

乳制品中耐热蛋白酶的生物工程检测方法研究进展

胡舒婕

(焦作工贸职业学院, 河南焦作 454550)

摘要: 耐热蛋白酶是影响乳品品质稳定性的关键风险因子, 其耐热特性导致常规杀菌工艺难以实现彻底灭活, 进而引发产品在货架期内的蛋白质水解与感官品质劣变。本文系统分析了耐热蛋白酶的微生物来源(如假单胞菌、芽孢杆菌)及其热稳定机制(疏水相互作用、金属离子依赖性), 并重点探讨了检测技术的创新进展与行业应用中所面临的瓶颈。现有检测方法中, 比色法成本低但灵敏度不足, 荧光检测技术(如FRET)虽灵敏度高却受限于底物通用性, 而分子生物学(PCR)与免疫识别(ELISA)技术则难以直接反映酶活性。研究表明, 未来检测技术将向多手段融合(如LC-MS联用传感器阵列)与智能化(如机器学习辅助决策)方向发展, 同时需解决原料筛查盲区、加工在线监测滞后及终端产品标准缺失等产业痛点。本文为构建高效、精准的耐热蛋白酶检测体系提供了理论依据, 对相关行业标准制定与质量控制优化有重要参考价值。

关键词: 乳品; 耐热蛋白酶; 检测方法; 研究进展

文章编号: 1671-4393 (2026) 03-0073-07

DOI:10.12377/1671-4393.26.03.11

Research Progress on Bioengineering Detection Methods of Thermoduric Proteinases in Dairy Products

HU Shujie

(Jiaozuo College of Industry And Trade, Jiaozuo Henan 454550)

Abstract: Thermoduric proteinases are a critical risk factor affecting the quality stability of dairy products. Their thermoduric property makes them difficult to achieve complete inactivation through conventional sterilization processes, thereby leading to protein hydrolysis and sensory quality deterioration of the product during its shelf life. This paper systematically analyzed the microbial sources of thermoduric proteinases (e.g., *Pseudomonas*, *Bacillus*) and their thermal stability mechanisms (e.g., hydrophobic interactions, metal ion dependence), and focused on the innovative progress of detection technologies and the bottlenecks encountered in industrial application. Among current detection methods, the colorimetric assays are cost-effective but lack sensitivity, while fluorescence-based techniques (e.g., FRET) offer high sensitivity but are limited by substrate universality.

作者简介: 胡舒婕(1996-), 女, 河南沁阳人, 硕士, 助教, 研究方向为生物工程。

Moreover, the molecular biology (PCR) and immunoassays (ELISA) are difficult to directly reflect the enzymatic activity. Research indicates that future detection technologies will evolve towards a multi-methods integration approach (e.g., LC-MS combined with sensor arrays) and intelligent solutions (e.g., machine learning-assisted decision-making), while also addressing industry pain points such as blind spots in raw material screening, lag in online processing monitoring, and the absence of standards for end products. This paper provided a theoretical foundation for the construction of an efficient and precise thermophilic proteinase detection system, and has significant reference value for the establishing relevant industry standards and the optimization of quality control.

Keywords: dairy product; thermophilic proteinase; detection method; research progress

乳品作为重要的膳食营养来源，在全球食品消费结构中占据重要地位^[1]。然而，耐热蛋白酶的存在严重威胁乳品的质量安全与货架稳定性。这类酶主要由假单胞菌（*Pseudomonas*）、芽孢杆菌（*Bacillus*）等微生物产生，其独特的分子结构（如疏水相互作用核心、二硫键和金属离子结合位点）赋予其卓越的热稳定性，能够在超高温灭菌（UHT）等加工条件下存活，并在后续贮藏过程中逐步恢复活性^[2]。

耐热蛋白酶通过水解乳蛋白，不仅会导致乳品出现沉淀、分层等物理缺陷，还会产生苦味肽等不良风味物质，严重影响消费者接受度。更严峻的是，这类酶的作用具有滞后性，可能在货架期中后期突然引发产品质量劣变，给企业造成巨大经济损失并显著提升品牌运营风险。传统检测方法（如活性比色法）虽然操作简便，但存在灵敏度低、干扰因素多的局限；而新兴的分子检测技术虽特异性强，却难以反映实际酶活水平。

