DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.xxx
引用格式: 覃思, 陈晨, 江思华, 等. 食品中菌落总数快速检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 192–201.
Qin Si, Chen Chen, Jiang Si-Hua, et al. Research progress on rapid detection technologies for total plate count in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 192–201. (in Chinese with English abstract).

食品中菌落总数快速检测技术研究进展

覃 思[1#], 陈 晨[2#], 江思华[3], 黄 结[4*], 朱 荣[4*]

(1. 广西-东盟食品检验检测中心, 南宁 530029; 2. 中国检验认证集团广西有限公司, 南宁 530022; 3. 南宁海关技术中心, 南宁 530000; 4. 广西壮族自治区药品检验研究院, 南宁 530021)

摘 要: 目的 食品菌落总数是评价食品卫生质量、监控生产过程及预测商品货架期的重要微生物指标, 检测速度的快慢决定了食品安全监管的时效性与精准度。食品传统检测方法 GB 4789.2—2022 平板计数法《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》虽为食品菌落总数检测“金标准”, 但操作耗时较长, 难以满足现代食品工业快速实时化检测的要求。本文综述了近十年食品菌落总数快速检测技术的研究进展, 着重分析介绍了各种快速检测平台如流式细胞术、快速测试片法、三磷酸腺苷生物发光法、电阻抗法、荧光定量聚合酶链式反应法、传感器、高光谱成像、介电谱、Soleris 实时光电技术和表面增强拉曼光谱法等新型检测平台的原理特点与优化方法。在此基础上, 从检测灵敏度、抗基质干扰能力、检测定量能力、检测现场适用性等方面分析讨论了各类技术存在的问题和未来的发展趋势, 以期能够为食品微生物快速检测技术的深入研究和产业化开发提供参考。

关键词: 食品安全; 菌落总数; 快速检测技术; 微生物检测
中图分类号: TS207.9 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0192–10

Research progress on rapid detection technologies for total plate count in food

QIN Si[1#], CHEN Chen[2#], JIANG Si-Hua[3], HUANG Jie[4*], ZHU Rong[4*]

(1. *Guangxi-Asean Food Inspection Center*, *Nanning* 530029, *China*; 2. *China Certification & Inspection Group Guangxi Co*., *Ltd*., *Nanning* 530022, *China*; 3. *Technology Center of Nanning Customs*, *Nanning* 530000, *China*; 4. *Guangxi Institute for Drug Control*, *Nanning* 530021, *China*)

ABSTRACT: Total plate count in food is a key microbiological indicator for evaluating food hygiene quality, monitoring production processes and predicting product shelf life; the speed of testing determines the timeliness and accuracy of food safety regulation. Although the traditional plate count method GB 4789.2—2022 *National food safety*

收稿日期: 2026-03-14
基金项目: 广西市场监督管理局科研项目(GXSJKJ2024-21)
#覃思和陈晨为共同第一作者

第一作者: 覃思(1987—), 女, 中级工程师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: 85693114@qq.com
陈晨(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: 260012499@qq.com
***通信作者:** 黄结(1978—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为微生物检查。E-mail: 1206037082@qq.com
朱荣(1978—), 女, 硕士, 副主任药师, 主要研究方向为微生物检查。E-mail: 944408331@qq.com

standard-Microbiological testing of foods-Determination of total colony count is considered the “gold standard” for total colony count testing, it is time-consuming and fails to meet the real-time testing requirements of the modern food industry for rapid verification. This paper reviewed the research progress in rapid total plate count detection technologies over the past decade, focused on the analysis and introduction of the principles, characteristics and optimization methods of various rapid detection platforms, such as flow cytometry, rapid test strips, adenosine triphosphate bioluminescence, electrical impedance, quantitative fluorescent polymerase chain reaction, sensors, hyperspectral imaging, dielectric spectroscopy, Soleris real-time photonic technology and surface-enhanced Raman spectroscopy. Based on this review, the paper analyzed and discussed the existing challenges and future trends of these technologies in terms of detection sensitivity, resistance to matrix interference, quantitative capabilities and on-site applicability, with the aim of providing a reference for in-depth research and industrial development of rapid food microbiological detection technologies.

KEY WORDS: food safety; total plate count; rapid detection technology; microbiological detection

0　引　言

食品安全是一个全球关注的公共卫生问题。据《中国卫生健康统计年鉴》记录, 2011—2021 年我国共上报 5000 多起微生物食品中毒事件[1]。近年来, 由微生物造成的食品安全事件仍然时有报道, 例如 2022 年河北省市场监督管理局发布山东鲁冰花冷冻食品有限公司老冰棍菌落总数超标事件[2]。菌落总数是衡量食品受微生物污染程度的核心指标, 其检测的效率、准确性直接影响食品质量控制的结果。

传统平板计数法(GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验菌落总数测定》)虽然准确性和重复性较好, 但也存在检测周期长(48 h 以上), 无法检出处于“活的非可培养状态”(viable but non culturable state, VBNC)的微生物的缺点, 难以满足现代食品工业急需准确可靠随时或应急监督的要求。目前, 实验室对食品菌落总数的检测大都采用平板计数法等传统方法, 导致产品停留时间的延长、库存的成本增加。因此开发可在几分钟或几小时内获得结果的快速检测技术已成为食品微生物检测领域研究的重点。快速检测技术是相较于传统平板计数法, 能在几分钟至几小时内得到结果的一种微生物检测技术, 主要包括流式细胞术、快速测试片法、三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)生物发光法、电阻抗法、荧光定量聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)法、传感器、高光谱成像、介电谱、Soleris 实时光电技术和表面增强拉曼光谱法(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS)等。

本文总结了近十年国内外有关食品菌落总数快速检测技术研究的进展, 阐述了各主流食品菌落总数快速检测技术的原理、优化方法、性能指标等, 从灵敏度、检测速度、成本、现场适用性等方面进行横向比较, 以及各快速检测方法面临的挑战与发展方向, 以期为科研人员、监管人员能够有所启发, 提供帮助。

1　技术现状分析

本文按照从分子/生理水平到宏观/图像水平、从经典技术到新兴技术的逻辑, 依次介绍 12 种主流菌落总数快速检测方法。其中, 流式细胞术、ATP 生物发光法、电阻抗法、荧光定量 PCR、四甲基偶氮唑蓝(methyl thiazolyl tetrazolium, MTT)比色法、荧光法、传感器技术均是利用微生物的生理特征、代谢特征、分子特征作为检测平台的方法; 快速测试片法、Soleris 实时光电技术是传统培养原理改进得的快速化方法; 高光谱成像、介电谱、SERS 都是光谱/物理场分析技术。每种技术从原理、优化方法或应用实例、优缺点、适用场景等 5 个方面进行阐述。

