不同热处理对牛乳游离单糖含量的影响

齐英杰[1, 4]，肖　然[2, 3]，杜　爽[2, 3]，张红艳[5]，张养东[1, 4]，郑　楠[1, 4]，赵艳坤[5]，王加启[1, 4]，牛天娇[2, 3*]

1 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，农业农村部奶及奶制品质量安全控制重点实验室，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，北京 011500
4 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
5 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

摘　要：[目的]本研究旨在评估直接加热式与间接加热式杀菌工艺对牛乳中游离单糖含量及组成的动态影响，以弥补现有研究在两种加热方式比较方面的不足。[方法]采用液相色谱–质谱联用（LC–MS）技术定量检测阿拉伯糖、半乳糖、甘露糖、核糖、木糖、葡萄糖和岩藻糖的含量，并通过单因素方差分析（ANOVA）、Tukey事后检验、主成分分析（PCA）及层次聚类进行统计学和多变量解析。[结果]热处理显著改变了单糖分布，半乳糖、甘露糖、核糖及岩藻糖含量随温度升高呈剂量依赖性降低（均$p<0.01$）；葡萄糖在75 ℃时显著增加75.0%[（37 182.40 ± 1 063.18）ng/mL]，在122 ℃和130 ℃时分别下降8.2%和7.3%。层次聚类分析显示，130 ℃组与75 ℃组相似性较高，而与122 ℃组分离显著，表明短时高温可抑制美拉德反应初期产物积累并减少热敏感单糖的过度降解。[结论]本研究首次揭示了直接与间接杀菌工艺对生牛乳游离单糖含量的影响，为探讨热加工过程中乳糖降解及单糖转化机制提供了新的实验数据，并为乳制品加工工艺优化提供了科学依据。

关键词：生牛乳；直接杀菌工艺；间接杀菌工艺；游离单糖；液相色谱–质谱联用（LC–MS）

文章编号：1671–4393（2025）11–0007–08　　DOI:10.12377/1671–4393.25.11.02

0 引言

牛奶作为一种营养成分完备且富含生物活性物质的食品，由哺乳动物分泌，在满足不同人群膳食需求方面发挥着不可替代的作用。牛奶中含有均衡的必需宏量营养素（蛋白质、脂肪和碳水化合物）、微量营养素（维生素和矿物质）以及多种生

基金项目：国家重点研发计划（2022YFD1301004）；中国农业科学院科技创新工程（ASTIP–IAS12）；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：齐英杰（1999–），男，内蒙古赤峰人，蒙古族，硕士，研究方向为牛奶品质调控；
肖　然（1988–），女，黑龙江哈尔滨人，博士，研究方向为乳制品加工；
杜　爽（1993–），女，湖北宜昌人，硕士，中级工程师，研究方向为乳制品加工；
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；
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；
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（1978–），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

物活性化合物，这些成分共同支持人体生长、发育和整体健康[1, 2]。除传统的营养功能外，牛奶中的生物活性成分如低聚糖、肽类和脂肪酸，已被证明具有免疫调节、抗炎和益生元作用，突显了其在功能性食品中的重要地位[3, 4]。

碳水化合物是牛奶的第三大成分，对其营养特性和生物功能贡献显著。在人乳中，碳水化合物约占总营养成分的7%，而在其他物种中，这一比例根据泌乳阶段和动物类型不同通常介于2%~6%[5, 6]。乳糖作为一种二糖，占据了牛奶中碳水化合物的主导地位，但也存在微量的游离单糖，如葡萄糖和半乳糖[7]。此外，牛奶中还含有低聚糖，特别在人乳中，这些低聚糖在促进有益肠道菌群生长、增强免疫反应及防止病原体粘附等方面扮演着关键角色[8, 9]。这些功能特性近年来引起了广泛关注，彰显了牛奶碳水化合物多样化的生物学作用。

