

牛乳光敏氧化机制及防控研究进展

陈鑫淼, 崔梦冉, 刘静一, 韩依航, 卢涵, 王琳*

(河北科技大学食品与生物学院, 河北石家庄 050018)

摘要: 牛乳在加工与运输储存过程中, 极易发生光敏氧化, 导致品质下降、产生酸败异味, 严重制约产品货架期并威胁消费者健康。本文系统解析了核黄素、叶绿素及原卟啉等光敏剂的光物理特性, 阐明了其引发乳脂肪氢过氧化物生成及乳蛋白交联变性的反应机制。重点综述了热处理、均质、超声、喷雾干燥等加工工艺对光散射特性及光敏剂微环境的调控效应。总结了不同类型包装及基于特征挥发性标志物的监测预测技术的防控成效。区别于现有单一环节研究, 本文创新性地构建了分子机制-工艺干预-包装适配的全链条耦合视角, 为乳品光敏氧化精准阻控与高品质加工提供了系统性的理论依据。

关键词: 牛乳; 光敏氧化; 光敏剂; 脂质氧化; 蛋白质氧化; 加工工艺; 包装防控

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0656

Research Progress on the Mechanism and Control of Photooxidation in Milk

CHEN Xinmiao, CUI Mengran, LIU Jingyi, HAN Yihang, LU Han, WANG Lin*

(College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In the process of processing, transportation and storage, milk is prone to photosensitive oxidation, resulting in quality degradation and rancid odor, which seriously restricts the shelf life of products and threatens the health of consumers. In this paper, the photophysical properties of photosensitizers such as riboflavin, chlorophyll and protoporphyrin were systematically analyzed, and the reaction mechanism of milk fat hydroperoxide formation and milk protein cross-linking denaturation was elucidated. The effects of heat treatment, homogenization, ultrasonic, spray drying and other processing techniques on light scattering characteristics and photosensitizer microenvironment were reviewed. The prevention and control effects of different types of packaging and monitoring and prediction technologies based on characteristic volatile markers were summarized. Different from the existing single-link research, this paper innovatively constructs a full-chain coupling perspective of molecular mechanism-process intervention-packaging adaptation, which provides a systematic theoretical basis for precise resistance control and high-quality processing of dairy photosensitive oxidation.

Keywords: milk; photosensitive oxidation; photosensitizer; lipid oxidation; protein oxidation; processing technologies; packaging prevention

牛乳富含蛋白质、脂类、维生素、糖和矿物质, 对人体营养摄取至关重要。然而, 在加工、运输及零售储存过程中, 牛乳长期暴露于超市照明、日光灯及 LED 光源下, 极易发生光敏氧化反应, 导致风味劣变、营养损失甚至产生潜在危害物^[1]。随着透明包装材料在乳品工业中的普及, 光敏氧化问题日益凸显, 已成为制约货架期品质的关键因素之一。

牛乳光敏氧化发生的根本原因在于体系内存在多种光敏物质, 其中以核黄素、叶绿素、原卟啉最为典型。光敏氧化由乳中的核黄素、原卟啉等光敏剂在光诱导下产生自由基和活性氧(单线态氧), 进而促进脂质和蛋白质的氧化, 造成牛乳营养品质下降。光敏氧化通过两种反应发生: I 型(自由基链式反应)和 II 型(单线态氧氧化反应)^[2]。牛乳中的不饱和脂肪酸因其双键结构易受到活性氧攻击, 成为光敏氧化反应的主要底物, 其含量与不饱和度是影响乳脂光敏氧化速率的关键因素之一^[3,4]。此外, 研究表明, α -酪蛋白和 β -酪蛋白对光敏氧化作用格外敏

收稿日期: 2026-04-27; 修回日期: 2026-05-26; 接受日期: 2026-05-26

基金项目: 河北省燕赵黄金台聚才计划骨干人才项目(博士后平台)(B2024005041); 河北省人社厅博士后择优资助项目(B2022004049)

作者简介: 陈鑫淼(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: 418272274@qq.com

通讯作者: 王琳(1989-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: linnew2026@126.com

感,容易发生分子间交联与聚集,因此在乳蛋白组分中, α -酪蛋白和 β -酪蛋白光诱导结构变化最为显著^[5]。

梳理该领域的研究脉络可以发现,早期研究聚焦于基础机制解析,明确了核黄素与痕量四吡咯类光敏剂的吸收特性及蛋白、脂质氧化的分子路径^[6]。随着乳品加工技术革新,研究逐步拓展至加工工艺影响,发现热处理、均质、超声、喷雾干燥、UV-C 辐照及高压处理等通过改变乳胶体构象、脂肪球粒径、光散射特性及光敏剂微环境,显著调控光激发效率与氧化传递,但工艺参数与光敏氧化的定量构效尚待系统整合^[7]。近年来,重心转向控制技术研发,包括高阻光、活性智能包装材料阻隔光、氧基于肽组学及特征挥发性标志物的监测预测模型等^[8],为品质控制提供了新视角。

尽管如此,当前研究仍呈分散态势,光敏氧化分子机制、多元加工工艺的物理化学干预、包装与预测防控技术三者多孤立探讨,基于此,本文系统梳理牛乳常见光敏剂特性,阐述蛋白与脂质光敏氧化机制;重点归纳热处理、均质、超声、喷雾干燥、UV-C 及高压处理等工艺对光敏氧化的影响规律;进而分析包装技术革新与监测预测技术的防控成效,以期对乳品光敏氧化精准阻控与高品质加工提供理论依据。

1 牛乳中常见的光敏剂

光敏氧化发生于存在可见光或紫外线的条件下,光敏性物质指的是一类可吸收光能近而发生化学反应的物质,而光敏氧化反应能够进行的前提,是存在光敏性物质。光敏性物质属于一类催化剂,在牛乳的光敏氧化过程中,光敏剂发挥着激活反应,传递能量和电子的作用^[9]。光敏氧化的起始标志是光敏剂吸收特定波长光子并产生激发态,进而引发底物的氧化链式反应。

1.1 核黄素

核黄素(维生素 B₂)属于水溶性光敏剂,是牛乳中含量最丰富的光敏剂,因此在牛乳的光敏氧化过程中发挥着关键作用。当受到光照射时,牛乳内源性光敏剂核黄素通过 Type I (夺氢/电子产自由基)与 Type II (传能产生单线态氧)双途径协同,分别引发自由基链式反应与直接氧化,共同导致乳蛋白与脂质光敏氧化劣变^[10]。核黄素光敏体系中活性氧的分布主要取决于氧的可用性、核黄素以及可氧化底物的浓度,还有猝灭剂的情况。此外,在核黄素溶液处在碱性 pH 值下时,核黄素会经光降解成光色和光黄素等物质^[11]。近年来,研究发现核黄素生物传感还可作为一种内部生物标志物,用于监测牛乳的质量及掺假情况^[12]。此外,核黄素具有很强的热稳定性,仅会发生小比例的降解,因此它也有望成为监测高温热处理过程中热损伤的潜在标记物^[13]。