1.1　流式细胞术

流式细胞术是一种基于单个细胞光学信号的高通量分析技术, 利用能与活菌或者死菌标记的特异性荧光染料标记活菌或死菌, 并在激光激发后产生荧光信号而实现快速、定量分析[3]。该技术不依赖培养, 可直接检测液态样本中的微生物。赵晓美等[4]将该技术用于生乳菌落总数的检测, 测定结果与 GB 4789.2—2022 平板计数法结果非常接近, 检测时间缩短至数小时。张兰等[5]应用于酸性饮料中菌落总数检测的结果比 GB 4789.2—2022 平板计数法提高 1 d 以上的效率。Stiefel 等[6]报道, 与 GB 4789.2—2022 平板计数法相比, 流式细胞术可使检测时间缩短 40%以上, 且其在 $10 \sim 10^4$ CFU/mL 范围内的分辨率高, 适用于低菌量样本的快速筛查。梅仕良[7]提高了染色剂浓度(0.05 mmol/mL SYTO+5 μg/mL 碘化丙啶)、孵育时间(5 min)、上样浓度(10^5~10^6 CFU/mL)及上样速度(30 μL/min), 建立了标准化的流式检测流程, 与 GB 4789.2—2022 平板计数法在 10^3~10^7 CFU/mL 范围内呈线性关系。上述研究表明, 流式细胞术的染色方案和样本前处理步骤是重点, 不同食品基质可能需要注意染色方案和程序的优化。该技术高通量、高灵敏, 缺点是仪器设备昂贵、前处理复杂, 主要用于以

液态食品为检测对象的质控和科研(图 1)。

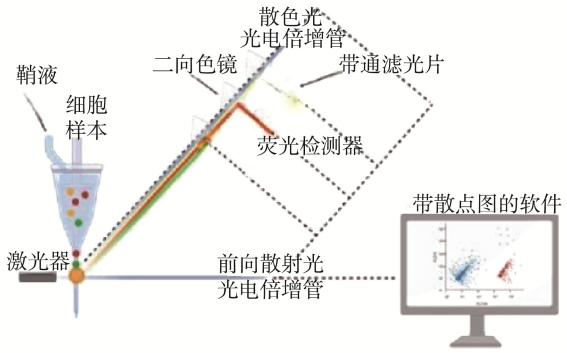


图 1 流式细胞术的原理
Fig.1 Principle of flow cytometry

1.2 快速测试片法

快速测试片法是把培养基和显色物质预固定于疏水载体(如纸片、无纺布或胶片等)上, 接种培养后, 菌落显色即可计数的即用型检测法。该方法省去了 GB 4789.2—2022 平板计数法中的培养基配制、灭菌及倾注等步骤。现在最具代表性的是美国 3M 公司研制的 3M™ Petrifilm™ 系列快速测试片, 其性能已在多种食品基质中得到广泛验证。赵立冬等[8]采用 3M™ Petrifilm™ 快速测试片法与 GB 4789.2—2022 平板计数法检测 295 份熟肉制品的结果一致性好。王曦等[9]将两种方法分别用于 30 份饼干、糕点样品和 2 份质控样品的菌落总数测定, 结果无显著差异。张建军等[10]扩大样本范围, 对市售生肉制品、鲜奶制品、豆制品、粮食制品、冷冻饮品、坚果籽实、即食果蔬制品等食品共计 112 批进行 2 种方法的比对研究, 结果显示快速测试片法与 GB 4789.2—2022 平板计数法检测结果无显著性差异, 说明了快速测试片方法在上述食品基质中的广泛适用性。麻晓莉[11]分别采用凝胶型(美国 3M 公司, 33PK43)和无纺布型(日本岛津公司)两种菌落总数测试片对 2 份实验室能力验证样品进行检测, 并与 GB 4789.2—2022 平板计数法进行比较。结果表明两种测试片法的检测结果与 GB 4789.2—2022 平板计数法均是一致的, 验证说明不同类型快速测试片在实际应用中的可靠性。该法操作简便、无需配制培养基, 但菌落易融合导致高浓度计数不准确, 适用于现场快速筛查和企业自检。

1.3 ATP 生物发光法

ATP 是活细胞内能量代谢的关键分子, 其含量与活菌数量成正比。荧光素酶催化荧光素与 ATP 反应并产生光子, 发光强度与 ATP 浓度成正比, 能够快速估算菌落总数[12]。Lee 等[13]采用 25 ℃热处理 10 min 显著提高了细菌 ATP 的释放效率, 检测时间缩短至 30 min 以内, ATP 法检测与 GB 4789.2—2022 平板计数法的线性相关系数达 0.975, 证明该方法可以用于乳制品中乳酸菌菌落总数检测。程教擘等[14]将其应用于测定鸡蛋壳表面菌落总数, 相关系数为 0.912, 证明了该方法可用于固体表面微生物的检测。张艳珍等[15]进一步以冷鲜肉为研究对象, 比较了不同保存天数下 ATP 生物发光法与 GB 4789.2—2022 平板计数法检测冷鲜肉中菌落总数的实验结果的线性相关系数超过 0.98, 且重现性良好, 表明该方法对肉品中菌落总数快速检测有较好的应用前景。该法操作简便、可现场检测, 但方法易受非细菌 ATP 的干扰, 低菌量时灵敏度不足等缺点, 适用于生产线清洁验证与卫生监控。

1.4 电阻抗法

电阻抗法是一种基于微生物代谢活性分析的快速检测方法。其基本原理是: 细菌在生长代谢过程中将培养基中的惰性物质(如碳水化合物、蛋白质、脂类等)消化分解为小分子电活性物质(如乳酸、乙酸、氨基酸等), 改变培养基的电导率和电阻抗、电阻抗值下降。电阻抗的变化程度与样品中初始微生物数量成正比关系, 电阻抗值降至特定阈值所需的时间可推算出样品中菌落总数[16]。杜寒春等[17]采用电阻抗法对市售五大品牌巴氏杀菌牛乳中的菌落总数进行快速检测, 结果表明, 该方法的可信检测范围为 10 CFU/mL, 可完全满足食品安全国家标准对巴氏杀菌乳微生物限量的检测要求。在 7.46 h 内即可准确判定样品是否合格, 较传统 GB 4789.2—2022 平板计数法检测时间大幅缩短。总的来看, 该方法自动化程度高、重复性好, 但设备昂贵、对低浓度菌或不活跃菌不敏感, 现在较适用于货架期间监测和生产过程实时监测。

