

综述

微生物快速检测在战场环境中的应用研究进展

李广大¹, 石晋¹, 王敬夫², 田磊¹, 丁明超^{1*}

¹颌面系统重建与再生全国重点实验室/口腔疾病国家临床医学研究中心/陕西省口腔疾病临床医学研究中心/空军军医大学口腔医院颌面外科, 陕西西安 710032; ²北部战区总医院口腔科, 辽宁沈阳 110016

[中图分类号] R82

[文献标志码] A

[DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.2639.2026.0617

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 李广大, 石晋, 王敬夫等. 微生物快速检测在战场环境中的应用研究进展[J]. 解放军医学杂志, DOI: 10.11855/j.issn.0577-7402.2639.2026.0617.

[收稿日期] 2025-12-22

[录用日期] 2026-03-21

[上线日期] 2026-06-17

[摘要] 现代及未来战场环境生物威胁的日益复杂化对军事卫勤保障提出了严峻挑战, 微生物感染是导致伤员非战斗减员和死亡的重要因素之一, 微生物快速检测是有效控制战伤感染、防范生物威胁的关键环节。传统的微生物检测方法耗时长、操作复杂, 难以满足战场快速诊断的需求。近年来, 随着免疫层析技术、分子诊断技术和生物传感技术等检测技术的发展, 为战场微生物检测提供了新思路。本文系统综述微生物快速检测技术在战场环境中的应用现状, 重点分析以上技术的原理特点及军事应用场景, 探讨战场环境下检测技术应用面临的主要挑战及解决方案, 展望未来微生物快速检测技术与人工智能和无人化平台深度融合的发展趋势, 旨在为构建快速、精准、机动的战场微生物检测体系提供理论参考和技术思路, 为提升我军战场卫勤保障能力提供支持。

[关键词] 微生物快速检测; 战场环境; 生物战剂; 即时检测; 生物传感

Research on the application of rapid microbial detection in battlefield environments

Li Guang-Da¹, Shi Jin¹, Wang Jing-Fu², Tian Lei¹, Ding Ming-Chao^{1*}

¹State Key Laboratory of Oral & Maxillofacial Reconstruction and Regeneration/National Clinical Research Center for Oral Diseases/Shaanxi Clinical Research Center for Oral Diseases/Department of Oral and Maxillofacial Surgery, School of Stomatology, the Fourth Military Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032, China

²Department of Stomatology, General Hospital of Northern Theater Command, Shenyang, Liaoning 110016, China

*Corresponding author, E-mail: blackdoctor@163.com

This work was supported by the Project of Major Scientific and technological Research Topics of Air Force Military Medical University (2023JSYX32)

[Abstract] The growing complexity of biological threats in contemporary and future battlefield environments presents significant challenges to military medical support systems. Microbial infections represent a major cause of non-combat casualties and mortality among injured personnel. Rapid microbial detection is therefore essential for effective control of battlefield-acquired infections and mitigation of biological threats. However, conventional microbial detection methods are often time-consuming and operationally cumbersome, limiting their utility in time-sensitive combat settings. Recent advances in detection technologies, including immunochromatography, molecular diagnostics, and biosensing, have introduced promising solutions for point-of-care microbial identification in austere environments. This article provides a systematic review of the current application status of rapid microbial detection technologies in battlefield contexts, with a focus on their underlying principles, technical characteristics, and specific military use cases. It further examines key challenges associated with their deployment under operational conditions and proposes practical countermeasures. Finally, the paper explores the emerging trend of integrating these detection platforms with artificial intelligence and unmanned systems. The objective is to offer theoretical insights and technical guidance for establishing a

[基金项目] 空军军医大学重大科技攻关项目(2023JSYX32)

[作者简介] 李广大, 硕士研究生, 主要从事病原微生物检测方面的研究

[通信作者] 丁明超, E-mail: blackdoctor@163.com

rapid, precise, and mobile battlefield microbial detection framework, thereby enhancing the overall effectiveness of military medical support capabilities.

[Key words] rapid microbial detection; battlefield environment; biological warfare agent; point-of-care testing; biosensing

现代及未来战场环境的生物威胁日益复杂,对军事卫勤保障构成了严峻挑战。战场环境具有高度动态性、不确定性和严酷性的特点,是各类微生物包括致病菌、病毒、生物毒素等孳生与传播的高风险场所^[1-3]。战场环境下,微生物感染的威胁主要来源于3个方面:一方面来源于传统的战伤感染,由环境或人体自身的致病菌(如金黄色葡萄球菌、破伤风梭菌、鲍曼不动杆菌等)侵入开放性伤口引起,可导致严重感染甚至脓毒症,是造成非战斗减员和死亡的重要因素之一^[4-6];另一方面来源于战场的特殊环境卫生条件引发的传染病,在缺乏洁净水源、人员密集的环境中,病毒、细菌等病原体极易传播,导致疫情暴发^[7-8];此外一方面是最为严峻的人为生物威胁,即生物战剂。以生物战剂形式出现的人为恶意攻击,如炭疽芽孢、鼠疫耶尔森菌、蓖麻毒素等具有隐蔽性强、杀伤范围广、高风险效应、易获取性及高传染性等独特特征,对部队有生力量和军事行动造成毁灭性打击,已成为各国高度关注的焦点^[9-11]。因此,战场微生物威胁是一个涵盖细菌、病毒、生物毒素等多类别病原体的复合体系。

随着全球局势动荡与生物技术发展,战场微生物感染的威胁发生了显著变化。在早期,威胁主要集中于传统的战伤感染和因条件恶劣引发的传染病。近年来生物战剂被用作生物武器的情况显著增加,使得威胁来源从“自然发生”扩展到“人为恶意释放”,其形态也更趋复杂和隐蔽。微生物感染可延长康复时间,并可能引发脓毒症等严重危及生命安全的情况,对人类生命健康及公共卫生安全构成重大威胁^[12-13]。然而,传统的微生物检测方法,包括平板计数法^[14]、生化鉴定法^[15]以及聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)^[16]等核酸检测法等,在实验室条件下虽然准确可靠,但耗时长(数小时至数天)、对实验环境与专业操作人员依赖度高、设备笨重等固有缺陷,使其难以适应前线战场快速决策和机动保障的需求^[17]。特别是在野战条件下,及时有效地控制战伤感染,需要进行快速的微生物检测,为前线临床治疗提供科学依据。

近年来,随着分子生物技术^[18]、纳米技术^[19]、光学技术^[20]和人工智能技术^[21]的交叉融合发展,各种快速、灵敏、特异的检测方法不断涌现,一系列新型快速检测技术正从实验室走向野外现场^[22-25]。微生物检测技术如免疫学检测技术^[26]、分子生物学技术、生物传感器技术^[27]等均取得了显著进步,这