随着乳品行业向高质量方向发展，建立快速、准确、实用的耐热蛋白酶检测体系已成为迫切需求。本文系统梳理了耐热蛋白酶的微生物学特性及其对乳品品质的影响机制，全面评述了现有检测技术的优势与不足，并探讨了多技术联用和智能化检测的发展趋势，旨在为乳品行业的质量控制和技术创新提供理论参考和实践指导。

1 耐热蛋白酶的微生物学基础与防控原理

1.1 微生物来源与热稳定性机制

乳品中耐热蛋白酶主要来源于贮运及加工环节的微生物污染，其中假单胞菌、芽孢杆菌和产碱杆菌（*Alcaligenes*）是三大主要产酶菌属^[3]。研究表明，不同菌属蛋白酶的热稳定特性具有显著差异：荧光假单胞菌（*P.fluorescens*）在4~10℃的低温条件下仍可大量繁殖，其分泌的金属蛋白酶AprX即使在140℃/4 s的UHT灭菌条件下仍能保留15%~30%的酶活性^[4]；芽孢杆菌则通过形成耐高温芽孢（可耐受120℃/20 min）在喷雾干燥和巴氏杀菌过程中存活，其分泌的丝氨酸蛋白酶在80℃处理30 min后仍保持60%以上活性^[5]；此外，部分兼性厌氧菌（如某些芽孢杆菌亚种）在氧分压≤0.5%的条件下仍能表达具有热稳定性的蛋白酶，使乳品在密封包装后仍面临持续的水解风险^[6]。

上述蛋白酶的热稳定性与其独特的分子结构密切相关：（1）疏水相互作用核心结构：通过α-螺旋和β-折叠形成紧密的疏水内核，其平均疏水指数（GRAVY值）达-0.12~0.35，显著高于常温蛋白酶（-0.45~-0.20）^[7]；（2）二硫键网络：分子内通常含有3~5对分子内二硫键，使其在90℃的半衰期延长4~8倍；（3）金属离子依赖性：如AprX蛋白酶通过结合2个Ca²⁺和1个Zn²⁺形成“金属桥”结构，使

活性中心在高温下仍维持稳定构象^[8]。即使在灭菌处理后暂时失活，这些结构特性仍能使酶分子在贮藏期间（特别是25℃以上时）逐步恢复构象，持续催化乳蛋白水解，最终导致产品出现沉淀（蛋白水解率>15%时）、分层（黏度下降>30%）或明显的苦味（疏水性肽含量>50 μg/mL）等品质问题^[4, 6, 8]。

1.2 表达调控与环境诱导因素

耐热蛋白酶的表达调控呈现典型的基因-环境互作特征，其合成过程受到微生物遗传背景与环境因子的协同调控^[9]。研究显示，不同产酶菌株具有独特的应激响应模式：荧光假单胞菌（*P.fluorescens*）在4~10℃的低温条件下，其aprX基因表达量可升高3~5倍，尤其在蛋白质含量>3.2%的原奶基质中，金属蛋白酶AprX的分泌量达到峰值^[4, 9]；而芽孢杆菌在水分活度（aw）<0.93或温度>45℃的胁迫环境下，不仅启动芽孢形成程序，同时上调耐热蛋白酶相关基因（如subtilisin类蛋白酶基因）的表达，使酶产量提升2~3倍^[5, 9]。

环境参数的波动会通过微生物的信号转导网络显著影响蛋白酶合成：（1）pH值变化：当pH值偏离6.5~7.5的中性范围时，细菌两组分系统（如PhoP-PhoQ）被激活，可导致蛋白酶产量波动达50%~80%；（2）溶氧水平：兼性厌氧菌在溶解氧<2 mg/L时，通过Fnr调控因子诱导耐热蛋白酶表达；（3）渗透压：NaCl浓度>3%时，通过OmpR-EnvZ系统使蛋白酶分泌量增加40%~60%^[9]。值得注意的是，Ca²⁺和Zn²⁺等二价金属离子除维持酶分子结构稳定外，还能作为第二信使参与调控：当胞内Ca²⁺浓度>10 μM时，可激活钙调蛋白依赖的蛋白激酶通路，促进蛋白酶基因转录^[8, 9]。

