

# 牛乳新鲜度评价及其检测方法的研究进展

扶晓菲, 游春苹\*

(乳业生物技术国家重点实验室, 上海乳业生物工程技术研究中心, 光明乳业股份有限公司乳业研究院, 上海 200436)

**摘要:** 近年来以巴氏杀菌牛乳为代表的新鲜牛乳越来越受到广大消费者的青睐, 新鲜度成为挑选牛乳的首要考量要素。同时, 牛乳新鲜度评价是衡量乳品品质的重要组成部分, 相关评价指标一般包括感官指标、理化指标、流变性指标及介电特性等, 当然一些参考性的评价指标也在补充和完善牛乳质量体系中发挥潜在作用; 相关检测方法从传统的感官检测、微生物检测、常规理化检测拓展到了现有的红外光谱、液相色谱、基于传感器的电子鼻、电子舌等多种动态检测方法。理想的乳品评价体系需要囊括源头的新鲜乳品采集, 到加工过程的安全杀菌和营养物质保留, 再到乳品的新鲜度检测, 当从全产业链的方方面面确保乳品的新鲜。本文旨在综述牛乳新鲜度评价指标及其检测方法, 从而为牛乳新鲜度鉴定和乳品品质评价体系的完善提供理论参考。

**关键词:** 牛乳; 新鲜度; 变质; 评价指标

## Research progress on evaluation and detection methods of milk freshness

FU Xiao-Fei, YOU Chun-Ping\*

(State Key Laboratory of Dairy Biotechnology, Shanghai Engineering Research Center of Dairy Biotechnology, Dairy Research Institute, Bright Dairy & Food Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**ABSTRACT:** In recent years, as the representative of fresh cow's milk, pasteurized cow's milk is becoming more and more favored by the vast number of consumers, and freshness has become the primary consideration in the selection of cow's milk. Meanwhile, cow's milk freshness evaluation is an important part of measuring dairy quality, the relevant evaluation index generally includes sensory index, physical and chemical index, rheological index and dielectric properties, etc. Indeed, some reference evaluation indicators also play a potential role in supplementing and perfecting the quality system of cow's milk, while the relevant detection methods have been expanded from the traditional sensory detection, microbial detection, conventional physiologic detection to the existing infrared spectrum, liquid chromatography, sensor-based electronic nose, electronic tongue and other dynamic detection methods. The ideal dairy evaluation system needs to cover the fresh dairy collection at the source, the safe sterilization and nutrient retention in the processing process, and the freshness detection of dairy products, so as to ensure the freshness of dairy products from all aspects of the whole industrial chain. This paper reviewed the evaluation indexes and detection methods of milk freshness, which provided a theoretical reference for the identification of milk freshness and the improvement of dairy quality evaluation system.

**KEY WORDS:** milk; freshness; deterioration; evaluation index

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2017YFC1600404)、上海乳业生物工程技术研究中心项目(19DZ2281400)

Fund: Supported by the National Key R & D Program of China (2017YFC1600404), and Shanghai Engineering Research Center of Dairy Biotechnology (19DZ2281400)

\*通信作者: 游春苹, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: youchunping@brightdairy.com

\*Corresponding author: YOU Chun-Ping, Ph.D, Senior Engineer, Dairy Research Institute, Bright Dairy & Food Co., Ltd., No.1518, West Jiangchang Road, Jingan District, Shanghai 200436, China. E-mail: youchunping@brightdairy.com

## 0 引言

新鲜度是肉类、海鲜、鸡蛋、乳制品等生鲜食品消费的关键要素,新鲜度评估及检测因而也成为食品质量感知的基本方面之一<sup>[1-2]</sup>。新鲜牛乳是一种天然、营养、健康的食物,作为食物金字塔中不可或缺的组成部分,可提供丰富的钙质及优质蛋白质,对人类饮食模式的均衡、优化发挥了重要作用<sup>[3]</sup>。正因为牛乳营养丰富,也成为了微生物、细菌的生长繁殖绝佳场所,一旦贮藏、监测不当,极易发生变质。牛乳新鲜度异常主要表现为蛋白变性、脂肪酸败、乳糖经微生物利用产生乳酸导致体系酸度过高等现象<sup>[4-5]</sup>。为获得明显的新鲜感,更有不法商家因此在食品中掺假<sup>[6-7]</sup>。狭义的牛乳新鲜度一般是指牛乳加工之前,即生乳的新鲜程度,对于新鲜牛乳,尤其是优质生乳,除蛋白质、脂肪含量高,菌落总数、大肠菌群、体细胞数低外,近年来乳铁蛋白、乳过氧化物酶等也成为其新的品质度量指标<sup>[8]</sup>。