些技术大幅缩短了检测时间,提高了检测效率,为战场环境下微生物的快速检测提供了有力的技术支持,展现出了在军事医学领域及军事应用中的重大潜力。本文旨在系统综述微生物快速检测技术在战场环境中应用的研究进展,分析各类技术的原理、特点、适用范围及军事应用场景,探讨当前面临的技术挑战及未来发展趋势,以期为战场环境下微生物快速检测技术的研究和应用提供参考,为我国军事医学及其相关领域的研究与装备发展提供借鉴。

1 微生物检测在战场环境中的发展历程

在战场环境中的微生物检测技术经历了从被动防护到传统培养法再到现代分子诊断技术的演变过程(表1)。20世纪初面对世界各国的细菌战及生化武器的威胁,主要由后方医院的机械性物理隔离以及抗感染等方式的被动防护从而进行筛查确定感染微生物的种类^[28];20世纪40年代战场微生物主要依赖显微镜观察和微生物培养等基础技术进行检测;20世纪50-90年代随着分子生物学的兴起,分子生物学技术的发展和应用于微生物检测带来了革命性的变化,例如应用PCR技术针对炭疽芽孢杆菌的生物战剂进行病原体鉴定,显著提升了鉴定的准确性和灵敏度^[29];20世纪90年代初期我国为应对野战条件下的微生物检测,开发了一种WP-I型微型多功能培养箱,可用于需氧菌、厌氧菌等多种细菌的培养,在一定程度上满足了野战条件下细菌检验的需求^[30]。

21世纪初微生物检测技术的发展突出,表现为快速、高通量以及现场检测趋势,可对多种病原体或毒素同时定量检测,检测动态范围宽,在应对生物恐怖威胁时具有强大优势^[31]。美国继“9·11”事件之后又经历了炭疽生物恐怖袭击事件。由此可见在当今及未来战场上,对病原微生物进行早期、快速、精准的检测与鉴定,已成为识别生物威胁、实施有效防御并赢得战争主动权的关键前提,是守卫国家安全不可或缺的“前沿哨兵”^[32]。近年来,新型微生物快速检测技术的不断发展与涌现,各国军队在军事领域展示出广泛应用。美军的生物侦察力量主要包括M31系列生物综合检测系统(BIDS)、联合生物远程探测系统(JBSDS)、远程遥感生物检测系统(LR-BSDS)等;核生化一体化侦察装备主要包括M93A1“狐”式核生化侦察车(NB-CRS)等;俄军的生物侦察力量主要包括RKhm-9系统核生化侦察车、MRK-RKH无人地面核生化侦察车、机动式生化侦察

系统等；英国、法国和印度等国家主要配备微型化生放核(CRBN)无人车、aunav.next 型机器人、生物战剂分析系统、MAB生物报警监测器等。

2024 年美国陆军医学研究与发展司令部(USAMRDC)的官方媒体报道，其传染研究所开发的便携式快速诊断设备“DRAGON MEDIC”获得了由美国陆军未来司令部颁发的格林少将创新奖，并已投入使用。同时，我国空军军医大学研制出一款基于智能手机平台的无扩增检测设备，实现了对细菌的快速、灵敏且便携的定量检测，为战场微生物检

测装备的研发提供了现实依据^[33]。中国科学院与海军军医大学合作开发的基于太赫兹超表面的无标记传感技术，成功实现了对金黄色葡萄球菌和表皮葡萄球菌的高灵敏度检测与区分，为战场的快速、无标记筛查以及战场环境生物安全防护提供了新技术手段^[34]。目前随着生物技术的发展，战场微生物快速检测技术逐渐向快速化、便携化、智能化方向发展，已形成多元化发展格局。特别是生物战剂检测技术的进步，对战场微生物检测技术的快速性、灵敏度以及设备的便携性提出了更高要求^[35]。

表 1 微生物检测在战场环境中的发展历程

Tab.1 The development process of microbial detection in battlefield environments

时间阶段	主要微生物威胁	代表性技术/设备	主要技术特点	军事应用价值
20 世纪初至 40 年代	鼠疫耶尔森菌、霍乱弧菌等	显微镜观察、传统微生物培养法	以被动防护为主，在 20 世纪初依赖于物理隔离与基础形态学观察及微生物培养等方法进行检测，方法繁琐，效率较低	依托于后方实验室进行基础的病原形态学观察与培养鉴定，检测能力有限，难以满足战场快速响应需求
20 世纪 50~90 年代	天花病毒、鼠伤寒沙门氏菌、肉毒毒素、克里米亚刚果出血热病毒、炭疽杆菌	聚合酶链式反应(PCR)技术	分子生物学技术兴起，实现了核酸水平的精准检测，灵敏度和特异性显著提升	实现对炭疽芽孢杆菌等生物战剂的精准、快速鉴定
20 世纪 90 年代	埃博拉病毒、产气荚膜梭菌、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌等	WP-I 型微型多功能培养箱	技术向便携化、现场化发展，满足野战条件下基础细菌检验的需求	在野战条件下进行需氧菌、厌氧菌等多种细菌的培养，服务于战伤感染控制
21 世纪初叶	SARS 冠状病毒、炭疽恐怖袭击等	快速免疫色谱技术、联合生物病原检测和鉴定系统	快速、高通量、现场检测，可在 30 min 内完成多种病原体的同时检测与定量	生物战剂的快速预警与鉴定，以及战伤感染的初步控制
近年发展(至今)	新冠病毒及其分型等	CRISPR 检测技术、微流控生物传感器、太赫兹超表面传感技术、智能手机平台检测设备	技术向智能化、数字化、无标记、高通量、高灵敏度方向发展，部分技术可实现常温扩增和智能化判读	实现病原体的超灵敏、快速、精准诊断与区分，支撑单兵级实时生物威胁侦检与战场环境安全监测
未来趋势	全新病原体、基因武器等	与无人机/无人车等机动平台集成的智能化检测系统	多技术深度融合(微流控、纳米技术、人工智能)，并向分布式智能感知网络演进，实现实时、持续、自动化监测与智能决策	构建覆盖“战略预警-战术侦察-单兵诊断”的全方位、高效协同生物安全防护体系，提升战场生物威胁应对能力

CRISPR. 成簇规则间隔短回文重复序列

2 微生物快速检测技术的军事应用分析

微生物快速检测技术在现代军事领域发挥着至关重要的作用。随着科学技术的不断进步，为适应战场需求的微生物快速检测技术，其核心评价指标在于速度、灵敏度、特异性、多目标检测能力、设备便携性及操作复杂度。以下将分别从免疫学、分子生物学、生物传感器及其他新兴技术等方面，分析其军事应用现状、前景和应用场景。

2.1 基于免疫学的检测技术 免疫学检测技术(图 1)是利用抗原抗体特异性免疫反应的原理来定性、定量地识别与检测目标毒素及致病微生物，具有操作简便、反应快速、高灵敏度和特异性、适合现场使用等优点^[36]。基于免疫学的检测技术凭借其优势，

已成为军事医学与生物安全领域不可或缺的核心技术手段，其中以酶联免疫吸附法(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)为典型代表^[37]，大多数生物战剂均可采用 ELISA 法测定，通常灵敏度可达 10²~10³ CFU/ml^[38]。近年来，随着检测技术的发展，免疫层析技术(immunochromatography assay, ICA)、免疫荧光技术(immunofluorescence technique, IF)等在军事医学领域及军事安全防控领域中发挥着重要作用^[39-40]。