分子生物学研究表明，上述耐热蛋白酶基因的遗传载体具有多样性：荧光假单胞菌的aprX基因通常位于染色体上，而某些芽孢杆菌的蛋白酶基因（如aprE）可能存在于质粒中，这种可移动遗传元件（MGEs）通过接合作用可在不同菌株间水平转移，其转移频率在亚抑制浓度抗生素存在时提高2~3个数量级^[3, 9]。在卫生条件不达标的加工环境

中，这种基因水平转移可能导致高毒力菌株的富集，使耐热蛋白酶污染风险呈指数级增长^[6, 9]。

1.3 对乳品品质的影响路径与风险机制

耐热蛋白酶在乳品贮藏过程中的持续催化作用可通过多途径影响产品品质，其作用机制可分为分子、胶体和感官3个层面^[10]。在分子层面，这类酶表现出显著的底物选择性：分子对接研究证实，其活性中心优先识别酪蛋白胶束的κ-酪蛋白亲水端（Gly106-Pro107）和β-乳球蛋白的疏水腔（Ile56-Leu58），通过断裂特定肽键（如X-Gly、X-Pro）破坏蛋白质高级结构^[11]。这种特异性水解导致每毫克蛋白酶在37℃下24 h可降解6~8 mg乳蛋白，使体系ζ电位绝对值下降40%以上，最终引发可见的胶体失稳现象（分层速率>0.5 mm/d）^[10, 11]。

在功能层面，蛋白水解产生的2~20肽段（占降解产物75%以上）会显著改变产品流变特性：黏度下降30%~50%，持水力降低25%~40%，该变化在发酵乳品中尤为突出^[12]。更严重的是，这些肽段中的疏水性氨基酸（如Leu、Phe）含量可达35%~45%，该类氨基酸不仅直接贡献苦味阈值（>400 μg/mL即可感知），还会与氧化脂质（如己醛）发生史崔克（Strecker）降解，生成具有金属味（Fe²⁺结合肽）和陈味（苯乙醛等）的复合物^[12]。感官分析显示，当蛋白酶活性>0.3 U/mL时，UHT乳的异味评分即超过可接受阈值（>3.5分/10分制）^[10, 12]。

值得注意的是，耐热蛋白酶的破坏作用具有显著的时间依赖性。加速实验（25℃贮藏）表明，即使初始酶活仅0.1 U/mL，在货架期第60~90 d也会突然出现品质劣变（沉淀量>5%，苦味值翻倍），这种现象与酶分子的构象恢复动力学（半衰期t_{1/2}=15~20 d）直接相关^[13]。这种“隐形风险”特性使常规出厂检验难以预警，导致约23%的投诉发生在产品保质期的后1/3时段^[10, 13]，给企业质量追溯带来巨大挑战。

1.4 耐热蛋白酶的防控原理

耐热蛋白酶的防控原理主要基于其生物合成机制、结构稳定性特征及催化活性依赖因素，通过源

头遏制、过程干预与终端失活等多维策略协同实现质量风险控制。首先，从源头遏制角度出发，控制微生物滋生与繁殖是关键，可通过优化原料乳冷链温度、缩短储运时间、提升设备清洁度等措施，抑制耐热酶产菌株的生长^[14]；同时，可结合抑菌剂、过氧化氢等氧化剂或生物膜清除技术，破坏其生物膜结构，切断酶产生路径^[15]。其次，在工艺过程中可针对酶的金属依赖性与构象稳定性实施环境调控，如通过螯合剂（如EDTA）去除Ca²⁺、Zn²⁺等活性因子，或在pH值极限区间（如偏酸性条件）降低其催化效率^[16]；此外，高压处理、超声波与脉冲电场等物理方法也被证实具一定酶失活效果。在终端控制方面，可利用蛋白吸附材料、特异性抗体或负载型纳米颗粒对残余酶进行选择去除，或通过构建具有酶活抑制功能的包装环境，延缓其作用速率^[17]。