1.5 荧光定量 PCR 技术

荧光定量 PCR 技术是标记荧光基团加入到反应中而达到对整个 PCR 扩增过程中变化进行实时监测。随着扩增产物累积, 荧光信号随之增大, 并依据阈值循环数(Ct 值)及标准曲线对初始模板进行准确定量[18]。该技术具有灵敏度高、特异性强、检测时间短等优势, 已广泛应用于食品中细菌种类和数量检测[19]。Fan 等[20]建立了荧光定量 PCR 定量检测乳酸菌的方法, 成功实现对 6 株乳酸菌的定性和定量检测, 并与 GB 4789.2—2022 平板计数法进行对比验证。结合共聚焦激光显微镜、SYTO 9/碘化丙啶双荧光染色, 证明了酸奶中活菌比例在 90%以上。Alves 等[21]采用荧光定量 PCR 技术, 在 24 h 富集后同时检测空肠弯曲杆菌和沙门氏菌的检出限分别为 10^6 CFU 和 10^3 CFU。该技术特异性强、灵敏度高, 缺点为仪器试剂昂贵、需专业人员操作, 且无法区分死活菌, 可用于致病菌快速检测和科研领域。

1.6 MTT 比色法

MTT 比色法是一种利用细胞代谢的活性检测微生物数量的快速方法。其原理是活细胞线粒体中的琥珀酸脱氢

酶可将外源性的黄色 MTT 还原为蓝紫色甲臜结晶, 结晶不溶于水, 加入有机溶剂溶解后在 550 nm 波长处显示特征吸收峰。一定范围内的细胞浓度越高, 吸收量越大, 吸光度值随活细胞数量成正比例变化, 从而可间接定量测定样品中的活菌总数[22]。李旋[23]分别采用MTT比色法与ATP生物发光法检测鸡蛋蛋壳表面的细菌总数, 结果表明两种方法与 GB 4789.2—2022 平板计数法得到的结果无显著差异, 验证了MTT比色法对固体样本表面菌落总数检测中的适用性。该法操作简便、检测速度快, 但结果易受细胞代谢活性影响、需要标准化操作, 可用于活性菌总数的快速筛查。

1.7　荧光法快速检测技术

荧光法快速检测技术利用活细胞内的非特异性酯酶能够水解 Calcein AM, 生成强烈绿色荧光的 Calcein, Calcein滞留于活菌胞内, 用便携式荧光定量仪测定荧光强度, 定量活菌数。该染料易穿透细胞膜、荧光稳定性高、背景干扰低, 适用于活性菌总数的即时检测。张宇婷等[24]使用便携式荧光定量仪(Qubit 3.0)检测, 相对荧光强度与活菌数线性良好, 与 GB 4789.2—2022 平板计数法结果无显著性差异, 验证该方法活性菌快速检测准确。该技术操作简便、稳定性好、背景干扰低, 但需针对不同菌种做相应的标准曲线, 适用于发酵工艺过程的动态监测和活性菌即时检测。

1.8　传感器技术

传感器技术通过敏感元件对微生物代谢产生的物理化学信号进行识别获得微生物菌落总数。根据传感器识别信号之间的转换机制不同有以下几种。

生物传感器利用酶、抗体、核酸等生物活性物质作为识别元件, 改变其形式的换能器实现生物反应信号定量转换[25–26]。Huang 等[27]采用生物传感器检测生乳中的菌落总数的结果表明, 35 ℃、1 V 电压是最好反应条件, 线性范围为 10^2~10^8 CFU/mL, 检测时间为 1 h, 展现出良好的应用前景。

化学传感器(电子鼻)模拟嗅觉系统来辨识微生物产生的能被气体传感器阵列检测出的挥发性有机物。Carrillo-Gomez 等[28]利用化学传感器方法并结合算法来检测生乳样品的菌落总数, 准确率可达 94.7%。Yang 等[29]采用电子鼻和人工神经网络相结合, 检出限低至 10 CFU/mL, 结果与 GB 4789.2—2022 平板计数法相同。GU 等[30]开发离子迁移谱电子鼻检测香肠中的大肠杆菌, 线性范围为 10~10^8 CFU/g, 相关系数达 0.99。

电化学传感器利用微生物代谢引起的氧化还原反应, 发生变化电流、电位来进行定量分析[31]。孙芝杨等[32]采用电化学传感器技术(伏安法)检测乳制品中的菌落总数, 将样品富集于玻碳电极后, 在 0.5 V 范围内扫描, 记录伏安扫描曲线, 峰电流值与细菌总数基本一致, 检测结果与 GB 4789.2—2022 平板计数法一致。

比色传感器利用纳米材料(如 CS@MNPs 磁性纳米粒子)来催化底物显色的方法, 实现裸眼或分光光度检测, 结果直观。王璐莹[33]在优化实验条件下(10 mmol/L H_2O_2、8 mmol/L 四甲基联苯胺、35 ℃、15 min)采用比色传感器对生牛乳中菌落总数进行检测, 检测结果与 GB 4789.2—2022 方法无显著差异。

免疫传感器可分为无标记和有标记两类。无标记免疫传感器采用丝网印刷电极、电化学阻抗谱、压电石英晶体微天平等技术结合成不同的无标记免疫传感器, 通过将特异性抗体直接固定于金片表面或通过羧甲基化葡聚糖层共价偶联, 省去了抗体的标记和酶反应时间。有标记免疫传感器则利用标记物对微生物进行标记, 催化底物生成不可溶沉淀物沉积于传感器表面, 通过微电极测量阻抗的变化进行细菌定量检测, 无需预培养[34]。在应用研究中, Farka 等[35]采用无标记免疫传感器可在 20 min 内检测出牛奶样本中有 10~10^3 CFU/mL 的沙门氏菌; Huang 等[36]则利用标记免疫传感器检测鸡肉样本中的沙门氏菌, 可在 2 h 内检出 10~10^6 CFU/mL 的沙门氏菌, 平均回收率达 100.1%, 验证了该方法在食品中的适用性。

该技术操作简便、响应速度快、部分设备可便携, 但易受杂质干扰、灵敏度有限, 适用现场快速筛查和致病菌初检。

1.9　高光谱成像技术

高光谱成像技术是成像技术和光谱分析技术的结合, 其基本原理是: 化学成分和分子结构的不同造成它们的光吸收、反射和散射特性不同, 两个样品之间的光谱图像相似性表明它们的化学成分和物理性质相似[37], 采样得到样品在连续波长范围内的光谱图像信息之后可对待测物进行定性与定量分析。李文采等[38]利用高光谱成像系统(400~1100 nm)采集鸡肉表面散射光谱信息, 与偏最小二乘回归建立菌落总数预测模型, 在经标准变量变换预处理后可有效预测样品菌落总数的空间分布。魏菁等[39]对冷却羊肉, 采用波长(400~1100 nm)范围的高光谱成像技术结合数学建模方法, 实现了羊肉表面菌落总数的定量分析。何鸿举等[40]采用近红外高光谱成像技术(900~1699 nm)对不同冷藏期鸡胸肉中的热杀索丝菌进行快速无损检测, 验证了该技术在某种腐败菌定量评估中的可行性。高光谱成像技术可无损检测、可视化菌落分布, 但需做复杂的校正模型、对低浓度的菌不灵敏度, 适用于在线检测和肉类、禽蛋新鲜度评估, 图 2。