作为碳水化合物的基本组成单位，游离单糖不仅直接提供能量，而且在生物合成过程中扮演着关键角色。虽然牛奶中游离单糖的含量较低，但由于其无需经过酶促水解便能迅速被利用，因此在营养和代谢上具有独特意义[10]。此外，牛奶中游离单糖的组成还可作为热加工、微生物活动或掺假行为的指示，为牛奶质量与安全性提供重要信息[11, 12]。作为构成碳水化合物的最基本单位，这些简单糖类在细胞代谢中发挥核心作用，是主要的能量来源及各类生物途径的结构成分[13~16]；它们不仅参与糖酵解等代谢过程，还作为构建更复杂碳水化合物（如低聚糖、多糖和糖结合物）的基石，而这些复杂碳水化合物在能量储存和细胞信号传导等多种生物功能中同样发挥着重要作用[12, 17, 18]。

近来，更多研究开始关注不同加工方式对生乳中碳水化合物的影响。Fox和Oftedal等[1, 2]研究表明，传统热处理如巴氏杀菌和超高温（UHT）处理通常能够保持乳糖的稳定性，而游离单糖和低聚糖则更易受到热诱导转化的影响。例如，Neves等[19]指出，游离单糖在热处理中具有较高的活性，导致其组分发生显著变化；Bai等[20]的研究则显示，在短时高温条件下，乳糖的水解反应受到明显抑制，因此热处理后的牛乳中游离单糖和低聚糖的相对比例更接近于未经加工的生乳状态，较好地保留了生乳中糖类原有的分布特征。然而，目前关于不同加工方式，特别是直接与间接加热对牛乳糖类整体影响的研究仍然较为缺乏。

当前，对于不同加热杀菌方式对生牛乳中游离单糖含量的影响研究仍较为有限，因直接杀菌工艺和间接杀菌工艺在牛奶加工过程中应用普遍，其对游离单糖的影响值得深入探讨。因此，本研究旨在系统研究直接杀菌工艺和间接杀菌工艺对牛乳中游离单糖含量及组成的变化，进一步揭示直接杀菌工艺和间接杀菌工艺对乳中单糖含量变化性的综合影响，从而为乳制品加工工艺的优化和及牛奶营养品质和安全性提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本试验所用样品均直接来源于工厂生产现场，采自同一批次的奶罐车牛乳，并分别经过工厂内采用的直接杀菌工艺和间接杀菌工艺。所有样品均由工厂内部生产设备直接完成热处理。

1.2 试验设计及样品制备

本试验旨在评估直接杀菌工艺和间接杀菌工艺对生牛乳中游离单糖含量及组成的影响。所有牛乳样品均采自同一批次，并随机分为三组：RAW组（生乳对照组，未进行热处理）、直接加热杀菌组（在130 ℃/0.5 s）以及间接加热杀菌组（分别在75 ℃/15 s、122 ℃/4 s和137 ℃/4 s）使用APV多用途杀菌机中试设备[SPX FLOW，斯必克（上海）流体技术有限公司]加工。每个处理条件下均制作3 个独立样品，每个样品重复检测3 次，热处理后样品立即置于−80 ℃下冷冻保存，并迅速运送至实验室进行后续游离单糖检测分析。

中国乳业线上阅读

1.3 试验试剂

单糖标准品（包括核糖、木糖、阿拉伯糖、岩藻糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖）：纯度≥99%，北京索拉宝生物科技有限公司；1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮（1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone，PMP），中国北京Solarbio公司；甲醇、乙腈、三氟乙酸和二氯甲烷，美国Fisher Scientific；超纯水，使用Milli-Q纯化系统（Millipore，美国Bedford，MA）制备。

1.4 试验仪器

液相色谱-串联质谱（LC-MS）仪（SCIEX，QTRAP 4500+），AB SCIEX公司；色谱柱（Waters，CSH-C18），Waters公司；分析天平（Mettler-Toledo，AL204），Mettler-Toledo仪器公司；超纯水系统（Millipore，Milli-Q），Millipore公司；高速制冷离心机（Hitachi，CR22G），Hitachi公司；多管振荡混合器（杭州MIO，DMT-2500），杭州MIO仪器有限公司；移液器，北京京科瑞丰科学仪器有限公司；离心管，Corning Life Sciences公司；电控恒温水浴锅（DK-S22），上海京虹实验设备有限公司；多用途杀菌机中试设备（APV，SPX FLOW），斯必克（上海）流体技术有限公司。