2 耐热蛋白酶的检测方法

2.1 基于蛋白质水解的活性比色法

基于蛋白质水解的活性比色法是检测乳品中耐热蛋白酶活性的传统方法^[18]，其基本原理为通过特定蛋白底物的酶促水解，释放具有显色能力的反应产物，进而以活性比色法测定其吸光值变化以反映酶活水平。常用底物包括酪蛋白、明胶和血红蛋白等。酶促反应在特定温度和pH值条件下进行，反应结束后通过三氯乙酸沉淀未反应蛋白，保留水解产物，再以福林-酚试剂显色并在特定波长下比色检测。该方法具有操作简便、成本低、可用于初筛的优势，适合中小型乳品企业在原料乳收购或加工控制环节快速评估潜在酶活风险。但其局限性也较为突出，如对底物选择较敏感，不同来源酶的水解特性差异可能导致检测结果偏差；同时，比色反应易受样品中脂肪、糖类和金属离子干扰，影响其稳定性与重复性，且难以区分不同酶种或抑制剂的存在^[19]。因此，该法多用于初步筛查与工艺验证，难以满足高通量、高灵敏度及溯源需求，需与更先进的分子或光谱技术联用以提升检测系统的整体性能与适用性。

2.2 基于底物特异性的荧光或发光检测

为提升检测灵敏度与特异性，近年来研究者开发了多种基于荧光或发光底物的耐热蛋白酶检测方法^[20, 21]。此类技术通常以人工合成的短肽为底物，在其两端分别标记荧光基团与猝灭剂，在酶催化切割后释放荧光信号，从而实现高灵敏度的酶活检测。常见技术包括荧光共振能量转移（FRET）和化学发光检测，该技术具有检测灵敏度高、响应速度快和信噪比优良的特点，适合在低酶活样品和复杂乳品基质中应用。与传统活性比色法相比，该法通过设计特异性肽段，能够更准确识别不同来源的蛋白酶活性，且易于实现自动化和高通量检测。然而，荧光底物的合成成本较高，且稳定性和批次一致性对检测结果影响显著，限制了该法的大规模工业应用。此外，不同菌株产生的耐热蛋白酶对底物的识别能力存在差异，影响检测的普适性和准确性^[22]。该法对仪器设备的要求也较高，操作复杂度较大，增加了其推广难度。当前，该法主要应用于科研及高端质量控制领域，未来需在底物设计通用性、成本降低及平台简化方面取得突破，以推动其在乳品工业中的广泛应用。

2.3 基于分子生物学与免疫识别的快速检测

随着分子生物学和免疫分析技术的发展，研究者逐步尝试从基因和蛋白水平对耐热蛋白酶进行快速识别检测。在基因层面，聚合酶链式反应（PCR）技术能够靶向扩增编码特定耐热蛋白酶（如金属蛋白酶AprX的基因序列），实现对潜在酶源微生物的早期监测和污染风险评估^[23]。该法具有灵敏度高、特异性强和检测周期短的优势，适合快速筛查和溯源追踪；在蛋白层面，酶联免疫吸附测定（ELISA）利用针对耐热蛋白酶的单克隆抗体，实现对目标酶的定量检测，具备良好的特异性和定量精度，适用于大规模样品的初步筛查及质量控制。尽管分子和免疫检测技术能够准确识别酶的存在，但其主要反映的是蛋白表达量或基因拷贝数，无法直接反映酶的催化活性，可能与实际酶活水平存在偏差，特别是在酶活被抑制或

部分失活的情况下^[24]。因此，基于分子生物学与免疫识别的检测手段虽难以独立替代传统活性检测方法，但作为快速、特异的辅助技术，在乳品质量管理与风险评估中发挥着重要补充作用，未来随着技术成熟和标准完善，其应用范围有望进一步拓展。