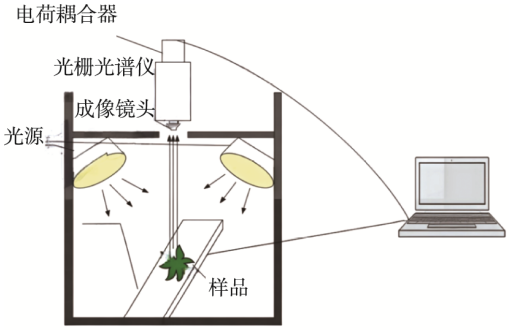


图 2　高光谱成像技术的原理

Fig.2　Principle of hyperspectral imaging technology

1.10 介电谱技术

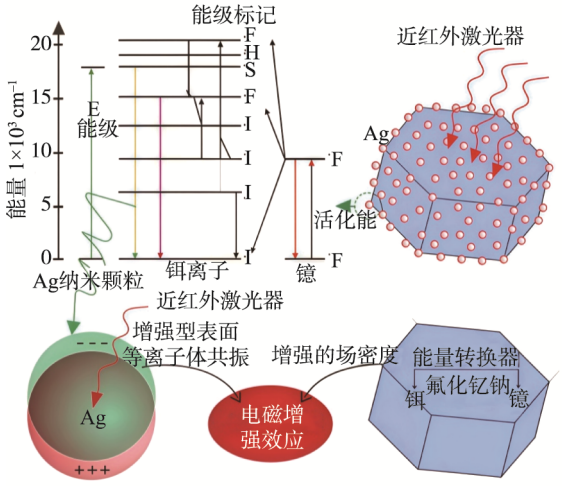
介电谱技术是一种成本相对较低的成分分析技术，适用于现场和在线监测。其基本原理：细菌的存在及其代谢活动引起液体介质中的某些酶促反应，使培养基中的非电活性大分子物质转化为离子态小分子产物。这些离子态小分子产物可以用介电谱测量仪进行测量。此外，细菌细胞表面具有净负电荷，能够在外加电场的作用下发生电极化作用，使该体系的介电谱发生改变。建立介电参数(如介电常数、介电损耗因子)与微生物浓度之间的定量关联模型，可对样品中的菌落总数进行间接计数。孔繁荣[41]以生鲜乳为研究对象，采集了在 25 ℃条件下采集 20~4500 MHz 频率范围内的介电谱，使用偏最小二乘回归和误差反向传播的神经网络建立生鲜乳是否菌落总数超标识别模型，结果表明牛乳菌落总数与介电特性之间存在显著相关性。Zhu 等[42−43]采用矢量网络分析仪(Agilent E5071C)和开放式同轴探头分别对 150 份、154 份生羊奶样品进行介电谱 20~4500 MHz 测定，建立的识别模型对菌落总数是否超标的总体判别准确率可达 100%。该技术操作简便、成本低廉、无需试剂，但需针对不同的食品建立不同的模型，对于周围环境如温度等方面的影响大，在原料奶现场快速筛查和在线监测中有着巨大的应用前景。

1.11 Soleris 实时光电技术

Soleris 实时光电技术是一种基于微生物代谢活性检测微生物的快速检测方法。其原理是将样品接种于含一定量葡萄糖、蛋白胨酵母抽提物及 pH 指示剂(溴甲酚紫)的试剂瓶中，35 ℃培养条件下微生物生长代谢分解葡萄糖产酸，培养基 pH 下降，使瓶底琼脂栓颜色发生变化。瓶内光电检测装置实时监测颜色变化，通过观察变色时间点对应的标准曲线定值点，即可快速定量样品中的菌落总数。张雪苍等[44]采用 Soleris 技术检测焙烤食品中菌落总数所建立的标准曲线用 GB 4789.2—2022 平板计数法进行了验证，结果两者无显著差异(对数值绝对差值小于 0.5)。富莉静[45]对冰淇淋样品的检测，也证明了二者的一致性。陈美莲等[46]在生乳检测中再次验证，Soleris 法可在 11.8 h 出具结果，比 GB 4789.2—2022 平板计数法快很多。该技术将传统微生物培养理论、染色技术、光电检测、计算机控制系统相融合，具有自动化程度高、检测速度快、通量高等优点[47]，是美国药典推荐的替代 GB 4789.2—2022 平板计数法的一个有效方法之一。该设备初始投资较高、需定期用平板计数法校正标准曲线，适用于批量筛选、货架期预测、企业质量控制等。

1.12 表面增强拉曼光谱法

SERS 是一种基于分子振动能级的高灵敏度检测技术，其原理是利用贵金属(如金、银等)纳米结构作为增强基底。在激光照射下，基底表面产生明显的局域表面等离子体共振效应，使入射光和散射拉曼光各获得一次增强，总增强效果为指数级增强，称为电磁增强。同时分子与金属的电荷转移也能贡献增强效应，称为化学增强。两者的结合可以使吸附在基底表面的待测分子的特征“指纹”拉曼信号极大增强，从而实现定量检测[48−49]。SERS 检测可采用无标记法(直接测分子自身信号)或标记法(通过抗体/适配体间接检测报告分子)[50−51]。Wen 等[52]利用 SERS 技术将乳制品中的微生物吸附于纳米级的贵金属底物上，实现了乳制品中微生物 10^2 CFU/mL 的定量检测。王庆慧[53]提出目前市面上绝大多数酸奶均为混合菌种发酵，该研究对 6 种市售的混合菌种发酵酸奶样品稀释 4~5 倍，同时采用 SERS 技术与 GB 4789.2—2022 平板计数法分别检测菌落总数。结果表明两种方法的检测结果处于同一数量级，差异甚微。从取样到获得 SERS 信号仅需 1 h，提升了检测效率。SERS 技术检测速度快、成本低、前处理简便，可结合纳米增强基底进一步提高检测灵敏度[54−56]；SERS 数据处理较为复杂、需预先建立标准谱图库，现在多用于快速筛查和科研，图 3。



注：图中能量级标记 F、H、S、I 为铒离子的光谱项符号，分别对应轨道角动量量子数(L=3,5,0,6)。在近红外激光激发下，镱离子吸收光子并将能量传递给铒离子，铒离子分别从 H、S 和 F 向基态 I 跃迁，产生各特征波长上转换发光。图中右侧单独标出的镱能级 F，为镱离子全部能级都属于 F 多重态能级，只用 F 标注。

