热处理对乳品风味及美拉德反应程度的影响

陈银阁[1]，温凤亮[1, 2, 3]，肖　然[1, 2, 3]，张养东[1]，郑　楠[1]，赵艳坤[4]，张红艳[4]，欧国兵[5]，王加启[1]，牛天娇[1, 2, 3*]

1 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，国家市场监督管理总局重点实验室（乳品质量数智监控技术），北京 100193
2 蒙牛鲜乳制品（天津）有限公司，天津 301700
3 内蒙古蒙牛乳业（集团）股份有限公司，内蒙古呼和浩特 011500
4 新疆维吾尔自治区农业科学院农业质量标准与检测技术研究所，新疆乌鲁木齐 830091
5 新疆西域春乳业有限责任公司，新疆昌吉 831201

摘　要：[目的]本文系统研究了不同热处理条件对牛乳风味及美拉德反应程度的影响。[方法]通过设置生乳组、10 种间接式杀菌工艺（包括3 个时间2 s、15 s、30 min与10 个温度63~135 ℃）以及直接式杀菌工艺（130 ℃/0.5 s），结合电子鼻风味分析、糠氨酸和乳果糖含量测定，综合评价热处理强度对乳品品质的作用。[结果]电子鼻可有效区分不同热处理组的风味特征，直接式杀菌工艺在风味上与其他组差异显著，（72~90 ℃）/15 s与（95~122 ℃）/15 s间接杀菌工艺风味差异明显，主要挥发性差异物质为硫化物、芳香成分和氮氧化合物。糠氨酸和乳果糖含量随温度升高而增加，尤其在135 ℃/15 s时急剧上升，反映出强烈热损伤；而直接式杀菌工艺（130 ℃/0.5 s）能有效抑制美拉德反应产物生成，糠氨酸和乳果糖含量分别介于90~95 ℃/15 s和72~80℃/15 s工艺之间。[结论] 直接式杀菌工艺在实现灭菌和延长货架期的同时，可显著控制热损伤并保留良好风味，适用于高品质UHT乳生产；低温间接杀菌工艺热负荷低、风味变化小，适用于巴氏乳；中温工艺则适用于延长货架期乳制品。本研究为优化乳品热处理工艺、平衡灭菌效果与风味品质提供了理论依据和技术支持。

关键词：热处理强度；风味；电子鼻；糠氨酸；乳果糖

文章编号：1671–4393（2025）11–0042–09　　DOI:10.12377/1671–4393.25.11.05

基金项目：国家重点研发计划（2022YFD1301004）；国家奶牛产业技术体系（CARS–36）；新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2024B04005）

作者简介：陈银阁（1999–），女，河南许昌人，硕士，研究方向为奶牛营养与牛奶质量安全；
温凤亮（1976–），男，内蒙古包头人，硕士，研究方向为乳制品加工；
肖　然（1988–），女，黑龙江哈尔滨人，博士，研究方向为乳制品加工；
张养东（1982–），男，山东济宁人，博士，研究员，研究方向为牛奶品质调控；
郑　楠（1980–），女，内蒙古包头人，博士，研究员，研究方向为奶产品质量安全风险评估与营养功能评价；
赵艳坤（1990–），女，河南周口人，博士，研究员，研究方向为乳品质量与安全；
张红艳（1978–），女，山东东明人，博士，正高级实验师，研究方向为乳品质量与安全；
欧国兵（1976–），男，重庆人，本科，高级畜牧师，研究方向为乳制品加工与开发；
王加启（1967–），男，安徽宿州人，博士，研究员，研究方向为奶牛营养与牛奶质量安全。
*通信作者：牛天娇（1982–），女，黑龙江齐齐哈尔人，博士，正高级工程师，研究方向为乳制品加工。

中国乳业线上阅读

0 引言

牛奶作为一种广受欢迎的天然饮品，被普遍视为均衡人体营养与促进饮食健康的重要食物[1]。从营养学角度看，牛奶营养成分丰富，组成比例合理，易于消化吸收[2]。其蛋白质的氨基酸构成在种类、数量及比例上均与人体蛋白质高度相似[3]，因此被世界卫生组织列为优质蛋白质的参考标准。每升牛奶约含32 g蛋白质，包括β-乳球蛋白、α-乳白蛋白、免疫球蛋白、乳铁蛋白等多种成分[4]，这些成分在抗氧化[5]、免疫调节、抗高血压以及维护心血管与消化系统健康等方面具有重要作用[6, 7]。牛奶中的脂肪酸以饱和脂肪酸为主，易于被人体吸收并转化为能量[8]。随着乳制品市场的不断发展，行业也持续根据消费者需求调整产品类型。在保持营养丰富、质地与风味适宜的基础上，低脂（脂肪含量1.5%~2.0%）和脱脂（脂肪含量＜1%）牛奶因脂肪含量更低、热量更少，受到高血脂和肥胖人群的青睐，有助于促进心脏健康，并降低心脑血管疾病风险[9]。此外，牛奶富含维生素A、D以及钙、磷、镁、锌、硒等多种矿物元素，对骨骼生长及预防骨质疏松症等方面具有积极作用[10]。