牛乳新鲜度作为衡量原料奶品质的关键指标之一,其评价指标极其丰富并不断被完善<sup>[9]</sup>。常规评价指标包括感官指标、理化指标、微生物指标、流变学特性、介电特性以及其他参考性指标,与之对应的检测方法也由经典的感官评价、酸度测定、酒精实验等不断向更加综合性的电子舌、电子鼻、红外光谱、核磁检测、传感器动态性检测等方法发展和完善<sup>[10-13]</sup>。具体来看,理化指标如酸度、pH是国内外乳品评价最为经典的衡量指标,感官指标虽然具有主观性,但一直是新鲜度评价的必要手段,而流变学特性、介电特性主要借助牛乳粘度、牛乳介电参数变化来考察牛乳新鲜度,报道相对较少;国内关于牛乳新鲜度的报道最早可追溯至20世纪50年代,相关研究缺乏系统性且评价及检测方法单一;近十年来,以近红外光谱技术为代表的无损检测方兴未艾,快速、无损、精准检测成为了研究热点<sup>[5]</sup>。

新鲜的牛乳含有乳铁蛋白、免疫球蛋白等生物活性物质,在提高人体免疫力,对抗新型冠状病毒肺炎等疾病中发挥潜在天然屏障作用<sup>[12,14]</sup>。后疫情时代,我国国民饮奶意识普遍提升,乳品消费升级也使得消费者对新鲜、安全、优质牛乳的消费偏好成为必然,提高牛乳新鲜度评价的精确性和检测的准确性势在必行,优化和寻找可靠的评价指标,开发新型检测方法成为必须要攻克的科研难题。本文比较了各类牛乳新鲜度评价指标,梳理了传统和新型检测方法及其优缺点,归纳现有报道的研究方向,旨在为牛乳新鲜度的研究提供参考,进而为新鲜牛乳品质评价体系的完善提供潜在理论依据。

## 1 评价指标

牛乳的新鲜度评价多从感官指标、微生物指标、理化

指标如流变特性和介电特性等常规指标考量。此外还包含一些参考性指标例如营养指标、美拉德反应各阶段产物、牛乳体系的稳定性等,这些指标也有助于牛乳新鲜度的判断,成为评价牛乳新鲜度的佐证<sup>[14-17]</sup>。

新鲜度评价是牛乳品质评价的重要组成部分,经典的感官指标有看、闻、尝等,主要从牛乳的颜色、气味、色泽、口味等多方面来快速、综合考量牛乳的新鲜程度<sup>[3]</sup>。具体包括观察牛奶是否呈现乳白色、是否散发异味、是否口感异常,初步评价牛乳的质量状况。一般而言,感官指标缺乏客观性,但伴随味觉传感器等新兴检测设备的出现,具有优化及综合评价的潜力<sup>[4]</sup>。大肠菌群等杂菌的存在既影响了原料乳的质量状态,同时也会在货架期内分解氧化牛乳中的营养物质,导致酸度下降,进而影响牛乳的货架期内稳定性<sup>[17]</sup>。微生物指标如菌落总数、大肠菌群并不是判断牛乳新鲜程度的经典指标,但一定程度上可以验证牛乳酸度变化,间接证实牛乳新鲜度程度。

酸度和pH是新鲜度检测的最为直观的经典理化指标,此外还可以借助牛乳的流变学特性和介电特性来判定牛乳新鲜度。一般通过测定相对密度和比重,借助酸度、pH、粘度等直观指标的差异来表征新鲜度的改变,酸度和pH的含量变化贯穿了牛乳新鲜度变化的全过程,是经典的新鲜度理化指标<sup>[4,18-19]</sup>。流变特性如粘度的变化则提示了贮藏条件的变化,而介电特性通常是借助于牛乳成分相关的介电参数,如复阻抗与牛乳pH等具有相关性来建模间接分析<sup>[20-23]</sup>。另有研究也指出,决定电磁能量与牛奶在受到介电加热时相互作用特性的介电常数,例如损耗因子,与pH呈线性关系,也被引入评价牛乳等液体食品的新鲜度评价体系,有望成为牛乳的质量评价技术,同时可能为牛乳新鲜度检测器的开发提供建设性的信息<sup>[24]</sup>。

营养及功能性指标在牛乳新鲜评价中并不常见,但具有参考价值。基于乳酸、短链脂肪酸、溶菌酶、生物胺等来开发生物传感器,建立新指标,在乳制品微生物检测等方面作出了贡献,拓展了新鲜度评估的指标,有望极大程度上丰富品质评估体系<sup>[4,25-26]</sup>。现有国家标准中对牛乳的一些评价指标要求详见表1。