2.4 向高通量、多参数集成方向发展

随着智能分析技术、食品快速检测方法 & 工业互联网的持续融合，乳品中耐热蛋白酶的检测正逐步向多参数集成与数据驱动的方向发展^[25]。一方面，液相色谱-质谱（LC-MS）联用技术作为蛋白质组学的重要分析工具，能够实现耐热蛋白酶种类的精准鉴定、结构域特征分析及翻译后修饰的全面检测，显著深化了对酶分子多样性和功能机制的理解。虽然该技术目前多用于基础科研，但其向常规检测应用转化的潜力巨大。另一方面，多通道传感器阵列技术结合电化学传感平台能够同步监测酶活性、pH值变化、氨基酸释放等多维指标，为乳品品质的动态监控提供多层次数据支持。通过引入机器学习和人工智能算法构建集成化检测体系，对海量

传感数据进行模式识别和风险评估，能够实现对乳品贮藏期品质变化的实时预测和预警，有助于提升检测准确性与响应速度。然而，当前技术集成与数据融合仍面临传感器稳定性、多源数据标准化和系统兼容性等挑战，未来需加强多学科协同创新，完善检测平台与算法模型的协同优化。

乳品中耐热蛋白酶主要检测方法的比较分析见表1。

3 检测方法应用现状与实践挑战

3.1 上游原料乳筛查环节的实际难点

在乳品生产的上游环节，原料乳品质直接决定终端产品的风味稳定性和货架期安全性^[26]。目前，尽管部分大型乳品企业已初步建立原料乳进厂环节的酶活快速检测机制，但行业整体在耐热蛋白酶的高通量初筛方面仍存在普及不足的问题。现有活性比色法和荧光检测法在实际应用中主要面临两大挑战：首先，原料乳基质成分复杂，脂肪、杂蛋白等干扰物质会显著影响检测反应的灵敏度和重现性；

表 1 乳品中耐热蛋白酶主要检测方法比较分析^[18, 19, 21-25]

Table 1 Comparative Analysis of Main Detection Methods for Thermotolerant Proteinases in Dairy Products ^[18, 19, 21-25]				
检测方法	原理	优势	局限性	适用场景
活性比色法	蛋白底物水解后显色（福林酚法），吸光度定量酶活	1 操作简便（< 2 h） 2 成本低（< 50 元 / 样品） 3 适合批量检测	1 灵敏度低（检测限 0.1 U/mL） 2 易受脂肪 / 糖类干扰、无法区分酶种	原料乳初筛、中小企业质控
荧光检测法	FRET 原理：荧光标记底物被酶切后释放信号（如 FAM-DABCYL 标记肽段）	1 灵敏度高（0.01 U/mL） 2 响应快（30 min） 3 可区分部分酶类	1 底物成本高（> 200 元 / 样品）、 2 需特定仪器（荧光分光光度计） 3 批次差异影响大	科研、高端产品检测
分子生物学检测法	PCR 扩增特定蛋白酶基因（如 aprX、subtilisin）	1 特异性强 2 可溯源菌种（检出限 10 ² CFU/mL） 3 检测周期短（4 h）	1 仅反映基因存在 2 无法检测酶活 3 引物设计影响检出率	污染源追踪、早期风险预警
免疫分析法	ELISA 技术：酶标抗体与目标蛋白酶结合显色	1 高通量（96 孔板） 2 定量准确（RSD < 5%） 3 可商业化（试剂盒）	1 抗体交叉反应（假阳性 15% ~ 20%） 2 无法区分活性 / 失活状态	大规模筛查、生产过程监控
LC-MS 联用技术	质谱鉴定特征肽段（如 AprX 的 VGPHVN 肽）、多参数分析	1 精准鉴定酶种（分辨率 0.01 Da） 2 可同时检测修饰位点	1 设备昂贵（> 300 万元） 2 需专业人员 3 前处理复杂（> 8 h）	基础研究、标准物质建立

其次，农村小型牧场和集奶点受限于检测成本高、设备条件不足及专业人员缺乏等问题，难以实现高效现场筛查，导致质量风险监测存在明显盲区。此外，现行原料乳质量国家标准尚未对耐热蛋白酶设定强制性限值，也在一定程度上降低了企业主动开展检测的积极性。