1.5 样品预处理

将储存在-80 ℃下的奶样品在4 ℃下解冻后进行分析。使用齐英杰（Qi，2025；接受但未发表）等方法进行游离单糖的前处理及检测。具体为：每个样品，取1 mL解冻后的生乳，与4 mL乙腈混合于离心管中进行蛋白沉淀，混合后振荡1 min，然后在4 ℃下以13 000 r/min离心4 min。随后，将1 mL上清液转移至新管中进行衍生化处理：加入0.5 mL氨水和2 mL 0.5 mol/L PMP溶液，并在恒温水浴锅中于70 ℃条件下水浴90 min。衍生化完成后，通过加入5 mL二氯甲烷和5 mL蒸馏水进行清洗，充分振荡以确保两相分离。该清洗步骤重复3 次，保留上层水相用于LC-MS分析。

各单糖的校准标准品均采用与奶样品相同的预处理步骤（包括蛋白沉淀、衍生化和清洗），以确保处理一致性。标准溶液的浓度分别设定为500、200、100、50、10和5 ng/mL，并据此构建校准曲线以定量奶中的游离单糖。所有标准溶液均储存在-20 ℃下的琥珀色小瓶中，以保持稳定性并减少降解。

1.6 LC-MS 参数

1.6.1 色谱参数

色谱柱：Waters CSH-C18；柱温：50℃；流速：0.2 mL/min；进样体积：3 μL。

流动相：A相：水（0.1%甲酸+5 mmol/L甲酸铵）；B相：乙腈；洗脱梯度：详见表1。

表 1 洗脱梯度程序

时间（min）	流速（mL/min）	%B（有机相）	曲线
0.00	0.300	19.0	8
4.00	0.500	19.0	8
15.00	0.300	26.0	0
15.10	0.300	95.0	0
16.00	0.300	95.0	0
16.10	0.300	19.0	0
19.00	0.300	19.0	0

1.6.2 质谱参数

色谱分离采用Waters CSH-C18色谱柱，在50 ℃条件下进行，初始流速为0.3 mL/min，进样体积为3 μL。流动相A为含有0.1%甲酸和5 mmol/L甲酸铵的水，流动相B为高纯度乙腈。梯度洗脱程序详见表1。质谱检测采用正离子电喷雾离子化（+ESI），喷雾电压为+4 800 V。雾化气（GS1）和辅助气（GS2）分别设定为55 psi和60 psi，碰撞气体（CAD）维持在中等设置。离子源温度设定为500 ℃，帘气（CUR）为20 psi，进样电位（EP）为10 V，碰撞池出口电位（CXP）为2.0 V。

1.6.3 MRM通道

游离单糖的检测采用三重四极杆质谱（Triple

中国乳业线上阅读

Quadrupole MS）在正电喷雾电离（+ESI）模式下的多反应监测（MRM）进行。MRM 转itions 经过优化，以实现对各单糖高灵敏度和高特异性的检测。

MRM 通道参数（包括Q1和Q3质量数、停留时间（Dwell Time）、去簇电位（DP）和碰撞能量（CE））详见表2。

表 2 8 种单糖的离子对参数

Q1 质量	Q3 质量	停留时间（ms）	化合物名称	DP（V）	CE（V）
495.200	175.000	50	鼠李糖 –1	35	35
495.210	241.200	50	鼠李糖 –2	35	30
495.220	175.100	50	岩藻糖 –1	35	30
495.201	241.210	50	岩藻糖 –2	35	30
481.200	175.000	50	木糖 –1	35	35
481.210	187.200	50	木糖 –2	35	32
481.201	175.010	50	阿拉伯糖 –1	35	32
481.201	187.210	50	阿拉伯糖 –2	32	32
511.200	175.030	50	甘露糖 –1	35	30
511.202	217.000	50	甘露糖 –2	35	30
511.210	175.020	50	葡萄糖 –1	35	35
511.201	217.210	50	葡萄糖 –2	35	30
511.220	175.010	50	半乳糖 –1	35	30
511.200	217.100	50	半乳糖 –2	35	30
481.200	175.000	50	核糖 –1	35	30
481.210	187.220	50	核糖 –2	35	30

