DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260115002
引用格式: 余文, 安琳, 姜英辉, 等. 三磷酸腺苷荧光法在乳制品商业无菌快速检测中的适用性评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 32–41.
Yu Wen, An Lin, Jiang Yinhui, et al. Applicability evaluation of adenosine triphosphate fluorescence method for rapid detection of commercial sterility in dairy products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 32–41. (in Chinese with English abstract).

三磷酸腺苷荧光法在乳制品商业无菌快速检测中的适用性评价

余 文[1], 安 琳[1], 姜英辉[2], 崔生辉[1], 李景云[1*], 郑海云[3*]
(1. 中国食品药品检定研究院, 北京 100050; 2. 青岛海关技术中心, 青岛 266112;
3. 中国中医科学院中医药科技合作中心, 北京 100700)

摘 要: 目的 系统评估三磷酸腺苷荧光法在乳制品商业无菌快速检测中的适用性。**方法** 采用三磷酸腺苷荧光法, 通过包容性实验测试其对 35 种代表性微生物的检出能力; 通过排他性实验评价三磷酸腺苷荧光法在 7 类共 70 份乳制品基质中的抗干扰性能; 通过人工污染实验, 以平板划线法和 GB 4789.26—2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 商业无菌检验》为参比方法, 系统比较其在 7 类乳制品中对 7 种代表性污染菌的检测灵敏度; 并组织两家实验室进行比对, 评估方法的重现性。**结果** 三磷酸腺苷荧光法的包容性和排他性结果均为 100%。在灵敏度测试中, 对植物乳杆菌检测灵敏度(50%检出限, limit of detection 50%, LOD_{50})=0.32 CFU/样品)略优于平板划线法(0.37 CFU/样品)和 GB 4789.26—2023 (0.37 CFU/样品), 对其他 6 种菌的 50%检出限(LOD_{50})与参比方法基本一致(相对检出限, relative limit of detection, RLOD 约等于 1)。实验室间比对结果显示该方法具有良好的重现性(多数 RLOD 约等于 1)。该方法对黑曲霉、粪肠球菌等可在培养 3 d 时实现早期检出, 相较 GB 4789.26—2023(检测周期 7~10 d), 检测周期缩短 4~7 d。**结论** 三磷酸腺苷荧光法检测速度快、操作简便、包容性和特异性良好, 灵敏度与传统方法相当, 适用于乳制品商业无菌的快速筛查与过程监控。本研究为缩短乳制品商业无菌检测周期、推动快速检测技术应用提供了实验依据, 同时构建了可复用的方法学验证框架, 为其他快速检测技术在食品基质中的验证提供参考, 并为实践中“初筛—复核”流程提供了实验证据。

关键词: 乳制品; 商业无菌; 三磷酸腺苷荧光法
中图分类号: TS207.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0032–10

Applicability evaluation of adenosine triphosphate fluorescence method for rapid detection of commercial sterility in dairy products

YU Wen[1], AN Lin[1], JIANG Yin-Hui[2], CUI Sheng-Hui[1], LI Jing-Yun[1*], ZHENG Hai-Yun[3*]

收稿日期: 2026-01-15
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1100704)
第一作者: 余文(1983—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为微生物。E-mail: 6646227@qq.com
***通信作者:** 李景云(1972—), 女, 主任技师, 主要研究方向为微生物检测与细菌耐药性。E-mail: lijingyun@nifdc.org.cn
郑海云(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为中药及相关健康产品研究。E-mail: 64322766@qq.com

(1. *National Institutes for Food and Drug Control*, *Beijing* 100050, *China*; 2. *Technology Center of Qingdao Customs District*, *Qingdao* 266112, *China*; 3. *Science and Technology Collaborating Center for Chinese Medicine*, *China Academy of Chinese Medical Sciences*, *Beijing* 100700, *China*)

ABSTRACT: Objective　To systematically evaluate the applicability of adenosine triphosphate fluorescence method in the commercial aseptic rapid detection of dairy products. **Methods**　The detection ability of 35 kinds of representative microorganisms was tested by the inclusion experiment using the adenosine triphosphate fluorescence method. The anti-interference performance of adenosine triphosphate fluorescence method in 70 dairy product matrices of 7 types was evaluated through exclusive experiments. Through artificial contamination experiments, using the plate streptography method and GB 4789.26 — 2023 *National food safety standard-Microbiological testing of food-Commercial sterility testing* as reference methods, the detection sensitivity of 7 kinds of representative contamination bacteria in 7 types of dairy products was systematically compared. The 2 laboratories were arranged to perform inter-laboratory comparison tests for evaluating the reproducibility of the established method. **Results**　The inclusive experiment and exclusive experiment results of the adenosine triphosphate fluorescence method were both 100%. In the sensitivity test, the limit of detection at 50% positive rate (LOD_{50}) of the developed method for *Lactobacillus plantarum* was 0.32 CFU/ sample, slightly superior to the streak plate method (0.37 CFU per sample) and the national standard GB 4789.26—2023 (0.37 CFU per sample). The LOD_{50} values for the other 6 kinds of target bacterial strains were basically consistent with those of the reference methods, with the relative limit of detection (RLOD) approaching 1. Interlaboratory comparison results verified favorable reproducibility of this method, as the RLOD for most strains were close to 1. This method could achieve early detection of *Aspergillus niger*, *Enterococcus faecalis* and other microorganisms following 3 days of incubation. In comparison with GB 4789.26—2023, which required a detection period of 7–10 days, the assay duration was reduced by 4–7 days. **Conclusion**　The adenosine triphosphate fluorescence method features rapid detection speed, simple operation, as well as good inclusivity and specificity. Its sensitivity is comparable to that of traditional methods, making it suitable for the rapid screening and process monitoring of commercial sterility in dairy products. This study provides experimental evidence for shortening the detection cycle of commercial sterility in dairy products and promoting the application of rapid detection technologies. Meanwhile, it constructs a reusable methodological validation framework, providing a reference for the validation of other rapid detection technologies in food matrices, and offers experimental evidence for the “primary screening-rechecking” process in practice.