## 2 检测方法

### 2.1 传统检测方法

感官检测、微生物检测、酸度等理化指标测定是传统检测方法的代表性实验,其中感官检测是牛乳新鲜度检测的第一步,它借助视觉、嗅觉、触觉、味觉等多方面直观评判了牛乳质量的优劣,带有一定的主观性,对操作人员的专业性要求较高<sup>[4]</sup>;微生物检测同样也是原料乳安全检测的重要一环,以嗜冷菌为代表的牛乳中细菌组成变化规律、对乳中各类营养物质的影响的研究确保了牛乳在全产业链的新鲜和安全<sup>[27]</sup>;国标规定正常牛乳的酸度一般维持

表 1 国标中现有的生乳评价指标  
Table 1 Existing evaluation indexes of raw milk in national standard

种类	评价内容	指标要求	检验标准	检测方法
感官指标	颜色、气味、色泽、口味	乳白色、无异味、口感香醇	GB 19301—2010	感官测定
微生物指标	菌落总数	$\leq 1 \times 10^5$ CFU/g(mL)(优级生乳)	GB 4789.2—2016	标准平板计数法
理化指标	酸度、pH 相对密度、比重	酸度(12~18 °T)(生乳) 相对密度(1.028~1.032)(生乳) 比重(1.030~1.034)(生乳)	GB 19301—2010 GB 5413.33—2010	标准碱滴定法 密度计检测
营养指标	蛋白质 脂肪	$\geq 3.0$ g/100 g(优级生乳) $\geq 3.3$ g/100 g(优级生乳)	GB 5009.5—2016 GB 5009.6—2016	分光光度法 碱水解法

在 12~18 °T, 相对密度维持在 1.028~1.032, 比重维持在 1.030~1.034, 偏离正常值的牛乳存在变质和掺假的风险<sup>[9]</sup>。基于牛乳酸度的检测方法很多, 包含煮沸试验、酒精试验以及碱滴定法等, 借助蛋白的热稳定性和牛乳溶解性判定牛乳是否为新鲜牛乳<sup>[18]</sup>。大多传统的检测方法往往耗时、费力、有损、昂贵且具有滞后性, 不能实时检测和监测牛乳新鲜度, 因此寻找一种无损、响应快、安全的方法势在必行。

## 2.2 电子舌、电子鼻检测

新型检测方法中, 最为常见的是电子鼻、电子舌检测, 它们的出现让新鲜度的感官评价更为多样。电子舌检测是一种以伏安法或电势测定法为原理的, 旨在对从源头到不同加工阶段的食物腐败、掺假、新鲜度作出全程判定的检测方法, 具有简单高效、无损等优点<sup>[28]</sup>。研究发现, 基于伏安电子舌, 结合主成分分析和聚类分析的科学研究, 检测了未经密封的巴氏杀菌牛奶的质量和储存时间内的变化情况, 结果发现牛乳样品中的菌落总数、粘度、酸度等理化指标与成分分析和聚类分析的图谱显示出一致性, 表明了电子舌检测法在牛乳质量检测中的可行性<sup>[29]</sup>。一项综述了电子鼻、电子舌和计算机视觉系统的结合应用报道指出, 二者作为快速可靠的质量评估工具受到越来越多食品工业的青睐, 同时基于食品成分高度复杂性的现实情况, 指出实现多传感器的数据融合是应用难题之一<sup>[30]</sup>。BRODZIAK<sup>[15]</sup>基于脂质和聚合物膜阵列的电子舌方法, 采用主成分分析和线性判别分析方法来评估天然的牛乳和山羊奶的味道演变, 通过交叉验证, 能够分别达到 95.7% 和 87.1% 正确分类率, 具有区分乳制品掺假的潜力。

## 2.3 传感器检测

传感器尤其是生物传感器检测方法十分丰富, 在智能包装、食品保质期指示、新鲜度检测等方面具有应用前景。花青素作为天然的食品着色剂, 对环境 pH 变化敏感, 并兼有抗氧化的特点, 基于 pH 响应花青素聚合物的智能包材具有潜在的应用优势和前景<sup>[31]</sup>。相关报道指出, 将提取自黑胡萝卜的花青素固定于淀粉基质制备而成的传感器

