使二者在终点时刻的肉眼判读结果可能极为相似。这种基于“过程分析”而非“终点判断”的策略,无需改变试纸条的物理结构和生化反应体系,仅通过算法升级即可显著扩展检测的动态范围,为 LFIA 在 POCT 场景下的精准定量提供了极具前景的低成本解决方案。

改进后的试纸条在临床诊断、食品安全检测、环境监测等领域均具有广泛的应用潜力。例如,在临

床检测中,可以更准确地检测高浓度的生物标志物,如C反应蛋白、PSA等。未来,随着技术的进一步发展,试纸条的检测性能有望进一步提升,为快速、便捷的现场检测提供更可靠的工具。

#### 4. 结论

LFIA 因其快速、简便、成本低廉等优点,在医学诊断、环境监测和食品安全等领域得到广泛应用。然而,试纸条检测中存在的钩状效应问题严重制约了其检测性能和应用范围。钩状效应是指在高浓度分析物存在时,检测信号反而降低的现象,导致检测结果出现假阴性或定量不准确。这一问题在临床诊断中尤为突出,可能造成误诊或漏诊,影响患者治疗。消除试纸条钩状效应是提高试纸条检测性能的关键问题。通过微流控技术、改进试纸条结构等策略,研究人员在这一领域取得了显著进展,在提高检测灵敏度、扩大线性范围以及增强定量准确性等方面具有重要的指导意义。未来,通过结合新材料、新技术(如纳米材料、微流控技术等)以及智能化数据分析方法,有望进一步突破现有局限,推动试纸条技术向更高性能、更广泛应用的方向发展。这将极大地拓展试纸条在临床诊断、环境监测和食品安全等领域的应用前景,为精准医疗和个性化诊断提供更强大的工具并为人类健康和社会发展做出更大贡献。

#### 基金项目

重庆医科大学第四临床学院教改项目(2022jg007);重庆医科大学附属大学城医院科研青苗培育项目(2021LC07)。

#### 参考文献

- [1] Huang, X., Aguilar, Z.P., Xu, H., Lai, W. and Xiong, Y. (2016) Membrane-Based Lateral Flow Immunochromatographic Strip with Nanoparticles as Reporters for Detection: A Review. *Biosensors and Bioelectronics*, **75**, 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.08.032>
- [2] Posthuma-Trumpie, G.A., Korf, J. and van Amerongen, A. (2009) Lateral Flow (Immuno)Assay: Its Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats. A Literature Survey. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **393**, 569-582. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-2287-2>
- [3] Tate, J. and Ward, G. (2004) Interferences in Immunoassay. *Clinical Biochemist Reviews*, **25**, 105-120.
- [4] Amarasiri Fernando, S. and Wilson, G.S. (1992) Studies of the 'Hook' Effect in the One-Step Sandwich Immunoassay. *Journal of Immunological Methods*, **151**, 47-66. [https://doi.org/10.1016/0022-1759\(92\)90104-2](https://doi.org/10.1016/0022-1759(92)90104-2)
- [5] Ross, G.M.S., Filippini, D., Nielen, M.W.F. and Salentijn, G.I. (2020) Unraveling the Hook Effect: A Comprehensive Study of High Antigen Concentration Effects in Sandwich Lateral Flow Immunoassays. *Analytical Chemistry*, **92**, 15587-15595. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c03740>
- [6] 胡凤岐, 陈士菊, 马云华. 早孕试纸法检测 HCG 出现带现象的观察[J]. 实用医技杂志, 1998(8): 559.
- [7] 贾珂珂, 孙文苑, 聂睿, 崔丽艳. 免疫透射比浊法常见干扰因素的识别与应对策略[J]. 检验医学, 2021, 36(4): 362-368.
- [8] Ward, G., Simpson, A., Boscato, L. and Hickman, P.E. (2017) The Investigation of Interferences in Immunoassay. *Clinical Biochemistry*, **50**, 1306-1311. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2017.08.015>
- [9] Pang, Y.P., Rajesh, H. and Tan, L.K. (2010) Molar Pregnancy with False Negative Urine hCG: The Hook Effect. *Singapore Medical Journal*, **51**, e58-e61.
- [10] Nizet, A., Jeanmart, P., Dewalque, L. and Bodson, Q. (2023) Falsely Low Beta-hCG Results in Pregnant Woman on Siemens Atellica: Don't Forget the "Hook Effect". *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, **61**, e118-e120. <https://doi.org/10.1515/cclm-2022-1208>
- [11] Akhtar, K., Sherwani, R.K., Sofi, L.A., Sharma, A. and Singh, P. (2009) Hook's Effect—A Rare Presentation in HBsAg Screening. *Indian Journal of Hematology and Blood Transfusion*, **25**, 27-29. <https://doi.org/10.1007/s12288-009-0006-6>
- [12] Kittanakom, S., Donohue, V., Beattie, J., Clark, L. and Kavsak, P.A. (2018) The Importance of Tumour Marker Dual Reporting during Method Transition: PSA High-Dose Hook Effect Detected. *Clinical Biochemistry*, **61**, 45-46. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2018.08.011>

- 
- [13] Barkan, A.L. and Chandler, W.F. (1998) Giant Pituitary Prolactinoma with Falsely Low Serum Prolactin: The Pitfall of the “High-Dose Hook Effect”: Case Report. *Neurosurgery*, **42**, 913-915. <https://doi.org/10.1097/00006123-199804000-00126>
- [14] Butch, A.W. (2000) Dilution Protocols for Detection of Hook Effects/Prozone Phenomenon. *Clinical Chemistry*, **46**, 1719-1720. <https://doi.org/10.1093/clinchem/46.10.1719>
- [15] 王修石, 何思春, 王利君, 等. 消除 Abbott AXSYM SYSTEM 检测血清总  $\beta$ -HCG 钩状效应[J]. 现代医药卫生, 2006, 22(10): 1547-1548.
- [16] Gervais, L. and Delamarche, E. (2009) Toward One-Step Point-Of-Care Immunodiagnosics Using Capillary-Driven Microfluidics and PDMS Substrates. *Lab on a Chip*, **9**, 3330-3337. <https://doi.org/10.1039/b906523g>
- [17] Chen, W., Shan, S., Peng, J., Liu, D., Xia, J., Shao, B., *et al.* (2020) Sensitive and Hook Effect-Free Lateral Flow Assay Integrated with Cascade Signal Transduction System. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **321**, Article ID: 128465. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128465>
- [18] Gao, Y., Zhu, Z., Xi, X., Cao, T., Wen, W., Zhang, X., *et al.* (2019) An Aptamer-Based Hook-Effect-Recognizable Three-Line Lateral Flow Biosensor for Rapid Detection of Thrombin. *Biosensors and Bioelectronics*, **133**, 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.03.036>
- [19] He, G., Dong, T., Yang, Z. and Jiang, Z. (2022) Mitigating Hook Effect in One-Step Quantitative Sandwich Lateral Flow Assay by Timed Conjugate Release. *Talanta*, **240**, Article ID: 123157. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123157>
- [20] Oh, J., Joung, H., Han, H.S., Kim, J.K. and Kim, M. (2018) A Hook Effect-Free Immunochromatographic Assay (HEF-ICA) for Measuring the C-Reactive Protein Concentration in One Drop of Human Serum. *Theranostics*, **8**, 3189-3197. <https://doi.org/10.7150/thno.24034>
- [21] 孔鑫, 李光荣, 刘靳波. 侧流免疫层析检测系统的研究进展[J]. 中华检验医学杂志, 2020, 43(6): 678-682.