热处理强度对乳中短链脂肪酸谱图的影响研究

陆松翠[1]，肖 然[2, 3]，杜 爽[2, 3]，赵艳坤[4]， 张养东[1]，郑 楠[1]，王加启[1]，张红艳[4]，欧国兵[5]，牛天娇[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]为探究热处理强度对乳中短链脂肪酸（SCFAs）含量和组成的影响。[方法]本研究以同一批次生乳，经过间接式热处理（75 ℃/15 s、122 ℃/4 s、137 ℃/4 s）和直接式热处理（130 ℃/0.5 s）加工的乳为研究对象，采用气相色谱–质谱（GC–MS）检测乳中SCFAs和游离短链脂肪酸（FSCFAs）含量，并对其含量进行差异分析。[结果]不论是直接式热处理和间接式热处理均会导致生乳中总短链脂肪酸（TSCFAs）和总游离短链脂肪酸（TFSCFAs）不可避免的损失；在FSCFAs水平上，热处理改变了各FSCFAs的比例，尤其是C2:0、C3:0和C5:0，可能作为区分生乳与热处理乳的潜在标志物。[结论]本研究揭示了乳中SCFAs和FSCFAs在不同热处理条件下的变化规律，丰富热处理强度对乳中SCFAs的研究数据，为乳品品质评价、质量安全控制等提供了参考依据。

关键词：热处理；短链脂肪酸（SCFAs）；牛奶；游离短链脂肪酸（FSCFAs）

文章编号：1671–4393（2025）11–0015–09 DOI:10.12377/1671–4393.25.11.03

0 引言

长期以来，牛奶被认为是新生儿在生命早期直到断奶的唯一营养来源，含有各种微量营养素和活性物质，被认为是自然界中最完美的食物之一[1, 2]。牛奶具有独特的风味和各种健康益处，如抗氧化[3]、抗炎[4]、抗骨质疏松症[5]等。随着消费

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：陆松翠（1999–），女，贵州安顺人，硕士，研究方向为奶牛营养与牛奶质量安全；
肖 然（1988–），女，黑龙江哈尔滨人，博士，工程师，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；
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；
张养东（1982–），男，山东济宁人，博士，研究员，研究方向为奶牛营养与牛奶品质；
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；
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；
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。
*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。

中国乳业编辑阅读

者健康意识的增强，乳制品的消费量有所增长。然而，这些营养化合物也是有害微生物的良好底物，有害微生物不仅对人体健康有害，而且使牛奶变质，因此，热处理是牛奶商品化前微生物控制不可或缺的重要措施之一。虽然热处理对某些营养物质造成了一定的损失，但能够保证牛奶安全的同时延长其保质期[6]，因此热加工在乳制品行业中得到了广泛运用。热处理根据加热方式可分为直接式和间接式两种：直接式加热是用蒸汽直接对物料进行热杀菌，而间接式加热是以板、螺旋式管换热器对液体食品进行热交换杀菌。如现在常用的巴氏杀菌、高温灭菌和超高温灭菌等均通过热交换杀菌的方式杀死乳中潜在的致病微生物[7~9]。根据热处理强度的不同，生乳的生物、物理和化学状态会受到不同程度的影响，产生不同的风味、口感[10]，也会导致生乳营养价值降低，如一些维生素、必须脂肪酸和其他活性物质的损失[11]。热加工会影响牛奶的特性并改变牛奶代谢物的组成，例如，巴氏杀菌和超高温灭菌牛奶（UHT灭菌乳）的乳糖含量与生牛乳相似，但十六烷酸和十八烷酸等饱和脂肪酸含量增加[12]。Raynal-Ljutovac等[13]研究表明，热处理主要影响乳脂球膜（Milk Fat Globule Membrane，MFGM）和许多热敏性蛋白成分，从而改变脂肪球的凝聚和乳化。脂肪酸是乳脂的重要组成成分，同样受到热处理的影响。Gathercole等[14]通过增加巴氏杀菌到UHT处理的热处理强度发现，随着热处理强度的变化，乳中游离脂肪酸（Free Fatty Acid，FFA）（C4:0-C18:0、C18:1）的浓度降低了30%~60%，此外，还发现FFA浓度的降低与温度的升高成正比。因此，具有加热时间短、接触面积大、对热敏物质影响较小的一种新型的热加工方式（蒸汽浸入式直接杀菌）出现在人们的视野中，直接瞬时热杀菌通过蒸汽浸入式直接对物料进行热杀菌，高温处理在瞬时进行，在一定程度上保留了牛奶中的活性物质[15，16]。然而短链脂肪酸（Short Chain Fatty Acids，SCFAs）是乳脂所独有的脂肪酸，是乳及乳制品风味的重要来源，尤其是游离短链脂肪酸（Free Short Chain Fatty Acids，FSCFAs）[17，18]，但关于热加工方式对SCFAs影响的研究有限，且主要关注的是C4:0和C6:0。因此，本试验通过气相色谱-质谱（Gas Chromatography-mass Spectrometry，GC-MS）法比较分析生乳、间接式热处理（75 ℃/15 s、122 ℃/4 s、137 ℃/4 s）和直接式热处理（130 ℃/0.5 s）乳中SCFAs含量及其组成，了解SCFAs在乳制品中的变化规律，为优化乳制品加工工艺、提高乳制品品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