标签, 与巴氏杀菌乳的 pH、酸度和微生物生长情况呈现高度正相关, 表明了该标签总色差的变化显著区分牛乳的新鲜度的能力, 同时该标签稳定性良好, 为乳品中智能鲜度指示器的研发提供了新的视角<sup>[32]</sup>。这一假设在基于固定化细菌纤维素膜的食品 pH 传感器研究中得到证实, 该项研究发现传感器的颜色变化与 pH 变化呈现线性关系, 可以通过颜色变化区分新鲜牛奶和腐败牛奶, 该传感器室温条件下 17 d 内保持其稳定性, 为食品智能包装研发领域的拓展补充了证据<sup>[33]</sup>。目前的食品日期标记往往不够智能, 会导致食物的浪费或者对消费者健康产生不良影响。一种基于聚二乙炔开发出来的比色传感器, 以细菌腐败产生的乳酸菌浓度, 借助其 pH 的变化来表征全脂牛奶的新鲜程度, 同时就其色度稳定性进行探究; 实验区分出新鲜牛奶、临保牛奶和腐坏牛奶分别是 6.0~6.8、4.5~6.0 和 4.0~4.5, 并以蓝、紫、红 3 种颜色加以区分, 从而简单明了指示牛乳的实际使用日期, 具有一定的实用价值<sup>[34]</sup>。牛乳在货架期内会因微生物的作用分解乳糖产生乳酸, 并转化为丙酮酸和过氧化氢, 过氧化物的浓度与样品中乳酸的含量相关, 一项基于乳酸开发出来的生物传感器, 借助所测的催化电流与过氧化物的浓度成正相关的原理, 检测了牛乳体系的新鲜度, 检出限为 2.6  $\mu\text{mol/L}$ , 并能达到与传统试剂盒一致的良好检测效果<sup>[12]</sup>。

## 2.4 光谱检测

光谱检测方法以红外光谱、荧光光谱和介电光谱较为多见, 在牛乳的无损检测中具有代表性<sup>[35]</sup>。红外光谱是一种基于物质经光照射震动后产生能量吸收差异来区分不同物质的检测方法, 近红外光谱和中红外光谱最常用于乳品质量评估, 具有快速、无创、简便等优点, 结合化学计量学方法, 有望成为监测和评估乳品状况的有力工具<sup>[36]</sup>。WANG 等<sup>[5]</sup>借助傅立叶变换-近红外光谱技术, 在 833~2500 nm 光谱范围内, 通过对比传统乳品品质参数如酸度、pH、乳糖含量并建立模型, 基于层次聚类分析法, 构建了贮藏过程中原料奶新鲜度相似性分析及分类方法, 该模型预测系数达 0.85, 验证了本方法评价新鲜度的潜力。

荧光光谱与红外光谱具有相似的检测优势, 荧光光谱在乳品质量的快速、准确评价中具有有效性。SUN 等<sup>[37]</sup>采用荧光光谱对几种经典酸奶, 通过粘度、pH 等物理参数的比较加以区分, 同时借助多元线性回归模型, 评价了荧光信号与理化参数之间的相关性, 5 类酸奶中相关系数均达到 85%, 进一步证明了评价酸奶贮存过程中品质的潜力。发光二极管(light emitting diode, LED)作为能源效率高的光源已有广泛的应用。用 LED 诱导的荧光光谱技术照射常温牛奶来探究牛奶新鲜度变化趋势, 分别在 0、7、10、12、15、17、20 h 的时间点取样并记录荧光数据, 建立准确的评估模型, 荧光图谱显示 10 h 后图谱开始呈现差异, 借助主成分分析法进一步验证 10 h 是一个转折点, 在 10 h 后, 评估时间与相应的实际存储时间能够较好拟合, 相比其他方法, 该方法成本更低且高效<sup>[10]</sup>。由于暂无独特的检测方法来详细反应食物腐败、变质的复杂动力学, 更有学者尝试使用更为灵敏的宽带介电谱, 作为一种工具来探测牛奶变质过程中结构性变化的信息, 体现出了非破坏性、短时、在线处理等优势, 有望结合传统理化检测参数, 实现牛乳变质全过程的实时评价<sup>[38]</sup>。

## 2.5 其他检测方法

此外, 基于核磁共振衍生的检测技术也是检测牛乳新鲜度的重要手段之一, 其中射频识别(radio frequency identify, RFID)是其中的一个应用方向, 是一种基于牛乳变质过程中介电性能变化导致接触表面电容变化进而引起射