1.2 叶绿素

叶绿素的主要成分是叶绿素 a 和叶绿素 b,二者不溶于水,且对光较为敏感。在相同光照条件下,叶绿素 a 的降解速率明显快于叶绿素 b,并且不同光照强度对叶绿素降解作用的发生程度也有所不同,在叶绿素的光敏氧化反应中,II 型反应占主导地位,其代谢产物能够促进核黄素的降解^[4],这会对牛乳的光敏氧化过程产生一定的影响。

1.3 原卟啉

原卟啉对牛奶的光敏氧化过程有一定的影响,卟啉在 630 nm 处有很强的吸收带。牛乳能在红光下发生光敏氧化反应正是由于原卟啉的存在^[14]。水溶性卟啉可以通过磺化、羧基化或 n-吡啶取代化合物的烷基化来合成。卟啉光物理行为的调整能够通过选择大环取代基来实现^[15]。

上述叶绿素、原卟啉均属于四吡咯类化合物,属于脂溶性光敏剂。这类化合物的浓度会随脂肪含量变化,在脂肪含量为 3.5%的牛乳里,四吡咯含量仅为核黄素含量的 1/250 左右^[16]。四吡咯类光敏剂因疏水性强,倾向于富集于生物膜脂质区,主要诱发脂质过氧化^[17];而核黄素作为水溶性光敏剂,更易通过 I 型机制靶向氧化水溶性蛋白质^[18]。四吡咯类光敏剂通常可吸收紫外光及蓝紫光,并在 500~700 nm 可见光区具有宽谱吸收,涵盖绿、黄、橙及红光。为系统对比核黄素与典型四吡咯类光敏剂的关键光化学指标,现将含量、敏感波段及主导反应类型等信息汇总于表 1。

相较于波长 550 nm 以下光源,牛乳在 550 nm 以上可见光照射下更易生成不良风味物质。四吡咯类化合物的光敏氧化与牛乳异味形成密切相关,是诱导体系产生氧化味、酸败味等不良风味的重要诱因。表 2 总结了牛乳光

表 1 牛乳中光敏剂关键特性对比

Table 1 Comparison of key characteristics of photosensitizers in milk					
光敏剂名称	典型含量/(mg·L ⁻¹)	来源	敏感波段/nm	主导反应类型	参考文献
核黄素	~1.4	内源	400~500（蓝紫光区）	I 型+II 型	[16,19]
叶绿素	~0.000 8	饲料	500~650（绿至红光区）	以 II 型为主	[16,20]
原卟啉	~0.000 8	饲料、内源	500~600（黄橙光区）	以 II 型为主	[16,19]

表 2 牛乳光敏氧化产生的特征风味物质及其前体

Table 2 Characteristic flavor compounds generated by milk photooxidation and their precursors			
光敏氧化风味	挥发性化合物	来源（光敏氧化前体）	参考文献
含硫味	二甲基亚砷; 2-甲基-3-呋喃硫醇	含硫氨基酸	[21,22]
纸板味	戊醛; 庚醛; 壬醛	脂肪酸	[23]
蘑菇味	1-辛烯-3-醇; 1-辛烯-3-酮	脂肪酸	[24,25]
蛋腥味	硫化氢	含硫氨基酸	[22]
青草味	己醛	脂肪酸	[25]
柑橘味	辛醛	脂肪酸	[25]
大蒜/卷心菜味	二甲基三硫醚	含硫氨基酸	[25]

2 牛乳蛋白光敏氧化

蛋白质光敏氧化存在两种途径。第一种为非光敏氧化，该途径无需光敏剂参与，主要是在波长范围为 280~320 nm 的 UVB 光下可直接吸收芳香氨基酸残基、蛋氨酸和半胱氨酸的光子^[26]，使基态分子发生电子跃迁形成激发态，再通过抽提氢原子、电子转移及能量传递等方式，引发蛋白质氧化反应。

以色氨酸为例，其吲哚侧链是蛋白质中最强的紫外发色团，因而具备丰富的光化学性质^[27]。色氨酸吸收光后，首先会成为单重激发态，之后跃过体系形成相应的三重激发态（³Trp^{*}）。³Trp^{*}与电子受体发生电子转移，产生阴离子自由基和阳离子色氨酸自由基（Trp⁺），并使 Trp 去质子化，形成中性吲哚自由基色氨酸（Trp[•]）。如图 1 所示，Trp 主要与 O₂ 反应生成色氨酸酰过氧自由基（Trp-OO[•]），该自由基攫取氢原子后，会形成色氨酸氢过氧化物，进而生成六吡啶、吲哚或其他内过氧化物衍生物^[28]。此外，Trp 也可以与自身反应形成二色氨酸（di-Trp），不过二色氨酸的产率低于由 Trp-OO 衍生的氧化产物，这可能是由于色氨酸丰度低以及空间构象的限制^[29]。

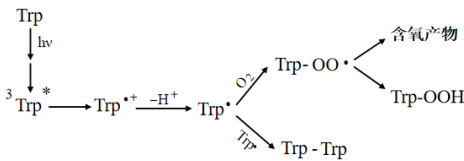


图 1 色氨酸的光敏氧化降解路径

Fig.1 Photosensitized oxidation and degradation pathway of tryptophan

第二种途径是由 UVA 波段的三激发光敏剂介导的光敏氧化。氧化反应通过 I 型和 II 型两种机制进行。I 型机制是三激发光敏剂从氨基酸侧链上去除电子，同时产生一个蛋白质自由基阳离子（Pr⁺）和一个光敏剂自由基阴离子（Sen^{•-}）。Pr⁺（或其他供体）可以将质子转移到 Sen^{•-}上，分别产生蛋白质中性自由基（Pr[•]）和光敏剂中性自由基（Sen[•]）。Sen 通过自身反应返回基态，而 Pr 通过与 O₂ 反应产生过氧自由基（Pr-OO[•]），即使在低氧张力条件下，该反应在代谢活跃的组织中也比大多数其他途径更占优势^[30]。此外，有报道称，即便在低氧或无氧环境下，Pr 也会与自身发生反应，引发蛋白质聚合，形成同源或异源蛋白二聚体，这一点已在 Trp 和 Tyr 的氧化中得到证实。因此，去除氧气并不能完全保护牛乳蛋白免受光敏氧化^[31]。第二种是 II 型机制，三激发光敏剂与氧反应生成单线态氧（¹O₂），蛋白质中的氨基酸残基可通过直接化学反应或物理猝灭与 ¹O₂ 反应^[32]，进而使氨基酸氧化，生成二硫化物、二甲基二醚等产物。图 2 概括了这两种机制的详细反应路径：在 I 型机制中，激发态光敏剂直接夺取电

子产生自由基离子对；而在 II 型机制中，能量转移生成高活性的 $^1\text{O}_2$ 。这两种路径往往同时存在，其主导类型取决于光敏剂性质、氧气浓度及底物特性。