异丙醇（质谱级）、正己烷（质谱级），北京汇海科仪科技有限公司；氢氧化钠（纯度≥99%）和无水乙醇，北京广达恒益科技有限公司；盐酸（纯度 ≥ 98%），上海麦克林生化科技有限公司。

SCFAs标准品：甲酸（C1:0）、乙酸（C2:0）、丙酸（C3:0）、丁酸（C4:0）和己酸（C6:0），安谱实验科技股份有限公司；异丁酸（isoC4:0）、异戊酸（isoC5:0）、3-甲基丁酸（anteisoC5:0）、戊酸（C5:0）、2-甲基戊酸（isoC6:0），北京莱伯沃德科技有限公司；3-甲基戊酸（anteiso C6:0），上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

AL204型分析天平（感量0.1 mg），美国梅特勒托利多仪器上海有限公司；Milli-Q去离子水发生器，美国Millipore公司；CR22G型落地高速冷冻离心机，日本日立中国有限公司；TRACE 1300气相色谱仪、TSQ8000质谱，Thermo Fisher赛默飞世尔科技有限公司；DB-FFAP毛细管柱（30 m×250 μm×0.25 μm），美国安捷伦科技中国有限公司；DMT-2500多管涡旋混合仪，杭州米欧仪器有限公司；移液枪，北京京科瑞丰科学仪器有限公司；带盖耐高温玻璃管，北京爱普锐晟科技有限公司；离心管，美国康宁生命科学有限公司；DK-S22型电热恒温水浴锅，上海精宏实验设备有限公司。

中国乳业线上阅读

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集

生乳采自某规模化牧场，间接式热处理（75 ℃/15 s、122 ℃/4 s、137 ℃/4 s）和直接式热处理（130 ℃/0.5 s）乳使用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，详细信息见表1。所有样品均在−80 ℃下保存至分析。

表 1 样品热加工工艺信息（n=4）

产品类型	工艺条件					
	预热温度/均质温度（℃）	均质压力（Bar）	杀菌温度（℃）	保持时间（s）	第二段冷却温度（℃）	第三段冷却温度（罐装温度）（℃）
生乳	无热加工					
间接式热处理乳（75 ℃/15 s）	65	220/40	75	15	25	8
直接式热处理乳（130 ℃/0.5 s）	72	220/40	130	0.5	20	6
间接式热处理乳（122 ℃/4 s）	70	220/40	122	4	20	10
间接式热处理乳（137 ℃/4 s）	70	220/40	137	4	20	10