频天线工作频率变化, 同时结合三维仿真软件对本方法进行灵敏度优化, 提出的一种快速、无直接接触式的新鲜度检测方法<sup>[39]</sup>。另外一项类似的科学报道, 用可导电的水稀释牛奶至不同浓度, 分别于 22 °C 存储 36 h、5 °C 存储 144 h, 实验通过 10~4500 kHz 的微波, 借助 X 射线、开放式同轴探头技术、导电率检测证实了介电常数随着频率的增加而降低, 损失因子在 1700 kHz 附近具有最小值, 进而提出损失因子可以是预测牛奶浓度和新鲜度的潜在指标, 为新鲜传感器的研发提供了建设性信息<sup>[7]</sup>。液相、气相色谱检测也是乳品品质评价体系的重要组成部分。比如多项研究表明糠氨酸和乳果糖比率在乳制品掺假检测中发挥作用, 具备间接评价新鲜度的潜在价值<sup>[40]</sup>。XING 等<sup>[41]</sup>采用高效液相色谱紫外检测器法对 3 大类不同杀菌温度的牛乳保质期内糠醛类化合物的变化进行探究, 建立了温度回归模型, 为基于 4 类糠醛的新鲜度评价方法的建立提供参考价值。除此之外, 新鲜度检测方法还包括超声波检测技术、ATP 生物荧光技术以及一些生物在线监测技术<sup>[42-44]</sup>。例如, LOUTFI 等<sup>[13]</sup>依据乳品货架期内酸度、电容变化研发出的多表查询方法的实时查询系统, SONG 等<sup>[44]</sup>开发出的基于牛奶和鸡蛋温度的质量综合监测系统方法, 均具有更好的检测效果。此外, 生物胺作为一种生物活性物质, 近期一项旨在探究 4 °C 的贮存条件其变化规律的研究指出, 腐胺和尸胺随温度变化最为明显, 并与常见指标如感官指标、酸度呈现良好正相关性, 且方法容易定量检测, 具有成为鉴定原料乳的腐败变质、检测其新鲜度的标示潜力<sup>[12]</sup>。新鲜度检测方法比较见表 2。

表 2 新鲜度检测方法比较  
Table 2 Methods and comparison of freshness detection

分类	检测方法	评价指标/检测依据	应用比较
传统检测方法	感官检测 <sup>[4]</sup>	颜色、气味、口味	直观, 但具有主观性
	理化检测 <sup>[18]</sup>	pH、酸度、粘度	经典, 有损
	微生物检测 <sup>[9]</sup>	菌落总数	经典, 滞后性
电子舌、电子鼻	电子舌和电子鼻技术 <sup>[30]</sup>	基于牛乳主成分得分与酸度、挥发性物质等具有相关性的伏安法或电势测定法	稳定, 快速客观, 替代部分感官实验
传感器检测	pH 响应传感器 <sup>[33]</sup>	花青素对环境 pH 变化敏感	颜色变化显著, 用于智能包装
	乳酸生物传感器 <sup>[11]</sup>	催化电流与乳酸的浓度正相关	检出限低, 效果好
光谱检测	近红外光谱技术 <sup>[5]</sup> 、傅立叶变换-近红外光谱技术 <sup>[28]</sup>	基于评价参数如酸度、pH、乳糖并建模	安全可靠, 快速准确
	LED 诱导荧光光谱技术 <sup>[10]</sup>	基于 pH、粘度等质量参数并建模	无损, 快速检测
核磁检测	射频识别(radio frequency identification, RFID)技术 <sup>[39]</sup>	介电性能变化导致接触表面电容变化进而引起射频天线工作频率变化	无源, 低成本, 选择性响应, 非接触
	基于多源光谱数据融合 <sup>[28]</sup>	融合近红外光谱和拉曼光谱, 比较预测模型和未知奶样的酸度值	安全可靠, 快速测定, 实际应用价值广
在线检测	多表查询方法的牛奶新鲜度实时检测系统 <sup>[44]</sup>	基于不同贮藏时间、温度内与乳品电容、酸度的关系表创建系统	准确, 全面, 实时
其他技术	ATP 生物荧光技术 <sup>[43]</sup>	ATP 荧光强度与微生物浓度具有相关性	快速检测微生物

### 3 新鲜度的保持与监测

新鲜度的保持对于乳品质量的维持至关重要, 需要从原料乳采集、过程检测、物理保障、全程监测等各环节发力<sup>[45]</sup>。首先, 好的奶源确保了牛乳的营养、安全、卫生状况, 对原料乳的质量安全控制有助于降低牛乳耐热菌等致病菌, 稳定牛乳体细胞数和提高产品品质, 牧场作为牛乳的源头地, 应该维护好牧场生长环境、确保乳牛健康泌乳<sup>[46-47]</sup>。其次, 生乳挤出经检验后应该及时冷藏及冷链运输。更为关键的, 新鲜度的保持离不开各环节的检测与监测, 传统、新型检测方法, 甚至是二者结合的新兴检测技术需要不断拓展, 为乳品新鲜度提供关键保障; 动态、实时、智能、全程监测的在线检测系统研发有望为乳品新鲜度提供可信的数据信息, 必然成为亟待攻关的课题方向。此外, 为进一步拓展牛乳新鲜度范围, 更有研究聚焦于牛乳的储存、智能包装研发及管理等方面<sup>[33,48-50]</sup>。