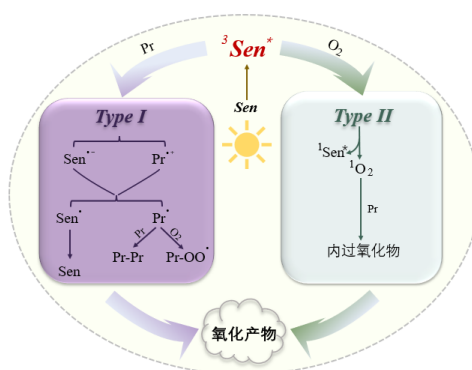


图 2 蛋白质光敏氧化机制

Fig.2 Mechanism of protein photosensitized oxidation

3 牛乳脂质光敏氧化

牛乳中含有多种脂肪酸，由于不饱和脂肪酸双键脱氢所需能量低，使其成为脂肪氧化的主要反应位点，且氧化敏感性会随不饱和程度的增加而提升^[33]。基态三线态氧分子（ $^3\text{O}_2$ ）在有光和光敏物存在的条件下，可被激发为单线态氧分子（ $^1\text{O}_2$ ）。 $^1\text{O}_2$ 能与不饱和脂肪酸的双键发生反应，生成氢过氧化物，这是脂质氧化的根源^[34]。Liu 等^[35]发现增加牛乳中 α -亚麻酸的含量会显著降低乳脂的氧化稳定性。与普通氧化不同，光诱导氧化的特点是即便在低温环境下也能从激发的光敏剂中快速形成自由基或 $^1\text{O}_2$ 。在乳脂光敏氧化过程中，基态光敏剂（Sen）吸收可见光或紫外光被活化，短暂成为单重激发态光敏剂（ $^1\text{Sen}^*$ ）， $^1\text{Sen}^*$ 通过体系释放部分能量，成为三重态光敏剂（ $^3\text{Sen}^*$ ）的激发态。

如图 3 所示， $^3\text{Sen}^*$ 通过 I 型和 II 型两种机制发生氧化。在 I 型机制中，氢过氧化物经由自由基途径产生。 $^3\text{Sen}^*$ 直接与脂质底物反应产生自由基和 $^1\text{Sen}^*$ 的混合物，然后与 $^3\text{O}_2$ 发生自氧化反应，生成氢过氧化物。而在 II 型机制里，氢过氧化物是在 $^1\text{O}_2$ 的攻击下产生的。 $^3\text{Sen}^*$ 通过与 $^3\text{O}_2$ 反应生成 $^1\text{O}_2$ ，进而回到基态。 $^1\text{O}_2$ 是一种高活性的非自由基分子，具有较强的亲电能力，它与不饱和脂肪酸的反应速度比三重态氧与不饱和脂肪酸的反应速度快约 1 450 倍^[36]。 $^1\text{O}_2$ 可直接与不饱和脂肪酸中的双键反应形成过渡态六元环，然后通过双键置换生成过氧化氢。由于 II 型反应不涉及自由基中间体，因此传统的自由基清除剂对其抑制效果有限，这解释了为何在某些光照条件下，即使添加了抗氧化剂，脂质氧化仍难以完全阻断。

乳脂氧化能够产生多种氧化产物。氢过氧化物属于一次氧化产物，但其性质不稳定，会分解成醛类、酮类、酸类等羰基化合物这类二次氧化产物，是导致牛乳酸败变质的主要原因之一，常被用于测定脂类的氧化程度^[37,38]。光敏氧化可不依赖脂质，亦可诱导蛋白质氧化，但牛乳中的脂质氧化在光照条件下主要由光敏氧化驱动。

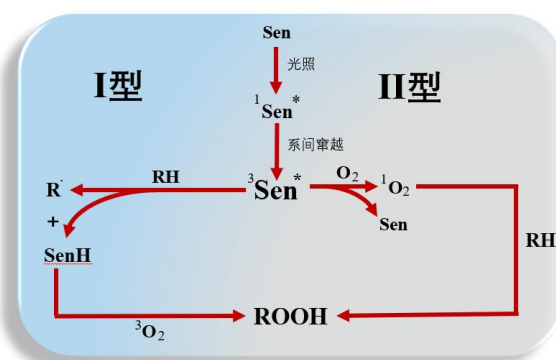


图 3 脂质光敏氧化机制

Fig.3 Mechanism of photosensitized oxidation of lipids

值得注意的是,在牛乳复杂的微粒体系中,脂质光敏氧化生成的初级过氧化物及后续分解产生的活性醛类物质(如丙二醛等),可与牛乳蛋白的亲核氨基酸残基(如赖氨酸、半胱氨酸)发生共价相互作用,进而诱导蛋白质分子内或分子间交联与聚集,导致乳蛋白结构修饰及功能特性下降^[39,40]。因此,脂质氧化与蛋白质氧化在牛乳体系中存在显著的协同劣变效应,并非完全独立的进程。

4 加工工艺对牛乳光敏氧化的影响

4.1 热处理

热处理是保证液态奶质量的关键,高热处理可以显著延长液态奶的保质期。例如,超巴氏杀菌牛乳在 138 °C 或更高的温度下进行至少 2 秒的热处理后,产品在冷藏时通常可拥有约 60 天的保质期^[41]。不过,随着温度升高,超巴氏杀菌牛乳往往会产生硫磺味和酸涩味等不良风味,进而降低消费者的偏好。此外,Shuang 等^[42]研究表明随着加热温度升高,牛奶的抑菌和抗氧化能力下降,生物活性成分也随之减少。超巴氏杀菌牛乳中挥发性硫化化合物的掩蔽作用或抗氧化特性可以防止超巴氏杀菌牛乳中由于光照而产生的光敏氧化味。牛乳在高温加工过程中释放的巯基可作为中间体,淬灭自由基,减缓氧化风味的产生^[43]。

4.2 均质

均质是市售牛乳加工过程里的必要步骤,对牛乳的诸多成分与性质有着重大影响。它借助吸附酪蛋白胶束和乳清蛋白,减小脂肪球的尺寸,改变了界面的组成^[44,45]。此外,均质过程中产生的力可以破坏细菌、使酶失活、使乳清蛋白变性,还能改变牛乳的流变学及储存特性^[46]。早在 1945 年,就有学者发现均质可提高牛乳中核黄素的光稳定性,从而减少牛乳的光敏氧化。但实际上,均质本身并不直接对光敏剂在牛乳中的稳定性产生影响。牛乳经均质处理后,体系内大粒径脂肪球被破碎细化,颗粒数量显著增多,所以会提升样品的总散射,从而间接影响核黄素的降解速率^[47]。研究表明,核黄素的降解速率显著取决于均质压力的大小以及由此产生的粒度变化。牛乳经 40 MPa 均质处理后,核黄素降解率显著高于 250 MPa 组,前者降解幅度约高出后者 50%。在 200 MPa 下不同时间处理的样品,降解速率无显著差异^[48]。除了均质过程中脂肪球大小变化引起的散射效应外,对光散射和吸收最重要的影响或许是蛋白质结构的变化,这甚至可以导致乳清蛋白变性、酪蛋白胶束聚集以及核黄素免受光降解的保护^[49]。图 4 表明,均质可细化脂肪球、增大界面面积并改变抗氧化物质分布。这种结构变化利弊共存:虽然能增强光散射、减少光能吸收,但是会加剧脂质与促氧化因子接触,因此需合理优化均质压力。