1.3.2 SCFAs测定

乳中总SCFAs含量采用异丙酯化GC−MS的检测方法[19]进行测定。简而言之，将1 mL样品与50 μL内标（anteisoC6:0，2 500 μg/mL）溶液和3 mL正己烷/异丙醇（V/V，1/2）混合，以去除蛋白质并提取SCFAs。使用2%氢氧化钠异丙醇溶液和10%盐酸异丙醇溶液进行SCFAs的异丙酯化反应。使用TRACE 1300气相色谱与TSQ8000质谱仪分析SCFAs异丙酯。将1 μL SCFAs异丙酯以10:1的分流比通过分流进样口注入0.25 mm×0.20 μm×30 m的DB−1毛细管柱。柱温箱初始温度为50 ℃。保持5 min，以10 ℃/min升温至110 ℃，然后以80 ℃/min升温至280 ℃，并保持9.875 min。

乳中FSCFAs含量参考Wu等[20]方法进行测定。简而言之，1 mL生乳中加入3 mL 0.5%盐酸乙醇混合溶液、50 μL内标溶液（2 500 μg/mL，anteisoC6:0）和1 mL水，涡旋混匀，在4 ℃条件下，12 000 r/min离心20 min，去除蛋白质提取FSCFAs。使用TRACE 1300气相色谱与TSQ8000质谱仪分析FSCFAs，1 μL FSCFAs以20:1分流比注入0.25 mm×0.20 μm×30 m的DB−FFAP色谱柱。初始柱箱温度为50 ℃，保持1 min，然后以10 ℃/min升温至170 ℃并保持2 min，最后以50 ℃/min升温到240 ℃，保持9.6 min。

SCFAs和FSCFAs的进样口温度、MS离子源、四极杆和传输线分别保持在250 ℃、230 ℃、150 ℃和250 ℃，电离能量为70 eV。

1.3.3 数据统计与分析

使用Excel 2021对数据进行初步整理和分析。使用SAS 9.4 软件首先进行正态性检验（使用Shapiro−Wilk检验并结合Q−Q图进行判断）。符合正态分布的数据以“均值±标准差（SEM）”表示，后对各组进行单因素方差分析和多重比较，$P<0.05$表示有显著差异，每个试验重复6 次。使用Origin 2021进行柱状图、主成分分析（PCA）图和雷达图的绘制。