随着消费者对乳制品健康益处的认知不断提升，优化加工工艺后的乳制品风味正面临重大挑战[11]。乳制品的风味主要来源于牛奶中脂质、蛋白质、碳水化合物、矿物质和维生素等主要营养成分的降解过程[12]。然而，从如此复杂的组分中阐明风味形成机制极具挑战性，涉及多种成分间的相互作用[13]。脂质虽然在乳制品中含量较低，却是异味形成的重要前体。其降解程度受水分、温度、氧气和光照等因素影响[14]。脂质异香主要通过2 种途径产生：自氧化和脂肪分解。自氧化是指不饱和脂质在氧气作用下发生氧化，生成氢过氧化物，随后进一步分解为醛、酮、酸、醇和呋喃等次级氧化产物[15]。脂肪分解则是在脂肪酶作用下甘油三酯发生水解，其中由嗜冷菌污染产生的细菌脂肪酶具有热稳定性，能够在加工过程中存活并在储存期间持续引发脂肪分解，生成游离脂肪酸、部分甘油酯及可能的甘油[16]。除脂质外，蛋白质降解也被多位风味研究者确认为乳制品异味的主要来源之一。热处理后的牛奶蛋白质可能产生类似臭鸡蛋的不良气味[17]，这既可能源于原料本身，也可能来自加工和储存过程中香气成分的变化，或是因挥发物的相互作用、结合或释放而改变原有的乳香[18]。 作为高蛋白食品，牛奶在整个产品开发过程中需采取主动策略以预防异味产生。本质上，研究牛奶风味旨在识别赋予特定感官属性的香气化合物，而要改善乳蛋白风味质量，就必须全面理解异味的性质与来源[19]。总之，乳制品成分的风味至关重要，因为异味会残留于成品中，成为影响消费者接受度的关键客观因素。在奶源、加工、处理和储存各环节均可能引入异味，其中加工与储存条件对不合格品产生的影响尤为显著。

本文旨在探究不同热处理参数对牛奶风味和美拉德反应中有害成分的影响，揭示可能导致牛奶风味变差的热处理条件，从而积极监测，优化生产条件，改善加工工艺，最大限度地减少最终乳制品相关产品中不良风味的产生，以期为牛奶热处理工艺改进提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

共采集不同加工工艺牛奶样品12 组，包括生乳组，间接式杀菌工艺组（参数包括63 ℃/30 min、72 ℃/15 s、80 ℃/15 s、85 ℃/15 s、90 ℃/15 s、95 ℃/15 s、100 ℃/15 s、105 ℃/15 s、122 ℃/15 s和135 ℃/2 s），直接式杀菌工艺（参数包括130 ℃/0.5 s），每个工艺参数进行3次生物学重复。

便携式电子鼻（PEN 3，Air sense Analytics，德国）；聚四氟乙烯/硅隔盖；15 mL玻璃小瓶。

1.2 电子鼻检测

采用电子鼻对不同热处理组乳制品的风味特征进

中国乳业编辑部

行分析。选用10 种金属氧化物传感器阵列，其具体特性详见表1。样品处理方法如下：准确量取7.0 mL牛奶样品置于20 mL顶空进样瓶中，加入1.0 g氯化钠（NaCl）作为盐析剂，充分混匀后于40 ℃恒温水浴中平衡5 min。采用自动进样系统，将进样针插入样品瓶顶空部分，持续采集120 s。每个样品设置3 个平行重复。数据采集使用Win Muster v.1.6分析软件，选取传感器响应稳定阶段（117~119 s）的测量值，计算各传感器响应信号的平均G/G0值（传感器电导率与基线电导率之比）作为分析指标。

表 1 电子鼻 10 种金属氧化物半导体（MOS）传感器的特性

序号	类型	敏感物质
1	W1C	芳烃化合物
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨类、芳香成分
4	W6S	氢化合物
5	W5C	短链烷烃
6	W1S	甲基类
7	W1W	无机硫化物
8	W2S	醇类、醛酮类
9	W2W	有机硫化物、芳香成分
10	W3S	长链烷烃、脂肪族

1.3 糠氨酸和乳果糖检测

糠氨酸和乳果糖含量的测定根据《NY/T 939—2016 巴氏杀菌乳和UHT灭菌乳中复原乳的鉴定》的方法[20]进行检测。

1.4 数据分析

在电子鼻数据分析过程中，选取传感器响应稳定阶段（117~119 s）的数据进行后续统计分析。采用MetaboAnalyst 5.0在线数据挖掘平台进行多变量统计分析，包括主成分分析（PCA）和偏最小二乘判别分析（PLS-DA），以探究不同热处理组乳品的风味差异模式。同时，利用SPSSAU在线统计分析平台（http://www.spssau.com）对数据进行标准化预处理，并进行单因素方差分析（ANOVA），显著性水平设定为$p<0.05^{**}$。试验结果以“均值±标准差（Mean±SD）”表示。