KEY WORDS: dairy products; commercial sterility; adenosine triphosphate fluorescence method

0　引　言

乳制品富含蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素和矿物质, 是重要的营养来源[1–4], 在人类饮食中占据着核心地位。但是乳制品也容易受微生物污染而腐败变质, 因此商业无菌检验成为保障乳制品安全的关键环节[5–7]。当前我国主要依赖终产品检测进行风险管控。根据 GB 25190—2010《食品安全国家标准 灭菌乳》与 GB 25191—2010《食品安全国家标准 调制乳》的规定, 灭菌乳、调制乳的微生物指标必须符合商业无菌要求, 即产品经适度热杀菌后不含致病菌及在通常温度下可繁殖的非致病微生物[8–10]。然而, 现行 GB 4789.26—2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 商业无菌检验》所规定的传统方法检测周期长达 7~10 d, 时效性差[11]。这既延长了产品上市周期, 也增加了企业库存压力, 难以适应现代市场对快速、准确检测的需求。

随着超高温瞬时灭菌等加工技术的广泛应用, 可在常温下储存的灭菌乳与调制乳日益普及, 乳制品行业持续发展, 消费者对食品安全与公共卫生的关注也显著提高[12–14]。在此背景下, 推动商业无菌检验方法的快速化与精准化, 已成为行业高质量发展的迫切需求。因此, 微生物快速检测技术应运而生, 凭借其高效、便捷、灵敏等优势受到广泛关注。为突破传统方法在时效性上的局限, 研究人员正积极探索新的技术方向, 包括免疫分析、纳米技术以及三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)生物发光检测等, 致力于实现微生物的准确、快速检测[15]。其中, ATP 生物发光法是一种重要的快速微生物检测技术[16–21]。ATP 作为细胞内普遍存在的能量载体, 其含量与活细胞数量直接相关。该方法基于 ATP 与荧光素酶反应产生光信号的原理, 通过检测样品中 ATP 的荧光信号来间接评估微生物数量[22–24]。目前, 该项技术已在医疗器械、化妆品及食品等行业的微生物安全控制中得到实际应用, 为乳制品等商品的商业化无菌快速检测提供了可行的技术路径[25–30]。

然而，当前 ATP 生物发光法在研究与实际应用中仍面临若干挑战。首先，样品基质的干扰机制尚不明确，对低浓度微生物的检测灵敏度仍有待提升。其次，现有研究大多集中于少数单一菌株或简单基质，缺乏针对复杂乳制品基质及多样化菌种的系统验证，难以满足实际生产场景下的检测需求。此外，ATP 生物发光法目前尚未形成统一且可复用的快速检测方法学验证框架，其在食品基质中的验证缺乏标准化流程，导致各类技术的适用性评估缺少可比性与统一参考依据，限制了该方法的规范化应用与广泛推广。针对上述挑战，本研究围绕 ATP 荧光法在乳制品商业无菌检测中的适用性开展了系统验证与创新探索，选取 7 类乳制品基质及 35 种代表性微生物，从包容性、排他性、灵敏度及实验室间重现性 4 个维度综合评估该方法在实际场景中的检测性能，构建了一套可复用的快速检测方法学验证框架，将包容性、排他性、50%检出限/相对检出限(limit of detection 50%/relative limit of detection, LOD_{50}/RLOD)测定与实验室间可转移性验证整合为统一体系，不仅为 ATP 荧光法的规范化应用提供支撑，也可为流式细胞术、qPCR 等其他快速检测技术在食品基质中的验证提供方法学参考。

1 材料与方法

1.1 菌株与培养基试剂

本研究采用的菌株来源主要为中国医学细菌保藏管理中心 CMCC 注册菌株、美国典型培养物保藏中心 ATCC 菌株、中国工业微生物菌种保藏管理中心 CICC 菌株和本实验室分离获得 FC 菌株。所有菌株前期均已经使用基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱法(matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry, MALDI-TOF MS)进行确认，菌株信息见表 1。

胰酪大豆胨液体培养基(tryptic soy broth, TSB)、MRS 液体培养基(美国 BD 公司)；胰酪大豆胨琼脂培养基(tryptic soy agar, TSA)、MRS 琼脂培养基、平板计数琼脂(plate count agar, PCA)、沙氏葡萄糖琼脂(Sabouraud's dextrose agar, SDA)(北京三药公司)；冻干保护剂(中国食品药品检定研究院)；生理盐水(国药集团化学试剂公司)；α-氰基-4-羟基肉桂酸基质液(德国 Bruker 公司)；甲酸(分析纯，上海百灵威化学技术有限公司)。

1.2 样品信息

本研究用于灵敏度测定的样品是 7 种类型的乳品样品，具体信息见表 2。

1.3 主要仪器

PL2002 电子天平(精密度 0.01 g，瑞士梅特勒-托利多公司)；MLS-3780 高压灭菌器(日本三洋公司)；Thermo 1389 生物安全柜(美国 Thermo 公司)；PR 205050 GCN 生化培养箱(美国 Thermo Fisher Scientific 公司)；AutoflexII基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱仪(德国 Bruker 公司)；ATP 荧光检测系统(美国 Charm 公司)。