2 结果与分析

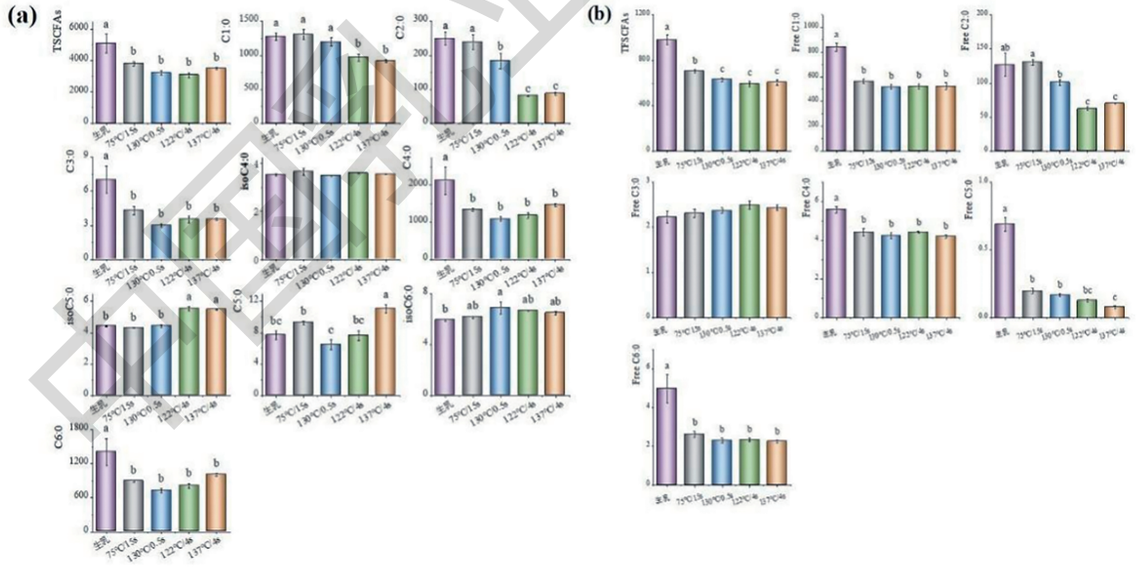
2.1 不同热处理强度对乳中 SCFAs 含量的影响

如图1和表2所示，本试验在乳中测到了C1:0、C2:0、C3:0、isoC4:0、C4:0、isoC5:0、C5:0、isoC6:0和C6:0 9 种SCFAs和C1:0、C2:0、C3:0、C4:0、C5:0和C6:0 6 种FSCFAs。前人研究发现，65 ℃/30 min杀菌没有显著降低TSCFAs浓度[21]，但当杀菌温度为75 ℃/15 s时C4:0和C6:0等SCFAs的浓度显著降低[22]，137 ℃/4 s杀菌会显著降低乳中SCFAs的浓度。在本试验中，直接式热处理（130 ℃/0.5 s）和间接式热处理（75 ℃/15 s、122 ℃/4 s和137 ℃/4 s）均会导致生乳中TSCFAs和TFSCFAs的不可避免的损失，这与以前的研究一致[23, 24]，这些研究结果表明，热处理会对生乳脂肪酸浓度造成一定的影响，推测导致TSCFAs和TFSCFAs损失可能的2 个原因：

中国乳业线上阅读

一是因为热处理和均质化处理会破坏MFGM[25]，使得甘油三酯和磷脂上结合的SCFAs被脂肪酶降解形成FSCFAs，而热处理过程导致释放出FSCFAs挥发；二是因为间接式热处理75 ℃/15 s能够有效杀灭乳中致病微生物，而间接式热处理（122 ℃/4 s和137 ℃/4 s）和直接式热处理（130 ℃/0.5 s）均能够杀灭乳中所有微生物，但间接式热处理（122 ℃/4 s）能够保留一些酶活性，而直接式热处理（130 ℃/0.5 s）能够保持一定的风味和营养物质[26]，因此导致乳中产SCFAs的菌群数量减少，最终导致TSCFAs浓度降低，进而分解产生的FSCFAs也相应减少。然而，Khan等[27]发现，在65 ° C/30 min和煮沸1 min后牛奶和水牛奶中FSCFAs增加，这与本文研究结果相反，可能是数据的表现形式不一致（绝对含量&相对含量）、热处理操作误差等导致最终结果不一致。

如图1a和表2所示，热处理对单个SCFAs的影响没有统一的变化规律。75 ℃/15 s显著降低了C3:0、C4:0和C6:0，提高了C5:0和isoC6:0；130℃/0.5s显著降低了C2:0、C3:0、C4:0、C5:0和C6:0，提高了isoC6:0；122 ℃/4 s和137 ℃/4 s均显著降低了C1:0、C2:0、C3:0、C4:0、C6:0，提高了isoC5:0、C5:0和isoC6:0。前人研究表明，C4:0和C6:0受到热处理强度的影响，75 ℃/15 s和137 ℃/4 s会降低乳中C4:0和C6:0浓度[22, 28]，在本研究中也得到了一致的结果，与生乳相比，C4:0和C6:0的浓度在热处理的作用下降低了。如图1b和表2所示，除C3:0外，其余5 种FSCFAs的浓度均随着热处理温度的升高而降低，推测一是由于FSCFAs具有高挥发性和水溶性，热处理会先影响乳中FSCFAs浓度；二是随着热处理温度的升高乳中微生物被杀灭，微生物产生的脂肪酶减少，且酶活性受到温度影响而失活，导致FSCFAs产生减少。Gathercole等[14]研究发现，牛奶样品中FFA成比例降低与热处理过程中牛奶FFA的损失或改性一致，因为FFA的浓度与热处理直接相关，表明一些脂肪酶在较低温度下处理的牛奶中仍然活跃。C4:0和C6:0释放是乳品酸败和风味变化的重要因素[29]，而