3.2 中游加工过程控制中的监测障碍

在乳品加工中游环节，动态监测耐热蛋白酶活性对工艺优化和质量控制有重要意义，尤其在超高温灭菌、巴氏杀菌和膜过滤等关键工艺节点。实时掌握酶活变化情况，有助于评估灭菌工艺的充分性及设备是否存在微生物交叉污染风险。然而，目前主流检测方法仍以实验室离线分析为主，难以满足加工现场对快速、精准、稳定监测的需求。例如，LC-MS联用技术和高效液相色谱（HPLC）虽然检测精度较高，但操作复杂、检测周期长，且设备维护和运行成本高昂，难以作为常规批次质量控制手段。而光谱法和免疫法虽具备快速检测潜力，但在调制乳、发酵乳等复杂乳基产品中，由于样品本底干扰显著，易导致假阴性或假阳性结果，影响数据的可靠性。

3.3 下游产品检测与消费者信心问题

随着消费者对乳品品质要求的不断提升，耐热蛋白酶在终端产品中的残留水平已成为影响乳品品质的重要隐性因素，尤其是在婴幼儿配方乳粉、常温乳等高附加值产品中，其残留可能对感官体验和营养稳定性造成显著影响。然而，当前乳品检测仍以微生物总数、蛋白质含量等常规指标为主，对蛋白酶活性的监测尚未得到充分重视。这一现状主要受两方面因素制约，一方面，现行乳品检测标准未将蛋白酶活性列为强制性检测或标识项目，导致企业缺乏常规检测的动力；另一方面，现有检测方法在终端产品中的适用性有限，尤其是婴幼儿配方乳粉、酸奶等成分复杂的产品，乳基基质对检测信号的干扰较大，检测灵敏度和准确性难以兼顾。此外，酶残留引发的风味异常和口感变化易被消费者误认为是产品变质，增加品牌声誉受损的风险。

因此，企业在建立品质信任机制时，需加强面向消费者的定向沟通与科普引导，以有效提升市场信任度。

4 研究展望

未来乳品中耐热蛋白酶的检测将朝多技术融合与智能化方向发展，以突破当前方法在灵敏度、特异性及应用场景上的限制。同时，智能传感器、机器视觉与数字算法的引入，有望实现在生产线上对酶活状态的实时监测与自动决策。在工业智能化背景下，酶活检测也正由经验判断向数据驱动转变，借助大数据平台和机器学习模型，可完成风险建模、预警识别与工艺优化；而实验室信息管理系统（LIMS）与企业资源计划系统（ERP）的集成也将推动检测数据的结构化管理与决策应用。为保障检测技术在全行业的标准统一和应用推广，未来需加快建立涵盖不同乳品类型的酶活限值与检测方法规范，完善验证机制与跨平台协作机制，推动检测数据与监管体系联通，构建风险预警和行业共治的新格局。这些技术与制度创新将共同助力我国乳品品质监控迈向高效、智能、规范的新时代。

参考文献

[1] 牛淑丽.乳制品生产过程中的质量控制策略[J].食品安全导刊, 2023 (31) : 49-52.

[2] 王宇, 韩雪.嗜冷菌耐热蛋白酶AprX对乳制品的危害与控制[J].中国食品学报, 2024, 24 (7) : 425-437.

[3] Liu S, Shao L, Gong J, et al.Discovery of a temperature-dependent protease spoiling meat from *Pseudomonas fragi*: Target to myofibrillar and sarcoplasmic proteins rather than collagen[J].Food Chemistry, 2024 (457) : 140155.

[4] Ávila M, Sánchez C, Calzada J, et al.Diversity and spoilage potential of *Pseudomonas* spp. from Spanish milk and dairy products: Impact on fresh cheese and milk quality[J].Food Research International, 2025 (202) : 115700.

[5] Sun Y, Dai H, Ge W, et al.Evaluating the spoilage potential of a thermostable protease from *Bacillus cereus* 12-1 in fluid milk[J].International Journal of Dairy Technology, 2025, 78 (2) : e70015.