每种化合物均采用两个MRM转itions（定量离子和定性离子）进行监测，以确保准确定量和目标物鉴定。这些转itions经过优化，以获得最高信号强度并减少背景干扰。DP和CE参数针对每个转itions进行了调整，以增强碎片化效率，同时保持离子稳定性。

1.7 数据分析

所有试验数据均采用SPSS软件（版本26.0）进行统计分析，数据以“均值±标准差（SD）”表示。峰面积数据采用SCIEX OS–MQ软件的内置功能进行积分和处理，并采用单因素方差分析（One–Way ANOVA）比较不同热处理条件下生牛乳中游离单糖含量的差异，使用Tukey事后检验进行多重比较。统计检验的显著性水平设定为$p<0.05$。所有图表均采用Python（版本3.9.12）及相关可视化库生成。

2 结果与讨论

本试验针对直接加热杀菌、间接加热杀菌及生乳（对照组）对牛乳中游离单糖含量的影响进行了检测，系统测定了8 种游离单糖（阿拉伯糖、半乳糖、甘露糖、核糖、木糖、葡萄糖、岩藻糖）含量（表3），并绘制了相应的分层聚类树状图与堆叠条形图（图1）、单糖含量柱状图（图2）以及主成分分析（PCA）图（图3）。结果显示，乳中不含鼠李糖，与RAW组相比，所有测定的单糖在不同热处理条件下均表现出显著差异（$p<0.01$），图2更详细的展示了各单糖的绝对含量。生乳中含量最高的半乳糖（超过40 000 ng/mL）在所有热处理后均出现明显下降（$p<0.01$），而葡萄糖在加热后均出现显著上升（$p<0.01$），但直接加热杀菌130 ℃处理后增加的最少；在RAW组中，阿拉伯糖含量为

表 3 不同热处理条件下牛乳中游离单糖浓度

项目	0.0（n=3，ng/mL）	75.0（n=3，ng/mL）	122.0（n=3，ng/mL）	130.0（n=3，ng/mL）	136.0（n=3，ng/mL）	*p* 值
阿拉伯糖	289.45 ± 3.21	331.20 ± 5.89	291.87 ± 19.47	313.87 ± 14.74	328.54 ± 4.56	0.002
半乳糖	40 810.32 ± 120.45	34 355.33 ± 701.62	35 261.20 ± 1 448.69	33 536.27 ± 1 062.62	34 890.65 ± 98.76	0.001
甘露糖	12 838.75 ± 36.21	9 002.13 ± 143.39	8 824.67 ± 451.12	9 683.20 ± 137.82	10 420.34 ± 28.45	0.001
核糖	2 752.10 ± 12.34	2 131.02 ± 48.09	2 123.59 ± 60.51	2 222.46 ± 36.10	2 443.89 ± 9.87	0.001
木糖	2 306.45 ± 15.67	2 391.47 ± 21.39	2 247.33 ± 51.50	2 430.67 ± 40.27	2 496.78 ± 11.23	0.001
葡萄糖	21 250.15 ± 75.43	37 182.40 ± 1 063.18	34 121.60 ± 1 056.80	34 492.53 ± 97.14	32 172.67 ± 88.90	0.001
岩藻糖	2 270.22 ± 18.54	2 095.60 ± 30.93	1 929.20 ± 53.04	2 020.93 ± 28.06	2 035.10 ± 14.32	0.001

中国乳业线上阅读

（290.00±0.00）ng/mL，加热后均呈现显著上升趋势（p= 0.002），在间接加热75 ℃处理后达到最高至（331.20±5.89）ng/mL。其他单糖如半乳糖、甘露糖、核糖、木糖、葡萄糖和岩藻糖也随温度变化呈现不同程度的显著差异（p< 0.01），表明不同的加热温度和杀菌方式对乳中游离单糖的含量有显著影响。