（a）TSCFAs　　（b）TFSCFAs

图1 不同热处理强度（生乳、间接式热处理（75 ℃/15 s）、直接式热处理（130 ℃/0.5 s）、间接式热处理（122 ℃/4 s）和间接式热处理（137 ℃/4 s）对乳中SCFAs含量和组成的影响

注：不同的字母表示在P< 0.05水平上存在显著差异，误差线表示“均值 ± SEM”

中国乳业生产技术

表 2 不同热处理条件对乳中 SCFAs 的影响（均值 ±SEM）　　单位：μg/mL

目标物	生乳	间接式热处理（75 ℃ /15 s）	直接式热处理（130 ℃ /0.5 s）	间接式热处理（122 ℃ /4 s）	间接式热处理（137 ℃ /4 s）	*P* 值
C1:0	1 275.56 ± 54.69^{a}	1 302.51 ± 77.79^{a}	1 194.79 ± 61.06^{a}	967.56 ± 51.63^{b}	911.8 ± 21.8^{b}	0.000 2
C2:0	249.13 ± 19.61^{a}	238.42 ± 21.77^{a}	183.18 ± 22.84^{b}	81.39 ± 1.8^{c}	87.89 ± 3.82^{c}	<0.000 1
C3:0	7.02 ± 1.21^{a}	4.31 ± 0.39^{b}	3.01 ± 0.13^{b}	3.51 ± 0.3^{b}	3.53 ± 0.09^{b}	0.001 3
isoC4:0	3.52 ± 0.03^{a}	3.64 ± 0.14^{a}	3.48 ± 0.01^{a}	3.59 ± 0.02^{a}	3.55 ± 0.02^{a}	0.566 1
C4:0	2 118.08 ± 370.69^{a}	1 338.19 ± 38.57^{b}	1 086.5 ± 53.7^{b}	1 187.41 ± 70.55^{b}	1 471.68 ± 33.98^{b}	0.006 1
isoC5:0	4.42 ± 0.02^{b}	4.31 ± 0.02^{b}	4.43 ± 0.09^{b}	5.53 ± 0.12^{a}	5.47 ± 0.03^{a}	<0.000 1
anteisoC5:0	ND	ND	ND	ND	ND	
C5:0	7.67 ± 0.57^{bc}	9.27 ± 0.22^{b}	6.49 ± 0.6^{c}	7.64 ± 0.65^{bc}	11.07 ± 0.54^{a}	0.000 1
isoC6:0	5.91 ± 0.08^{b}	6.15 ± 0.09^{ab}	6.85 ± 0.48^{a}	6.65 ± 0.07^{ab}	6.45 ± 0.13^{ab}	0.090 1
C6:0	1 400.92 ± 241.81^{a}	888.2 ± 22.03^{b}	724.94 ± 32.06^{b}	808.36 ± 42.13^{b}	1 004.89 ± 20.68^{b}	0.005 8
TSCFAs	5 072.22 ± 591.88^{a}	3 795.02 ± 137.81^{b}	3 213.66 ± 136.51^{b}	3 071.64 ± 152.33^{b}	3 506.33 ± 64.38^{b}	0.001 1
Free C1:0	840.29 ± 34.61^{a}	563.78 ± 16.55^{b}	519.45 ± 16.63^{b}	522.03 ± 21.79^{b}	524.89 ± 28.02^{b}	<0.000 1
Free C2:0	126.65 ± 17.31^{ab}	130.42 ± 4.12^{a}	100.78 ± 3.95^{b}	62.23 ± 2.9^{c}	69.96 ± 1.45^{c}	<0.000 1
Free C3:0	2.22 ± 0.13^{a}	2.31 ± 0.09^{a}	2.37 ± 0.06^{a}	2.49 ± 0.09^{a}	2.43 ± 0.06^{a}	0.352 3
Free isoC4:0	ND	ND	ND	ND	ND	
Free C4:0	5.58 ± 0.18^{a}	4.42 ± 0.2^{b}	4.24 ± 0.15^{b}	4.42 ± 0.05^{b}	4.2 ± 0.1^{b}	<0.000 1
Free isoC5:0	ND	ND	ND	ND	ND	
Free C5:0	0.69 ± 0.05^{a}	0.2 ± 0.02^{b}	0.17 ± 0.01^{b}	0.13 ± 0.01^{bc}	0.08 ± 0.01^{c}	<0.000 1
Free isoC6:0	ND	ND	ND	ND	ND	
Free C6:0	4.97 ± 0.74^{a}	2.62 ± 0.16b	2.31 ± 0.12^{b}	2.33 ± 0.09^{b}	2.25 ± 0.08^{b}	<0.000 1
TFSCFAs	980.39 ± 42.93^{a}	703.76 ± 17.83^{b}	629.32 ± 18.12^{c}	593.64 ± 24^{c}	603.81 ± 27.03^{c}	<0.000 1