图 3 SERS 的原理

Fig.3 Principle of SERS

2 技术性能比较与应用分析

2.1 技术性能比较

各类食品菌落总数快速检测技术在灵敏度、检测时间、操作便捷程度及适用场景等方面各有优缺点。表 1 对主流技术的优缺点做了比较。

2.2　在监管及产业链中的应用分析

菌落总数快速检测技术伴随着生产环境监测、原料验收、生产过程控制、贮藏流通、监管抽检、事故应急处理等, 可以协助企业进行全链条风险防控。

在生产环境监测阶段, 如 ATP 生物发光法可快速评估设备表面、操作台、操作人员手上微生物污染水平, 及时发现潜在污染点, 保证生产加工过程的卫生安全[15]。有企业利用实时荧光定量 PCR 技术来监测肉制品生产环境, 查找设备污染隐患, 从源头防止成品超标[58]。

在原料验收环节, 原料的质量直接影响产品的安全质量, 各类原料如果蔬、肉类、生鲜乳等均可能携带或滋生微生物, 其中菌落总数是检验受污染程度的重要指标, 超标就是说明原料存在安全问题。在肉类、乳制品等高风险原料进行预检时, 用分子生物学技术检测病原菌特异性基因片段, 能够快速识别出污染源, 防止不合格原料进入到加工生产环节中[59]。针对生鲜乳进行电阻抗法、ATP 生物发光法、荧光定量 PCR 技术均能在数小时内完成菌落总数定量检测, 大幅缩短验收周期[60]。

在生产过程控制阶段, 快速检测技术可实时监测关键指标, 确保产品质量稳定。一些在线检测手段包括传感器技术和光谱技术, 快速、准确、非破坏性, 能连续检测并分析传感器技术或光谱技术, 为控制产品质量提供动态的监控。例如, 美国南佛罗里达大学将过滤浓缩系统和光纤生物传感器相连用于自动在线监测饮用水[61]。

在贮藏流通环节, 生物传感器可追踪温度敏感食品中微生物的代谢产物, 预警冷链断裂造成的嗜冷菌增殖风险[62]; 近红外光谱技术能无损检测干货、罐头等低水分活度低的食品因包装破损渗入引发的腐败菌[63]。

在监管抽检环节, 便携式传感器或微生物测试片可搭建“快检初筛+实验室确证”联动模式, 提高抽检率, 降低监管盲点。

表 1　食品中菌落总数检测技术性能对比

Table 1　Performance comparison of detection techniques of total plate count in food

技术方法	优点	主要局限性	是否需培养	检测时长	适用场景
平板计数法	GB 4789.2—2022 方法, 结果准确、直观	操作耗时长, 无法检测 VBNC 状态菌	是	>48 h	实验室常规检测、标准验证
流式细胞术	检验速度快, 灵敏度高, 可区分死活菌, 高通量	仪器昂贵, 试剂成本高, 前处理复杂	否	<30 min	液态食品质控、科研
快速测试片法	操作简便, 无需配制培养基	菌落易融合, 计数准确度较低	是	<48 h	现场检测、餐饮自检
ATP 生物发光法	操作简便, 检验速度快	易受非细菌 ATP 干扰, 假阳性风险高, 低菌量灵敏度不足	否	<5 min	生产线实时监测
电阻抗法	自动化程度高, 重复性好, 不受食品基质影响	设备昂贵, 对低浓度或不活跃菌不敏感[57]	是	2 h	货架期预测、过程监控
荧光定量 PCR 技术	灵敏度高, 特异性强, 检测时间短	仪器试剂昂贵, 需专业人员操作, 无法区分死活菌	否	4 h	病原菌快速检测、科研
MTT 比色法	操作简便、检验速度快、灵敏度高	需标准化操作, 受代谢活性影响	否	1 h	快速筛查、活性菌检测
荧光法	操作简便、检验速度快、稳定性好	需预先制作微生物标准曲线	否	30 min	发酵过程监测、活性菌检测
传感器技术	操作简便、成本低, 响应快	易受杂质干扰, 灵敏度有限	否	<2 h	现场检验、实时监测
高光谱技术	无损检测, 重现性好, 可视化分析	仪器昂贵, 需建立复杂校正模型	否	<5 min	在线检测
Soleris 实时光电技术	操作简便, 检验速度快, 灵敏度高, 高通量	需定期用平板计数法进行校正和验证	是	<12 h	批量筛选、货架期预测
介电谱技术	操作简便, 检测速度快, 成本低	需建立定量分析模型	否	<5 min	现场检验、在线检测
SERS 法	预处理简单, 检测速度快, 成本低	数据处理复杂, 需建立谱图库	否	1 h	快速筛查、科研

在事故预防和应急处理方面, 监管部门借助快速检测技术判断事故隐患, 来预防食物中毒事件发生。当发生食品事故, 便携式传感器 2 h 内便可获得菌落总数结果, 结合荧光定量 PCR 技术在 4 h 内可得到致病微生物具体种

属及来源，快速判断出本次事故的污染源头并实施召回，将事故范围控制在最小[64]。

随着物联网技术融合，快检设备可自动把数据上传至云端监管平台，自动预警和进行大数据分析，实现监管部门从“事后惩罚”向“事前预防”管理的改变。未来可以建立一个“原料—生产—流通—消费”全链条的智能化的微生物监测网络，这也是食品安全监管提高一项有效的能力。

3 挑战与展望

3.1 当前面临的主要挑战

虽然快速检测技术近几年来取得了显著进展，但在实际工作应用中仍存在一些困难。例如：(1)检测灵敏度的限制依然突出存在，即便现有技术的灵敏度已大幅提升，仍存在有些方法本身无法直接对未增菌样品中低至 1 CFU 的目标菌进行准确定量，不得不依赖耗时的前增菌或富集时间，这在一定程度上削弱了“快速”检测的优势。(2)食品基质的复杂性构成了普遍的干扰因素，样品中的脂肪、蛋白质及多糖等成分可能抑制检测反应或引发假阳性信号，亟需开发更高效、更具普适性的样品前处理技术以消除基质效应。另外，死活菌的区分问题尚未得到完美解决，基于 DNA 的分子生物学方法无法区分活菌与死菌，易造成实际存在的安全风险被高估；虽然基于 RNA 检测或活菌富集的技术可部分缓解该问题，但是相关的操作难度和经费也会随之提高。(3)现场适用性仍是制约技术落地的主要问题，部分检测的方法或检测平台或多或少都需要配备较精密设备和专业操作人员，难以真正满足对基层监管、生产一线的便携化、自动化的需求[65]。

