

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241112004

引用格式: 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 YZ, LIU N, NI LX, *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. (in Chinese with English abstract).

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

张艳珍^{1,2}, 刘宁³, 倪来学³, 王伟³, 姚现琦³, 刘云国^{1*}

(1. 临沂大学生命科学学院, 临沂 276005; 2. 水原大学工程学院, 水原 18323;
3. 临沂新程金锣肉制品集团有限公司, 临沂 276036)

摘要: **目的** 探究三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)生物发光法检测冷鲜肉中菌落总数的可行性, 比较其与国家标准平板计数法的检测效果。**方法** 通过实验确定不同浓度的曲拉通 X-100 (Triton X-100)和三磷酸腺苷双磷酸酶(adenosine triphosphate double, Apyrase)对冷鲜肉体细胞 ATP 的清除效果, 并分别使用 ATP 生物发光法和国家标准平板计数法检测冷鲜肉中的菌落总数, 并评估 ATP 生物发光法的重现性。**结果** Triton X-100 和 Apyrase 清除冷鲜肉体细胞 ATP 的最佳浓度分别是 0.2%和 0.10 U/mL, 此浓度下, 冷鲜肉体细胞 ATP 清除效果最好。ATP 生物发光法与国家标准平板计数法的检测结果显示良好的线性关系, 其相关系数(r^2)为 0.9871, 且 ATP 生物发光法重现性良好, 检测结果稳定可靠。**结论** 本研究通过与国家标准平板计数法的比较, 进一步验证了 ATP 生物发光法可用于冷鲜肉中菌落总数的快速检测。

关键词: 冷鲜肉; 菌落总数; 平板计数法; 三磷酸腺苷生物发光法

Application of adenosine triphosphate bioluminescence method in the microbial detection of chilled meat

ZHANG Yan-Zhen^{1,2}, LIU Ning³, NI Lai-Xue³, WANG Wei³, YAO Xian-Qi³, LIU Yun-Guo^{1*}

(1. College of Life Sciences, Linyi University, Linyi 276005, China; 2. College of Engineering, The University of Suwon, Suwon 18323, South Korea; 3. Linyi Xincheng Jinluo Meat Products Group Co., Ltd., Linyi 276036, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the feasibility of using the adenosine triphosphate (ATP) bioluminescence method for detecting the colonies number in chilled meat, and compare its performance with the national standard plate count method. **Methods** Effects of different concentrations of Triton X-100 and adenosine triphosphate double (Apyrase) on the remove of ATP from the somatic cells of chilled meat were determined. The colonies number in the chilled meat was measured using both the ATP bioluminescence method and the national standard plate count method,

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2023081); 海关总署科研项目(2024HK014)

第一作者: 张艳珍(1996—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为食品微生物。E-mail: zyz0521@163.com

*通信作者: 刘云国(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品微生物。E-mail: yguoliu@163.com

and the reproducibility of the ATP bioluminescence method was evaluated. **Results** The optimal concentrations of Triton X-100 and Apyrase for ATP removal from the somatic cells of chilled meat were found to be 0.2% and 0.10 U/mL, respectively, with the best ATP removal effect observed at these concentrations. The results of the ATP bioluminescence method and the national standard plate count method demonstrated a strong linear relationship, with a correlation coefficient (r^2) of 0.9871. The ATP bioluminescence method indicated good reproducibility, and the results were stable and reliable. **Conclusion** This study further validates the applicability of ATP bioluminescence method for the quick detection of colonies number in chilled meat, demonstrating its advantages over the national standard plate count method.

KEY WORDS: chilled meat; colonies number; plate count method; adenosine triphosphate bioluminescence method

0 引言

随着生活水平的不断提升,食品安全已成为备受关注的问题,特别是在肉类产品的消费方面。冷鲜肉作为一种通过严格控制屠宰后温度和冷链运输条件,保持肉类新鲜、营养和风味的低温肉制品,其肉质鲜嫩、味道鲜美,富含人体必需的蛋白质、脂肪、碳水化合物及多种微量元素,深受消费者青睐,已成为我国肉类市场的主要销售形式之一^[1]。然而,尽管低温保存有助于减缓微生物的生长,但冷鲜肉在屠宰、加工和贮运过程中仍容易受到微生物的污染,这不仅影响其品质,还可能对消费者健康构成潜在威胁^[2]。微生物污染是影响冷鲜肉质量的关键因素之一,菌落总数的检测是评估微生物污染程度和卫生状况的重要指标^[3],能直观地反映冷鲜肉的卫生质量。目前,食品中菌落总数测定通常采用平板计数法,依据 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》进行,该方法通过培养样品中的微生物,计数可培养的菌落数量,并根据稀释倍数计算出样品中的菌落总数。然而,平板计数法只能检测在特定条件下生长的细菌,且检测周期较长,在实际生产中难以实现快速响应^[4]。因此,建立一种及时、快速且准确的冷鲜肉菌落总数检测方法显得尤为重要。