2 结果与讨论

2.1 不同热处理对牛奶整体风味影响的分析

电子鼻响应值PCA结果，显示了95%置信区间（图1a）。第1主成和第2主成的累积方差贡献率之和表明它们捕获了原始数据中的大部分信息。从电子鼻置信椭圆区间距离来看，生乳与其余热处理组在数据点上有明显区分为了进一步评估电子鼻中每个传感器的贡献度，PLS-DA判别结果所示（图1b），VIP值超过1.0 通常被认为表示在PLS-DA判别过程中具有显著重要性。10 个传感器对应不同敏感物，W6S、W1W、W2W这3 个传感器在区分组间差异起重要作用，突出了它们在区分风味方面的关键作用。生乳与加工处理组具有明显差异，但可能由于热处理组温度及时间参数较为相似，使热处理组间风味在主成分分析图中不能很好的区分，因此本文删除了生乳组和63 ℃/30 min组，进行风味整体性分析。

从电子鼻置信椭圆区间距离来看（图1c），130 ℃/0.5 s与其余组在数据点上有明显区分。（72~90 ℃）/15 s连续式间接杀菌工艺得到的乳制品组别间数据点上区分不明显，（9~135 ℃）/15 s组别间数据点上区分不明显，但（72~℃）/15 s组的样品与（95~135 ℃）/15 s组的样品在电子鼻风味传感器PCA图中各自聚为一类，两类间距能够很好区分，且W6S、W2W、W1C、W3C、W5C、W3S在区分组间差异起重要作用（图1d）。显著性分析的结果所示（表2），传感器W5S、W1W与W2W在不同热处理组间呈现出极显著差异（$p<0.01$），这说明这些传感器所响应的挥发性物质在热处理过程中发生了显著变化。电子鼻整体检测结果进一步证实，生乳与各热处理组在气味轮廓上存在可区分的差异。根据传感器特性，通过以变量重要性投影（VIP）大于1为标准筛选关键差异性挥发物质，发现硫化物、芳香成分、氮氧化合物是构成组间风味差异的主要