ICA 是目前战场环境下应用最为广泛的快速检测技术之一^[41]，其原理是基于抗原抗体特异性反应，通过层析作用在试纸条上呈现检测结果^[42]。该技术具有操作简单、检测快速(通常仅需数分钟)、无需专业仪器、便于携带、结果直观且结果稳定易于判

读等优点,非常适合战场环境和野外现场使用^[43-44]。2003年史子江^[45]研制出丙型肝炎病毒(hepatitis C virus, HCV)的抗体快速检测试纸,目的在于满足战时条件下对血液制品的快速、现场筛查需求。该研究利用膜ICA,筛选胶体硒等纳米材料作为标记物,实现了易判读的检测结果。该研究很好地契合了军事应用中对战场野外条件下进行现场快速检测的迫切需求,为军队在野战环境下进行血液质量鉴定和传染病防控提供了一种可行的技术路径。2016年赵勇^[46]基于上转发光ICA平台,建立了一种电场驱动的新型免疫层析快速检测技术,以鼠疫耶尔森菌为检测目标,检测用时仅5 min的同时,仍然可以保持优越的检测灵敏度、特异性以及定量准确性等性能,显著提升了生物战剂现场检测速度,增强了生物反恐应急能力。2025年Yu等^[47]提出一种高灵敏现场通用检测病毒和细菌的先进技术,突破了现有诊断方法无法快速准确区分细菌性和病毒性呼吸道感染的瓶颈。该研究以新冠病毒、铜绿假单胞菌和肺炎链球菌为模型,病毒检测灵敏度低至1.2 pg/ml,细菌低至17 cells/ml,特异性达100%,检测时间仅需20 min,具备高灵敏、操作简便、快速响应等特点,为野战医院或前线营地快速区分细菌性和病毒性感染,避免抗生素滥用,提供了正确的指导。此外,外军开发了如快速免疫色谱技术(如HHAs)等装备,用于检测炭疽、鼠疫、布氏菌等多种生物战剂^[48]。

美军的联合生物病原检测和鉴定系统(JBADIS)等更高级的检测装备,能够在30 min内完成至少8种战剂的检测与鉴定,进一步提升了战场微生物检测的能力和水平^[48]。

IF是标记免疫技术中发展最早的一种技术^[49],其原理是基于抗原抗体特异性反应,通过荧光显微镜观察荧光信号,从而确定抗原或抗体的性质、定位和含量^[50]。该技术具有特异性强、敏感性高、速度快等特点,特别适用于战场环境下生物战剂监测、战场创伤感染诊断、军事人员健康监测等场景的快速检测需求^[51]。2002年Peruski等^[52]研制出一种基于时间分辨荧光检测技术,并应用于生物战剂的快速灵敏检测,实现了对多种生物和环境基质中3种生物威胁因子的灵敏、快速且可重复的检测,灵敏度达到4~20 pg/ml。该检测技术能在环境和临床样本中可重复地检测低浓度传染性病原体及其毒素,有助于早期识别潜在的生物战剂。2025年de Araujo等^[53]开发了一种多重血清学检测方法,以检测军事工作犬中新型巴尔通体的免疫反应。巴尔通体对军事工作犬构成重大健康威胁,也会导致人类的重大疾病。该研究通过筛选特异性B细胞表位肽段,实现高通量、高灵敏度血清学检测,所需血清样本量仅1 μ l,远高于传统间接免疫荧光法的检出率,在战场感染诊断及军事人员健康监测等方面发挥着重要作用。

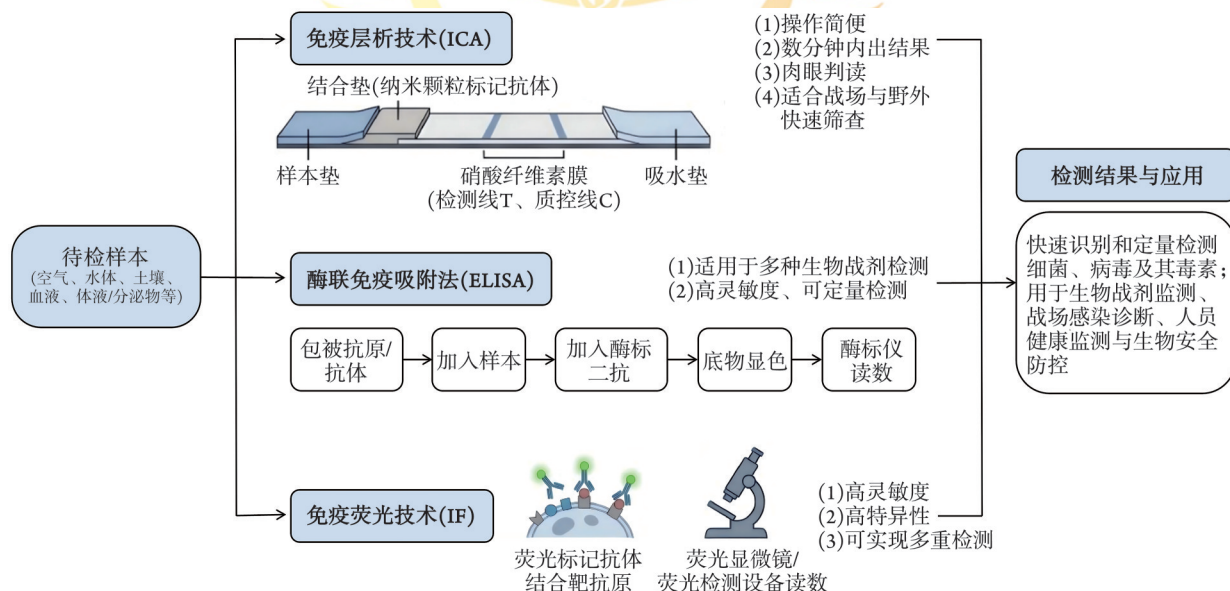


图1 基于免疫学检测技术的微生物检测流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the microbial detection process based on immunological detection technology

2.2 基于分子生物学的检测技术 分子生物学作为现代生物学的核心分支,致力于解析生物大分子的结构、功能及其相互作用机制^[54]。分子生物学技术(图2)是基于微生物核酸特征的检测方法,通过解析

微生物遗传信息、改造其功能特性,检测病原微生物的特异性核酸序列及丰度即可实现微生物的定量识别与鉴别,具有高灵敏度、强特异性和反应迅速的特点^[55-56]。基于分子生物学的快速检测技术,已

成为现代军事生物防御体系中的核心工具。在军事医学与人员健康保障等方面展现出超高的军事应用价值,为维护部队战斗力与军事行动安全提供了至关重要的科技支撑。近年来,随着科技的不断进步,核酸扩增技术、成簇规则间隔短回文重复序列(clustered regularly interspaced short palindromic repeats, CRISPR)基因编辑技术^[57-58]及基因芯片^[59]等随之不断发展,在军事医学侦察、生物威胁预警及战场感染控制中发挥着关键作用。