腺嘌呤核苷三磷酸(adenosine triphosphate, ATP)是细胞内的重要能量载体,几乎在所有活细胞中都有分布^[5]。ATP 生物发光法是一种快速的微生物检测技术,通过测量样品中存在的 ATP 荧光信号来评估微生物的数量。这一方法利用 ATP 与荧光素酶反应生成光子,通过光度计或荧光计检测反应所产生的光子数量,从而推断样品中微生物的数量。ATP 发光法因其具有高灵敏度、快速性和简便性,且检测结果与传统平板计数法呈较好的一致性,现已广泛应用于食品安全^[6-9]、环境监测^[10-12]、医疗消毒^[13-16]及废水生物处理工艺^[17-18]等领域,用以快速评估样品的微生物污染程度,及时提供质量反馈。研究表明,食品中存在的背景 ATP 会干扰微生物含量的准确测定,尤其在细菌浓度达到 1×10^5 CFU/mL 或更高时更为明显^[19]。因此,采用 ATP 生物发光法对冷鲜肉进行菌落计数时,必须去除背景 ATP,

以避免高估微生物数量。近年来,广泛应用于非微生物 ATP 去除的方法是将非离子表面活性剂曲拉通 X-100 (Triton X-100) 与三磷酸腺苷双磷酸酶 (adenosine triphosphate double, Apyrase) 结合使用。Triton X-100 是一种非离子表面活性剂,能够有效裂解细胞膜,释放 ATP 并保持其稳定性。Apyrase 作为一种水解酶,能够催化 ATP 的水解反应,有效降低非细菌来源 ATP 的浓度^[20-21]。这一方法能够有效减少非细菌 ATP 的干扰,同时保持微生物的活性,使 ATP 生物发光法更准确地反映冷鲜肉中的实际微生物负荷。

本研究确定了适宜的 Triton X-100 和 Apyrase 浓度,以确保在去除非细菌 ATP 干扰的同时不影响微生物活性,从而优化 ATP 生物发光法的检测准确性。此外,比较国家标准平板计数法与 ATP 生物发光法在冷鲜肉微生物检测中的应用效果,并评估 ATP 生物发光法的重现性,以期为冷鲜肉中菌落总数的快速检测提供一种可行的方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

按照 GB 4789.17—2024《食品安全国家标准 食品微生物学检验 肉与肉制品采样和检验处理》从山东临沂新程金锣肉制品集团有限公司选取屠宰后冷却 24 h 的不同批次金锣冷鲜肉 36 份,1 h 内运回实验室,于 (0 ± 0.5) °C 条件下贮存 0、1、3、5、7 d。处理当天开始,在每个测量时间点,随机取出 6 份样品进行实验。

Apyrase(分析纯,上海源叶生物科技有限公司); ATP 标准品、Trixon-100(分析纯,北京索莱宝科技有限公司); 平板计数琼脂(北京陆桥技术股份有限公司); 3M™ Clean Trace™ ATP 采样棒 UXL100 (3M 中国有限公司)。

1.2 仪器与设备

BSA224S 电子分析天平(精度 0.1 mg, 北京赛多利斯仪器有限公司); BL-250 拍打式均质器(上海比朗仪器制造有限公司); YXQ-LS 立式高压蒸汽灭菌器(上海仪天科学仪器有限公司); SW-CJ 型超净工作台(苏州安泰空气技术有

限公司); DHG-9140A 电热恒温培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); 3M LM1 手持式荧光检测仪(3M 中国有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 溶液配制

样液的配制: 称取 25 g 样品, 放入含 225 mL 生理盐水的无菌均质袋中, 拍打均质 1~2 min, 制成 1:10 的样品悬匀液。使用 1 mL 无菌吸管吸取 1 mL 样品匀液, 缓慢注入盛有 9 mL 稀释液的无菌试管中, 振荡试管至混合均匀, 制成 10^{-2} 样品匀液。重复上述操作, 制备 10 倍系列稀释样品匀液, 每次更换 1 mL 无菌吸管进行操作。