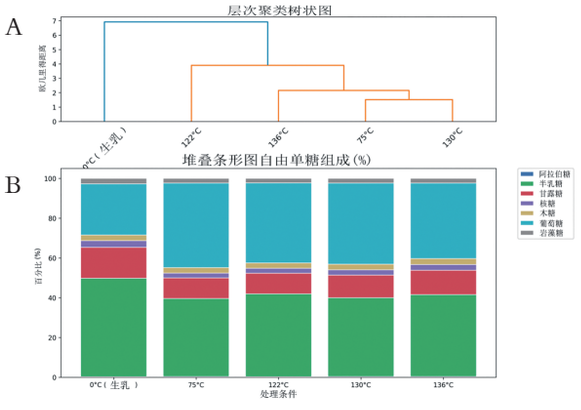


图 1 不同热处理下游离单糖的分层聚类和堆叠条形图

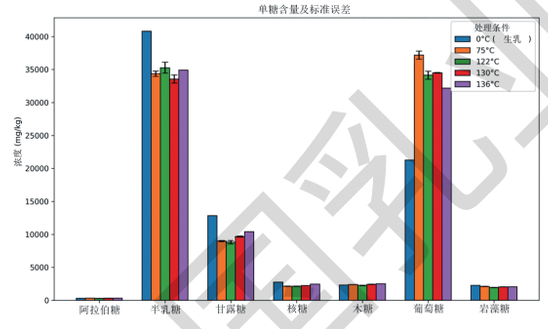


图 2 不同温度下游离单糖含量柱状图

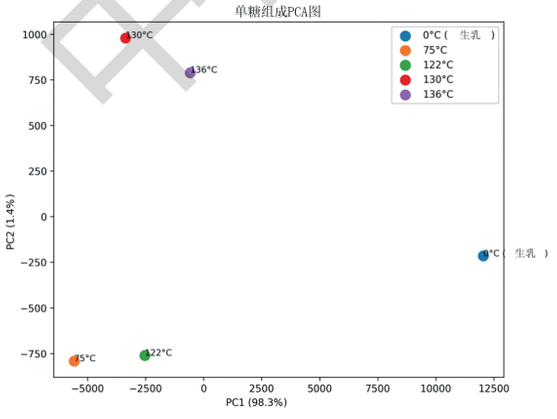


图 3 不同热处理下游离单糖的 PCA 图

图1A的分层聚类树状图显示，RAW组（0 ℃）与所有热处理组（75、122、130、136 ℃）明显分离，表明热处理显著改变了单糖组成。在热处理组中，75 ℃与130 ℃处理组的聚类距离最近，而122 ℃组独立成簇（图1A）。堆叠条形图（图1B）进一步显示，半乳糖在RAW组中占比最高（>90%），热处理后其比例显著下降，而葡萄糖比例随温度升高呈现先增后降的趋势。

图2的单糖含量柱状图表明，葡萄糖在75 ℃处理组中达到峰值[（37 182.40±1 063.18）ng/mL]，较RAW组（21 250.15±75.43）ng/mL增加75.0%，但在更高温度（122℃、136℃）下增幅减弱。半乳糖含量则随温度升高持续下降，从RAW组的（40 810.32±120.45）ng/mL降至136 ℃组的（34 890.65±98.76）ng/mL（降幅14.5%）。岩藻糖在所有热处理组中均显著减少（p< 0.01），但130 ℃组的保留率（89.0%）高于136 ℃组（89.6%），提示短时高温对热敏感单糖的保护作用。

图3的PCA分析显示，第一主成分（PC1）解释了总变异的98.3%，主要受半乳糖（负向载荷）和葡萄糖（正向载荷）的驱动；第二主成分（PC2）仅占1.4%，与阿拉伯糖和岩藻糖的波动相关。所有热处理组沿PC1轴与RAW组显著分离（图3），反映了半乳糖消耗与葡萄糖积累的核心特征。