核酸扩增技术又称特异性DNA序列体外引物定向酶促扩增法,在体外大量复制特定DNA或RNA片段,从而达到可供分析检测的体量。主要技术包括PCR、实时荧光定量PCR(quantitative real-time, qPCR)^[60]、多重PCR(multiplex PCR)^[61]、数字PCR(digital PCR)^[62]、环介导等温扩增(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)^[63]、重组酶聚合酶等温扩增(recombinase polymerase amplification, RPA)^[64]、重组酶介导等温核酸扩增(recombinase aided amplification, RAA)技术^[65]等。2017年孙魁^[66]基于RPA技术构建了一种集核酸提取、扩增和结果判定功能的完整检测系统,应用于日本血吸虫和腺病毒的检测。该系统可实现常温下反应,30~40 min即可完成检测。更重要的是其可在无电力的环境下应用,不仅适用于基层部队及边远地区的医疗诊断,在野外现场及战场环境下的检测任务中也具有极大优势。2022年赵勇等^[67]申请公开了一项名为“一种基于液滴数字PCR快速检测五种烈性病原菌的引物探针组合及其应用方法”的国家发明专利。该专利明确针对5种烈性病原菌,分别是鼠疫耶尔森菌、炭疽芽孢杆菌、布鲁氏菌、类鼻疽伯克霍尔德菌和土拉弗朗西斯菌。为战场生物威胁监测与预警,快速判断是否存在生物战剂攻击,识别具体病原体类型,及时采取防护、洗消和医疗措施赢得黄金时间。此外,日本长崎大学热带医学研究所应用LAMP技术开发出了高效检测埃博拉病毒的方法。该方法无需特殊仪器,检测用时仅30 min,为野战条件或资源匮乏区域病毒快速检测提供方法^[68]。

CRISPR基因编辑技术是一种基于细菌免疫系统开发的基因编辑工具,其核心组分CRISPR-Cas9系统通过向导RNA精确定位DNA并切割,是当今生命科学领域极具影响力的突破之一^[69-70]。该技术具有操作简便、低成本、高效率及高精度等优点,在微生物检测方面可快速分析新型生物战剂的基因序列,并在生物威胁预警和军事人员健康保障方面展现出巨大潜力^[71]。2019年Teng等^[72]开发了一种以CRISPR-Cas12b为基础的DNA检测系统,用于微量DNA的简便快速检测。该方法不仅实现了1阿摩尔

级的灵敏度,还实现了单碱基的区分,能快速地实现细胞、血液、尿液以及动植物中的细菌和病毒感染、基因分型和单核苷酸多态性(SNP)突变检测。同时该系统对环境温度、pH值变化不敏感,在极端战场环境下仍能稳定工作。2025年Li等^[73]提出了一种CRISPR/Cas12a功能化硅纳米线场效应晶体管传感器的新型检测策略,实现了对病原体双链DNA的超灵敏、快速、直接检测。该策略可在10 min内完成炭疽芽孢杆菌双链DNA的定量检测,灵敏度达阿摩尔级。同时该策略在战场上可快速识别生物战剂、判断疫情性质,从而为指挥员提供决策支持、实施隔离和救治至关重要。

基因芯片技术又称为DNA微阵列或DNA芯片,根据碱基互补的原理,利用基因探针到基因混合物中识别特定基因,实现对样品遗传信息的高通量、快速、准确的检测与分析^[74-75]。目前,基因芯片技术分为传统芯片和可视化芯片两大类,在生物战场的病原微生物中能进行快速高通量的检测,并且在病原微生物基因诊断研究中意义重大^[32]。2017年郭微微等^[76]研制出一套针对港口航道致病性细菌检测的基因芯片,可同时检测7种致病菌,灵敏度达10 $\mu\text{mol/L}$,检测时间为2 h,在特定军事环境病原体检测及评估环境安全和后勤保障风险方面展现出重要的应用价值。2023年Xie等^[77]研发了一种致病菌毒力基因芯片,对环境中4种典型人畜致病菌进行检测,覆盖了参与编码毒素、黏附因子、分泌系统、免疫逃避/入侵等5种主要功能的96个毒力基因,可在2 h内一次性检测42个样品。该芯片不仅可检测环境中致病菌的毒力,还可用于战场环境中生物威胁溯源与毒力分析。

2.3 基于生物传感器的检测技术 生物传感器是一种结合了生物学、化学、物理学和电子技术的前沿交叉学科技术,主要包括电化学生物传感器^[78]、光学生物传感器^[79]、压电生物传感器^[80]及微流控生物传感器^[81-82]等。通过巧妙的设计,将生物识别元件(如抗体、酶、核酸、全细胞)与物理或化学换能器(如电化学、光学传感器)相结合,快速、精准地检测特定的生物或化学物质。同时,凭借其良好的战场适应性,在军事领域展现出重要的应用价值,不仅实现了对特定生物或化学物质的实时、连续监测,还在野战饮水安全、生物战剂侦检、爆炸物探测等多个特定军事场景中提供了创新性的解决方案,在军事领域的装备化、便携化方面应用前景广阔^[35,83]。

2022年Abramovich等^[84]提出了一种基于金纳米粒子和太赫兹光谱的实时超表面传感器,用于监测水溶液中的微毒物。该传感器是使用双面FR4基板印刷板电路制造的,通过在超表面传感器正面的双