ATP 标准溶液的配制: 准确称取 0.051 g ATP 标准品, 用超纯水溶解配制成 10^{-5} mol/L 标准溶液。

1.3.2 平板计数法测定菌落总数

按照 GB 4789.2—2022, 选取稀释倍数为 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 的样品悬液, 于超净工作台上, 吸取 1 mL 样品悬液转移至无菌培养皿中, 每个稀释度做 2 个培养皿, 及时将 15~20 mL 冷却至 46~50 °C 的平板计数琼脂培养基倾注培养皿, 随后转动培养皿使其混合均匀。同时, 吸取 1 mL 空白稀释液加入另外 2 个无菌培养皿内作对照。水平放置待琼脂凝固后, 翻转平板放置于 (36 ± 1) °C 的恒温培养箱中, 培养 (48 ± 2) h 后进行菌落计数。记录稀释倍数和相应的菌落数量, 并以菌落形成单位(colony forming unit, CFU)表示。

1.3.3 ATP 生物发光法测定菌落总数

(1) 建立标准曲线

将 10^{-5} mol/L 的 ATP 标准溶液, 依次稀释成 10^{-15} ~ 10^{-6} mol/L 的 ATP 溶液, 测量其相对光单位(relative light units, RLU)数值, 根据 ATP 浓度的对数值和相应的 RLU 对数值绘制标准曲线。

(2) 体细胞 ATP 清除

Triton X-100 浓度研究: 取 1 mL 待测冷鲜肉的样品悬液, 分别加入 1 mL 0.1%~0.8% 浓度范围的 Triton X-100, 轻轻振荡混匀 2 min 后测定体细胞发光强度, 探究 Triton X-100 的浓度对发光反应的影响。

Apyrase 浓度研究: 将 0~0.10 U/mL 浓度范围的 Apyrase 作用于经 Triton X-100 提取后的冷鲜肉体细胞 ATP 溶液, 反应 10 min 后立即 100 °C 水浴 1 min, 测定发光强度, 并通过剩余发光强度来评估 Apyrase 对 ATP 的水解效果。

(3) 微生物 ATP 检测

取测定菌落总数稀释倍数为 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 的样品匀液 1 mL, 分别加入最佳浓度的 Triton X-100 和 Apyrase, 在室温条件下孵育 10 min 后, 将样品置于沸水浴中 1 min 以灭活 Apyrase。分别将 ATP 采样棒插入上述各待测样品悬液中进行充分浸湿, 随后将拭子插回采样管, 按压使棉签与内部试剂接触, 摇晃采样棒, 确保棉签与试剂充分混合。激活后的采样棒迅速插入 3M LM1 手持荧光检测仪,

进行实时检测并记录 RLU 数值。使用无菌生理盐水作空白对照, 根据建立的标准曲线计算 ATP 含量。

1.4 数据处理

所有实验重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示, 使用 Excel 2016 和 GraphPad Prism 10 对数据进行统计分析并绘图。

2 结果与分析

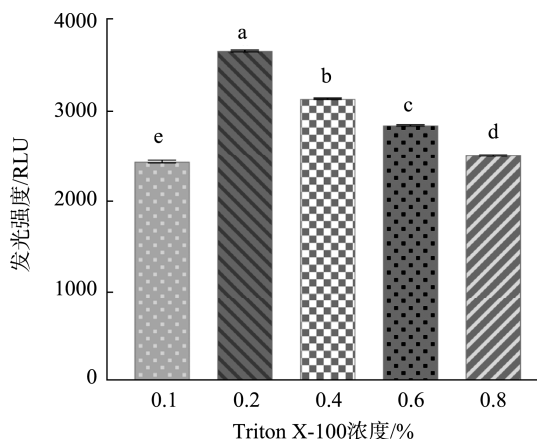
2.1 ATP 标准曲线

以 ATP 浓度的对数值为横坐标(X, lgmol/L), 相应发光强度的对数值为纵坐标(Y), 建立了 ATP 标准品不同浓度与发光强度之间的数学关系模型。通过回归分析得到的线性方程为 $Y=0.1768X+5.1532$, $r^2=0.9942$, 表明在 ATP 浓度范围为 10^{-15} ~ 10^{-6} mol/L 之间, ATP 浓度与发光强度之间存在显著的线性相关性。因此, ATP 生物发光法用于 ATP 含量测定具有较好的可行性。