表 1 菌株信息
Table 1 Strain informations

序号	菌种编号	菌株信息
1	CMCC (B) 44102	大肠埃希氏菌
2	CMCC (B) 45107	产气肠杆菌
3	CMCC (B) 26003	金黄色葡萄球菌
4	CMCC (B) 50094	沙门氏菌
5	CMCC (B) 28001	藤黄微球菌
6	CMCC (B) 32480	粪肠球菌
7	CMCC (B) 26029	表皮葡萄球菌
8	CMCC (B) 54012	单核细胞增生李斯特氏菌
9	CMCC (B) 51572	福氏志贺氏菌
10	CMCC (B) 54103	英诺克李斯特氏菌
11	CMCC (B) 45416	阪崎肠杆菌
12	CMCC (B) 23005	洋葱伯克霍尔德菌
13	CMCC (B) 23006	新洋葱伯克霍尔德菌
14	CMCC (B) 23010	神秘伯克霍尔德菌
15	CMCC (B) 20033	副溶血弧菌
16	CMCC (B) 10104	铜绿假单胞菌
17	CMCC (B) 63501	枯草芽孢杆菌
18	CMCC (B) 63612	人参土芽孢杆菌
19	CMCC (B) 34134	植物乳杆菌
20	CMCC (B) 34131	德氏乳杆菌保加利亚亚种
21	CMCC (B) 93905	长双歧杆菌婴儿亚种
22	CMCC (B) 34135	干酪乳杆菌
23	CMCC (F) 98028	桔青霉
24	CMCC (F) 98801	产黄青霉
25	CMCC (F) 98003	黑曲霉
26	CMCC (F) 98018	酿酒酵母
27	CMCC (F) 98010	近平滑假丝酵母
28	CMCC (F) 98025	解脂耶氏酵母菌
29	CMCC (F) 98001	白色念珠菌
30	ATCC 13124	产气荚膜梭菌
31	ATCC 10149	嗜热脂肪地芽孢杆菌
32	ATCC 10223	酸土脂环酸芽孢杆菌
33	CICC 23972	地衣芽孢杆菌
34	FC 25138	蜡样芽孢杆菌
35	FC 13290	副干酪乳杆菌

表 2　方法验证用样品信息
Table 2　Sample informations for method validation

序号	品类	名称
1	灭菌乳	全脂牛奶
2	淡炼乳	三花植脂淡奶
3	植物蛋白饮料	冰凉感厚椰饮品
4	稀奶油	淡奶油
5	调制乳	全脂牛奶
6	含乳饮料	牛乳乳饮料
7	风味饮料	咖啡伴侣风味饮料

1.4　实验方法

1.4.1　菌株确认

使用MALDI-TOF MS方法对表1中的菌株进行确认。参照仪器手册, 用1 μL无菌接种环蘸取少量菌落直接涂抹于飞行质谱靶板样本孔位上, 取1 μL体积分数为70%甲酸涂敷于样本孔位上, 彻底干燥后再滴加 1 μL α-氰基-4-羟基肉桂酸基质液, 室温干燥后上机检测。应用 MALDI Biotyper OC 4.0软件将样品的质谱图与Bruker菌种鉴定数据库进行比对, 鉴定分值≥2.000 为鉴定到种水平可信; 1.700≤分值<2.000 为鉴定到属水平可信; 分值<1.700, 认为其无法提供可信鉴定结果。

1.4.2　菌株冻干

用无菌棉签蘸取表1中的菌株, 其中细菌接种在TSA平板, 乳酸菌接种在 MRS 平板, 酵母及霉菌接种在 SDA平板, 在平板上取新鲜二代培养物加入无菌生理盐水中, 制备成1.5~2.0麦氏浊度的菌悬液, 将上述菌悬液用无菌生理盐水进行稀释, 菌液浓度约10^7 CFU/mL, 取菌液 200 μL 加入1800 μL冻干保护剂中混匀, 将上述冻干菌悬液以20 μL/球的量进行速冻, 然后置于冷冻干燥机中进行冻干, 制备成冻干菌球, 浓度约为10^3 CFU/瓶。

1.4.3　ATP 荧光法包容性验证

将1.4.2冻干菌球接种于5 mL TSB肉汤中培养, 细菌培养18~48 h, 酵母和霉菌培养2~5 d, 将培养液稀释到浓度约为10^5 CFU/mL, 用无菌移液器吸取50 μL菌液, 根据仪器操作说明进行ATP上机检测。

1.4.4　ATP 荧光法排他性验证

灭菌乳、淡炼乳、植物蛋白饮料、调制乳、含乳饮料、稀奶油、风味饮料7种类型样品各选取10个样品进行ATP上机检测。

1.4.5　ATP 荧光法灵敏度验证

国家标准方法(以下简称国标法): 依据GB 4789.26—2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 商业无菌检验》进行检验。

ATP荧光检测方法(以下简称ATP荧光法): 取待检样品, 在特定温度下经一定时间培养后, 吸取50 μL样品, 依据仪器说明书进行上机检验。

平板划线法(以下简称平板法): 用 10 μL 接种环取培养后混匀的样品 1 环, 之字划线于不同平板, 重复两次, 其中细菌划线于PCA平板, 霉菌和酵母菌划线于SDA平板, 乳酸菌划线于 MRS 平板。将平板置于(30±1) ℃培养24~72 h[嗜热脂肪地芽孢杆菌培养条件为(55±1) ℃, 22~24 h]后进行观察, 如平板划线有菌生长, 且经过MALDI-TOF MS鉴定为接种菌株, 则判定为阳性检出。

用表1所列冻干微生物对灭菌乳、淡炼乳、植物蛋白饮料、调制乳、含乳饮料、稀奶油及风味饮料进行人工污染实验。用大肠埃希氏菌污染灭菌乳; 用植物乳杆菌污染淡炼乳; 用地衣芽孢杆菌污染植物蛋白饮料; 用酿酒酵母污染调制乳; 用粪肠球菌污染含乳饮料; 用黑曲霉污染稀奶油; 用嗜热脂肪地芽孢杆菌污染风味饮料。具体操作方法如下: 首先用生理盐水溶解冻干菌, 并梯度稀释至适宜浓度备用; 用 75%酒精对样品表面进行消毒, 使用无菌注射器在产品适宜位置扎一个小孔, 接种 1 mL 适宜稀释度的菌悬液, 使产品中分别污染高、中、低3个浓度水平, 分别为10^1、10^0、10^{-1} CFU/独立包装, 每个污染浓度接种20个样品, 接种完毕后消毒密封接种孔, 颠倒混匀。人工污染大肠埃希氏菌、植物乳杆菌、地衣芽孢杆菌、粪肠球菌、酿酒酵母和黑曲霉的样品于(30±1) ℃培养至3、5、7 d进行测试; 人工污染嗜热脂肪地芽孢杆菌的样品于(55±1) ℃培养 5 d 进行测试。测试当天从培养箱中取出样品, 颠倒混匀后, 使用无菌注射器吸取出部分样品, 同时用 ATP 荧光法、国标法和平板法进行检测, 取样后及时将取样口重新用热熔胶进行密封, 并用无菌胶带覆盖, 置于培养箱中继续培养、检测。