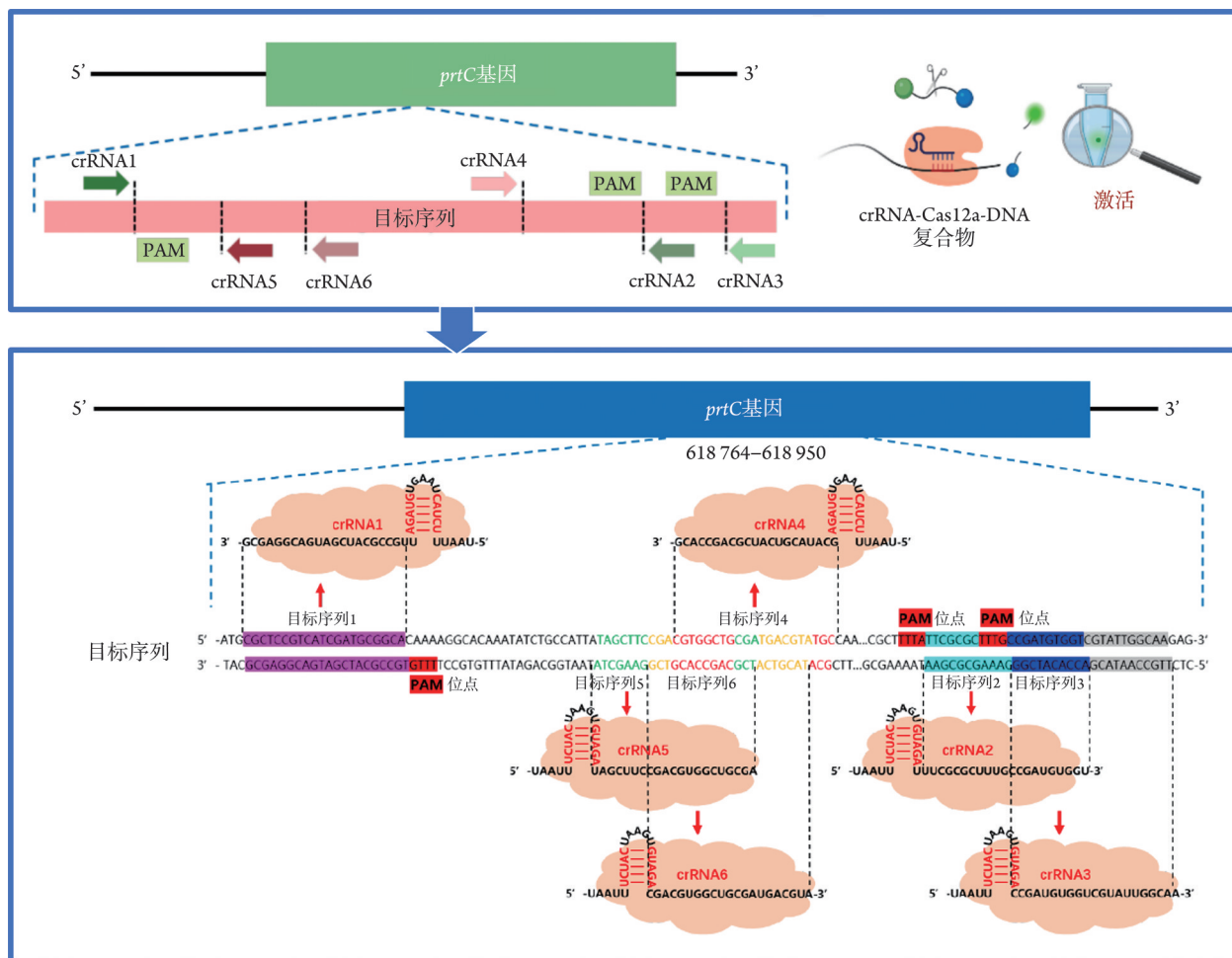
图2 基于分子生物学(CRISPR-Cas12a)检测技术的原理图^[33]

Fig.2 Schematic diagram of the detection technology based on molecular biology (CRISPR-Cas12a)

crRNA. 向导RNA; PAM. 原间隔序列邻近基序

分裂矩形谐振器的间隙中添加金纳米颗粒层,显著提高了超表面传感器的灵敏度,为野战饮水安全、反化学战及军事基地水质保障提供了快速、低成本且高灵敏度的检测方案。

2024年Park等^[35]研制出一种无细胞生物传感器,用于生物战剂的多重、灵敏检测。通过将目标病原体的16S rRNA转化为可定制的报告蛋白来实现检测,灵敏度可达飞摩尔级别,且能灵活配置用于检测多种病原体。凭借其超高的检测性能及卓越的战场适应性,为军事生物防御领域提供了一种极具潜力的工具。

2024年Wang等^[85]开发了一种能够安全高效探测爆炸物的生物传感器系统,用于检测1,3-二硝基苯。该传感器在液体溶液中的检测灵敏度为0.1 μg/ml,在沙土中的检测灵敏度达到0.5 mg/kg,并且具有令人满意的特异性和长期稳定性。该生物传感器的优异性能可推动在实际大面积雷区中实现精确、现场化且高效地探测爆炸物,展现出其在军事场景中的潜在应用价值。

综上,微生物快速检测技术在军事领域的应用核心在于其能够快速、精准地识别生物战剂、监测战场环境及保障人员健康,主要依托免疫学技术、分子生物学技术以及生物传感器等实现。此外还有表面增强拉曼散射技术^[86]、激光诱导击穿光谱技术^[87]、无人机侦察与检测平台^[88]等技术,在远程、非接触式侦检及检测装备方面具有重大意义,同时还具备了大范围生物威胁快速巡查能力。微生物快速检测在军事应用场景广泛,包括生物威胁预警、战场医学防护、军事环境安全监测以及特殊侦察任务。该类技术也正向智能化、微型化与集成化发展,力求在便携性、灵敏度与实战适应性上进一步提升,以应对未来战场复杂多变的生物威胁。基于微流控的生物传感器检测技术如图3所示。

3 总结与展望

现代及未来战场中,微生物威胁谱系日益复杂,已从传统的特定微生物感染,扩展至多重耐药菌的战伤感染、恶劣环境引发的流行病、恐怖的生物战

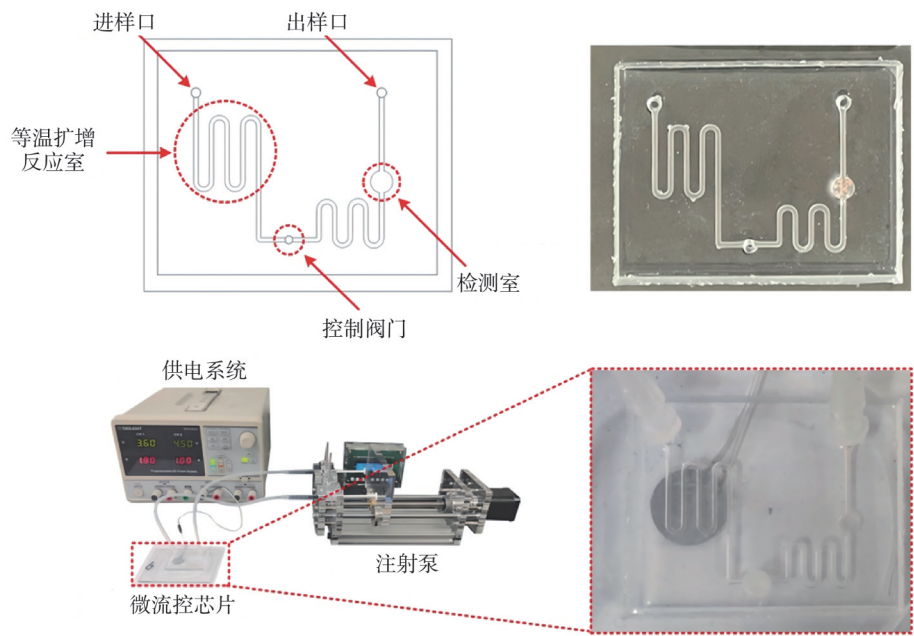


图3 基于微流控生物传感器检测技术的示意图^[89]

Fig.3 Schematic diagram of microfluidic biosensor detection technology

左上图为微流控芯片结构示意图，包含进样口、等温扩增反应室(蛇形通道)、控制阀门、检测室及出样口；右上图为芯片实物图；左下图为检测系统实物，包含芯片、注射泵(驱动液体流动)和供电系统(为系统提供能源)；右下图为加热器置于蛇形通道下方，为等温扩增提供恒温环境