### 4 结束语

当前牛乳新鲜度的评估与检测主要还是以酸度、pH、微生物等经典新鲜度指标为基础, 结合光谱、色谱、核磁、人工智能等热门技术, 探索指标与技术参数的相关性来联合的直接或间接评价。存在一定的局限性, 主要表现为: 传统的感官、理化检测往往是有损、主观、单一的检测方式, 不能批量操作, 难以适应现代检测的需求; 而许多新的检测方法仍处于初步研究阶段, 方法的可靠性仍待加强验证, 但需要肯定的是, 诸如生物活性物质等的出现, 必将进一步吸引并推动相关研究的开展。后疫情时代, 能够增强营养、提高人体免疫力的食物成为新时期的需求, 新鲜营养的乳制品必然成为不可或缺的选择<sup>[51]</sup>。这一需求对乳品行业提出了新的要求和挑战: 完善和丰富乳品评价指标, 亟待探索出新的、综合的、可靠的、快速直观的评价指标, 围绕评价指标形成一整套系统性的乳品新鲜度检测方法; 第二, 以无损、简便、低成本为导向, 加速研发牛乳新鲜度快检方法, 围绕新的检测方法, 要做到充分比较各方法的优势与劣势, 力求技术的融合与互补, 形成综合的检测方法, 从而完善和丰富牛乳新鲜度乃至乳品品质的评价及检测研究。

### 参考文献

- [1] MALLOUCHOS A, MIKROU T, GARDELI C. Gas chromatography-mass spectrometry-based metabolite profiling for the assessment of freshness in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) [J]. *Foods*, 2020, 9(4). DOI: 10.3390/foods9040464.
- [2] MLADENOV M. Model-based approach for assessment of freshness and safety of meat and dairy products using a simple method for hyperspectral analysis [J]. *J Food Nutr Res-Slov*, 2020, 59(2): 108-109.
- [3] PARDAKHTI A, MALEKI S. Risk assessment of aflatoxin M<sub>1</sub> contamination of milk in Iran [J]. *Int J Environ Res*, 2019, 13(2): 265-271.
- [4] 徐楚璇. 牛奶的变质与新鲜度检测探讨[J]. *现代商贸工业*, 2019, 40(10): 176-178.  
XU CX. The discussion on the metamorphism and freshness detection of milk [J]. *Mod Business Trade Ind*, 2019, 40(10): 176-178.
- [5] WANG Y, DING W, KOU L, *et al.* A non-destructive method to assess freshness of raw bovine milk using FT-NIR spectroscopy [J]. *J Food Sci Technol*, 2015, 52(8): 5305-5310.
- [6] PAVLOS, NIKOLAOU, EFSTATHIOS, *et al.* Application of chemometrics for detection and modeling of adulteration of fresh cow milk with reconstituted skim milk powder using voltammetric fingerprinting on a graphite/SiO<sub>2</sub> hybrid electrode [J]. *Talanta*, 2020, 206: 120223.
- [7] JITENDRA MV, SAI KN, KUMAR S. Study of dielectric properties of adulterated milk concentration and freshness [J]. *Mater Sci Eng*, 2017, 225(1): 12285.
- [8] 王加启. 优质乳工程技术体系核心指标研究[J]. *中国乳业*, 2019, 6: 2-6.  
WANG JQ. Study on the core index of quality milk engineering technology system [J]. *China Dairy*, 2019, 6: 2-6.
- [9] 库婷, 刘永峰, 张玲玲, 等. 牛乳品质检测方法的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(1): 375-380, 385.  
KU T, LIU YF, ZHANG LL, *et al.* Progress and analysis of detection methods of milk quality [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(1): 375-380, 385.
- [10] DING WR, GAO F, YAN CS. LED-induced fluorescence spectroscopy technique for milk freshness detection [C]// 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). IEEE, 2016.
- [11] BRAVO I, REVENGA-PARRA M, PARIENTE F, *et al.* Reagent-less and robust biosensor for direct determination of lactate in food samples [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 144.
- [12] GAMA MR, ROCHA FRP. Solventless separation of underivatized biogenic amines by sequential injection chromatography [J]. *Microchem J*, 2020, 156: 104839.
- [13] LOUTFI A, CORADESCHI S, MANI GK, *et al.* Electronic noses for food quality: A review [J]. *J Food Eng*, 2015, 144: 103-111.
- [14] CAMPIONE E, COSIO T, ROSA L, *et al.* Lactoferrin as protective natural barrier of respiratory and intestinal mucosa against coronavirus infection and inflammation [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(14): 4903.
- [15] BRODZIAK A. Effect of storage time under home refrigeration conditions on the quality of opened drinking milk [J]. *Mjekarstvo*, 2017, 67: 283-296.
- [16] NAJIB M, BOTOSOA EP, HALLAB W, *et al.* Utilization of front-face fluorescence spectroscopy for monitoring lipid oxidation during Lebanese Qishta aging [J]. *LWT*, 2020, 130: 109693.
- [17] PRADHAN D. Efficacy of reuterin and bacteriocins, nisin and pediocin on preservation of dairy farm procured raw milk [J]. *Food Technol*