1.4.6　实验室间比对

选择2家有资质的机构, 对ATP荧光检测系统进行验证。分别使用表1中大肠埃希氏菌人工污染灭菌乳、嗜热嗜脂肪地芽孢杆菌人工污染风味饮料、酿酒酵母人工污染调制乳、粪肠球菌人工污染含乳饮料、黑曲霉污染稀奶油, 使产品中分别污染高、中、低3个浓度水平, 分别为10^1、10^0、10^{-1} CFU/独立包装, 每个污染浓度接种8个样品, 具体污染方式和检测方式同1.4.5。

1.5　数据处理及结果判定

1.5.1　ATP 荧光法检测结果

参考 T/CAFFCI 46—2021《化妆品微生物检验方法(定性)ATP 生物荧光增幅法》, 相对光单位(relative light unit, RLU)≤30, 判定为阴性; RLU>30, 判定为阳性。

1.5.2　方法灵敏度

LOD_{50}是定性方法检出概率为50%时, 样品中目标微生物的浓度。依据GB 4789.45—2023《食品安全国家标准 微生物检验方法验证通则》中B.1的公式计算, 如公式(1)所示。

$$LOD_{50}=\frac{0.7\times d\times m}{\ln\left[\frac{n}{(n-y)}\right]} \quad (1)$$

式中: d 为样品的染菌浓度, CFU/g(mL); m 为试样量, g(mL); n 为测试总数; y 为阳性结果数。

1.5.3 相对检出限

待验证方法与参考方法两者 50%检出限的比值。RLOD 的计算参考 GB 4789.45—2023 B.2 的公式计算, 如公式(2)所示。

$$RLOD=\frac{\ln\left[n_{ref}/n_{ref}-y_{ref}\right]}{\ln\left[n_{val}/n_{val}-y_{val}\right]} \quad (2)$$

式中: n_{ref}为参考方法的测试总数; y_{ref}为参考方法的阳性结果数; n_{val}为待验证方法的测试总数; y_{val}为待验证方法的阳性结果数。

1.5.4 95%置信区间

为明确 LOD_{50}与 RLOD 的统计可靠性, 采用正态分布法计算其 95%置信区间(95% confidence interval, 95% CI), 反映在 95% CI 下, 真实检出限的波动范围, 计算如公式(3)、(4)所示。

$$95\%\ CI(LOD_{50})=LOD_{50}\pm1.96\times SE(LOD_{50}) \quad (3)$$

$$95\%\ CI(RLOD)=RLOD\pm1.96\times SE(RLOD) \quad (4)$$

式中: 1.96 为 95%置信水平下的正态分布临界值; $SE(LOD_{50})$为 50%检出限的标准误差; SE(RLOD)为相对检出限的标准误差, 标准误差均由概率单位回归分析计算获得。

1.5.5 拟合方法

本研究中 LOD_{50} 的计算均采用概率单位回归拟合(probit regression), 以微生物染菌浓度的对数值为自变量(X), 阳性结果数转换后的概率单位为因变量(Y), 通过最小二乘法进行线性拟合, 拟合模型需满足拟合优度检验(χ^2检验)要求(P>0.05), 确保回归模型的显著性与可靠性, 所有拟合分析均采用 SPSS 26.0 或 GraphPad Prism 9.0 软件完成。

1.5.6 判定规则

LOD_{50}判定: 待验证方法的 LOD_{50}需小于等于参考方法的 LOD_{50}, 且两者的 95%置信区间无显著重叠, 表明待验证方法的检出能力不劣于参考方法;

RLOD 判定: RLOD 需在 0.8~1.2 范围内, 且其 95%置信区间包含 1, 表明待验证方法与参考方法的检出能力无统计学差异, 方法检出性能符合验证要求;

拟合模型判定: 概率单位回归拟合的决定系数(r^2)≥0.90, 且χ^2检验 P>0.05, 表明回归模型拟合度良好, 计算所得 LOD_{50}与 RLOD 具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 菌种冻干浓度

为模拟真实样品中菌株可能存在的损失状态, 并便于后续系列实验开展, 本研究将所有测试菌株的浓度统一控制在 10^3 CFU/球水平。包容性测试菌株冻干浓度为 1.3×10^3~6.5×10^3 CFU/球, 灵敏度测试各菌株冻干浓度为 1.31×10^3~6.50×10^3 CFU/球(表 3), 均处于 10^3 CFU 数量级, 与预设浓度要求高度契合。

上述浓度设置既贴近实际样品中微生物含量偏低的真实情况, 又可保证不同菌株间试验条件的一致性, 为后续方法灵敏度及包容性评价提供了稳定、可控、可比性强的菌量基础。

表 3 灵敏度测试菌株的冻干浓度

Table 3 Lyophilized concentrations of bacterial strains for sensitivity testing

序号	菌种编号	菌株名称	冻干菌球浓度/(CFU/球)
1	CMCC (B) 44102	大肠埃希氏菌	1.77×10^3
2	CMCC (B) 32480	粪肠球菌	1.88×10^3
3	CICC 23972	地衣芽孢杆菌	6.50×10^3
4	ATCC 10149	嗜热脂肪地芽孢杆菌	1.31×10^3
5	CMCC (B) 34134	植物乳杆菌	2.34×10^3
6	CMCC (F) 98003	黑曲霉	2.80×10^3
7	CMCC (F) 98018	酿酒酵母	1.54×10^3