剂及潜在的新型基因工程病原体。这一演变对检测技术提出了前所未有的挑战，要求其必须从后方实验室走向战场前沿，实现从定性筛查到种类鉴定、载量定量、毒力/耐药性分析、溯源追踪等多维度精准判定的能力跨越。微生物快速检测技术是现代战场卫勤保障与生物防御体系的核心环节，其发展水平直接关系到伤员的存活率、部队战斗力的维持以及应对生物威胁的响应速度。本文系统综述了免疫层析、CRISPR 基因编辑、等温扩增及生物传感器等前沿技术的原理与军事应用，揭示了该领域正经历从依赖实验室的传统方法向适用于战场前线的即时、精准诊断范式的转变。这些技术为快速识别生物战剂、精准控制战伤感染提供了关键工具，展现出较高的军事应用价值。

然而，将高性能的实验室技术转化为稳定可靠的野战装备，仍面临严峻瓶颈。首先是环境适应性的瓶颈。战场环境的极端温湿度、震动、电磁干扰及复杂样本基质，极易导致依赖精密生化反应的检测方法失效，出现灵敏度下降或假性结果。其次是操作集成化的瓶颈。理想的单兵或野战级设备需实现“样本入、结果出”的全流程整合，但目前核酸提取、扩增、检测等步骤往往依赖多个设备或人工操作，距离高度自动化、微型化的“芯片实验室”目标仍有差距。最后是信息维度的瓶颈。单一技术的检测，已不足以支撑复杂的战场决策。指挥与卫

勤系统更需要能同步鉴别混合感染、评估毒力与耐药性乃至溯源威胁的多维信息。

为突破上述瓶颈，未来战场微生物快速检测技术的发展，将遵循“技术融合-装备升级-体系重构”的清晰路径纵深演进。在技术层面，突破点在于微流控、纳米材料、生物学与人工智能算法的交叉。通过微流控芯片集成全自动样本预处理，利用功能化纳米材料提升信噪比与抗干扰能力，并借助 AI 算法优化反应或直接解析复杂信号，从而创制出对各种环境具备充分鲁棒性且对操作者友好的新一代智能检测模块。在装备平台层面，这些核心技术模块将向两极集成，一是向单兵手持、便携的超小型、低功耗装备发展，成为前线人员的标准配置；二是与无人机、无人车、无人艇等机动平台深度融合，构成可前出侦察、自动采样、原位分析的无人化检测哨点，实现前线即时检测，大幅扩展监测半径并降低人员风险。最终，在体系层面，通过物联网与边缘计算，将散布于单兵、无人平台、野战医疗点及后方指挥所的各类检测节点联为一体，构建一个全域覆盖、实时同步的分布式生物威胁智能感知网络。该网络不仅能实现海量检测数据的实时汇聚与智能研判，完成威胁评估、态势预测与资源调度，更能推动我军生物安全防护从“被动响应、分散处置”向“主动预警、体系协同”的根本性跨越。这不仅是提升新时代卫勤保障能力的关键，更是未

来战争中夺取生物安全主动权、保障部队整体战斗力的战略支撑。

【参考文献】

- [1] 杨勇, 雷万生, 冯青青, 等. 对应急作战中医院感染预防控制的思考[J]. 东南国防医药, 2010, 12(2): 140-141.
- [2] Eardley WGP, Brown KV, Bonner TJ, *et al.* Infection in conflict wounded[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2011, 366(1562): 204-218.
- [3] Boral J, Tellapragada C, Thofte O, *et al.* Comparative infectivity, virulence and molecular epidemiology of MDR and XDR *Acinetobacter baumannii* isolates emerging from war-related injuries in Ukraine[J]. *J Infect*, 2025, 91(2): 106561.
- [4] Collaborators GAR. Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990-2021: a systematic analysis with forecasts to 2050 [J]. *Lancet*, 2024, 404(10459): 1199-1226.
- [5] Vestweber PK, Wächter J, Planz V, *et al.* The interplay of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* in dual-species biofilms impacts development, antibiotic resistance and virulence of biofilms in in vitro wound infection models[J]. *PLoS One*, 2024, 19(5): e0304491.
- [6] Tribble DR, Murray CK, Lloyd BA, *et al.* After the battlefield: infectious complications among wounded warriors in the trauma infectious disease outcomes study[J]. *Mil Med*, 2019, 184(Suppl 2): 18-25.
- [7] 刘润卿. 传染病对战争结果的影响机制[D]. 武汉: 华中师范大学, 2022.
- [8] Biselli R, Nisini R, Lista F, *et al.* A historical review of military medical strategies for fighting infectious diseases: from battlefields to global health[J]. *Biomedicine*, 2022, 10(8): 2050.
- [9] 周丽艳, 于玲. 二战及战后初期美国海军在国家生物战略中的作用[J]. 哈尔滨师范大学社会科学学报, 2025, 16(4): 148-151.
- [10] 郇悦名, 翁国军, 李剑君, 等. 表面增强拉曼散射技术在生化战剂侦检中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 72-85.
- [11] Jansen HJ, Breeveld FJ, Stijns C, *et al.* Biological warfare, bioterrorism, and biocrime[J]. *Clin Microbiol Infect*, 2014, 20(6): 488-496.
- [12] Chiu C, Legrand M. Epidemiology of sepsis and septic shock[J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2021, 34(2): 71-76.
- [13] Taj M, Brenner M, Sulaiman Z, *et al.* Sepsis protocols to reduce mortality in resource-restricted settings: a systematic review[J]. *Intensive Crit Care Nurs*, 2022, 72: 103255.
- [14] Martini KM, Boddu SS, Nemenman I, *et al.* Maximum likelihood estimators for colony-forming units[J]. *Microbiol Spectr*, 2024, 12(9): e0394623.
- [15] Popović NT, Kepec S, Kazazić SP, *et al.* Identification of environmental aquatic bacteria by mass spectrometry supported by biochemical differentiation[J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e0269423.
- [16] Ding R, Zhang J, Chen C. The thermal cycling methods for rapid PCR[J]. *Crit Rev Biotechnol*, 2026, 46(1): 80-99.
- [17] 李广大, 王敬夫, 石晋, 等. 基于 PfAgo 的生物传感器在病原微生物检测中的研究进展[J]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2025, 19(2): 124-131.
- [18] Waigh TA, Korabel N. Heterogeneous anomalous transport in cellular and molecular biology[J]. *Rep Prog Phys*, 2023, 86(12): 126601.
- [19] Narwal N, Katyal D, Kataria N, *et al.* Emerging micropollutants in aquatic ecosystems and nanotechnology-based removal alternatives: a review[J]. *Chemosphere*, 2023, 341: 139945.
- [20] Ravindran N, Kumar S, MY, *et al.* Recent advances in surface plasmon resonance (SPR) biosensors for food analysis: a review[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023, 63(8): 1055-1077.
- [21] Li Y, Cui X, Yang X, *et al.* Artificial intelligence in predicting pathogenic microorganisms' antimicrobial resistance: challenges, progress, and prospects[J]. *Front Cell Infect Microbiol*, 2024, 14: 1482186.
- [22] Tyler AD, Mcallister J, Stapleton H, *et al.* Field-based detection of bacteria using nanopore sequencing: Method evaluation for biothreat detection in complex samples[J]. *PLoS One*, 2023, 18(11): e0295028.
- [23] Geleta GS. A colorimetric aptasensor based on gold nanoparticles for detection of microbial toxins: an alternative approach to conventional methods[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2022, 414(24): 7103-7122.
- [24] Bani A, Whitby C, Colbeck I, *et al.* Rapid in-field detection of airborne pathogens using loop-mediated isothermal amplification (LAMP)[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(12): 2578.
- [25] Voon CH, Yusop NM, Khor SM. The state-of-the-art in bioluminescent whole-cell biosensor technology for detecting various organic compounds in oil and grease content in wastewater: from the lab to the field[J]. *Talanta*, 2022, 241: 123271.
- [26] Barnell EK, Wurtzler EM, Rocca JL, *et al.* Multitarget stool RNA test for colorectal cancer screening[J]. *JAMA*, 2023, 330(18): 1760-1768.
- [27] Lee JH, Kim KS. Nano/micro biosensors for biomedical applications[J]. *Biosensors*, 2024, 14(2): 58.
- [28] 张宪文, 吕晶. «抗日战争时期细菌战与防疫战文献集»[J]. 近代史研究, 2025, (6): 139.
- [29] 史清海. 土拉弗朗西斯氏菌、炭疽芽孢杆菌定量PCR检测技术的研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2010.
- [30] 吉颖, 耿际泉, 向庆燕. 野战条件下快速细菌检验及药敏试验方法的探讨[J]. 西南国防医药, 1994, 4: 216-217.
- [31] 王静. 用悬浮芯片技术定量检测多种病原体的研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2007.
- [32] 刘玮, 路颖, 于庆潭. 分子生物学技术在生物战病原微生物检测中的应用[J]. 国际检验医学杂志, 2021, 42(23): 2927-2930.
- [33] Wang JF, Zhang J, Qu X, *et al.* Amplification-free detection of *Porphyromonas gingivalis* with no-PAM CRISPR-Cas12a using a smartphone-based platform[J]. *Chem Eng J*, 2025, 510: 161578.
- [34] Zhong H, Li JL, Jiang JH, *et al.* Label-free sensing technology of two *Staphylococcus* species based on a terahertz metasurface[J]. *Biomed Opt Express*, 2025, 16(6): 2210-2216.
- [35] Park YJ, Choi S, Lee KW, *et al.* A cell-free biosensor for multiplexed and sensitive detection of biological warfare agents[J]. *Biosens Bioelectron*, 2024, 257: 116331.
- [36] 华菲, 张平平, 王晓英, 等. 基于上转发光免疫层析技术快速定量检测类鼻疽伯克霍尔德菌方法的建立[J]. 中华预防医学杂志, 2015, 49(2): 166-171.
- [37] 刘婧婷, 譙华, 冯孝杰, 等. 酶联免疫吸附分析法应用于战场水环境 TNT 检测的可行性研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(1): 125-127, 131.