中国乳业线上阅读

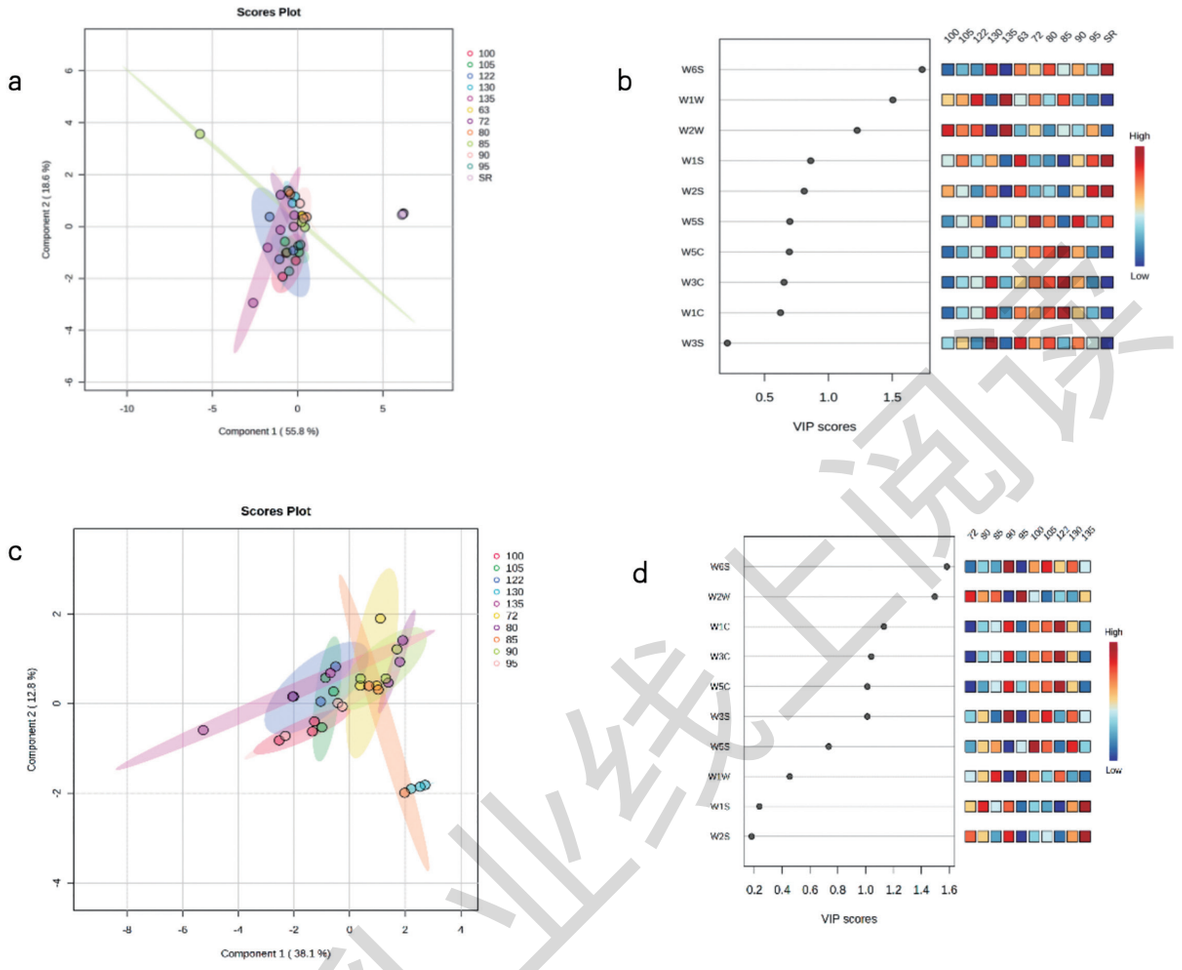


图 1 电子鼻传感器风味分析

（a）12组牛奶的电子鼻响应值PCA结果；（b）12组牛奶的PLS-DA 判别VIP贡献值结果；（c）删除生乳和63 ℃/30 min组的电子鼻响应值PCA结果；（d）删除生乳和63 ℃/30 min组的PLS-DA判别VIP贡献值结果

物质基础。值得注意的是，部分传感器响应值在特定处理组中表现出较大的标准差，主要源于样品顶空挥发的不均一性、传感器交叉敏感性及进样操作的微小波动。然而，尽管存在一定组内变异，电子鼻整体数据仍能通过多元分析方法有效捕捉不同热处理强度导致的系统性风味差异，说明其在乳品热处理风味评价中具有良好的适用性与区分能力。

牛奶热加工程度不同会伴随着不同的理化反应，如蛋白间发生交联[21]、乳脂肪发生氧化作用[19]、乳糖与蛋白发生美拉德反应和焦糖化反应[22]等，从而导致牛奶风味发生不同程度的改变。根据上述电子鼻传感器检测结果发现，直接与间接杀菌工艺组样品差异产生的蒸煮风味可能与硫化物反应密切相关。这是由于高温处理会促使乳清蛋白（如β-乳球蛋白）中的巯基和二硫键发生变化，生成甲硫醇、硫化氢等含硫化合物[23]。此外，游离的甲硫氨酸和半胱氨酸通过美拉德反应生成二甲基二硫化物、硫化氢等挥发性含硫化合物。同时，热加工处理产生的芳香成分可能与乳脂肪有关，它是牛奶热加工过程中风味形成的重要前体物质[24]。热处理会使脂肪球膜蛋白变性，释放游离脂肪酸，通过氧化、水解等反应生成烷烃、酸类、酯类等风味物质[25]。乳脂肪球膜蛋白中的酶和脂类在热处理后也会通过二硫键交联形成含硫物质。值得注意的是，乳糖在热处理

中国乳业线上阅读

中易发生美拉德反应、降解和异构化，生成中间产物与氨基酸、硫化氢等反应，形成大量风味化合物，显著影响牛奶风味[26]。

2.2 不同热处理对牛奶中糠氨酸含量影响的分析

牛奶中在热处理过程中会发生降解、失活或变性的成分，主要是乳清蛋白类和酶类，如α-乳白蛋白、β-乳球蛋白、碱性磷酸酶、乳过氧化物酶等。它们被称之为Ⅰ型指标也称为热损失类指标，这些成分本身存在于牛奶中且对温度十分敏感。Ⅱ型指标也称为热生成类指标，牛奶中本身不含有或含有但含量低，在热处理过程中因美拉德反应生成或显著增加的一类物质，主要是糠氨酸、乳果糖等。因此可以根据糠氨酸质量分数和乳果糖质量浓度来区分不同类型的乳制品。

糠氨酸是美拉德反应初始产物（Amadori化合物）的酸水解物质，通常用作监测乳制品杀灭菌和贮存过程中的热损伤指标，其生成途径是由于乳糖在高温下会发生热降解生成活性中间体羟甲基糠醛（HMF），HMF与氨基酸反应进一步形成糠氨酸[27]。乳制品中糠氨酸的生成受加热温度、时间、pH值、乳糖和蛋白质含量等因素的影响。Baptista和Carvalho等[28]发现，巴氏杀菌牛奶中糠氨酸含量达到89.2 mg/100 g蛋白质，超高温灭菌牛奶中达53.2~138 mg/100 g蛋白质。Boitz和Maye[29]发现糠氨酸、乳果糖和α-乳白蛋白含量随热负荷的增加而变化。Guo等[30]发现，将羊奶加热至137 ℃并保持4 s，糠氨酸含量达到130.22 mg/100 g蛋白质，比生羊奶中的糠氨酸含量高35 倍。本研究系统测定了不同热处理强度下牛奶中糠氨酸的质量分数（图2），其中生乳中糠氨酸含量为5.9 mg/100 g蛋白质，其余11组样品的糠氨酸含量分布于7.0~117.4 mg/100 g蛋白质。值得关注的是，本研究发现采用63 ℃/30 min间歇式杀菌工艺所得产品中糠氨酸含量为19.0 mg/100 g蛋白质，而（72~90 ℃）/15 s连续式间接杀菌工艺所得产品的糠氨酸含量仅为7.0~9.2 mg/100 g蛋白质，含量呈缓慢增加趋势，低于Baptista与Carvalho[28]报道的巴氏杀菌牛奶中糠氨酸含量（89.2 mg/100 g蛋白质）。95 ℃以上连续式间接杀菌工艺得到的乳制品中糠氨酸含量快速增长（保持时间均为15 s），保持时间降低到2 s，135 ℃连续式间接杀菌工艺得到的乳制品中糠氨酸含量达到117.4 mg/100g蛋白质。130 ℃/0.5 s直接式杀菌工艺得到的乳制品中糠氨酸含量为11.1 mg/100g蛋白质，介于90 ℃/15 s连续式间接杀菌工艺和95 ℃/15 s连续式间接杀菌工艺之间，进一步说明在相近或更高温度下通过优化工艺参数可有效抑制糠氨酸的生成。相比之下，Baptista等[28]研究中超高温灭菌乳的糠氨酸含量为53.2~138 mg/100 g蛋白质，而本研究在135 ℃连续式间接杀菌工艺中虽检测到最高值117.4 mg/100 g蛋白质，但整体数据范围更为系统，且揭示了在高温短时工艺中糠氨酸增长的临界条件（如95 ℃以上含量迅速上升）。总体而