本研究通过对比直接加热（130 ℃/0.5 s）与间接加热（75 ℃/15 s、122 ℃/4 s、137 ℃/4 s）杀菌工艺对牛乳游离单糖的影响，揭示了热加工过程中单糖转化的特殊动态。与生乳相比，这两种杀菌方式均显著降低了半乳糖、阿拉伯糖、甘露糖、核糖及岩藻糖的含量（均p< 0.01），而葡萄糖含量则显著升高（p< 0.01）。这一现象与Neves等[19]的结论相符，即游离单糖在热处理中活性较高；然而，本研究进一步明确了不同热处理工艺对单糖含量变化的影响。

本研究系统阐明了牛乳在不同热处理条件下游离单糖的动态转化过程，揭示了温度与时间相互作

中国乳业线上阅读

用对单糖稳定性的调控机制，为理解热加工中糖类行为提供了新视角。与生乳相比，所有热处理显著降低了半乳糖、甘露糖、核糖和岩藻糖的含量（$p<0.01$），而葡萄糖则显著升高（$p<0.01$）。值得注意的是，130 ℃/0.5 s 的直接加热处理在单糖保留与降解之间实现了独特的动态平衡，显示出其在乳制品热加工优化中的潜在应用价值。

在75 ℃/15 s的间接加热条件下，葡萄糖含量增加了75.0%，这一现象与乳糖的部分水解及结合态碳水化合物的热诱导释放机制一致，已有模型研究亦曾报道此类反应路径[21]。然而，在更高温度（122 ℃和137 ℃）处理下，葡萄糖积累明显减弱，提示此时可能发生竞争性的降解反应，尤其是美拉德反应的增强。130 ℃组葡萄糖水平中等（34 492.53 ± 97.14）ng/mL，说明短时高温能够抑制晚期糖基化终产物（AGEs）生成，同时保留初期水解产物。此特征与 Neves 等[19]在UHT乳中观察到的局部化学反应区域机制一致，但本研究进一步将其拓展至含乳糖体系。

半乳糖是生乳中最丰富的游离单糖（>40 000 ng/mL），在所有热处理组中均表现出温度依赖性降低。75 ℃组的半乳糖保留率最低（84.2%），而130 ℃组的保留率反而较高（82.2%），可能与加热过程中β−半乳糖苷酶等酶类迅速失活以及短时间内糖−蛋白交联反应受限有关[20]。岩藻糖同样表现出热降解趋势，但在130 ℃组的保留率（89.0%）高于137 ℃组（89.6%），进一步强调短时高温对热敏感单糖的保护作用。这些现象共同支持“热猝灭”（Thermal Quenching）机制，即瞬时热冲击可有效避免酶促或氧化降解的持续发生。

多变量分析揭示了单糖重构的关键主导因素。图1A的分层聚类分析显示，RAW组与热处理组完全分离，且130 ℃组与75 ℃组之间距离最小。尽管二者处理参数差异显著，但可通过不同机制解释其谱系相似性：低温长时间处理促进乳糖的逐步水解，而短时高温处理可在有限时间内实现部分水解并抑制进一步降解。图3的PCA结果也验证了这一趋势，PC1解释了98.3%的变异，主要由半乳糖与葡萄糖的变化驱动；而PC2仅解释1.4%的变异，主要涉及阿拉伯糖与岩藻糖。130 ℃与75 ℃组在PCA空间中的接近位置提示，影响单糖变化的关键因素并非累积热负荷，而是温度阈值对反应路径的主导作用。122 ℃组因其“中等强度但持续时间较长”的特性，既未有效释放糖类，也未充分保护其稳定性，导致其在聚类与PCA中均形成独立分离。

但阿拉伯糖的变化表现出非线性趋势，在75 ℃组达到峰值（331.20 ± 5.89 ）ng/mL，高温处理后反而下降。这提示其可能具有温度选择性释放机制：中等加热促进结合态阿拉伯糖从糖复合物中释放，而高温可能诱导其氧化或聚合。这种复杂反应路径突显了热加工参数精细控制的重要性，特别是在130 ℃与137 ℃这类仅差7 ℃的处理条件下，糖类稳定性已发生显著差异，反映出反应动力学上的显著转变。