3.2 未来发展趋势

食品菌落总数快速检测技术正向着集成化、智能化、多靶向、即时化、标准化的方向发展。

在硬件上，微流控芯片和“样本进-结果出”一体化设备的出现，将使检测的场景向车间、向产品“市场一线”延伸。在算法上，将人工智能图像识别和机器学习算法引入食品菌落总数快速检测[66]，对复杂的光谱数据图像进行自动判读和自动数学建模，依赖于物联网提出动态食品安全预警；在检测上向多靶标的检测迈进，一次检测兼顾菌落总数、大肠菌群、致病菌同时检测，提升检测效率；在应用上，出现现场即时检测设备向低成本、易于携带的方向发展，向产品产业链“下游端”和基层监管现场急需检测发展。

所有快速检测技术能够应用和推广，都需要标准化和规范化程序。未来应通过开展多中心协同验证，确定快速检测方法与标准方法的量值溯源关系及等效性评价[67]，加快成熟的快速检测方法形成国家、行业和国际标准，建立统一的检验操作标准，使各实验室的检测结果具有可比性和互认性。为全世界的食品安全检测技术发展进行强有力的制度准备。

4 结束语

近十年，各种快速检测技术各有灵敏度、检测速度快、适用范围等方面的优势，快速检测应用快速推广至生产线、流通现场、甚至基层监管领域。目前，快速检测的基质干扰、死活菌的区分、统一验证标准等问题仍待解决，但快速检测集成芯片技术、人工智能算技术、快速多靶标集成检验技术迅速发展叠加，快速检测正向快速、智能化、便携方向演进，为食品的安全监管模式转变和全过程质量控制提供强有力的技术保证。

参考文献

[1] 李安棋. 植物乳杆菌抑菌膜蛋白 LpDUF1516 的筛选及抑菌机理研究[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2023: 1.
Li Anqi. Screening and antibacterial mechanism of the antibacterial membrane protein LpDUF1516 from *Lactiplantibacillus plantarum* [D]. Foshan: Foshan University of Science and Technology, 2023.

[2] “鲁冰花”老冰棍被检出菌落总数超标[J]. 中国品牌与防伪, 2023(1): 36.
The total number of detected colonies of “Lu Binghua” old Popsicle exceeded the standard [J]. China Brand and Anti-Counterfeiting, 2023(1): 36.

[3] 杨莉婷, 何丽, 何海宁, 等. 流式细胞术对生乳中微生物检测的应用研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(2): 112–116.
Yang Liting, He Li, He Haining, et al. The application of flow cytometry in testing bacteria of raw milk [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2017, 35(2): 112–116.

[4] 赵晓美, 王娉, 曲天铭, 等. 基于流式细胞仪技术的快速检测试剂盒在生乳菌落总数检测中的应用[J]. 质量安全与检验检测, 2023, 33(1): 7–15.
Zhao Xiaomei, Wang Ping, Qu Tianming, et al. Application of rapid detection kit based on flow cytometry technology in the detection of total plate count in raw milk [J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2023, 33(1): 7–15.

[5] 张兰, 徐红, 翁文川, 等. 流式细胞技术检测酸性饮料中菌落总数的研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 235–239.
Zhang Lan, Xu Hong, Weng Wenchuan, et al. Study on total plate count detection in acid beverage by flow cytometry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 235–239.

[6] Stiefel P, Schmidt-Emrich S, Maniura-Weber K, et al. Critical aspects of using bacterial cell viability assays with the fluorophores SYTO9 and propidium iodide [J]. BMC Microbiology, 2015, 15(1): 36.

[7] 梅仕良. 豆制品中菌落总数的流式细胞术检测研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019: 54.
Mei Shiliang. Detection of aerobic plate count in soybean products by flow cytometry [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019: 54.

[8] 赵立冬, 赵红阳, 石业娇, 等. 3MTM PetrifilmTM 快速菌落总数测试片法与食品中菌落总数检测国标方法(GB 4789.2—2010)的比较[J]. 中国微生态学杂志, 2018, 30(10): 1203–1210, 1216.
Zhao Lidong, Zhao Hongyang, Shi Yejiao, et al. Comparison of 3MTM PetrifilmTM rapid aerobic count plate method with the national standard

(GB 4789.2 — 2010) in food inspection [J]. Chinese Journal of Microecology, 2018, 30(10): 1203–1210, 1216.

[9] 王曦, 苏章庭, 李宏, 等. 平板计数法与纸片法检测食品微生物菌落总数的比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(16): 5489–5493.
Wang Xi, Su Zhangting, Li Hong, et al. Comparison of plate counting method with paper slice method for detecting total bacterial count in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(16): 5489–5493.

[10] 张建军, 唐轶君, 李晶, 等. 基于测试片法与平板计数法对不同类型食品中菌落总数结果的比较分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(14): 5606–5612.
Zhang Jianjun, Tang Yijun, Li Jing, et al. Comparative analysis of the total number of colonies in different types of food based on the Petrifilm aerobic count method and plate count method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(14): 5606–5612.

[11] 麻晓莉. 平板计数法与测试片法对不同类型食品中菌落总数结果的比较分析[J]. 中国口岸科学技术, 2024, 6(S1): 107–112.
Ma Xiaoli. Comparative analysis of the results of plate counting method and test plate method for the total colony count of various food [J]. China Port Science and Technology, 2024, 6(S1): 107–112.

[12] Ziyaina M, Rasco B, Sablani S S. Rapid methods of microbial detection in dairy products [J]. Food Control, 2020, 110: 107008.

[13] Lee J, Park C, Kim Y, et al. Signal enhancement in ATP bioluminescence to detect bacterial pathogens *via* heat treatment [J]. BioChip Journal, 2017, 11(4): 287–293.

[14] 程教擘, 李梦丹, 刘金, 等. 不同方法检测鸡蛋表面菌落总数的相关性研究[J]. 激光生物学报, 2017, 26(3): 260–265.
Cheng Jiaobo, Li Mengdan, Liu Jin, et al. A study on the correlation of different methods for detecting the total number of bacteria on the surface of eggs [J]. Acta Laser Biology Sinica, 2017, 26(3): 260–265.

[15] 张艳珍, 刘宁, 倪来学, 等. 三磷酸腺苷生物发光法在冷鲜肉微生物检测中的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 284–289.
Zhang Yanzhen, Liu Ning, Ni Laixue, et al. Application of adenosine triphosphate bioluminescence method in the microbial detection of chilled meat [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 284–289.

[16] 庞恩. 食品微生物快速检测中阻抗法的应用解析[J]. 科技展望, 2016, 26(3): 258.
Pang En. Application of impedance method in rapid detection of food microorganisms [J]. Technology Outlook, 2016, 26(3): 258.

[17] 杜寒春, 叶开富, 刘绍刚, 等. 电阻抗法快速测定巴氏杀菌牛乳中菌落总数[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(4): 56–58; 61.
Du Hanchun, Ye Kaifu, Liu Shaogang, et al. Application research in rapid detection of aerobic plate count in pasteurized cow's milk by impedance method [J]. China Dairy Industry, 2017, 45(4): 56–58; 61.