表 2 电子鼻传感器风味显著性差异分析

传感器	72.0（n=3）	80.0（n=3）	85.0（n=3）	90.0（n=3）	95.0（n=3）	100.0（n=3）	105.0（n=3）	122.0（n=3）	130.0（n=3）	135.0（n=3）	*p* 值
W1C	0.85±0.01	0.85±0.00	0.90±0.10	0.84±0.01	0.82±0.01	0.82±0.00	0.83±0.01	0.84±0.01	0.90±0.01	0.83±0.01	0.096
W5S	1.71±0.09	1.67±0.04	1.48±0.29	1.69±0.04	1.63±0.03	1.60±0.00	1.68±0.09	1.72±0.03	1.24±0.01	1.72±0.02	0.000**
W3C	0.83±0.01	0.83±0.02	0.89±0.13	0.82±0.01	0.80±0.00	0.81±0.01	0.81±0.01	0.82±0.02	0.88±0.01	0.83±0.01	0.291
W6S	1.06±0.00	1.07±0.00	1.05±0.04	1.07±0.00	1.08±0.01	1.08±0.01	1.07±0.00	1.06±0.01	1.08±0.01	1.06±0.01	0.084
W5C	0.84±0.02	0.84±0.03	0.89±0.15	0.83±0.01	0.81±0.00	0.81±0.01	0.81±0.02	0.83±0.03	0.87±0.01	0.84±0.00	0.549
W1S	1.44±0.14	1.43±0.14	1.34±0.43	1.52±0.04	1.61±0.02	1.58±0.06	1.57±0.06	1.49±0.14	1.52±0.03	1.43±0.03	0.605
W1W	0.98±0.00	0.96±0.00	0.97±0.01	0.97±0.01	1.00±0.02	1.02±0.01	1.00±0.00	1.01±0.02	0.95±0.00	1.04±0.05	0.000**
W2S	1.51±0.11	1.51±0.11	1.40±0.41	1.59±0.04	1.68±0.01	1.67±0.04	1.62±0.05	1.53±0.14	1.60±0.03	1.48±0.03	0.436
W2W	0.98±0.01	0.96±0.00	0.97±0.00	0.97±0.02	1.04±0.04	1.06±0.03	1.03±0.01	1.04±0.03	0.93±0.01	1.10±0.10	0.000**
W3S	1.18±0.01	1.21±0.00	1.14±0.11	1.21±0.00	1.22±0.00	1.22±0.00	1.21±0.00	1.16±0.04	1.22±0.01	1.16±0.02	0.113

注：*p<0.05，**p<0.01

中国乳业线上阅读

言，贮存温度和时间可以影响乳制品中糠氨酸的生成，经过超高温杀菌处理的乳中糠氨酸的含量变化范围较大且高于巴氏杀菌乳。通过工艺优化可以实现在高温条件下对糠氨酸形成的有效控制，为低热损伤乳制品提供重要保障。

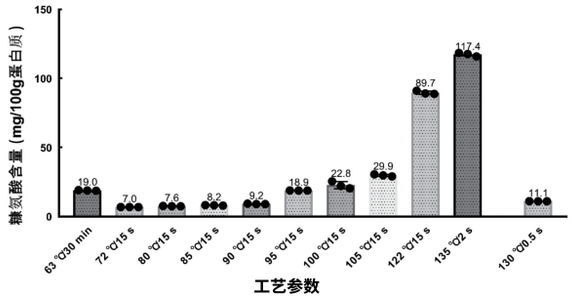


图 2 不同热处理条件下糠氨酸含量的变化

2.3 不同热处理对牛奶中乳果糖含量影响的分析

乳果糖是乳糖在牛奶热处理过程中异构化生成的产物，是目前区分不同热处理牛奶及评价牛奶热负荷的重要指标。一般认为巴氏杀菌乳中没有或含有极少量的乳果糖。本研究结果显示（图3），63 ℃/30 min间歇式杀菌工艺所得产品中乳果糖含量低于检测限（＜4.2 mg/L），而（72~122 ℃）/15 s连续式间接杀菌工艺中，乳果糖含量随温度升高从20.3 mg/L逐渐增加至192.9 mg/L；在135 ℃/2 s条件下进一步升至332.9 mg/L。值得注意的是，本研究中130 ℃/0.5 s直接式杀菌工艺所得产品的乳果糖含量仅为23.4 mg/L，介于72 ℃/15 s与80 ℃/15 s工艺之间。