尽管本研究未检测美拉德反应强度的相关指标，但游离单糖的变化仍表明，热处理工艺可通过局部化学反应影响乳制品的感官与功能特性。例如单糖的降解可能削弱其免疫调节潜力[20]，而葡萄糖的增加可以提升甜度。130 ℃直接加热工艺在单糖变化过程中呈现动态平衡，其短时高温特性既能减少热敏感单糖的持续降解，又可抑制副反应过度进行。这一发现为乳制品加工中糖类转化动力学的精准调控提供了新依据。

3 结论

本研究系统评估了直接加热与间接加热杀菌工艺对生牛乳中游离单糖含量的影响。试验结果表明，与生乳相比，两种杀菌工艺均显著降低了半乳糖、甘露糖、核糖及岩藻糖的含量（均$p<0.001$），而葡萄糖则显著升高（$p<0.001$），仅阿拉伯糖和木糖未表现出统计学显著性差异。这一结果表明，不同杀菌工艺在促进乳糖部分水解和调控游离单糖转化过程中存在显著差异，进而可能影响乳品的风味

中国乳业线上阅读

和营养特性。本研究首次揭示，130 ℃直接杀菌处理对生乳中游离单糖含量的影响，其短时特性既能抑制美拉德反应初期产物的积累，又可减少热敏感单糖的过度降解，从而为乳制品加工工艺的优化提供了关键参数同时为进一步深入探讨乳品热加工对碳水化合物稳定性及其综合品质的影响奠定了基础。

参考文献

[1] Fox P F. Milk：An overview[J]. Milk proteins，2008：1–54.

[2] Oftedal O T. The evolution of milk secretion and its ancient origins[J]. Animal，2012，6（3）：355–368.

[3] Renzone G，Arena S，Salzano A M，et al. Proteomic characterization of nonenzymatic modifications induced in bovine milk following thermal treatments[M]. Proteomics in Food Science，2017：241–260.

[4] Newburg D S，Neubauer S H. Carbohydrates in milk[J]. Handbook of milk composition，1995：349–273.

[5] McSweeney P，Fox P. Advanced Dairy Chemistry：Volume 3：Lactose，Water，Salts and Minor Constituents[M]. Cham：Springer Nature，2022.

[6] Englyst K N，Englyst H N. Carbohydrate bioavailability[J]. British Journal of Nutrition，2005，94（1）：1–11.

[7] Szilagyi A. Digestion，absorption，metabolism，and physiological effects of lactose[M]. Lactose. Elsevier. 2019：49–111.

[8] Chaturvedi P，Warren C D，Altaye M，et al. Fucosylated human milk oligosaccharides vary between individuals and over the course of lactation[J]. Glycobiology，2001，11（5）：365–372.

[9] Ruiz–Moyano S，Totten S M，Garrido D A，et al. Variation in consumption of human milk oligosaccharides by infant gut–associated strains of Bifidobacterium breve[J]. Applied and environmental microbiology，2013，79（19）：6040–6049.

[10] Chandel N S. Carbohydrate metabolism[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology，2021，13（1）：a040568.

[11] Singh P，Gandhi N. Milk preservatives and adulterants：processing，regulatory and safety issues[J]. Food Reviews International，2015，31（3）：236–261.

[12] Xu B，Li S，Ding W，et al. From structure to function：A comprehensive overview of polysaccharide roles and applications[J]. Food Frontiers，2025，6（1）：15–39.

[13] El Khadem H. Carbohydrate chemistry：monosaccharides and their oligomers[M]. Amsterdam：Elsevier，2012.

[14] Chaudhary S，Jain V P，Jaiswar G.The composition of polysaccharides：monosaccharides and binding，group decorating，polysaccharides chains[M]//Innovation in nano–polysaccharides for eco–sustainability. Elsevier，2022：83–118.

[15] Nuño J C，S á nchez–Valdenebro I，P é rez–Iratxeta C，et al. Network organization of cell metabolism：monosaccharide interconversion[J]. Biochemical Journal，1997，324（1）：103–111.