2.2 ATP 荧光法包容性及排他性结果

ATP 荧光法包容性测试实验结果表明: 35 种微生物在 1.0×10^5~9.9×10^5 CFU/mL 的浓度, 检测结果均为阳性, 包容性测试结果为 100% (35/35), 其中嗜热脂肪地芽孢杆菌使用了牛奶伴侣样品基质培养基。嗜热脂肪地芽孢杆菌使用 TSB 培养基时, ATP 荧光法的检出浓度为 1.34×10^6 CFU/mL。对灭菌乳、淡炼乳、植物蛋白饮料、调制乳、含乳饮料、稀奶油、风味饮料 7 种类型样品, 各选取 10 个空白样品用仪器检测, RLU 结果均为阴性(RLU<30), 排他性结果为 100%(表 4)。

2.3 ATP 荧光法灵敏度结果

污染嗜热脂肪地芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、大肠埃希氏菌、酿酒酵母、粪肠球菌、黑曲霉这 6 种菌的样品, ATP 荧光法、平板法、国标法在高、中、低 3 个污染浓度下的灵敏度一致。植物乳杆菌低浓度污染水平, ATP 荧光法的检出率为 40%, 其余两种方法的检出率为 35%, ATP 荧光法的 LOD_{50}低于平板划线法和国标法, 3 种方法中 ATP 荧光法灵敏度最高; 在中、高 2 个污染浓度, 3 种方法的灵敏度一致。粪肠球菌污染的样品, 平板法的最适检测时间为 5 d, 其余 2 种方法的最适检测时间为 7 d。国标法检测黑曲霉污染样品, 3 个污染浓度在 3 d、5 d 时检出率为 0。灵敏度结果具体见表 5、6。

表 4　包容性测试结果(*n*=3)

Table 4　Results of inclusivity test (*n*=3)

菌株编号	菌株名称	培养基	培养时间/h	检测浓度/(CFU/mL)	RLU 值
1	大肠埃希氏菌	TSB	24	6.2×10^5	82±8
2	产气肠杆菌	TSB	24	1.0×10^5	33±1
3	金黄色葡萄球菌	TSB	24	4.1×10^5	32±2
4	沙门氏菌	TSB	24	6.0×10^5	585±18
5	藤黄微球菌	TSB	48	1.0×10^5	308±27
6	粪肠球菌	TSB	24	3.6×10^5	101±3
7	表皮葡萄球菌	TSB	24	1.0×10^5	32±1
8	单核细胞增生李斯特氏菌	TSB	24	3.0×10^5	75±3
9	福氏志贺氏菌	TSB	24	6.0×10^5	536±22
10	英诺克李斯特氏菌	TSB	24	2.6×10^5	53±6
11	阪崎肠杆菌	TSB	24	4.4×10^5	698±41
12	洋葱伯克霍尔德菌	TSB	48	6.4×10^5	114±7
13	新洋葱伯克霍尔德菌	TSB	48	6.8×10^5	33±3
14	神秘伯克霍尔德菌	TSB	48	3.1×10^5	30±2
15	副溶血弧菌	TSB	24	6.0×10^5	62±3
16	铜绿假单胞菌	TSB	24	9.0×10^5	285±9
17	蜡样芽孢杆菌	TSB	24	1.0×10^5	48±3
18	枯草芽孢杆菌	TSB	24	1.2×10^5	225±7
19	地衣芽孢杆菌	TSB	24	1.8×10^5	405±46
20	人参土芽孢杆菌	TSB	72	1.0×10^5	281±23
21	嗜热脂肪地芽孢杆菌	TSB	24	1.3×10^6	40±3
		牛奶伴侣	24	9.7×10^5	676±23
22	酸土脂环酸芽孢杆菌	TSB	24	9.6×10^5	50±1
23	植物乳杆菌	MRSB	48	7.6×10^5	406±24
24	副干酪乳杆菌	MRSB	48	9.9×10^5	428±25
25	德氏乳杆菌保加利亚亚种	MRSB	48	3.5×10^5	134±4
26	长双歧杆菌婴儿亚种	MRSB	72	5.9×10^5	381±25
27	干酪乳杆菌	MRSB	48	4.3×10^5	253±15
28	桔青霉	SDA	120	5.6×10^5	84±8
29	产黄青霉	SDA	120	1.0×10^5	111±15
30	黑曲霉	SDA	120	6.6×10^5	123±12
31	酿酒酵母	SDB	48	2.1×10^5	4514±1302
32	近平滑假丝酵母	SDB	48	1.2×10^5	9076±187
33	解脂耶氏酵母菌	SDB	48	1.0×10^5	838±20
34	白色念珠菌	TSB	48	3.0×10^5	8696±609
35	产气荚膜梭菌	TSB	24	2.4×10^5	141±6

表 5 3 种方法的阳性率(%)

Table 5 Positive rates of the 3 kinds of methods (%)

污染菌株	污染浓度/(CFU/样品)	ATP 荧光法阳性率			平板法阳性率			国标法阳性率		
		3 d/2 d*	5 d	7 d	3 d/2 d*	5 d	7 d	3 d/2 d*	5 d	7 d
植物乳杆菌	0.22 (*n*=20)	35	40	40	35	35	35	0	35	35
	2.20 (*n*=20)	100	100	100	100	100	100	0	100	100
	22.00 (*n*=20)	100	100	100	100	100	100	0	100	100
嗜热脂肪地芽孢杆菌	0.1 (*n*=20)	/	0	/	/	0	/	/	0	/
	1.0 (*n*=20)	/	45	/	/	45	/	/	45	/
	10.0 (*n*=20)	/	100	/	/	100		/	100	/
地衣芽孢杆菌	0.45 (*n*=20)	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	4.50 (*n*=20)	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	45.00 (*n*=20)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
大肠埃希氏菌	0.12 (*n*=20)	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	1.20 (*n*=20)	85	85	85	85	85	85	85	85	85
	12.00 (*n*=20)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
酿酒酵母	0.22 (*n*=20)	35	40	40	35	40	40	35	40	40
	2.20 (*n*=20)	60	95	95	85	95	95	65	95	95
	22.00 (*n*=20)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
粪肠球菌	0.19 (*n*=20)	0	5	10	0	10	10	0	0	10
	1.90 (*n*=20)	0	75	75	0	75	75	0	75	75
	19.00 (*n*=20)	90	100	100	90	100	100	90	95	100
黑曲霉	0.15 (*n*=20)	0	20	25	0	20	25	0	0	25
	1.50 (*n*=20)	20	100	100	45	100	100	0	0	100
	15.00 (*n*=20)	85	100	100	95	100	100	0	0	100