乳糖在热处理中发生美拉德反应、降解和异构化，生成中间产物与氨基酸、硫化氢等反应，形成大量风味化合物，显著影响牛奶的风味特性。因此，乳糖异构化产物乳果糖也被作为反应牛奶的热处理程度的典型热敏指示物。本研究发现，当热处理时间均为15 s时，随热处理温度由72至122 ℃不断升高时，LCT含量呈现不同程度的增加，这一结果与大多研究结果相似。Elliott等[31]发现，当热处理高于120 ℃后 LCT含量急剧增加，当温度达到130 ℃和140 ℃时，LCT含量分别增加到551 mg/L和1 549 mg/L。然而，本研究中135 ℃/2 s工艺下乳果糖含量仅为332.9 mg/L，这表明加热方式与时间对乳果糖生成具有影响，在相近甚至更高温度条件下，通过优化加热模式与缩短作用时间，可实现乳果糖含量的有效控制。研究也表明，138 ℃/6 s和145 ℃/3 s工艺下乳果糖分别为240 mg/L与600 mg/L，进一步印证了时间参数在高温区间的敏感作用[32]。虽然135 ℃/2 s连续式间接杀菌工艺得到的乳制品中乳果糖含量极具升高，但130 ℃/0.5 s热处理乳中含量较低，这可能是由于直接式热处理导致的杀菌时长过短导致的。上述检测结果表明，乳果糖在高温热处理后的乳中更易检测且含量更高，且随热处理温度的增加，牛奶品质发生不同程度的变化，当温度升高到135 ℃以上时，乳糖与蛋白发生美拉德反应加剧，乳果糖含量剧增。而直接式热加工方式为130 ℃/0.5 s，其乳果糖含量较低，表明该加热模式可以很大程度上缓解热损伤程度，这一差异凸显了直接式超高温瞬时工艺在控制热损伤方面的独特优势。尽管温度较高，但极短的保持时间（0.5 s）可有效抑制乳糖的异构化反应，从而大幅降低乳果糖生成。

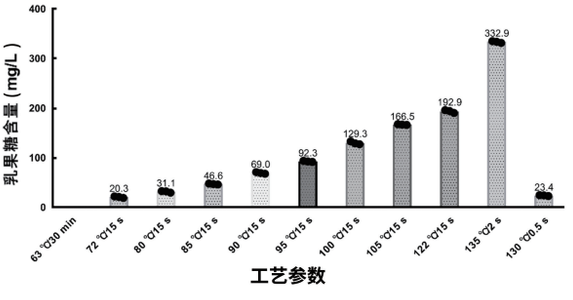


图 3 不同热处理条件下乳果糖含量的变化

3 结论

本文基于原料乳处理时的间接式杀菌工艺参数3 个时间2 s、15 s、30 min与10 个温度63、72、80、85、90、95、100、105、122、135 ℃，直接式杀菌工艺参数包括130 ℃/0.5 s，通过测定乳中美拉德反应的典型产物，即糠氨酸质量分数和乳果糖质量浓度，并结合电子鼻技术探究不同热处理程度对样品