- Biotechnol, 2020, 58(4): 359–369.
- [18] 赵瑞生, 梁茂文, 武守艳, 等. 牛乳新鲜度与牛乳酸度关系的探讨[J]. 中国乳品工业, 2015, 43(12): 14–15, 18.  
ZHAO RS, LIANG MW, WU SY, *et al.* Probe into the relation between freshness and acidity of cow milk [J]. China Dairy Ind, 2015, 43(12): 14–15, 18.
- [19] 范佳利. 乳及乳制品品质评价研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2010.  
FAN JL. Study on assessment of milk and dairy products quality [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2010.
- [20] MA Y, LI S, JI T, *et al.* Development and optimization of dynamic gelatin/chitosan nanoparticles incorporated with blueberry anthocyanins for milk freshness monitoring [J]. Carbohyd Polym, 2020, 247: 116738.
- [21] 康霞霞, 胡瑰, 吕玉祥. 基于介电参数的牛奶新鲜度非接触检测技术研究[J]. 电子器件, 2020, 43(3): 709–714.  
KANG XX, HU Y, LV YX. Research on non-contact measurement technology of milk freshness based on dielectric parameters [J]. Chin J Electron Dev, 2020, 43(3): 709–714.
- [22] GUO W, ZHU X, LIU H, *et al.* Effects of milk concentration and freshness on microwave dielectric properties [J]. J Food Eng, 2010, 99(3): 344–350.
- [23] MIURA N, YAGIHARA S, MASHIMO S. Microwave dielectric properties of solid and liquid foods investigated by time-domain reflectometry [J]. J Food Sci, 2003, 68(4): 1396–1403.
- [24] RODRIGUEZ D, SAED MA, LI C. A WPT/NFC-based sensing approach for beverage freshness detection using supervised machine learning [J]. Ieee Sens J, 2021, 21(1): 733–742.
- [25] 郑静铃. 牛乳品质检测方法与牛乳蛋白合成调控研究进展[J]. 湖北农业科学, 2018, 2(57): 9–13.  
ZHENG JL. Research progress on detection method of milk quality and regulation of milk protein synthesis [J]. Hubei Agric Sci, 2018, 2(57): 9–13.
- [26] 赵瑞生. 基于游离氨基酸和生物胺的牛乳腐败标示物的筛查[D]. 天津: 天津农学院, 2017.  
ZHAO RS. Screening of milk spoilage markers based on free amino acids and biogenic amines [D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2017.
- [27] DOYLE CJ, GLEESON D, O'TOOLE PW. High-throughput metataxonomic characterization of the raw milk microbiota identifies changes reflecting lactation stage and storage conditions [J]. Int J Food Microbiol, 2017, 255: 1.
- [28] AOUADI B, ZAUUUU J, VITALIS F, *et al.* Historical evolution and food control achievements of near infrared spectroscopy, electronic nose, and electronic tongue-critical overview [J]. Sensors, 2020, 20(19): 5479.
- [29] WADEHRA, AKANKSHA, PATIL. Application of electronic tongue in food processing [J]. Anal Methods, 2016, 8: 474.
- [30] DI-ROSA AR, LEONE F, CHELI FEA. Fusion of electronic nose, electronic tongue and computer vision for animal source food authentication and quality assessment-A review [J]. J Food Eng, 2017, (210): 62–75.
- [31] ROY S, RHIM J. Anthocyanin food colorant and its application in pH-responsive color change indicator films [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2020, (3): 1–29.
- [32] MOAZAMI GM, MORADI M, TAJIK H, *et al.* Development of an easy-to-use colorimetric pH label with starch and carrot anthocyanins for milk shelf life assessment [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 153: 240–247.
- [33] KUSWANDI B, ASIH NPN, PRATOKO DK, *et al.* Edible pH sensor based on immobilized red cabbage anthocyanins into bacterial cellulose membrane for intelligent food packaging [J]. Packag Technol Sci, 2020, 33(8): 321–332.
- [34] WESTON M, KUCHEL RP, CIFTCI M, *et al.* A polydiacetylene-based colorimetric sensor as an active use-by date indicator for milk [J]. J Colloid Interface Sci, 2020, 572: 31–38.
- [35] QU J, LIU D, CHENG J, *et al.* Applications of near-infrared spectroscopy in food safety evaluation and control: A review of recent research advances [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2015, 55(13): 1939–1954.
- [36] 魏艳敏, 王森. 红外光谱技术在乳制品检测方面的应用进展[J]. 中国乳业, 2018, 199(7): 50–52.  
WEI YM, WANG M. Progress in the application of infrared spectroscopy in dairy products detection [J]. China Dairy, 2018, 199(7): 50–52.
- [37] SUN H, WANG L, ZHANG H, *et al.* Evaluation of yogurt quality during storage by fluorescence spectroscopy [J]. Appl Sci, 2019, 9(1): 131.
- [38] MADHURIMA V, HARINDRAN A. Probing the onset of structural instabilities as a tool for detection of staling of dairy milk: A permittivity and conductivity study [C]// International Conference on Condensed Matter & Applied Physics, 2018.
- [39] 任大伟. 面向牛奶新鲜度检测的 RFID 平面螺旋线圈研究与仿真[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.  
REN DW. Research and simulation of RFID plane spiral coil for detection of milk freshness [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [40] CHO YH, HONG SM, KIM CH. Determination of lactulose and furosine formation in heated milk as a milk quality indicator [J]. Korean J Food Sci Anim Res, 2012, 32(5): 540–544.
- [41] XING Q, MA Y, FU X, *et al.* Effects of heat treatment, homogenization pressure, and over processing on the content of furfural compounds in liquid milk [J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(14). DOI: 10.1002/jsfa.10578.
- [42] 孙选, 艾长胜, 马玉真, 等. 基于动态测温的牛奶质量超声检测技术[J]. 传感技术学报, 2008, (11): 1954–1958.  
SUN X, AI CS, MA YZ, *et al.* Milk quality automation detecting technology based on dynamic temperature [J]. Chin J Sensor Actuat, 2008, (11): 1954–1958.
- [43] CUNHA AF, ARAÚJO MMPE, ABREU CF. ATP-Bioluminescence as a method to evaluated microbiological quality of UHT milk [J]. Arq Bras Med Vet Zoo, 2014, 6(66): 1909–1916.
- [44] SONG H, KIM J, KIM BS, *et al.* Development of a food temperature prediction model for real time food quality assessment [J]. Inte J Refrig, 2019, 98: 468–479.
- [45] GOHAR S, ABBAS G, SAJID S, *et al.* Prevalence and antimicrobial resistance of *Listeria monocytogenes* isolated from raw milk and dairy products [J]. Matrix Sci Med, 2017, 1. DOI: 10.26480/msm.01.2017.10.14.