2.2 体细胞 ATP 清除

2.2.1 Triton X-100 浓度的选择

使用不同浓度(0.1%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%)的 Triton X-100 对冷鲜肉样品悬液进行体细胞 ATP 的提取, 提取结果见图 1。从体细胞发光值可以看出, 不同浓度的 Triton X-100 对 ATP 的提取效果不同。随着浓度增加, 体细胞发光值呈现先上升后下降的趋势, 最大发光值出现在 Triton X-100 浓度为 0.2% 时, 这一浓度下 ATP 提取率最有效, 因此, 0.2% 的 Triton X-100 被确定为体细胞 ATP 最佳提取浓度。其原因是作为非离子表面活性剂, Triton X-100 通过改变细胞膜的通透性, 促进体细胞内的 ATP 释放, 浓度较低时 Triton X-100 可能无法完全破坏细胞结构, 随浓度的升高, 提取效率增强, 但过量的 Triton X-100 可能会抑制荧光素酶的活性, 导致发光强度下降。



注: 不同字母代表差异显著($P<0.05$), 图 2 同。

图 1 Triton X-100 浓度对提取冷鲜肉体细胞 ATP 的影响
Fig.1 Effects of Triton X-100 concentration on the extraction of intracellular ATP from chilled meat

2.2.2 Apyrase 浓度的选择

将不同单位的 Apyrase 作用于待测冷鲜肉样品悬液, 利用 ATP 生物发光法测定剩余 ATP 的含量。Apyrase 浓度对 ATP 水解效果的变化如图 2 所示。Apyrase 作为体细胞和游离 ATP 的水解酶, 其作用效果与酶浓度密切相关。若酶浓度过低, 无法有效水解样品中的 ATP, 导致细菌 ATP 的发光值较高。图 2 显示, 随着 Apyrase 浓度的增加, 剩余 ATP 的发光强度不断下降。当酶浓度为 0.10 U/mL 时, 剩余发光强度接近零, 表明该浓度的 Apyrase 能够完全水解非细菌来源的 ATP, 达到清除非细菌 ATP 的目的。因此, 选择 0.10 U/mL 的 Apyrase 作为非细菌 ATP 清除剂。

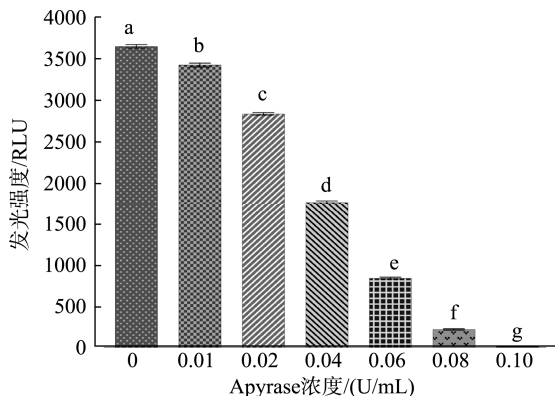


图 2 Apyrase 浓度对体细胞 ATP 清除的影响
Fig.2 Effects of Apyrase concentration on the deleting of somatic ATP

2.3 ATP 生物发光法与平板计数法检测菌落总数的相关性分析

分别采用 ATP 生物发光法和国家标准平板计数法测定不同存放天数后发光强度和菌落总数, 以国家标准平板计数法测定的菌落总数对数值为横坐标, 相应冷鲜肉样品的 ATP 发光值的对数作为纵坐标, 结果如图 3 所示, 随着存放天数的延长, 冷鲜肉样品中的菌落总数显著增加, ATP 发光值也呈现出相似的上升趋势, 两者之间具有良好的线性关系($r^2=0.9871$), 这表明 ATP 生物发光法可有效用于冷鲜肉样品中菌落总数的快速检测。