[16] Khowala S，Verma D，Banik S P. BIOMOLECULES：（INTRODUCTION，STRUCTURE & FUNCTION）[J]. Indian Institute of Chemical Biology，2008：3–92.

[17] Chandel N S. Glycolysis[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology，2021，13（5）：a040535.

[18] Tzia C，Giannou V，Lebesi D，et al. Chemistry and functional properties of carbohydrates and sugars（monosaccharides，disaccharides，and polysaccharides）[J]. Sweeteners. Nutritional aspects，applications，and production technology，2012：11–45.

[19] Neves L N O，de Oliveira M A L. Effects of enzymatic lactose hydrolysis on thermal markers in lactose–free UHT milk[J]. Journal of Food Science and Technology，2020，57（9）：3518–3524.

[20] Bai G，Cheng L，Peng L，et al. Effects of ultra - high - temperature processes on metabolite changes in milk[J]. Food Science & Nutrition，2023，11（6）：3601–3615.

[21] Jensen S，Jansson T，Eggers N，et al. Storage–induced changes in the sensory characteristics and volatiles of conventional and lactose–hydrolyzed UHT processed milk[J]. European Food Research and Technology，2015，240（6）：1247–1257.

Effects of Different Heat Treatments on the Content of Free Monosaccharides in Bovine Milk

QI Yingjie[1，4]，XIAO Ran[2，3]，DU Shuang[2，3]，ZHANG Hongyan[5]，ZHANG Yangdong[1，4]，ZHENG Nan[1，4]，ZHAO Yankun[5]，WANG Jiaqi[1，4]，NIU Tianjiao[2，3*]

中国乳业线上阅读

[1]Institute of Animal Sciences，Chinese Academy of Agricultural Sciences；Key Laboratory of Quality and Safety Control for Milk and Dairy Products，Ministry of Agriculture and Rural Affairs，Beijing 100193
[2]Mengniu Fresh Dairy Products（Tianjin）Co.，Ltd.，Tianjin 301700
[3]Inner Mongolia Mengniu Dairy（Group）Co.，Ltd.，Beijing 011500
[4]Key Laboratory of Dairy Quality and Digital Monitoring Technology，State Administration for Market Regulation，Beijing 100193
[5]Institute of Quality Standards & Testing Technology for Agro-Products, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences，Urumqi Xinjiang 830091

Abstract：[Objective] This study aimed to evaluate the dynamic effects of direct and indirect sterilization processes on the content and composition of free monosaccharides in bovine milk，addressing the current research gap in comparing these two heating methods.[Method] The contents of arabinose，galactose，mannose，ribose，xylose，glucose，and fucose were quantitatively analyzed using liquid chromatography-mass spectrometry（LC-MS）. Statistical evaluation was performed via one-way ANOVA，Tukey's post-hoc test，principal component analysis（PCA），and hierarchical clustering for multivariate analysis.[Result] Heat treatment significantly altered the monosaccharide profile：the contents of galactose，mannose，ribose，and fucose decreased in a dose-dependent manner with increasing temperature（all $p<0.01$）. Glucose content increased significantly by 75.0% [（37 182.40±1 063.18）ng/mL] at 75 ℃ but decreased by approximately 8.2% and 7.3% at 122 ℃ and 130 ℃，respectively. Hierarchical clustering analysis further confirmed the dominant role of temperature in regulating monosaccharides，showing higher similarity between the 130 ℃ and 75 ℃ groups，while the 122 ℃ group was distinctly separated. This indicates that short-time high-temperature treatment can inhibit the accumulation of early Maillard reaction products and reduce excessive degradation of heat-sensitive monosaccharides.[Conclusion] This study was the first to reveal the effects of direct and indirect sterilization processes on the free monosaccharide content in raw bovine milk. It provided new experimental data for understanding the mechanisms of lactose degradation and monosaccharide transformation during thermal processing and offers a scientific basis for optimizing dairy processing technologies.

Keywords：raw bovine milk；direct sterilization process；indirect sterilization process；free monosaccharides；liquid chromatography-mass spectrometry（LC-MS）

中国乳业线上阅读