注：ND，未检出；SEM，相对标准误；不同肩标的字母表示差异显著（*P*<0.05）

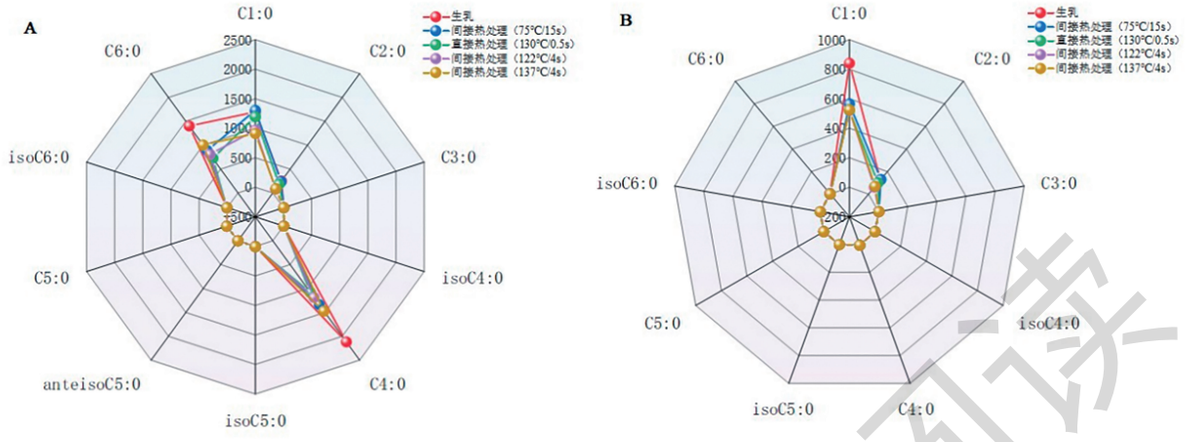
热处理在不同程度上消灭了乳中微生物大大降低了微生物代谢活性，限制了甘油三酯分解释放C4:0、C6:0和其他导致牛奶产生不良酸败味的化合物的产生，也相应地延长了品的保质期和保障了乳品质量安全，提高了消费者的接受度[21，30]。因此，不论是直接式热处理（130 ℃/0.5 s）还是间接式热处理（122 ℃/4 s和137 ℃/4 s）是通过有效地消灭了乳中微生物，抑制对牛奶感官特性有害的化合物的代谢途径，延长了牛奶保质期。

2.2 不同热处理强度对乳中 SCFAs 组成的影响

如图2所示，生乳、75 ℃/15 s、130 ℃/0.5 s、122 ℃/4 s和137 ℃/4 s乳中占主导地位的SCFAs为C1:0、C4:0和C6:0，占主导地位的FSCFAs为C1:0和C2:0，且生乳中占主导地位的SCFAs和FSCFAs含量均高于不同的热处理组。据文献报道，生乳中的FFA水平高于热处理牛奶样品，并且FFA浓度的降低与温度的升高成正比[14]。C4:0和C6:0在酸败过程中产生较多，通常与乳制品的风味变化密切相关[20，31，32]。本文研究结果显示，热处理乳中C4:0和C6:0的含量明显低于生乳，表明热处理能够有效地抑制细菌代谢和酸败过程的发生。