[18] Al-Kahtani H A, Ismail E A, Asif Ahmed M. Pork detection in binary meat mixtures and some commercial food products using conventional and real-time PCR techniques [J]. Food Chemistry, 2017, 219: 54–60.

[19] Chin Waihoe, Sun Yisun, Høgberg J, et al. Direct PCR–a rapid method for multiplexed detection of different serotypes of *Salmonella* in enriched pork meat samples [J]. Molecular and Cellular Probes, 2017, 32: 24–32.

[20] Fan Xiankang, Li Xiefei, Zhang Tao, et al. A novel qPCR method for the detection of lactic acid bacteria in fermented milk [J]. Foods, 2021, 10(12): 3066.

[21] Alves J, Hirooka E Y, De Oliveira T C R M. Development of a multiplex real-time PCR assay with an internal amplification control for the detection of *Campylobacter* spp. and *Salmonella* spp. in chicken meat [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 175–181.

[22] Grela E, Kozłowska J, Grabowiecka A. Current methodology of MTT assay in bacteria–a review [J]. Acta Histochemica, 2018, 120(4): 303–311.

[23] 李旋. MTT 比色法及 ATP 生物发光法在鸡蛋蛋壳表面细菌总数检测中的应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 61.
Li Xuan. Application of MTT colorimetry and ATP bioluminescence in detection of total bacterial count on eggshell surface [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016: 61.

[24] 张宇婷, 聂麦茜, 尹秋月, 等. 荧光法快速检测活菌数的方法研究及应用[J]. 微生物学通报, 2020, 47(8): 2652–2664.
Zhang Yuting, Nie Maiqian, Yin Qiuyue, et al. Rapid detection of viable bacteria cells with a fluorescence-based method [J]. Microbiology China, 2020, 47(8): 2652–2664.

[25] Wang Shiqi, Gao Yongheng, Miao Yiqin, et al. Detection of *Vibrio parahaemolyticus* by one-pot LAMP-CRISPR/Cas12b combined with immunomagnetic beads [J]. Food Control, 2025, 172: 111181.

[26] Wang Yuhe, Jia Kaiyuan, Lin Jianhan. Optical biosensors for the detection of foodborne pathogens: recent development and future prospects [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2024, 177: 117785.

[27] Huang Yiming, Hsu Hungyu, Hsu Chuanliang. Development of electrochemical method to detect bacterial count, *Listeria* monocytogenes, and somatic cell count in raw milk [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 62: 39–44.

[28] Carrillo-Gómez J K, Durán Acevedo C M, García-Rico R O. Detection of the bacteria concentration level in pasteurized milk by using two different artificial multisensory methods [J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2021, 33: 100428.

[29] Yang Yongheng, Wei Lijuan. Application of E-nose technology combined with artificial neural network to predict total bacterial count in milk [J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(10): 10558–10565.

[30] Gu X, Sun Y, Tu K, *et al*. Rapid detection of *Escherichia coli* in pork samples using a portable electronic nose based on a single metal oxide sensor [J]. Food Control, 2018, 86: 113–120.

[31] 张志伟. 基于电化学传感器的病原微生物即时检测技术研究[D]. 北京: 军事科学院, 2023: 84.
Zhang Zhiwei. Research on point-of-care testing technology for pathogenic microorganisms based on electrochemical sensors [D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2023: 84.

[32] 孙芝杨, 黄闯, 杨福臣, 等. 伏安法快速检测乳制品中细菌的总数[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(7): 47–49.
Sun Zhiyang, Huang Chuang, Yang Fuchen, et al. Rapid determination of total number of bacterial in dairy products by voltammetry [J]. China Dairy Industry, 2016, 44(7): 47–49.

[33] 王璐莹. 生牛乳中菌落总数可视化快速检测方法的建立与评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 59.
Wang Luying. Development and evaluation of a visual rapid detection method for aerobic plate count in raw bovine milk [D]. Guangzhou: South

China University of Technology, 2022: 59.

[34] Pagliarini V, Neagu D, Scognamiglio V, et al. Treated gold screen-printed electrode as disposable platform for label-free immunosensing of *Salmonella* Typhimurium [J]. Electrocatalysis, 2019, 10(4): 288–294.

[35] Farka Z, Juřík T, Pastucha M, et al. Rapid immunosensing of *Salmonella* typhimurium using electrochemical impedance spectroscopy: the effect of sample treatment [J]. Electroanalysis, 2016, 28(8): 1803–1809.

[36] Huang Fengchun, Xue Li, Qi Wuzhen, et al. An ultrasensitive impedance biosensor for *Salmonella* detection based on rotating high gradient magnetic separation and cascade reaction signal amplification [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2021, 176: 112921.

[37] 赵婕秀, 董庆利, 陈培琴, 等. 高光谱成像技术在动物源性食品微生物污染快速检测中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 467–473.
Zhao Jiexiu, Dong Qingli, Chen Peiqin, et al. Application progress of hyperspectral imaging technology in rapid detection of microbial contamination in animal derived food [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 467–473.

[38] 李文采, 刘飞, 田寒友, 等. 基于高光谱成像技术的鸡肉菌落总数快速无损检测[J]. 肉类研究, 2017, 31(3): 35–39.
Li Wencai, Liu Fei, Tian Hanyou, et al. Rapid non-destructive detection of total bacterial count in chicken using hyperspectral imaging [J]. Meat Research, 2017, 31(3): 35–39.

[39] 魏菁, 郭中华, 徐静. 基于高光谱和极限学习机的冷却羊肉表面细菌总数检测[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 211–214.
Wei Jing, Guo Zhonghua, Xu Jing. Detection of total bacteria on the surface of chilled mutton based on hyperspectral and extreme learning machine [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(24): 211–214.

[40] 何鸿举, 蒋圣启, 马汉军, 等. 基于NIR高光谱技术快速预测冷鲜鸡肉热杀索丝菌含量[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 241–246; 252.
He Hongju, Jiang Shengqi, Ma Hanjun, et al. NIR hyperspectral imaging technology for rapid prediction of *Brochothrix* thermosphacta in fresh chilled chicken [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 241–246; 252.

[41] 孔繁荣. 生鲜乳中菌落总数与其介电特性的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 49.
Kong Fanrong. Relationship between aerobic plate count and dielectric properties in raw milk [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017: 49.

[42] Zhu Z Z, Zhu X H, Kong F R, et al. A rapid method on identifying disqualified raw goat's milk based on total bacterial count by using dielectric spectra [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 239: 40–51.

[43] Zhu Z Z, Zhu X H, Kong F R, et al. Quantitatively determining the total bacterial count of raw goat milk using dielectric spectra [J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(9): 7895–7903.