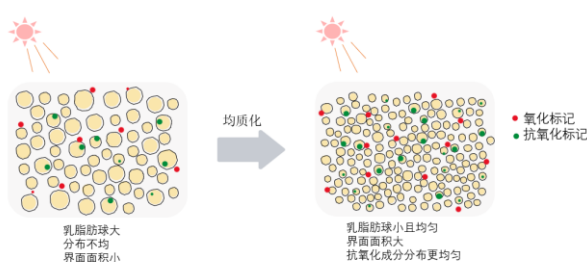


图 4 均质对乳液微结构及氧化稳定性的影响

Fig.4 Effect of homogenization on the microstructure and oxidative stability of emulsions

4.3 超声

超声作为乳品领域的一项新兴技术,在牛乳制品的乳化、均质、乳糖/脂肪结晶以及改变乳制品的物理和功能特性等方面展现出潜在的优势。在超声波处理过程中,一系列压缩与稀疏循环引发的局部压力梯度,会导致空化泡破裂,使局部温度升高,进而造成液体整体温度上升^[50]。空化作用产生的极高温度和压力条件,会促使羟基和氢自由基生成,且不同频率范围的超声波所产生的自由基数量存在差异。研究结果显示,在 20 kHz 和 2 000 kHz 时,羟基自由基的形成量最少^[51],而在 400~800 kHz 范围内羟基自由基的形成率最高^[52]。这些自由基随后会在牛乳系统中引发一系列氧化反应。诸多超声处理因素都会对牛乳中脂类挥发物的形成产生影响,低温超声处理牛乳能够更好地控制氧化性挥发物的形成。因此,通过缩短超声处理时间、控制温度以及选择合适的超声频率,能够

实现最佳的超声处理效果，有助于减少自由基的产生，进而控制脂质氧化反应。

4.4 喷雾干燥

喷雾干燥通过将牛乳雾化为微米级液滴并在高温气流中瞬时脱水，其过程深刻影响光敏氧化路径。巨大的比表面积增加了与氧气的接触，而高温可能导致乳清蛋白变性，破坏其对核黄素等光敏剂的天然包裹，使其活性位点暴露，增强光化学活性^[53]。然而，干燥的瞬时性限制了热氧化的深度。最终粉末的物理结构——如粒径分布、表面孔隙率和脂肪暴露程度，直接决定了储存阶段的氧化稳定性^[54]

4.5 UV-C 辐照

UV-C 辐照作为一种非热物理加工技术，其作用机制直接涉及光化学反应，其对牛乳光敏氧化进程的影响主要取决于辐照剂量与内源性光敏剂（核黄素、卟啉）的相互作用^[55]。研究表明，适度剂量的 UV-C 处理可诱导核黄素发生光异构化或光降解，破坏其共轭双键结构，从而降低光敏剂的量子产率与吸光能力，从源头上削弱单线态氧的生成效率。此外，UV-C 辐照还能激活牛乳中天然存在的抗氧化系统，如促进超氧化物歧化酶（SOD）的活性表达，增强体系对自由基的清除能力。然而，过量辐照或穿透不均会加剧乳脂脂质过氧化及芳香氨基酸（如色氨酸）的光解，诱导异味物质生成及乳蛋白氧化，导致牛乳营养价值下降^[10,56]。UV-C 的高能光化学反应可能诱发代谢物转化及潜在未知光化学副产物，目前体外毒理学实验尚未发现基因毒性或细胞毒性^[57]，但特征性风味劣变及长期食用安全性仍需进一步评估。

4.6 高压处理

高压处理（HPP）作为一种非热杀菌技术，近年来在乳制品加工中备受关注。热处理易破坏蛋白非共价键，高压处理主要改变分子间静电作用与疏水相互作用，对共价键及维生素等小分子物质结构损伤程度较低^[58]。在牛乳光敏氧化体系中，高压处理对光敏剂的影响主要体现在微环境改变而非光敏剂降解上。研究表明，HPP 处理虽然不会直接破坏核黄素的分子结构，但会显著改变其与乳蛋白的结合状态。在高压作用下，乳清蛋白和酪蛋白胶束的构象发生改变，导致原本结合在疏水空腔中的核黄素释放到水相中^[59]。

不同加工技术通过改变光敏剂活性、体系微观结构及氧化还原状态，对光敏氧化进程产生复杂影响。表 3 系统对比了 LTLT、HTST、UHT、均质、喷雾干燥等不同工艺对光敏剂含量、自由基生成及光学特性的具体影响。例如，虽然 UHT 热处理生成的褐变产物虽具备一定抗氧化活性，但会造成乳铁蛋白变性失活，并加速核黄素降解，致使体系光敏氧化作用减弱；然而蛋白结构破损与活性氧化位点暴露，反而大幅提升了牛乳在光照条件下的整体氧化风险。均质处理虽增加了光散射，却也因脂肪球表面积增大而提高了脂溶性光敏剂的反应活性。这些数据表明，单一工艺优化往往存在权衡，需结合后续包装策略进行综合调控。

表 3 不同加工技术对牛乳中光敏剂、自由基生成及光学特性的影响

Table 3 Effects of different processing technologies on photosensitizers, free radical generation, and optical properties in milk				
加工工艺	光敏剂含量与活性	自由基生成与传递	对光散射与吸收	参考文献
LTLT（低温长时间杀菌）	对牛奶中的生物活性成分和蛋白质结构影响最小。	对牛奶内部的氧化还原状态干扰极其微小	基本不改变牛奶原有的光学特性	[60]
HTST（高温短时间杀菌）	核黄素保留率高达 97.8%，蛋白质结构变化轻微。	对初级氧化产物无显著改变，但随着温度升高，牛奶的抗氧化能力降低	对牛奶的宏观光学性质影响不大，不会显著改变其光散射与吸收特性	[42,60]
UHT（超高温瞬时灭菌）	该处理可增强核黄素光稳定性，但其引发的美拉德反应损耗光敏剂。	美拉德反应产物具有抗氧化性，可清除自由基，但与均质协同会增加自由基生成	美拉德褐变产物使牛奶颜色加深并吸收光能	[61,62]
均质	破碎脂肪球，使脂溶性光敏剂的分布表面积增加，其反应活性提高。	脂肪球粒径减小、表面积剧增，使内部脂肪更易接触水相自由基。与 UHT 结合时，会显著促进氧化	均质后脂肪球尺寸降至 0.1~10 μm，成为强散射体。显著增加光散射	[61,63]
喷雾干燥	高温导致核黄素显著降解。	高温诱导自由基生成，进风温度越高，自由基水平越高	乳粉颗粒的粒径、孔隙率直接影响光的散射与穿透	[37,64,65]
超声	超声的空化效应会破坏蛋白质结构，使核黄素活性位点暴露。	超声空化效应裂解水分子生成羟基自由基，引发氧化反应。	超声能高效细化脂肪球，从而显著增强乳液体系的光散射能力，使体系更不透明。	[66]