如图3所示，SCFAs约80%以酯化形式存在于甘油骨架上（结合态），这可能因为SCFAs主要酯化在甘油骨架是Sn−1和Sn−3位上，脂肪水解酶优先水解Sn−1和Sn−3位置上的脂肪酸，因此在乳中FSCFAs含量较高（约20%）[33~35]。Pestana等[22]研究表明，巴氏杀菌和高温灭菌等热处理过程对乳中脂肪酸谱几乎没有影响。本试验结果显示，热处理对乳中SCFAs谱没有显著影响，75 ℃/15 s和130 ℃/0.5 s在SCFAs组成比例上相似以及各单个SCFAs（除C3:0

中国乳业线上阅读



（a）TSCFAs　　（b）TFSCFAs

图 2 不同热处理强度（生乳、间接式热处理（75℃ /15s）、直接式热处理（130℃ /0.5s）、间接式热处理（122℃ /4s）和间接式热处理（137℃ /4s）乳中 SCFAs 组成雷达图

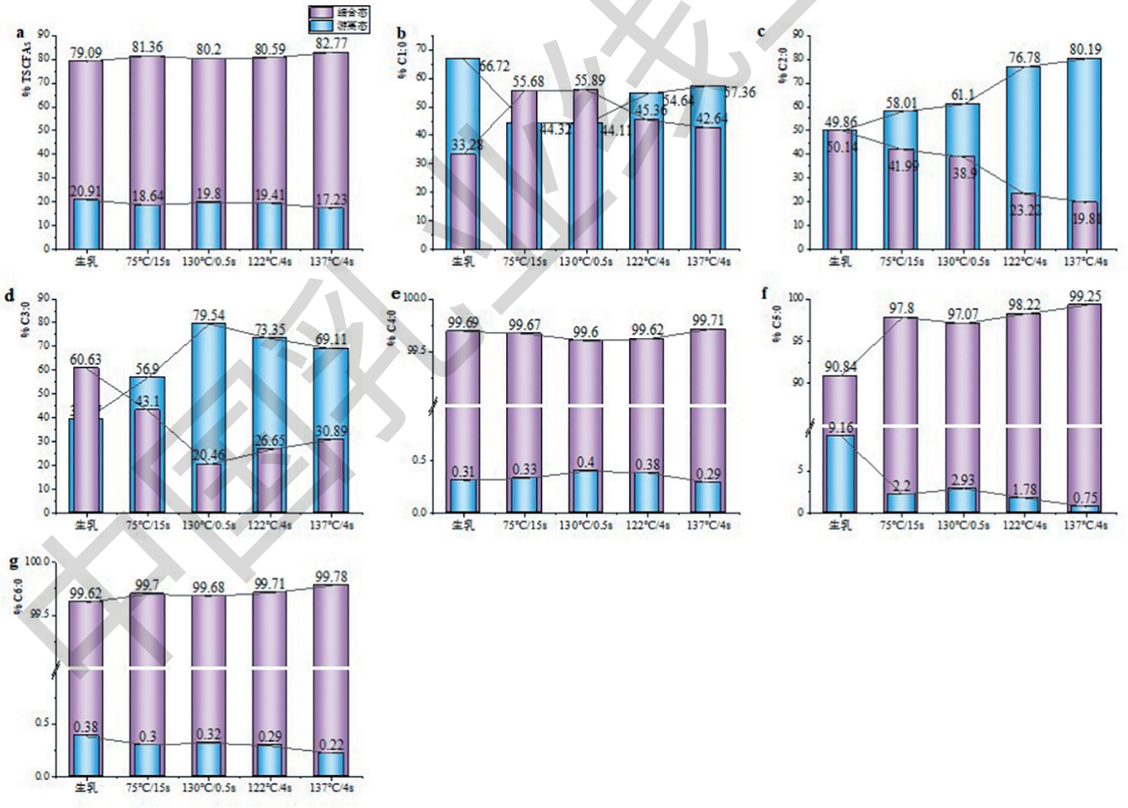
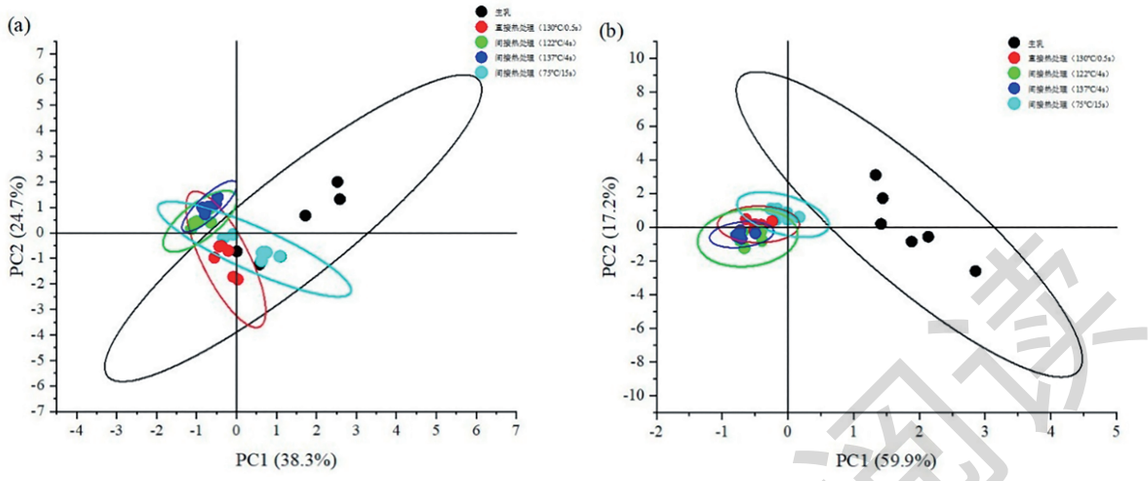