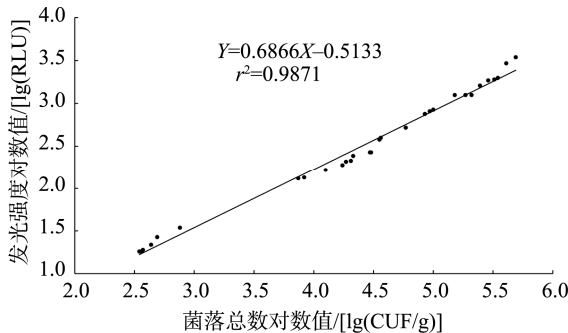


图 3 菌落总数与 ATP 发光强度的关系
Fig.3 Correlation analysis between colonies number and intensity of ATP bioluminescence

2.4 ATP 生物发光法重现性

为了评估 ATP 生物发光法在检测冷鲜肉样品菌落总数时是否具有良好的重现性, 对相同冷鲜肉样品中的菌落总数进行多次检测(图 4)。结果显示, ATP 生物发光法在冷鲜肉菌落总数检测中表现出良好的重现性, 各测量值围绕平均值上下波动, 标准偏差(standard deviation, SD)为 5.08, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)为 3.1%, 表明 ATP 生物发光法在冷鲜肉菌落总数检测中具有一定的可靠性。

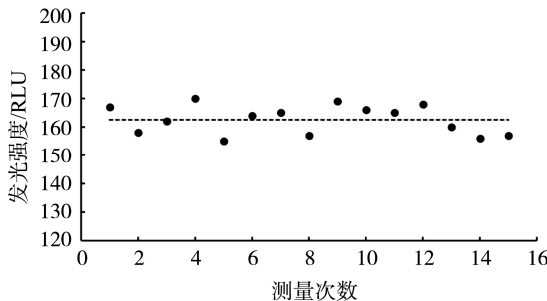


图 4 ATP 生物发光法的重现性
Fig.4 Reproducibility of ATP bioluminescence method

3 讨论与结论

传统的平板计数法检测菌落总数通常需要培养 48 h 才能获得结果, 在此期间, 冷鲜肉可能已经进入进一步的加工、包装, 甚至流入市场销售, 这给产品质量和安全带来了潜在风险, 例如腐败微生物增殖引起的产品变质或致病菌积累导致的食源性疾病。因此, 平板计数法作为食品质量和安全标准的应用需要进行重新评估, 以更好地适应快速检测的需求。

ATP 生物发光法的主要优势在于其检测速度快, 这在原材料的微生物分析中尤为重要。相比传统平板计数法, 它能够快速识别低质量的原料, 从而确保进入加工环节的原材料质量, 保证成品的最佳质量与保质期^[22-23]。由于其高效性, 许多行业将 ATP 生物发光法纳入其质量控制体系中, 以满足现代生产过程中对实时检测的需求^[24-27]。本研究中测定的冷鲜肉微生物 ATP 的对数值与已有研究有所差异, 可能与样品种类及来源不同有关^[6,21], 为更全面地评估冷鲜肉中的微生物质量, 可考虑扩大样品的种类、数量和来源。需要注意的是, ATP 生物发光法主要检测总的微生物 ATP 含量, 对于冷鲜肉中特定食源性致病菌的定量分析, 还需结合其他方法, 以进一步提升冷鲜肉的安全性。此外, 在低水平微生物污染情况下, ATP 生物发光法的灵敏度可能不够理想, 难以准确检测代谢活性较低的微生物, 可能导致对污染程度的误判^[28-30]。

本研究确定了在使用 ATP 生物发光法测定冷鲜肉菌

落总数时, Triton X-100 和 Apyrase 清除冷鲜肉细胞 ATP 的最佳浓度分别为 0.2% 和 0.10 U/mL。在该浓度下, 冷鲜肉细胞 ATP 清除效果最好。通过比较冷鲜肉在不同保存天数下的微生物变化, 使用国家标准平板计数法和 ATP 生物发光法分别测定菌落总数, 结果表明这两种方法具有良好的线性相关性, 相关系数超过 0.98, 且重现性良好。这表明 ATP 生物发光法在冷鲜肉菌落总数检测方面具有可行性, 能够快速准确地评估冷鲜肉品质, 相较于传统平板计数法具有更好的应用前景。