注: *大肠埃希氏菌产气明显, 检测时间为 2 d; /表示该时间点无需检测。

表 6 3 个方法灵敏度结果比对(CFU/样品)

Table 6 Comparison of the sensitivity results of the 3 methods (CFU/ sample)

污染菌株	LOD_{50}			RLOD	
	ATP 荧光法	平板法	国标法	ATP 荧光法与平板法	ATP 荧光法与国标法
植物乳杆菌	0.32	0.37	0.37	0.84	0.84
嗜热嗜脂肪地芽孢	1.17	1.17	1.17	1	1
地衣芽孢杆菌	0.73	0.73	0.73	1	1
大肠埃希氏菌	0.19	0.19	0.19	1	1
酿酒酵母	0.30	0.30	0.30	1	1
粪肠球菌	0.96	0.96	0.96	1	1
黑曲霉	0.36	0.36	0.36	1	1

2.4 实验室间比对结果

人工污染大肠埃希氏菌的灭菌乳测试结果: A 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌样品检出率为 62.5% (5/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。B 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 12.5% (1/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。

嗜热脂肪地芽孢杆菌人工污染的风味饮料测试结果: A 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 12.5% (1/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。B 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 87.5% (7/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。

酿酒酵母人工污染的调制乳测试结果: A 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 25% (2/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。B 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 50% (4/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。

粪肠球菌人工污染的含乳饮料测试结果: A 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 25% (2/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。B 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 12.5% (1/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 87.5% (7/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。

黑曲霉污染的稀奶油测试结果: A 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 62.5% (5/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。B 实验室 ATP 荧光法对低浓度染菌的 8 份样品检出率为 25% (2/8), 对中浓度染菌的 8 份样品检出率为 87.5% (7/8), 对高浓度染菌的 8 份样品检出率为 100% (8/8)。

两个实验室采用 ATP 荧光法、平板法、国标方法对不同菌株进行灵敏度比对, 结果见表 7。对于地衣芽孢杆菌、大肠埃希氏菌、酿酒酵母, 两种实验室中 3 种方法的 LOD_{50} 完全一致, 相对灵敏度 RLOD 均为 1, 表明 3 种方法对上述菌株的检出灵敏度高度一致, 实验室间与方法间无明显差异。对于粪肠球菌和黑曲霉, 实验室 A 中 3 种方法 LOD_{50} 相同, RLOD 均为 1; 实验室 B 中 ATP 荧光法与平板法、国标法的 LOD_{50} 略有差异, RLOD 分别为 1.12 和 1.13, 均接近 1, 整体仍处于高度吻合水平。

综合来看, 在本研究条件下, ATP 荧光法的检出灵敏度与传统平板法、国标法基本等效, 不同实验室间结果重复性良好, 说明 ATP 荧光法可作为一种灵敏、稳定、实验室间可比性强的快速检测方法使用。

表 7　实验室间灵敏度比对结果(CFU/样品)

Table 7　Results of sensitivity comparison between laboratories (CFU/ sample)

污染菌株	检测单位	LOD_{50}			RLOD	
		ATP 荧光法	平板法	国标法	ATP 荧光法与平板法	ATP 方法与国标法
地衣芽孢杆菌	A	0.88	0.88	0.88	1	1
	B	0.33	0.33	0.33	1	1
大肠埃希氏菌	A	0.44	0.44	0.44	1	1
	B	1.83	1.83	1.83	1	1
酿酒酵母	A	0.45	0.45	0.45	1	1
	B	0.27	0.27	0.27	1	1
粪肠球菌	A	1.26	1.26	1.26	1	1
	B	1.94	1.94	1.94	1.12	1.12
黑曲霉	A	0.57	0.57	0.57	1	1
	B	0.66	0.66	0.66	1.13	1.13

3　讨论与结论

ATP 荧光检测系统具备广泛的菌种检出能力和良好的特异性。采用 ATP 荧光法对涵盖细菌(需氧芽孢杆菌、嗜热芽孢杆菌、乳酸菌等)、酵母及霉菌在内的 35 种代表性微生物进行测试, 在 10^5 CFU/mL 浓度水平均可稳定检出(RLU>30), 包容性测试结果为 100%。该方法能有效检出乳制品中可能污染的代表性细菌(包括革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、需氧芽孢杆菌、厌氧梭菌、乳酸菌)、酵母和霉菌, 满足商业无菌检测对方法广谱性的核心要求。同时, 对 7 大类共 70 份未污染空白样品的检测结果均为阴性(RLU≤30), 排他性结果亦为 100%, 表明该方法具有显著的特异性, 包容性与排他性检测结果均符合 GB 4789.45—2023 的要求。

包容性结果显示, 酵母菌信号值较高, 酿酒酵母、近平滑假丝酵母和白色念珠菌的 RLU 为 4514~9076, 显著高于其他细菌(通常在 30~700 之间)。ATP 荧光法基于检测微生物代谢活动产生的 ATP, 其信号强度(RLU)与活菌数量及代谢活跃度直接相关。酵母菌作为真核细胞, 个体通常大于细菌, 单个细胞内 ATP 总量可能更高。在相近浓度下, 不同细菌间信号值也存在明显差异。其中, 阪崎肠杆菌、地衣芽孢杆菌、福氏志贺氏菌和沙门氏菌属于高信号组, 可能与这些菌株代谢活性较强或 ATP 更易释放有关。而产气肠杆菌、金黄色葡萄球菌、表皮葡萄球菌及神秘伯克霍尔德菌则处于低信号组, 其 RLU 接近阳性阈值, 原因可能包括细胞壁较厚(如葡萄球菌)导致 ATP 提取效率低、测试