UV-C 辐照	254 nm 紫外光直接导致核黄素、维生素 A 等发生剂量依赖性光降解。	在处理中直接引发光解反应产生自由基，但在后续 72 h 存储中显著降低牛奶的脂质过氧化程度。	紫外光穿透力很弱，主要引发表层物质的光化学变化，对整体光学性质长期影响小。	[67]
HPP	常温 HPP 处理可高效保留核黄素等光敏剂含量，无显著降解，活性基本保持稳定。	450~800 Mpa 可轻微淬灭光敏氧化产生的活性氧自由基，抑制自由基链式传递。	显著提升光散射系数，减少光敏剂有效光吸收。	[58,59,68]
UV-C+ HTST	对核黄素含量影响无显著差异，蛋白变性轻微。	协同处理对蛋白质氧化水平与单一高温处理无显著差异。	光散射变化不大于 HTST 单独处理。	[56]
HPP+LTLT	二者协同能较好保留核黄素的化学含量，避免高温导致的不可逆失活。	高压均质协同热处理可降低自由基清除能力的下降幅度，间接调控 ROS 传递效率。	LTLT 预聚集可部分抵消 HPP 促使酪蛋白胶束细化效应，光散射变化小于 LTLT 单独处理。	[69]

5 控制技术对牛乳光敏氧化的影响

5.1 包装技术革新

包装是防止光敏氧化的首要且最直接的物理屏障。现代包装技术已超越简单的不透明化，向着光谱靶向、功能主动和状态可视的智能化方向发展。

市场上常见的包装材料有硬纸板、高密度聚乙烯（HDPE）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）和玻璃。纸板箱通常被认为阻光性能良好且生产成本较低，不过其对氧气的渗透性较高，而且由于木质素形成纸板的过程属于氧化过程，纸板也可能成为气味的直接来源^[70]。虽然 HDPE 结构稳定，具有良好的抗湿性和透气性，但价格昂贵。因此，在防止牛乳光敏氧化的包装材料研究中，对在 PET 瓶中添加防光添加剂（LPA）的研究最为广泛。透明 PET 瓶往往受消费者青睐，因为和传统硬纸板包装相比，消费者能够看到瓶内的牛乳，同时 PET 具有更强的化学惰性、良好的气密性，还具备更优的延展性，生产与回收也更为容易，生产成本低于 HDPE。将其应用于牛乳包装，有助于解决其他材料存在的问题^[71]。LPA 可以最大程度减少或防止光照射，主要用于保护塑料或其他材料免受光敏氧化损伤^[72]。像二氧化钛（TiO₂）、黄色着色剂等 LPA 是有效的光屏障，可以散射和折射光线，并吸收特定紫外线波长以防止光敏氧化^[73]。

采用半透明的 HDPE 或透明的 PET 包装，含 TiO₂ 的包装在荧光灯下能更好地保护牛乳的营养成分和风味。Meng 等^[74]通过在 PET 瓶中添加不同量的 TiO₂ 以及 2% 活性氧洗涤剂环氧树脂，研究了不同包装材料对延长保质期的巴氏奶（ESL）光敏氧化的影响。结果显示，添加与不添加活性氧清除剂的 PET 瓶，对光敏氧化的抑制作用并无显著差异，活性氧清除剂无法抑制牛乳的光敏氧化。不过，含有 8% 光防护添加剂的 PET 瓶，在高光强下储存 30 天以上时，能够有效减少氧化气味的产生。Wang 等^[75]将 LPA 与炭黑结合，以增强光的屏蔽效果。结果表明，PET 与含 6.8% TiO₂ 的 23 ppm 炭黑组合，对含 2% 乳脂的 UHT 乳的氧化抑制效果优于单独含 6.9% TiO₂ 的 PET。由此可见，含有适当 LPA 的 PET 包装或许是一种极具前景的包装材料。表 3 进一步量化了不同包装材料、添加剂浓度及光照参数对牛乳中核黄素保留率与 TBARS 值（脂质氧化指标）的影响。此外，众多研究者还探究了不同颜色包装对牛乳品质变质的影响。在高氧浓度环境下，红色和绿色过滤器造成的不良影响最小。这可能是由于与其他滤光片相比，这些滤光片的透光率较低。而在低氧浓度（充满氮）条件下，红色和橙色过滤器会使氧化水平达到最高^[76]。另一项研究发现，通过定制波长在 450 nm 以下和 600 nm 以上的绿色聚乙烯薄膜，可以显著减少含脂肪巴氏奶的光敏氧化^[77]。这是因为该薄膜可降低核黄素及四吡咯特征吸收波长的光透过率，所以这种薄膜也可作为牛乳制品包装材料的潜在方案。

表 4 包装材料、添加剂添加及光照参数对牛乳中核黄素保留率与 TBARS 值的影响

Table 4 Effects of packaging material, additive incorporation, and light exposure parameters on riboflavin retention and TBARS values in milk

包装类型	杀菌类型	添加剂	光照强度/lux	光照时间	核黄素保留率/%	TBARS/(mg·L ⁻¹)	参考文献
聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）	UHT	无	3 823 ± 263	4 周	~15	~0.53	[75]
		3.7% TiO ₂			~33	~0.42	
		6.9% TiO ₂			~72	~0.25	
		6.8% TiO ₂ ; 23 ppm 炭黑			~92	~0.25	

高密度聚乙 烯(HDPE)	HTST	完全遮光	4 094±110	24 小时	~94	~0.24	[78]
		无			79.2	0.35	
		4.0% TiO ₂			92	0.31	
	ESL	完全遮光	3 500~4 000	30 天	93.8	0.32	[74]
		无			~0	-	
		除氧剂			~0	-	
	HTST	无	4 094±110	24 小时	80.2	0.34	[78]
		4.9% TiO ₂			82.8	~0.34	
		完全遮光			92.2	0.32	
	UHT	无	2 304±166	36 天	34	~2.3	[79]
		0.6% TiO ₂			24	~1.7	
		1.3% TiO ₂			60	~1.4	
		4.3% TiO ₂			70	1.43	
		完全遮光			89.5	1.0	

除上述包装策略外，在光波长靶向阻隔方面，通过向可生物降解基质聚乙烯醇中添加阿魏酸二乙酯衍生的碳点或木质素基纳米填料，可构建高透明、全波段 UV 至蓝光靶向屏蔽薄膜，精准阻断核黄素与四吡咯类光敏剂的关键激发波长，在显著抑制牛奶光敏氧化（延缓核黄素降解、减少吡咯类氧化产物积累）的同时保持包装透明性^[80]。

随着环保法规的收紧，传统塑料包装正逐渐被可降解聚合物替代。在此基础上，“活性包装”成为抑制牛乳光敏氧化的新趋势。通过在魔芋葡甘露聚糖、壳聚糖或海藻酸钠/普鲁兰多糖等可食性基质中负载天然抗氧化剂（如茶多酚、没食子酸）或功能性纳米粒子（如 ZnO）制备的复合膜不仅具备良好的对紫外和氧气的阻隔性能，还能向牛乳中缓慢释放抗氧化剂，直接淬灭体系内的自由基^[81,82]。

为了解决光敏氧化导致牛乳变质难以肉眼识别的问题，智能指示包装应运而生。这类包装通常将 pH 响应色素（如火龙果皮色素）嵌入生物基可降解薄膜中。当牛乳发生光敏氧化酸败时，体系 pH 值下降，指示剂会发生明显的颜色迁移，如从紫变红，从而实现新鲜度的可视化实时监控^[83]。值得注意的是，许多此类薄膜本身即具备优异的紫外屏蔽与抗氧化活性，实现了“光敏氧化风险防控”与“新鲜度智能感知”的功能集成。