参考文献

- [1] 王丽, 林颖, 谭旭, 等. 冷鲜肉主要致腐微生物及构建微生物预测模型研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(10): 42–48.
WANG L, LIN Y, TAN X, *et al.* Research progress in main spoilage microorganisms and predictive microbiological modeling of chilled meat [J]. Meat Research, 2023, 37(10): 42–48.
- [2] CASABURI A, PIOMBINO P, NYCHAS GJ, *et al.* Bacterial populations and the volatilome associated to meat spoilage [J]. Food Microbiology, 2015, 45: 83–102.
- [3] 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 JJ, TANG YJ, LI J, *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.
- [4] 阙玉敏, 蒋娜, 白凯红, 等. 细菌有活力但不可培养状态及其机制研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(3): 880–891.
KAN YM, JIANG N, BAI KH, *et al.* Research progress on viable but non-culturable state of bacteria [J]. Microbiology China, 2020, 47(3): 880–891.
- [5] 曹昕昱, 章小英, 叶建平. 线粒体 ATP 合成酶抑制因子 1 在细胞能量代谢中的调节作用[J]. 中国细胞生物学学报, 2020, 42(4): 682–690.
CAO XY, ZHANG XY, YE JP. Regulation of mitochondrial ATP synthase inhibitor 1 in cellular energy metabolism [J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2020, 42(4): 682–690.
- [6] 舒柏华, 孙丹陵, 王胜利, 等. 肉类食品细菌污染生物发光快速分析技术研究[J]. 中国公共卫生, 2003, 19(4): 483–484.
SHU BH, SUN DL, WANG SL, *et al.* Rapid bioluminescent technique to detect bacteria in meat [J]. Chinese Journal of Public Health, 2003, 19(4): 483–484.
- [7] 丛苑, 卢彦廷, 杜奕君, 等. ATP 发光法快速检测玉米中的霉菌[J]. 中国食品学报, 2014, 14(8): 233–239.
CONG Y, LU YT, DU YJ, *et al.* Application of ATP bioluminescence technology for rapid detection of moulds in maize [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(8): 233–239.
- [8] ZIYAINA M, RASCO B, SABLANI SS. Rapid methods of microbial detection in dairy products [J]. Food Control, 2020, 110: 107008.
- [9] 李海月, 黄继红, 张新武, 等. ATP 生物发光法快速检测食源性致病菌的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 67–71.
LI HY, HUANG JH, ZHANG XW, *et al.* Study on rapid detection of food-borne pathogen by ATP bioluminescence method [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 67–71.
- [10] CHO YS, KIM HR, KO HS, *et al.* Continuous surveillance of bioaerosols on-site using an automated bioaerosol-monitoring system [J]. ACS Sensors, 2020, 5(2): 395–403.
- [11] 连英姿, 董雪, 李勇, 等. ATP 生物发光技术快速检测水中细菌的研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(10): 1859–1860.
LIAN YZ, DONG X, LI Y, *et al.* Study on measuring rapidly bacterium in water with ATP bioluminescence technique [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2007, 17(10): 1859–1860.
- [12] 黄炎, 张文平, 凌艳明. ATP 生物荧光技术在肉品生产在线清洁度监测中的可行性研究[J]. 农产品加工, 2021(9): 65–68.
HUANG Y, ZHANG WP, LING YM. Feasibility study of ATP biofluorescence technology in on-line cleanliness monitoring of meat production [J]. Farm Products Processing, 2021(9): 65–68.
- [13] 朱金婷, 王岚, 何惠英, 等. 三磷酸腺苷生物荧光法评估口腔诊疗环境物体表面消毒效果[J]. 中国消毒学杂志, 2022, 39(9): 711–712.
ZHU JT, WANG L, HE HY, *et al.* Evaluation of disinfection effect of surfaces in oral diagnosis and treatment environment using ATP bioluminescence method [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2022, 39(9): 711–712.
- [14] 杨绍丽, 吴文莉, 王静, 等. ATP 荧光检测技术对纤维支气管镜清洗消毒效果评价的研究[J]. 当代医学, 2018, 24(19): 55–58.
YANG SL, WU WL, WANG J, *et al.* Study on the evaluation of the efficacy of ATP fluorescence detection for the cleaning and disinfection of bronchoscopy [J]. Contemporary Medicine, 2018, 24(19): 55–58.
- [15] LING S, HUI L. Evaluation of the complexity of indoor air in hospital wards based on PM 2.5, real-time PCR, adenosine triphosphate bioluminescence assay, microbial culture and mass spectrometry [J]. BMC Infectious Diseases, 2019, 19(1): 1–10.
- [16] MITCHELL BG, MCGHIE A, WHITELEY G, *et al.* Evaluating bio-burden of frequently touched surfaces using adenosine triphosphate bioluminescence (ATP): Results from the researching effective approaches to cleaning in hospitals (REACH) trial [J]. Infection, Disease & Health, 2020, 25(3): 168–174.
- [17] SIBAG M, KIM SH, KIM C, *et al.* Interference sources in ATP bioluminescence assay of silica nanoparticle toxicity to activated sludge [J]. Journal of Microbiological Methods, 2015, 113: 65–71.
- [18] NGUYEN LH, CHONG NM. Development of an ATP measurement method suitable for xenobiotic treatment activated sludge biomass [J]. Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2015, 1000: 69–76.