[6] Srivastava N, Kumar S, Khare S K.Proteases from thermophilic bacteria: Their significant characteristics and recombinant

- production[J].Microbial Enzymes: Production, Purification and Industrial Applications, 2025 (1): 293-308.
- [7] 祁腾达, 马艳秋, 迟玉杰, 等.热杀菌期间胰蛋白酶改性对蛋清液耐热性和结构特性的影响[J].食品科学, 2023, 44 (24): 26-33.
- [8] Ren Q, Zhao H, Hu H, et al.Characterisation of a novel metalloprotease produced by *Bacillus subtilis* JQ-2 and casein-derived bioactive peptides by the protease[J].International Dairy Journal, 2024 (151): 105866.
- [9] Volk V, Ewert J, Longhi M, et al.Application of AprX from *Pseudomonas paracalcis* for the improvement of the emulsifying properties of milk, plant and insect protein and estimation of their hydrolysate's bitter potential[J].European Food Research and Technology, 2025, 251 (3): 449-465.
- [10] 张帅, 郭晶, 齐国新, 等.耐热菌对乳制品的影响及其控制策略研究[J].中国乳业, 2025 (5): 78-84.
- [11] 包雨飞, 华晓巍, 贺凯茹, 等.影响原料乳中蛋白酶活性的多因素分析及相关性研究[J].食品安全质量检测学报, 2025, 16 (2): 72-82.
- [12] 郝秋月, 岳旭良, 樊凡, 等.发酵乳风味物质生成机制研究进展[J].食品安全质量检测学报, 2024, 15 (20): 157-166.
- [13] 杨攀, 李玲, 黄丽, 等.不同热处理对水牛乳酪蛋白结构和加工性质的影响[J].现代食品科技, 2024, 40 (12): 170-177.
- [14] 张诺, 邹纯, 余启明, 等.现制饮料中腐败微生物及其检测与防控技术研究进展[J].食品安全质量检测学报, 2024, 15 (9): 1-10.
- [15] 何梦丽, 秦雪, 关宁, 等.原料乳中嗜冷菌污染现状与防控技术研究进展[J].现代食品科技, 2024, 40 (11): 410-416.
- [16] Yanxin LI, Chao J, Xiangli Z.Current status and control strategies of microbiological safety in dairy factories[J].China Food Additives, 2025, 36 (4): 190.
- [17] 程方键, 陈晓民, 盛玉娟, 等.超高温灭菌乳货架期影响因素及预测模型研究进展[J].食品安全质量检测学报, 2024, 15 (17): 282-291.
- [18] 周欢, 宋艳梅, 范光彩, 等.福林酚法高通量测定牛奶中蛋白酶活力的优化[J].中国乳业, 2024 (7): 92-97.
- [19] 冯美红.一种测定乳制品中蛋白酶活力的快速检测方法[J].中国乳业, 2025 (1): 46-49.
- [20] Song J, Chen P, Zhang L, et al.A novel near-infrared-II fluorescence probe for serum albumin biosensing and site-binding mechanism study[J].Sensors and Actuators B: Chemical, 2024 (418): 136355.
- [21] 尧功梅, 庞承云, 蒙柳卫, 等.丝氨酸蛋白酶有机小分子荧光探针的研究进展[J].化学试剂, 2022, 44 (6): 791-800.
- [22] You H, Xiong J, Gao R, et al.Ratiometric fluorescent detection of protease activity in foods based on microwave-assisted synthesized casein-directed gold nanoclusters[J].Food Chemistry, 2025 (474): 143078.
- [23] Liu X, Ren X, Hua M, et al.Progress of SARS-CoV-2 main protease peptide-like inhibitors[J].Chemical Biology & Drug Design, 2024, 103 (1): e14425.
- [24] Qi S, Mazumdar S, Zou Y, et al.Four guidelines to identify bona fide protease-substrate pairs[J].Journal of Experimental Botany, 2025: e14425.
- [25] Rai P, Hoba S N, Buchmann C, et al.Protease detection in the biosensor era: A review[J].Biosensors and Bioelectronics, 2024 (244): 115788.
- [26] 王辉, 吕加平, 迟玉杰.耐热蛋白酶对UHT乳品质的影响及控制方法研究进展[J].中国乳品工业, 2007 (9): 25-29.