5.2 监测预测技术

近年来，随着光电传感技术与动力学建模的快速发展，除了物理层面的包装阻隔，乳品光敏氧化的实时监测与货架期动态预测已成为食品科学领域的研究热点。集成光学传感技术与机器学习算法的在线监测及货架期预测模型，正成为牛乳光敏氧化的关键软性控制手段。Faraco 等^[84]利用光纤马赫-曾德尔干涉仪构建“光学舌”实现对牛奶氧化标志物的无损追踪。基于荧光猝灭原理的包装内氧传感标签及光累积剂量指示剂，可非破坏性地追踪微环境氧渗透与光照暴露量，而集成表面增强拉曼光谱光纤与卷积神经网络^[85]或融合温度、光、透光率的多因子机器学习模型^[86]，能精准拟合脂质过氧化与蛋白氧化的非线性进程，实现剩余货架期的实时预测与主动预警，推动乳品质量控制从静态阻隔迈向“监测-预测-干预”的智能闭环。

6 总结与展望

牛乳作为一种营养丰富且体系复杂的天然胶体，在加工与流通过程中极易受到光照影响，发生光敏氧化反应。本文系统梳理了牛乳中核黄素、叶绿素及原卟啉等主要内源性光敏剂的特性，揭示了它们在特定波长光照下被激活，通过 I 型（自由基反应）和 II 型（单线态氧生成）途径，协同驱动蛋白质与脂质氧化的复杂机制。研究表明，光敏氧化不仅导致乳蛋白结构破坏、功能性质下降，还引发脂质过氧化，产生不良风味，严重制约乳制品品质的提升。在加工工艺方面，热处理、均质、超声、高压及 UV-C 辐照等单元操作，通过改变光敏剂的稳定性、乳体系的微观结构及抗氧化能力，对光敏氧化进程产生显著影响。而在防控技术层面，包装材料的革新（如避光包装、功能性涂层）与监测预测技术的发展，为延缓氧化、保障品质提供了有效手段。

尽管在牛乳光敏氧化领域已取得显著进展，但现有研究仍存在分散化、碎片化的问题，尤其在“机制—工艺

—防控”三者的耦合关系上缺乏系统性探讨。未来研究应重点关注以下方向：首先，应深入探究加工过程中光敏剂微环境的变化机制，明确不同工艺参数如何通过改变光敏剂的分布、结合状态及激发效率，进而调控氧化动力学，构建更为精细的“工艺—机制”关联模型。其次，需加强多技术协同防控策略的研究，探索包装设计如何与加工工艺参数相匹配，实现从源头阻隔、过程控制到终端监测的全链条品质保障。此外，随着智能包装与快速检测技术的发展，开发高灵敏度、实时在线的光氧化监测系统，对于实现乳制品品质的精准预测与动态调控具有重要意义。最后，应关注新型加工技术（如冷杀菌、脉冲电场等）对光敏氧化的潜在影响，以及天然抗氧化剂与物理屏障的协同增效机制，为开发高品质、长货架期的乳制品提供新的理论支撑与技术路径。

参考文献

- [1] MENG F, WANG J, HAN Z, et al. Effect of the light intensity and packaging materials on the photooxidation and volatile compounds in milk [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 120: 105358.
- [2] 张清阳,王少雷,苏美丞,等.牛奶光氧化研究进展[J].*中国食物与营养*,2020,26(12):19-23.
- [3] SARAIVA B B, CAMPANHOLI K D S S, MACHADO R R B, et al. Reducing *Pseudomonas fluorescens* in milk through photodynamic inactivation using riboflavin and curcumin with 450 nm blue light-emitting diode [J]. *International Dairy Journal*, 2024, 148: 105787.
- [4] D'INCECCO P, DALLAVALLE S, MUSSO L, et al. Formation of di-Tyrosine in pasteurized milk during shelf storage [J]. *Food Chemistry*, 2024, 435: 137566.
- [5] DALSGAARD T K, OTZEN D, NIELSEN J H, et al. Changes in Structures of Milk Proteins upon Photo-oxidation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(26): 10968-10976.
- [6] 谭冬飞,王少雷,张清阳,等.光诱导乳脂肪氧化的研究进展[J].*乳业科学与技术*,2021,44(1):39-43.
- [7] 马铭,沈玉,张佳欣,等.乳粉加工过程中乳蛋白结构及消化特性变化特征[J].*中国乳品工业*,2025,53(1):56-62.
- [8] TAN S, ZHANG Q, PEI X, et al. Evaluation of milk photooxidation based on peptidomics [J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113113.
- [9] 连琦,徐宝成,罗登林,等.食品中脂类物质的 $^1\text{O}_2$ 氧化及控制方法[J].*食品科学*,2021,42(19):307-316.
- [10] SOUROULLAS K, MANOLI A, ITSKOS G, et al. Fluorescence of Intrinsic Milk Chromophores as a Novel Verification Method of UV-C Treatment of Milk[J/OL]. *Foods*, 2024, 13(18): 2887.
- [11] WONG N G K, RHODES C, DESSENT C E H. Photodegradation of Riboflavin under Alkaline Conditions: What Can Gas-Phase Photolysis Tell Us about What Happens in Solution? [J]. *Molecules*, 2021, 26(19): 6009.
- [12] PANDEY G, JOSHI A. Riboflavin as an internal marker for spoilage and adulteration detection in milk [J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129792.
- [13] ALVARADO U, ZAMORA A, ARANGO O, et al. Prediction of riboflavin and ascorbic acid concentrations in skimmed heat-treated milk using front-face fluorescence spectroscopy [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 318: 110891.
- [14] OHSAKI Y, SASAKI T, ENDO S, et al. Observation of Zn-photoporphyrin red Autofluorescence in human bronchial cancer using color-fluorescence endoscopy [J]. *BMC Cancer*, 2017, 17(1) : 289.
- [15] DEROSA M C, CRUTCHLEY R J. Photosensitized singlet oxygen and its applications [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2002, 233-234: 351-371.
- [16] WOLD J P, SKARET J, DALSGAARD T K. Assessment of the action spectrum for photooxidation in full fat bovine milk [J]. *Food Chemistry*, 2015, 179: 68-75.
- [17] CARRARO C, PATHAK M A. Studies on the Nature of In Vitro and In Vivo Photosensitization Reactions By Psoralens and Porphyrins [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 1988, 90(3) : 267-275.
- [18] OLFAT N, ASHOORI M, SAEDISOMEOLIA A. Riboflavin is an antioxidant: a review update [J]. *British Journal of Nutrition*, 2022, 128(10) : 1887-1895.
- [19] 徐雯,卢立新.不同波段的光照对无菌牛奶中光敏剂降解的影响[J].*食品工业科技*,2012,33(11):154-156.
- [20] INTAWIWAT N, PETTERSEN M K, RUKKE E O, et al. Effect of different colored filters on photooxidation in pasteurized milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(5): 2002-2012..
- [21] HARWOOD W S, CARTER B G, CADWALLADER D C, et al. The role of heat treatment in light oxidation of fluid milk [J]. *Journal of*