中国乳业线上阅读

间风味物质差异和美拉德反应程度的影响。结果显示，在相同热处理时间15 s的条件下，美拉德反应产物糠氨酸和乳果糖含量均随72 ℃至122 ℃热处理温度的升高而有不同程度的增多。当连续式杀菌工艺升高至135 ℃/15 s时，糠氨酸和乳果糖含量急剧增加，反映出强烈热损伤。值得注意的是，直接式杀菌工艺（130 ℃/0.5 s）所得产品中糠氨酸含量介于90 ℃/15 s和95 ℃/15 s连续式间接杀菌工艺之间，乳果糖含量介于72 ℃/15 s和80 ℃/15 s连续式间接杀菌工艺之间，显示其在极短时高温下有效抑制了美拉德反应进程。电子鼻风味检测结果表明，不同热处理组间牛奶气味存在显著差异。直接式杀菌工艺（130 ℃/0.5 s）在风味特征上与其他组明显区分，（72~90 ℃）/15 s与（95~122 ℃）/15 s连续式间接杀菌工艺得到的乳制品样品电子检测整体风味存在明显区分，且差异性气味产生的物质基础主要为硫化物、芳香成分、氮氧化合物。基于电子鼻传感器与挥发性成分之间具有明显相关性，可对不同热处理组乳制品风味进行区分。综上所述，与其他间接式杀菌处理组相比，直接式杀菌工艺（130 ℃/0.5 s）在实现超高温灭菌、满足长货架期要求的同时，能显著控制美拉德反应产物的生成，保留较好的风味品质，适用于追求“低热损伤、高风味保留”的UHT乳制品生产；（72~90 ℃）/15 s连续式间接杀菌工艺热负荷较低，美拉德反应程度弱，风味变化最小，更适合用于风味优先、短货架期的巴氏杀菌乳；（95~122℃）/15s连续式间接杀菌工艺美拉德反应产物及风味变化居中，可作为延长货架期（ESL）乳的潜在处理选项；135 ℃及以上高温工艺虽灭菌效果显著，但美拉德反应剧烈，热损伤指标和风味变异显著，需在货架期需求与感官品质之间进行权衡。此外，由于本研究仅有单一参数的直接式杀菌工艺的局限性，缺乏不同温度时间组合的直接式工艺对比，因此难以系统揭示直接加热模式下热负荷与糠氨酸、乳果糖生成之间的完整关系。未来研究可增设多参数直接式杀菌工艺，将有助于更全面评估直接式杀菌工艺在控制乳品热损伤方面的优化路径。本研究可为探究不同热处理程度的乳制品风味物质和美拉德反应程度提供参考依据，同时为积极监测优化条件并调整加工参数以保证风味提供技术支撑。

参考文献

[1] Pereira P C. Milk nutritional composition and its role in human health[J]. Nutrition，2014，30（6）：619–627.

[2] Haug A，Høstmark A T，Harstad O M. Bovine milk in human nutrition––a review[J]. Lipids in Health and Disease，2007，6：25.

[3] Mills S，Ross R P，Hill C，et al. Milk intelligence：Mining milk for bioactive substances associated with human health[J]. International Dairy Journal，2011，21（6）：377–401.

[4] Politis IChronopoulou R. Milk peptides and immune response in the neonate[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology，2008，606：253–269.

[5] Fiat A–M，Migliore–Samour D，Joll è s P，et al. Biologically active peptides from milk proteins with emphasis on two examples concerning antithrombotic and immunomodulating activities[J]. Journal of Dairy Science，1993，76（1）：301–310.

[6] Zimecki M，Kruzel M L. Milk–derived proteins and peptides of potential therapeutic and nutritive value[J]. Journal of Experimental Therapeutics & Oncology，2007，6（2）：89–106.

[7] Gonz á lez–Ch á vez S A，Ar é valo–Gallegos S，Rasc ó n–Cruz Q. Lactoferrin：structure，function and applications[J]. International Journal of Antimicrobial Agents，2009，33（4）：301.

[8] Månsson H L. Fatty acids in bovine milk fat[J]. Food and Nutrition Research，2008，52：1–6.

[9] Benjamin S，Spener F. Conjugated linoleic acids as functional food：an insight into their health benefits[J]. Nutrition & Metabolism，2009，6：1–36.

[10] Gaucheron F. Milk and dairy products：a unique micronutrient combination[J]. Journal of the American College of Nutrition，2011，30（5 Suppl 1）：400–409.

[11] Su X，Tortorice M，Ryo S，et al. Sensory lexicons and formation pathways of off–aromas in dairy ingredients：A review[J]. Molecules，2020，25（3）：1–8.

[12] Cadwallader K，Rsingh T. Flavours and off–flavours in milk and dairy products[J]. Advanced Dairy Chemistry，2009，1（1）：631–690.

[13] Bassette R，Fung D Y，Mantha V R. Off–flavors in milk[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，1986，24

中国乳业线上阅读

（1）：1–52.

[14] Carunchia Whetstine M E，Croissant A E，Drake M A. Characterization of dried whey protein concentrate and isolate flavor[J]. Journal of Dairy Science，2005，88（11）：3826–3839.

[15] Whetstine M E C，Drake M A. The flavor and flavor stability of skim and whole milk powders[J]. American Chemical Society，2007，9：217–251.

[16] 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.

[17] Al–Attabi Z，D’Arcy B R，Deeth H C. Volatile sulfur compounds in pasteurised and UHT milk during storage[J]. Dairy Science & Technology，2014，94（3）：241–253.

[18] Smith T J，Campbell R E，Jo Y，et al. Flavor and stability of milk proteins[J]. Journal of Dairy Science，2016，99（6）：4325–4346.

[19] Adhikari A，KSingal O P. Effect of dissolved oxigen content on the flavour profile of UHT milk during storage[J]. The International Journal of Dairy Technology，1992，47：6.

[20] 全国畜牧业标准化技术委员会. 巴氏杀菌乳和UHT灭菌乳中复原乳的鉴定：NY/T 939–2016[S].

[21] Donato L，Guyomarc’h F，Amiot S，et al. Formation of whey protein/κ–casein complexes in heated milk：Preferential reaction of whey protein with κ–casein in the casein micelles[J]. International Dairy Journal，2007，17（10）：1161–1167.