- [46] MURPHY SC, MARTIN NH, BARBANO DM, *et al.* Influence of raw milk quality on processed dairy products: How do raw milk quality test results relate to product quality and yield? [J]. *J Dairy Sci*, 2016, 99(12): 10128–10149.
- [47] BERGE AC, BAARS T. Raw milk producers with high levels of hygiene and safety [J]. *Epidemiol Infect*, 2020, 148. DOI: 10.1017/S0950268820000060.
- [48] MIRZA AA, MASOOMIAN M, SHAKOOIE M, *et al.* Trends and applications of intelligent packaging in dairy products: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020:1-15. DOI: 10.1080/10408398.2020.1817847.
- [49] YONG H, LIU J. Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films [J]. *Food Packag Shelf*, 2020, 26. DOI: 10.1016/j.fpsl.2020.100550.
- [50] AW A, SED B, NWW B, *et al.* Interaction effect of LED color temperatures and light-protective additive packaging on photo-oxidation in milk displayed in retail dairy case [J]. *Food Chem*, 2020, 323. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126699.
- [51] DIERICK M, VANROMPAY D, DEVRIENDT B, *et al.* Minireview: Lactoferrin, a versatile natural antimicrobial glycoprotein which modulates host innate immunity [J]. *Biochem Cell Biol*, 2020, 99(2). DOI: 10.1139/bcb-2020-0080.

(责任编辑: 张晓寒)

## 作者简介



扶晓菲, 硕士, 主要研究方向为乳品安全。

E-mail: fuxiaofei@brightdairy.com



游春苹, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全。

E-mail: youchunping@brightdairy.com