- Dairy Science, 2020, 103(12) : 11244-11256.
- [22] JO Y, CARTER B G, BARBANO D M, et al. Identification of the source of volatile sulfur compounds produced in milk during thermal processing [J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(10) : 8658-8669.
- [23] JO Y, BENOIST D M, BARBANO D M, et al. Flavor and flavor chemistry differences among milks processed by high-temperature, short-time pasteurization or ultra-pasteurization [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5) : 3812-3828.
- [24] LIN J, BLANK I. Odorants generated by thermally induced degradation of phospholipids [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(15) : 4364-4369.
- [25] WHITSON M E, MIRACLE R E, DRAKE M A. Sensory Characterization of Chemical Components Responsible for Cardboard Flavor in Whey Protein [J]. Journal of Sensory Studies, 2010, 25(4) : 616-636.
- [26] FUENTES-LEMUS E, LÓPEZ-ALARCÓN C. Photo-induced protein oxidation: mechanisms, consequences and medical applications [J]. Essays in Biochemistry, 2020, 64(1) : 33-44.
- [27] PATTISON D I, RAHMANTO A S, DAVIES M J. Photo-oxidation of proteins [J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2012, 11(1) : 38-53.
- [28] FUENTES-LEMUS E, DORTA E, ESCOBAR E, et al. Oxidation of free, peptide and protein tryptophan residues mediated by AAPH-derived free radicals: role of alkoxyl and peroxy radicals [J]. RSC Advances, 2016, 6(63) : 57948-57955.
- [29] CARROLL L, PATTISON D I, DAVIES J B, et al. Formation and detection of oxidant-generated tryptophan dimers in peptides and proteins [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2017, 113: 132-142.
- [30] LÓPEZ-ALARCÓN C, ARENAS A, LISSI E, et al. The role of protein-derived free radicals as intermediaries of oxidative processes [J]. Biomolecular Concepts, 2014, 5(2) : 119-130.
- [31] FUENTES-LEMUS E, SILVA E, LEINISCH F, et al. α - and β -casein aggregation induced by riboflavin-sensitized photo-oxidation occurs via di-tyrosine cross-links and is oxygen concentration dependent [J]. Food Chemistry, 2018, 256: 119-128.
- [32] GRACANIN M, HAWKINS C L, PATTISON D I, et al. Singlet-oxygen-mediated amino acid and protein oxidation: Formation of tryptophan peroxides and decomposition products [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2009, 47(1) : 92-102.
- [33] WANG D, XIAO H, LYU X, et al. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review [J]. Oil Crop Science, 2023, 8(1) : 35-44.
- [34] SOL MORALES M, PALMQUIST D L, WEISS W P. Milk fat composition of Holstein and Jersey cows with control or depleted copper status and fed whole soybeans or tallow [J]. Journal of Dairy Science, 2000, 83(9) : 2112-2119.
- [35] LIU Q, WANG J, BU D, et al. Influence of Linolenic Acid Content on the Oxidation of Milk Fat [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(6) : 3741-3746.
- [36] KASTRUP DALSGAARD T, SØRENSEN J, BAKMAN M, et al. Light-induced protein and lipid oxidation in cheese: Dependence on fat content and packaging conditions [J]. Dairy Science & Technology, 2010, 90(5) : 565-577.
- [37] SAITO H, KATO S, SHIMIZU N, et al. LC-MS/MS analysis of milk triacylglycerol hydroperoxide isomers which are generated corresponding to the photo- and thermal-oxidation [J]. Food Research International, 2024, 178: 113913.
- [38] KUNYABOON S, THUMANU K, PARK J W, et al. Evaluation of Lipid Oxidation, Volatile Compounds and Vibrational Spectroscopy of Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) during Ice Storage as Related to the Quality of Its Washed Mince [J]. Foods, 2021, 10(3): 495.
- [39] BAO Y, HETTINGA K, LIU Y, et al. Effects of malondialdehyde-induced oxidative modifications on the techno-functional and in-vitro digestive properties of α -Lactalbumin [J]. Food Bioscience, 2026, 79: 108672.
- [40] CHEN J, LI X, KONG B, et al. Comparative study of protein-lipid co-oxidation in whey protein isolate-stabilised oil-in-water emulsions prepared by different homogenisation methods [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 633: 127916.
- [41] COOLBEAR T, JANIN N, TRAILL R, et al. Heat-induced changes in the sensory properties of milk [J]. International Dairy Journal, 2022, 126: 105199.
- [42] SHUANG J, LIU Y, HETTINGA K, et al. Effects of different heat treatments on the bioactive components, bactericidal and antioxidative capacity of bovine milk [J]. International Journal of Dairy Technology, 2025, 78(1) : e13154.
- [43] SOLANO-LOPEZ C E, JI T, ALVAREZ V B. Volatile Compounds and Chemical Changes in Ultrapasteurized Milk Packaged in