浓度下代谢活性较弱或处于生长平台期, 或菌体本身 ATP 含量较低。培养基质也会影响微生物 ATP 产量, 例如嗜热脂肪地芽孢杆菌在通用培养基 TSB 中培养时 RLU 值较低, 接近临界值; 而在“牛奶伴侣”样品基质中培养后, 其 RLU 值显著升高。这说明某些芽孢杆菌在普通培养基中的代谢状态不能完全反映其在特定食品基质中的实际情况。因此, 在方法建立与验证阶段, 使用目标产品或类似基质进行培养和检测, 对准确评估方法性能十分必要。

ATP 荧光法灵敏度与平板计数法及现行国标法相当或更优。在 7 种代表性乳制品基质中, 针对大肠埃希氏菌、嗜热脂肪地芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、酿酒酵母、粪肠球菌、黑曲霉和植物乳杆菌的人工污染测试表明, ATP 方法与平板计数法及现行国标法相比, 总体灵敏度一致。具体而言, 针对 6 种受试菌, 3 种方法的 LOD_{50} 及 RLOD 均无显著差异。在植物乳杆菌污染的淡炼乳样品中, ATP 荧光法在低污染水平显示出略高的检出率, 其 LOD_{50} 低于其他两种方法, 表现出一定优势。对于黑曲霉、粪肠球菌和植物乳杆菌, 培养 3 d 时 ATP 方法的检出率明显高于参比方法, 说明 ATP 法具有速度优势, 能够更快响应微生物的早期生长与代谢, 实现更早预警。

ATP 荧光法具备良好的实验室间转移性。两家外部实验室的比对结果显示, 针对不同菌株在不同乳制品基质中的污染, ATP 荧光法与参考方法(平板法、国标法)在绝大多数测试条件下的 LOD_{50} 和 RLOD 高度一致(RLOD≈1)。尽管在个别菌株(如粪肠球菌、黑曲霉)的低浓度污染水平上, 不同实验室间的阳性检出率存在一定波动, 但均处于微生物学方法预期的变异范围内(RLOD≤1.5), 证实 ATP 荧光检测系统在不同操作环境与人员下仍具备可靠且可转移的检测性能。在绝大多数条件下, 该方法与平板计数法及国标培养法的灵敏度基本一致, 证明其可作为可靠的替代或补充方法。尤为突出的是, ATP 法在检测速度上具有显著优势, 能更早提示特定微生物污染。

综上所述, ATP 荧光检测系统能有效检出乳制品中多种潜在微生物污染, 其灵敏度与传统培养方法相当, 并具备快速、操作简便的优势, 这对需要快速决策的生产过程控制与产品放行筛查至关重要。本研究结果为将该系统作为乳制品商业无菌快速筛查的有效工具提供了科学依据, 表明其在生产过程监控、产品放行初筛等领域具有实际应用潜力。建议在实际应用中, 对 ATP 初筛阳性的样品仍应通过标准培养法进行确认, 以符合现行法规对终产品判定的要求。本研究数据对提升企业质量监督与产品质量具有参考价值, 并为商业无菌标准的制修订提供了有益参考。

参考文献

[1] 刘娜, 王亚萍, 李景云, 等. 基于流式细胞仪提高乳制品商业无菌检验时效性的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(20): 131–139.
Liu Na, Wang Yaping, Li Jingyun, et al. Study on improving the timeliness of commercial sterility inspection of dairy products based on flow cytometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(20): 131–139.

[2] 黄宝莹, 李沅镁, 严家俊, 等. MALDI-TOF MS 在乳制品快速检测中的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2025, 53(4): 62–66.
Huang Baoying, Li Yuanmei, Yan Jiajun, et al. Research progress of MALDI-TOF MS in rapid detection of dairy products [J]. China Dairy Industry, 2025, 53(4): 62–66.

[3] Holven K B, Sonestedt E. Milk and dairy products—a scoping review for Nordic Nutrition Recommendations 2023 [J]. Food & Nutrition Research, 2024, 68: 10486.

[4] Akyil S, Winkler S, Meyer D, et al. Association between dairy intake and multiple health outcomes: a scoping review of systematic reviews and meta-analyses [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2026, 80: 16–27.

[5] 陈刚, 周芳芳, 申玉敏, 等. 乳制品中耐热蛋白酶及其检测方法研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(3): 1–13.
Chen Gang, Zhou Fangfang, Shen Yumin, et al. Research progress on heat-resistance protease in dairy products and its detection methods [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(3): 1–13.

[6] Martin N H, Quintana-Pérez F M, Evanowski R L. Sources, transmission, and tracking of sporeforming bacterial contaminants in dairy systems [J]. JDS Communications, 2024, 5(2): 172–177.

[7] Wang Xiya, Su Bin, Geng Fengzhen, et al. Detection and identification approaches of psychrotrophic bacteria in raw milk and dairy products: a review [J]. Food Chemistry, 2026, 498(Pt 2): 147263.

[8] 东思源, 仇凯, 孟镇, 等. 食品商业无菌国内外标准法规对比研究及标准化工作思考[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 305–310.
Dong Siyuan, Qiu Kai, Meng Zhen, et al. Comparative study on domestic and foreign standards and regulations of commercial sterility of food and thoughts on standardization [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 305–310.

[9] 王一恬. 荧光假单胞菌耐热性蛋白酶特性及其对液态乳品质影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023: 46–51.
Wang Yitian. Study on characteristics of heat-resistant protease from Pseudomonas fluorescens and its effect on liquid milk quality [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023: 46–51.

[10] 苏涛, 毛永杨, 田金兰, 等. 食品安全标准中微生物检验指标的问题分析及建议[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2801–2807.
Su Tao, Mao Yongyang, Tian Jinlan, et al. Analysis and suggestion on microbiological examination index in food safety standard [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(9): 2801–2807.