- [19] BAUTISTA DA. ATP bioluminescence: application in meat industry [J]. Encyclopedia of Food Microbiology, 2014(1): 97–104.
- [20] 王佳欣, 崔璐璐, 谢冰. 生物发光法测定天然水体细菌数量中游离 ATP 的去除[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(6): 1091–1095.
- WANG JX, CUI LL, XIE B. ATP bioluminescence for determining total bacteria in natural water to remove free ATP [J]. Chinese Journal of Apply Environmental Biology, 2014, 20(6): 1091–1095.
- [21] 苏媛媛, 张德权, 古明辉, 等. 不同来源 ATP 表征冷鲜肉新鲜度[J]. 中国农业科学, 2022, 55(19): 3841–3853.
- SU YY, ZHANG DQ, GU MH, *et al.* Characterization of chilled mutton by ATP from different sources [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(19): 3841–3853.
- [22] 张泽帅, 谢茂梅, 文有青, 等. ATP 生物发光技术结合统计分析方法应用于柴胡饮片微生物污染快速判断[J]. 药学报, 2023, 58(10): 2922–2930.
- ZHANG ZS, XIE MM, WEN YQ, *et al.* Rapid determination of microbial contamination of *Bupleurum* Chinese DC. decoction slices by ATP bioluminescence technology combined with statistical analysis methods [J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2023, 58(10): 2922–2930.
- [23] HEWAGE SN, MAKAWITA P, GIBSON KE, *et al.* Relationship between ATP bioluminescence measurements and microbial assessments in studies conducted in food establishments: A systematic literature review and meta-Analysis [J]. Journal of Food Protection, 2022, 85(12): 1855–1864.
- [24] MORETO T, NORMANN MA, SAEBO HR, *et al.* Evaluation of ATP bioluminescence-based methods for hygienic assessment in fish industry [J]. Journal of Applied Microbiology, 2019, 127(1): 186–195.
- [25] MOAZZAMI M, BERGENKVIST E, BOQVIST S, *et al.* Assessment of ATP-bioluminescence and dipslide sampling to determine the efficacy of slaughterhouse cleaning and disinfection compared with total aerobic and Enterobacterales counts [J]. Journal of Food Protection, 2023, 86(10): 100155.
- [26] BUCZINSKIS, MORIN MP, ROY JP, *et al.* Use of ATP luminometry to assess the cleanliness of equipment used to collect and feed colostrum on dairy farms [J]. Journal of Dairy Science, 2022, 105(2): 1638–1648.
- [27] 李婷, 沈颖, 蔡俊松, 等. ATP 生物荧光增幅法在化妆品微生物检测中的适用性研究[J]. 日用化学工业, 2021, 51(6): 513–521, 527.
- LI T, SHEN Y, CAI JS, *et al.* Applicability study of amplified ATP bioluminescence assay in microbial detection of cosmetics [J]. China Surfactant Detergent Cosmetics, 2021, 51(6): 513–521, 527.
- [28] 张桐, 谢茂梅, 刘艺丹, 等. 三磷酸腺苷生物发光法在提高复杂样品细菌检测能力方面的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 1–8.
- ZHANG T, XIE MM, LIU YD, *et al.* Research progress on the application of adenosine triphosphate bioluminescence method in improving the detection ability of bacteria in complex samples [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 1–8.
- [29] LIU S, ZHAO J, GUO Y, *et al.* Application of ATP-based bioluminescence technology in bacterial detection: A review [J]. The Analyst, 2023, 148(15): 3452–3459.
- [30] 叶盼弟. 食品工程中 ATP 生物发光技术的应用分析[J]. 现代食品, 2023, 29(10): 42–44.
- YE PD. Application analysis of ATP bioluminescence technology in food engineering [J]. Modern Food, 2023, 29(10): 42–44.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)