- Polyethylene Terephthalate Containers [J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(6) : C407-C412.
- [44] MICHALSKI M-C, JANUEL C. Does homogenization affect the human health properties of cow's milk? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(8) : 423-437.
- [45] 时佳,张海娇,赵锋,等.乳脂肪球膜结构、功能特性及其应用研究进展[J].*乳业科学与技术*,2025,48(1):46-52.
- [46] REN Q, LI Q, LIU H, et al. Thermal and storage properties of milk fat globules treated with different homogenisation pressures [J]. *International Dairy Journal*, 2020, 110: 104725.
- [47] BOGOMOLOV A, MELENTEVA A, DAHM D J. Fat Globule Size Effect on Visible and Shortwave near Infrared Spectra of Milk [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2013, 21(5) : 435-440.
- [48] SHARABI S, OKUN Z, SHPIGELMAN A. Changes in the shelf life stability of riboflavin, vitamin C and antioxidant properties of milk after (ultra) high pressure homogenization: Direct and indirect effects [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 47: 161-169.
- [49] SAIDI B, WARTHESEN J J. Effect of heat and homogenization on riboflavin photolysis in milk [J]. *International Dairy Journal*, 1995, 5(7) : 635-645.
- [50] ASHOKKUMAR M, GRIESER F. The effect of surface active solutes on bubbles in an acoustic field [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, 9(42): 5631-5643.
- [51] JULIANO P, TORKAMANI A E, LEONG T, et al. Lipid oxidation volatiles absent in milk after selected ultrasound processing [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(6) : 2165-2175.
- [52] THI HONG BUI A, COZZOLINO D, ZISU B, et al. Effects of high and low frequency ultrasound on the production of volatile compounds in milk and milk products-a review [J]. *Journal of Dairy Research*, 2020, 87(4) : 501-512.
- [53] JAKKAMSETTY C, SUBRAMANIAN P, RASHIDINEJAD A. Chapter 4-Spray drying of milk and milk products [M].JAFARI S M, SAMBORSKA K. *Spray Drying for the Food Industry*. ; Woodhead Publishing. 2024: 87-123.
- [54] GEORGE S, THOMAS A, KUMAR M V P, et al. Impact of processing parameters on the quality attributes of spray-dried powders: a review [J]. *European Food Research and Technology*, 2023, 249(2) : 241-257.
- [55] ATIK A, GUMUS T. The effect of different doses of UV-C treatment on microbiological quality of bovine milk [J]. *LWT*, 2021, 136: 110322.
- [56] SETTACHAIMONGKON S, MAKARARPONG D, KOEIPUDSA C, et al. Combined effects of UV-C pretreatment and subsequent pasteurization on the alteration in bovine milk metabolomic profile [J]. *International Dairy Journal*, 2026, 172: 106433.
- [57] SCHUBERT C, NEDELE A-K, BIERE N, et al. Impact of ultraviolet C treatment on sensory characteristics, amino acid profile, riboflavin content and toxicological activity of native whey [J]. *International Dairy Journal*, 2024, 157: 106027.
- [58] LIM S H, CHIN N L, SULAIMAN A, et al. Microbiological, Physicochemical and Nutritional Properties of Fresh Cow Milk Treated with Industrial High-Pressure Processing (HPP) during Storage [J]. *Foods*, 2023, 12(3): 592.
- [59] OZAYBI N. High-Pressure Processing of Milk and Dairy Products: Latest Update [J]. *Processes*, 2024, 12 (10): 2073.
- [60] CHEN J, ZHANG J, WANG N, et al. Comparative study on microbiological, physicochemical and nutritional properties of whole cow milk by thermal and non-thermal processing technologies [J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 104012.
- [61] MENG F, WANG J, HAN Z, et al. Effect of the light intensity and packaging materials on the photooxidation and volatile compounds in milk [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 120: 105358.
- [62] THUM C, CIRELLI A, OTOKI Y, et al. Concentration of milk oxylipins after heat and homogenization treatments [J]. *Frontiers in Food Science and Technology*, 2023, 3: 1027418.
- [63] BLINOV A V, SIDDIQUI S A, BLINOVA A A, et al. Analysis of the dispersed composition of milk using photon correlation spectroscopy [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 108: 104460.
- [64] GRANDA-RESTREPO D, PERALTA E, TRONCOSO-ROJAS R, et al. Release of antioxidants from co-extruded active packaging developed for whole milk powder [J]. *International Dairy Journal*, 2009, 19(8) : 481-488.
- [65] HARIZI N, MADUREIRA J, ZOUARI A, et al. Effects of Spray Drying, Freeze Drying and Gamma Irradiation on the Antioxidant Activities of Camel and Cow Milk Fractions [J]. *Processes*, 2023, 11(3) : 897.
- [66] MATI ULLAH KHAN, NBSP, LIMIN ZHEN, et al. Advancing Raw Milk Safety and Quality: A Critical Review of Existing and

- Emerging Nonthermal Technologies [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2026, 25 2: e70430.
- [67] MAKARARPONG D, TANTAYANON S, GOWANIT C, et al. Enhancing Raw Bovine Milk Quality using Ultraviolet-C (UV-C) Irradiation: A Microbial and Lipid Peroxidation Study [J]. *Food Science of Animal Resources*, 2024, 44(2) : 372-389.
- [68] SIDDIQUI S A, KHAN S, BAHMID N A, et al. Impact of high-pressure processing on the bioactive compounds of milk - A comprehensive review [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2024, 61(9) : 1632-1651.
- [69] 胡志和,赵旭飞,鲁丁强,等.超高压结合温热处理对脱脂乳透光率和粒径及蛋白溶解性的影响[J].*食品科学*,2021,42(19):170-182.
- [70] CADWALLADER D C, GERARD P D, DRAKE M A. The role of packaging on the flavor of fluid milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(1) : 151-167.
- [71] LIMBO S, PELLEGRINO L, D'INCECCO P, et al. Storage of pasteurized milk in clear PET bottles combined with light exposure on a retail display case: A possible strategy to define the shelf life and support a recyclable packaging [J]. *Food Chemistry*, 2020, 329: 127116.
- [72] HODGSON J L, COOTE M L. Clarifying the Mechanism of the Denisov Cycle: How do Hindered Amine Light Stabilizers Protect Polymer Coatings from Photo-oxidative Degradation? [J]. *Macromolecules*, 2010, 43(10) : 4573-4583.
- [73] WANG A, DUNCAN S E, WHALLEY N W, 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 Chemistry*, 2020, 323: 126699.
- [74] MENG F, WANG J, HAN Z, et al. Effect of the light intensity and packaging materials on the photooxidation and volatile compounds in milk [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 120: 105314.
- [75] WANG A, STANCIK C M, YIN Y, et al. Performance of cost-effective PET packaging with light protective additives to limit photo-oxidation in UHT milk under refrigerated LED-lighted storage condition [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 31: 100773.
- [76] INTAWIWAT N, PETTERSEN M K, RUKKE E O, et al. Effect of different colored filters on photooxidation in pasteurized milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(4) : 1372-1382.
- [77] INTAWIWAT N, WOLD J P, SKARET J, et al. Minimizing photooxidation in pasteurized milk by optimizing light transmission properties of green polyethylene films [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(11) : 6818-6829.
- [78] WANG A, DADMUN C H, HAND R M, et al. Efficacy of light-protective additive packaging in protecting milk freshness in a retail dairy case with LED lighting at different light intensities [J]. *Food Research International*, 2018, 114: 1-9.
- [79] JOHNSON D S, DUNCAN S E, BIANCHI L M, et al. Packaging modifications for protecting flavor of extended-shelf-life milk from light [J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(4) : 2205-2214.
- [80] DUAN H, ZHANG M, DENG Y, et al. Multifunctional carbon dots with full-band UV-to-HEBL shielding and antibacterial properties in polyvinyl alcohol film for enhancing food preservation [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2025,48: 101468.
- [81] ZHANG H, ZHANG X, WANG B, et al. Synergistic multi-crosslinked networks in chitosan/Gallic acid/Fe³⁺ composite biofilms with high UV resistance and antioxidant properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 316: 144686.
- [82] MA L, HU P, ZHANG Y, et al. The preparation and physicochemical properties of biodegradable konjac glucomannan-based films reinforced with bacterial cellulose and tea polyphenol for food packaging [J]. *RSC Advances*, 2026, 16(1): 370-382.
- [83] DENG L, LIU Q, WENG W, et al. Dragon fruit peel pigment extraction residue based intelligent and biodegradable film for indicating milk freshness [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2026, 108: 104418.
- [84] FARACO R L, ANDRADE A A E, CAMPOS D, et al. Enhancing milk quality assessment: A novel approach using an optical tongue with fiber-based Mach-Zehnder interferometry [J]. *Journal of Food Engineering*, 2024, 375: 112057.
- [85] ADAINOO B, GAO Z, HE L. Real-time prediction of shelf-life of soymilk using a surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) fiber and convolutional neural networks [J]. *Sustainable Food Technology*, 2026, 4(2) : 1541-1549.
- [86] OU H, ZHOU D, CAIRANG Z, et al. Photo-responsive films in food packaging: mechanisms, preparation, applications, and machine learning optimization [J]. *Food Research International*, 2026, 235: 119122.