[22] Van Boekel M A J S. Effect of heating on Maillard reactions in milk[J]. Food Chemistry，1998，62（4）：403–414.

[23] Wang Y，Guo M，Wu P，et al. Size–dependent composition and in–situ structure analysis of the milk fat globule membrane in buffalo milk[J]. Food Chemistry，2025，464：141766.

[24] Al–Attabi Z，D’Arcy B R，Deeth H C. Volatile sulphur compounds in UHT milk[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2009，49（1）：28–47.

[25] Rudy D W，Nieuwenhuijse H. Kinetic modelling of the formation of sulphur–containing flavour components during heat–treatment of milk[J]. International Dairy Journal，2008，18（5）：539–547.

[26] Lynch J M，Lock A L，Dwyer D A，et al. Flavor and stability of pasteurized milk with elevated levels of conjugated linoleic acid and vaccenic acid[J]. Journal of Dairy Science，2005，88（2）：489–498.

[27] Czerwonka M，Pietrzak S R，Bobrowska K B. Evaluation of 5–hydroxymethylfurfural content in market milk products[J]. Food Additives and Contaminants Part A–Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment，2020，37（7）：1135–1144.

[28] Baptista J A B，Carvalho R C B. Indirect determination of Amadori compounds in milk–based products by HPLC/ELSD/UV as an index of protein deterioration[J]. Food Research International，2004，37（8）：739–747.

[29] Boitz L I，Mayer H K. Evaluation of furosine，lactulose and acid–soluble β–lactoglobulin as time temperature integrators for whipping cream samples at retail in Austria[J]. International Dairy Journal，2015，50：24–31.

[30] Guo Y，Li H，Zhao X，et al. Changes in Maillard reaction products，volatile substances and active proteins of goat milk under different heat treatments[J]. International Dairy Journal，2023，146：105714.

[31] Elliott A J，Datta N，Amenu B，et al. Heat–induced and other chemical changes in commercial UHT milks[J]. Journal Of Dairy Research，2005，72（4）：442–446.

[32] Neves L N D O，Marques R，da Silva P H F，et al. Lactulose determination in UHT milk by CZE–UV with indirect detection[J]. Food Chemistry，2018，258：337–342.

中国乳业线上阅读

Effects of Heat Treatment on Dairy Flavor and the Degree of Maillard Reaction

CHEN Yinge[1]，WEN Fengliang[1，2，3]，XIAO Ran[1，2，3]，ZHANG Yangdong[1]，ZHENG Nan[1]，ZHAO Yankun[4]，ZHANG Hongyan[4]，OU Guobing[5]，WANG Jiaqi[1]，NIU Tianjiao[1，2，3*]

[1]Beijing Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine，Chinese Academy of Agricultural

Sciences，National Market Supervision Administration Key Laboratory（Digital Intelligent Monitoring Technology for Dairy Quality），Beijing 100193
[2]Mengniu Fresh Milk Products（Tianjin）Co.，Ltd.，Tianjin 301700
[3]Inner Mongolia Mengniu Dairy（Group）Co.，Ltd.，Hohhot Inner Mongolia 011500
[4]Institute of Quality Standards & Testing Technology for Agro-Products, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi Xinjiang 830091
[5]Xinjiang Xiyuchun Dairy Co.，Ltd.，Changji Xinjiang 831201

Abstract：[Objective] This study systematically investigated the effects of different heat treatment conditions on milk flavor and the degree of the Maillard reaction. [Method] Raw milk，10 indirect sterilization processes（including three holding times：2 s，15 s，30 min and ten temperatures：63~135 ℃），and a direct sterilization process（130 ℃/0.5 s）were established. The effects of heat treatment intensity on dairy product quality were comprehensively evaluated using electronic nose flavor analysis，furosine，and lactulose content determination. [Result] The electronic nose effectively distinguished the flavor profiles of different heat treatment groups. The direct sterilization process showed significant flavor differences compared to other groups. Notable flavor differences were also observed between the（72~90 ℃）/15 s and（95~122 ℃）/15 s indirect sterilization processes，with the main volatile differential compounds being sulfides，aromatic components，and nitrogen oxides. The contents of furosine and lactulose increased with rising temperature，showing a sharp rise particularly at 135 ℃/15 s，indicating severe heat damage. In contrast，the direct sterilization process（130 ℃/0.5 s）effectively inhibited the formation of Maillard reaction products，with furosine and lactulose contents falling between those of the 90~95 ℃/15 s and 72~80 ℃/15 s processes，respectively. [Conclusion] The direct sterilization process achieves sterilization and extends shelf life while significantly controlling heat damage and retaining favorable flavor，making it suitable for producing high-quality UHT milk. Low-temperature indirect sterilization processes，with low thermal load and minimal flavor changes，are suitable for pasteurized milk. Medium-temperature processes are applicable for extended shelf life（ESL）dairy products. This research provides a theoretical basis and technical support for optimizing dairy heat treatment processes to balance sterilization effectiveness with flavor quality.

Keywords：heat treatment intensity；furosine；lactulose；flavor；electronic nose

中国乳业线上阅读