- [38] 李鑫, 吴慧云, 黄志松, 等. 生物战剂检测技术及其研究进展[J]. 军事医学, 2014, 38(4): 312-316.
- [39] 左庭婷, 端青, 姜永强, 等. A型肉毒素胶体金免疫层析法检测试纸条的研制[J]. 军事医学科学院院刊, 2003, 27(6): 435-436.
- [40] Iqbal SS, Mayo MW, Bruno JG, *et al.* A review of molecular recognition technologies for detection of biological threat agents[J]. Biosens Bioelectron, 2000, 15(11-12): 549-578.
- [41] Cox CR, Jensen KR, Mondesire RR, *et al.* Rapid detection of *Bacillus anthracis* by γ phage amplification and lateral flow immunochromatography[J]. J Microbiol Methods, 2015, 118: 51-56.
- [42] Changula K, Kajihara M, Muramatsu S, *et al.* Development of an immunochromatography assay to detect Marburg virus and Ravn virus[J]. Viruses, 2023, 15(12).
- [43] Kong S, Ge M, Liu H, *et al.* Development and evaluation of a colloidal gold immunochromatographic assay for rapid on-site detection of cucumber mosaic virus[J]. J Virol Methods, 2025, 337: 115190.
- [44] Kim D, Lee J, Bal J, *et al.* Development and clinical evaluation of an immunochromatography-based rapid antigen test (GenBody™ COVAG025) for COVID-19 diagnosis[J]. Viruses, 2021, 13(5): 796.
- [45] 史子江. 纳米颗粒标记膜层析快速检测HCV试纸的初步研制[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2003.
- [46] 赵勇. 基于电场驱动的上转发光免疫层析快速检测技术研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2016.
- [47] Yu Q, Li J, Zheng S, *et al.* Mercaptophenylboronic acid-mediated nanzyme immunochromatographic assay for simultaneous detection of respiratory bacteria and virus[J]. Adv Sci (Weinh), 2025, 12(31): e2502574.
- [48] 马静, 李劲松, 杜新安, 等. 外军生物武器医学防护装备现状与发展[J]. 医疗卫生装备, 2003, 24(2): 28-31.
- [49] Whittle H, Hazlett D, Wood D, *et al.* Immunofluorescence technique for the identification of polioviruses[J]. Lancet, 1992, 339(8790): 429-430.
- [50] Santoriello D, Markowitz GS. Heavy and light chains all at once: a new immunofluorescence technique to evaluate monoclonal immunoglobulin deposits[J]. Kidney Int, 2021, 100(1): 22-24.
- [51] Anderson AD, Smoak B, Shuping E, *et al.* Q fever and the US military[J]. Emerg Infect Dis, 2005, 11(8): 1320-1322.
- [52] Peruski AH, Johnson LH, Peruski LF. Rapid and sensitive detection of biological warfare agents using time-resolved fluorescence assays[J]. J Immunol Methods, 2002, 263(1-2): 35-41.
- [53] de Araujo FF, Saffo J, Bolton J, *et al.* Development of a multiplex serological assay to detect immunoreactivity against a novel *Bartonella* species in military working dogs[J]. Microbiol Spectr, 2025, 13(10): e0071425.
- [54] Akhtar A, Fuchs E, Mitchison T, *et al.* A decade of molecular cell biology: achievements and challenges[J]. Nat Rev Mol Cell Biol, 2011, 12(10): 669-674.
- [55] Jarrold MF. Applications of charge detection mass spectrometry in molecular biology and biotechnology[J]. Chem Rev, 2022, 122(8): 7415-7441.
- [56] He H, Wu C, Saqib M, *et al.* Single-molecule fluorescence methods for protein biomarker analysis[J]. Anal Bioanal Chem, 2023, 415(18): 3655-3669.
- [57] Huang Z, Lacourse SM, Kay AW, *et al.* CRISPR detection of circulating cell-free *Mycobacterium tuberculosis* DNA in adults and children, including children with HIV: a molecular diagnostics study[J]. Lancet Microbe, 2022, 3(7): e482-e492.
- [58] Kulkarni A, Tanga S, Karmakar A, *et al.* CRISPR-based precision molecular diagnostics for disease detection and surveillance[J]. ACS Appl Bio Mater, 2023, 6(10): 3927-3945.
- [59] Yan L, Song Y, Zhai T, *et al.* Establishment of a visual gene chip method for the simultaneous detection of seven waterfowl virus pathogens[J]. Viruses, 2025, 17(3): 358.
- [60] 陈波, 李家奇, 付立申, 等. 诺如病毒TaqMan荧光定量PCR检测方法的设计与优化[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2024, 38(3): 1-6.
- [61] Barac D, Abdel-Mawgood A, Awad S, *et al.* Multiplex PCR-based genotyping of *Salmonella enteritidis* and *Salmonella typhimurium* from food sources and assessment of their antimicrobial resistance profiles in Egypt[J]. Mol Biol Rep, 2024, 51(1): 794.
- [62] Suo Y, Yin W, Zhu Q, *et al.* A specific and sensitive aptamer-based digital PCR chip for *Salmonella typhimurium* detection[J]. Biosensors, 2022, 12(7).
- [63] Fiore A, Treglia I, Ciccaglioni G, *et al.* Application of a loop-mediated isothermal amplification (LAMP) assay for the detection of *Listeria monocytogenes* in cooked ham[J]. Foods (Basel), 2023, 12(1): 193.
- [64] Lin L, Luo Q, Li L, *et al.* Recombinase polymerase amplification combined with *Pyrococcus furiosus* Argonaute for fast *Salmonella* spp. testing in food safety[J]. Int J Food Microbiol, 2024, 417: 110697.
- [65] Mu D, Zhou D, Xie G, *et al.* Real-time recombinase-aided amplification with improved propidium monoazide for the rapid detection of viable *Escherichia coli* O157:H7 in milk[J]. J Dairy Sci, 2022, 105(2): 1028-1038.
- [66] 孙魁. 基于LFD-RPA的核酸可视化检测技术的建立及应用[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2017.
- [67] 赵勇, 杜奕涛, 宋亚军, 等. 一种基于液滴数字PCR快速检测五种烈性病原菌的引物探针组合及其应用方法 CN202210408797.3[P]. CN114891902B [2026-06-12]. https://d.wanfangdata.com.cn/patent/ZL_CN202210408797.3_CN114891902B_20260102.
- [68] Oloniniyi OK, Kurosaki Y, Miyamoto H, *et al.* Rapid detection of all known ebolavirus species by reverse transcription-loop-mediated isothermal amplification (RT-LAMP) [J]. J Virol Methods, 2017, 246: 8-14.
- [69] Laurent M, Geoffroy M, Pavani G, *et al.* CRISPR-based gene therapies: from preclinical to clinical treatments[J]. Cells, 2024, 13(10): 800.
- [70] CRISPR technology[J]. Nat Biotechnol, 2022, 40(6): 832.
- [71] Janik E, Niemcewicz M, Ceremuga M, *et al.* Various aspects of a gene editing system-CRISPR-Cas9[J]. Int J Mol Sci, 2020, 21(24): 9604.
- [72] Teng F, Guo L, Cui T, *et al.* CDetection: CRISPR-Cas12b-based DNA detection with sub-attomolar sensitivity and single-base specificity[J]. Genome Biol, 2019, 20(1): 132.
- [73] Li Y, Dou Y, Lu Z, *et al.* CRISPR/Cas12a-functionalized silicon nanowires field-effect transistor sensor for ultra-sensitive detection of pathogen nucleic acids[J]. Biosens Bioelectron, 2025, 289: 117936.
- [74] Jaakson K, Zernant J, Külm M, *et al.* Genotyping microarray (gene