[44] 张雪苍, 周国磊, 傅科涵, 等. Soleris 检测技术在焙烤食品微生物检测中的应用研究[J]. 食品科技, 2020, 45(4): 321–326.
Zhang Xuecang, Zhou Guolei, Fu Kehan, et al. Application of soleris system in the detection of microorganism in baked food [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(4): 321–326.

[45] 富莉静, 薛志清, 韩立杰, 等. 冰淇淋菌落总数 Soleris 曲线的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(20): 5452–5456.
Fu Lijing, Xue Zhiqing, Han Lijie, et al. Soleris curve of total bacterial colony of ice cream [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(20): 5452–5456.

[46] 陈美莲, 章慧, 王仕英. Soleris 微生物实时光电法与平板计数法测定生乳中菌落总数的比较研究[J]. 乳业科学与技术, 2018, 41(5): 24–27.
Chen Meilian, Zhang Hui, Wang Shiying. Comparison of soleris real-time optoelectronic system with aerobic plate count method for detection of total bacterial count in raw milk [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2018, 41(5): 24–27.

[47] 姚卢悦. 基于 Soleris 光电系统检验食品中的沙门氏菌[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2024: 7.
Yao Luyue. Detection of *Salmonella* in food based on soleris photoelectric system [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2024: 7.

[48] 王留留, 孙方涛. 表面增强拉曼光谱技术在食品安全检测领域中的应用[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 212–218.
Wang Liuliu, Sun Fangtao. Application of surface-enhanced Raman spectroscopy in food safety detection [J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 212–218.

[49] Lee H K, Lee Y H, Koh C S L, et al. Designing surface-enhanced Raman scattering (SERS) platforms beyond hotspot engineering: emerging opportunities in analyte manipulations and hybrid materials [J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(3): 731–756.

[50] Liu Yu, Zhou Haibo, Hu Ziwei, et al. Label and label-free based surface-enhanced Raman scattering for pathogen bacteria detection: a review [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 94: 131–140.

[51] Yang Enlai, Li Dan, Yin Pengkun, et al. A novel surface-enhanced Raman scattering (SERS) strategy for ultrasensitive detection of bacteria based on three-dimensional (3D) DNA walker [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2021, 172: 112758.

[52] Wen Ping, Yang Feng, Zhao Haixia, et al. Novel digital SERS-microfluidic chip for rapid and accurate quantification of microorganisms [J]. Analytical Chemistry, 2024, 96(4): 1454–1461.

[53] 王庆慧. 基于多酚功能化磁珠结合表面增强拉曼光谱的乳制品中乳酸菌的快速检测方法开发[D]. 成都: 成都大学, 2024: 51.
Wang Qinghui. Development of a rapid detection method for lactic acid bacteria in dairy products based on polyphenol-functionalized magnetic beads combined with surface-enhanced Raman spectroscopy [D]. Chengdu: Chengdu University, 2024: 51.

[54] 杨泽帆, 陈颖欣, 黄晓桐, 等. 表面增强拉曼散射光谱新型基底及其在环境微生物分析中的应用研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 796–804.
Yang Zefan, Chen Yingxin, Huang Xiaotong, et al. Progress of new substrates of surface-enhanced Raman scattering spectroscopy and its application in the analysis of environmental microorganisms [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(3): 796–804.

[55] Gu X, Trujillo M J, Olson J E, et al. SERS sensors: Recent developments and a generalized classification scheme based on the signal origin [J]. Annual Review of Analytical Chemistry, 2018, 11(1): 147–169.

[56] Mi Fang, Guan Ming, Wang Ying, et al. A SERS biosensor based on aptamer-based Fe_3O_4@SiO_2@Ag magnetic recognition and embedded SERS probes for ultrasensitive simultaneous detection of *Staphylococcus*

aureus and *Escherichia coli* [J]. Microchemical Journal, 2023, 190: 108605.

[57] Aranzazu-Osorio J E, Alzate L H. Evaluation of *Pseudomonas* sp. Growth in culture medium using electrical impedance spectroscopy with two bipolar geometries [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1272(1): 012014.

[58] 周雪艳. 食品微生物检验中快速检测技术的优化与应用研究[J]. 中外食品工业, 2025(24): 113–115.
Zhou Xueyan. Study on optimization and application of rapid detection technology in food microbiology inspection [J]. Global Food Industry, 2025(24): 113–115.

[59] 刘红, 韩岩君. 生物检测技术在食品质量检测中的应用研究[J]. 中国质量监管, 2024(12): 84–85.
Liu Hong, Han Yanjun. Study on the application of biological detection technology in food quality detection [J]. China Quality Supervision, 2024(12): 84–85.

[60] 赵艳坤, 陈贺, 王帅, 等. 生鲜乳中微生物检测技术研究进展[J]. 中国奶牛, 2019(4): 52–56.
Zhao Yankun, Chen He, Wang Shuai, et al. Research status of microbial detection technology in raw milk [J]. China Dairy Cattle, 2019(4): 52–56.

[61] 廖伟, 杨蓉, 徐建, 等. 饮用水源微生物快速检测技术的发展及应用[J]. 中国环境监测, 2020, 36(6): 104–112.
Liao Wei, Yang Rong, Xu Jian, et al. Development and application of microbial rapid detection technology in drinking water sources [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, 36(6): 104–112.

[62] 张宜新, 刘通, 张峰. 冷链贮运中生鲜食品劣变的快检技术研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 295–305.
Zhang Yixin, Liu Tong, Zhang Feng. Research progress on rapid techniques for detection of quality deterioration of fresh foods during cold chain transportation [J]. Food Science, 2024, 45(15): 295–305.

[63] 张百刚, 孟子轩, 张井, 等. 基于光学特性的无损检测技术在杨梅品质方面的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(7): 216–224.
Zhang Baigang, Meng Zixuan, Zhang Jing, et al. Research progress in application of nondestructive testing technology of Chinese bayberry quality based on optical characteristics [J]. Food Research and Development, 2025, 46(7): 216–224.

[64] 庄志毅. 食品微生物检测技术在食品安全中的应用研究[J]. 食品安全导刊, 2025(21): 190–192.
Zhuang Zhiyi. Research on the application of food microbiological detection technology in food safety [J]. China Food Safety Magazine, 2025(21): 190–192.

[65] 李若菡. 微生物快速检测技术在食品安全中的应用与发展[J]. 现代食品, 2025(16): 125–127.
Li Ruohan. Application and development of microbial rapid detection technology in food safety [J]. Modern Food, 2025(16): 125–127.

[66] Zatsu V, Shine A E, Tharakan J M, et al. Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial intelligence-a review [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101867.

[67] 覃浩, 鲍蕾. 食品安全快速检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(24): 3–9.
Qin Hao, Bao Lei. Research progress on rapid detection methods for food safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(24): 3–9.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)