[11] 郭晶, 王丹, 张帅, 等. 流式细胞技术在乳品商业无菌检测中的应用[J]. 中国乳业, 2024(10): 64–69.
Guo Jing, Wang Dan, Zhang Shuai, et al. Application of flow cytometry in commercial sterility detection of dairy products [J]. China Dairy, 2024(10): 64–69.

[12] 张太, 刘伊索, 王鹏杰, 等. 乳清蛋白对直接超高温乳贮存稳定性的影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(23): 7637–7644.
Zhang Tai, Liu Yisuo, Wang Pengjie, et al. Research progress on the effect of whey protein on storage stability of direct UHT milk [J]. Journal

of Food Safety & Quality, 2022, 13(23): 7637–7644.

[13] 张宇明. 中国乳制品贸易现状与发展研究——基于国际竞争力与进口依赖性[J]. 中国商论, 2025, 34(12): 165–168.
Zhang Yuming. Research on current situation and development of China's dairy product trade [J]. China Journal of Commerce, 2025, 34(12): 165–168.

[14] Rabbani A, Ayyash M, D'Costa C D C, et al. Effect of heat pasteurization and sterilization on milk safety, composition, sensory properties, and nutritional quality [J]. Foods, 2025, 14(8): 1342. .

[15] Servain-Viel S, Aknin M L, Domenichini S, et al. A flow cytometry method for safe detection of bacterial viability [J]. Cytometry Part A, 2024, 105(2): 146–156.

[16] Liu Qing, Yan Saisai, Zhang Miao, et al. Air sampling and ATP bioluminescence for quantitative detection of airborne microbes [J]. Talanta, 2024, 274: 126025.

[17] Sueda S, Fujii S. An ATP detection system based on the enzyme reaction with biotin protein ligase [J]. Analytical Biochemistry, 2025, 696: 115698.

[18] 常超, 王凌, 伍金娥. 基于 ATP 再生体系快速检测乳品中微生物[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 320-324.
Chang Chao, Wang Ling, Wu Jine. Rapid detection of microorganisms in dairy products based on ATP regeneration system [J]. Food Science, 2018, 39(4): 320–324.

[19] 管勇佳, 富鑫, 陈晓义, 等. ATP 生物发光技术快速检测牛乳体细胞数[J]. 中国乳品工业, 2010, 38(9): 49–50.
Guan Yongjia, Fu Xin, Chen Xiaoyi, et al. Rapid detection of somatic cell count in raw milk by ATP bioluminescence technology [J]. China Dairy Industry, 2010, 38(9): 49–50.

[20] Liu Shitong , Zhao Jinbin, Guo Yulan, et al. Application of ATP-based bioluminescence technology in bacterial detection: a review [J]. Analyst, 2023, 148(15): 3452–3459.

[21] Sever E A, Aybakan E, Beşli Y, et al. A novel rapid bioluminescence-based antimicrobial susceptibility testing method based on adenosine triphosphate consumption [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1357680.

[22] Ferreira M A M, Dos Santos L C, Castellani L G S, et al. Application of BactTiter-Glo ATP bioluminescence assay for *Mycobacterium tuberculosis* detection [J]. Diagnostic Microbiology and Infectious Disease, 2024, 109(2): 116275.

[23] Morciano G, Sarti A C, Marchi S, et al. Use of luciferase probes to measure ATP in living cells and animals [J]. Nature Protocols, 2017, 12(8): 1542–1562.

[24] 翟磊, 葛媛媛, 崔生辉, 等. ATP 生物荧光增幅法在化妆品微生物检测中的验证研究[J]. 日用化学工业, 2020, 50(11): 771–775, 782.
Zhai Lei, Ge Yuanyuan, Cui Shenghui, et al. Validation of ATP bioluminescence amplification method in microbial detection of cosmetics [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2020, 50(11): 771–775, 782.

[25] 张文涛, 李晓敏, 李洪伟, 等. ATP 生物发光检测技术在食品工程中的应用研究[J]. 食品安全导刊, 2025(11): 150–152.
Zhang Wentao, Li Xiaomin, Li Hongwei, et al. Application research of ATP bioluminescence detection technology in food engineering [J]. China Food Safety Magazine, 2025(11): 150–152.

[26] Park J S, Kim Y W, Kim H, et al. Development of a novel ATP bioluminescence assay based on engineered probiotic *Saccharomyces boulardii* expressing firefly luciferase [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2023, 33(11): 1506–1512.

[27] Samkutty P J, Gough R H, Adkinson R W, et al. Rapid assessment of the bacteriological quality of raw milk using ATP bioluminescence [J]. Journal of Food Protection, 2001, 64(2): 208–212.

[28] 刘爽, 葛媛媛, 洪海军, 等. ATP 生物荧光增幅 24 h 检测方法用于化妆品微生物定性检测的验证研究[J]. 日用化学品科学, 2025, 48(7): 12–17.
Liu Shuang, Ge Yuanyuan, Hong Haijun, et al. Validation of a 24 h ATP bioluminescence amplification method for qualitative detection of microorganisms in cosmetics [J]. Detergent & Cosmetics, 2025, 48(7): 12–17.

[29] 李婷, 马紫英, 刘吉泉, 等. 化妆品微生物 ATP 生物荧光增幅检测技术的双培养体系构建及可行性研究[J]. 日用化学工业, 2025, 55(5): 668–676.
Li Ting, Ma Ziying, Liu Jiquan, et al. Construction and feasibility study of a dual-culture system for ATP bioluminescence amplification detection of cosmetic microorganisms [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2025, 55(5): 668–676.

[30] 任凤英, 刘文娟. 可视化径道检视仪联合 ATP 生物荧光检测法在腔镜器械清洗质量控制中的应用[J]. 中国医疗器械信息, 2024, 30(18): 107–109.
Ren Fengying, Liu Wenjuan. Application of visual channel inspector combined with ATP bioluminescence detection in cleaning quality control of endoscopic instruments [J]. China Medical Device Information, 2024, 30(18): 107–109.

(责任编辑: 韩晓红　曹岱琳)