- chip) for the ABCR (ABCA4) gene[J]. *Hum Mutat*, 2003, 22(5): 395-403.
- [75] Bharti M, Bajpai A, Rautela U, *et al.* Human ERG oncoprotein represses a *Drosophila* LIM domain binding protein-coding gene Chip[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2023, 120(2): e2211189119.
- [76] 郭微微, 邱军强, 何培民, 等. 港口航道致病性细菌检测微阵列基因芯片的研制[J]. *南方农业学报*, 2017, 48(7): 1304-1309.
- [77] Xie ST, Ding LJ, Huang FY, *et al.* VFG-chip: a high-throughput qPCR microarray for profiling virulence factor genes from the environment[J]. *Environ Int*, 2023, 172: 107761.
- [78] Yoon J, Kwon N, Lee Y, *et al.* Nanotechnology-based wearable electrochemical biosensor for disease diagnosis[J]. *ACS Sens*, 2025, 10(3): 1675-1689.
- [79] Lei ZL, Guo B. 2D material-based optical biosensor: status and prospect[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2022, 9(4): e2102924.
- [80] Li H, Long M, Su H, *et al.* Carboxymethyl chitosan assembled piezoelectric biosensor for rapid and label-free quantification of immunoglobulin Y[J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 290: 119482.
- [81] Koumbia M, Ngoepe M, Holman JB, *et al.* Microfluidic electrochemical biosensors: tools for advancing the sustainable development goals[J]. *Trends Biotechnol*, 2024, 42(10): 1207-1210.
- [82] Aghababae M, Foroushani ES, Changani Z, *et al.* Recent advances in the development of enzymatic paper-based microfluidic biosensors[J]. *Biosens Bioelectron*, 2023, 226: 115131.
- [83] Zhang J, Srivatsa P, Ahmadzai FH, *et al.* Reduction of biosensor false responses and time delay using dynamic response and theory-guided machine learning[J]. *ACS Sens*, 2023, 8(11): 4079-4090.
- [84] Abramovich A, Azoulay Y, Rotshild D. Real-time metasurface sensor for monitoring micropoisons in aqueous solutions based on gold nanoparticles and terahertz spectroscopy[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(3): 1279.
- [85] Wang Z, Ma R, Chen B, *et al.* A transcription factor-based bacterial biosensor system and its application for on-site detection of explosives[J]. *Biosens Bioelectron*, 2024, 244: 115805.
- [86] Chen R, Li S, Ren S, *et al.* Micro-/nanostructures for surface-enhanced Raman spectroscopy: recent advances and perspectives [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2024, 331: 103235.
- [87] Skalny AV, Korobeinikova TV, Aschner M, *et al.* Medical application of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for assessment of trace element and mineral in biosamples: laboratory and clinical validity of the method[J]. *J Trace Elem Med Biol*, 2023, 79: 127241.
- [88] Do S, Lee M, Kim JS. The effect of a flow field on chemical detection performance of quadrotor drone[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(11): 3262.

(责任编辑: 纪方方)

解放军医学杂志®