图 3 不同热处理强度条件下乳中游离态和结合态 SCFAs 组成比例变化组合图

外）的变化趋势一致。游离态的C1:0呈现出先降低后增加的变化趋势，而游离态C2:0、C3:0的比例高于生乳，游离态C5:0的比例则相反。C1:0在热处理初期因挥发而损失，但随着温度升高，可能由于乳糖等成分的热降解，其比例有所回升，例如牛奶中乳糖热加工下会降解产生的有机酸，主要是C1:0，

中国乳业线上阅读



（a）TSCFAs　　（b）TFSCFAs

图 4 不同热处理强度 [生乳、间接式热处理（75 ℃ /15 s）、直接式热处理（130 ℃ /0.5 s）、间接式热处理（122 ℃ /4 s）和间接式热处理（137 ℃ /4 s）] 乳中 SCFAs 组成主成分分析图

也产生C2:0、C3:0和乳酸等[12]，具体机制尚待进一步研究。乳中脂肪酸含量和组成受多种因素影响，如物种、饮食、泌乳期、热加工方式等[36~38]，因此，SCFAs谱的测定为乳和乳制品在加工和储存条件下的脂肪分解提供有用的指示。

对生乳、75 ℃/15 s、130 ℃/0.5 s、122 ℃/4 s和137 ℃/4 s乳的SCFAs和FSCFAs进行主成分分析，结果显示生乳、75 ℃/15 s、130 ℃/0.5 s、122 ℃/4 s和137 ℃/4 s乳在SCFAs组成上比较相似（图4a）。前人的研究表明，生乳、巴氏杀菌乳和UHT乳具有非常相似的脂肪酸谱[12]。本文的结果表明，热处理对乳中SCFAs谱几乎没有影响。但在FSCFAs水平上，生乳与热处理乳（直接式热处理乳&间接式热处理乳）具有明显区分。主成分1和主成分2的累积贡献率达77.1%（图4b）。热处理改变了FSCFAs的比例，特别是C2:0、C3:0和C5:0，FSCFAs对热处理的敏感性使其可能成为区分生乳和热处理乳的重要标志物，但不同热处理组之间的差异可能需要进一步研究。

3 结论

热处理导致乳中TSCFAs和TFSCFAs总体损失，但对各组分影响不一。FSCFAs，特别是C2:0、C3:0和C5:0，对热处理敏感，具备作为生乳与热处理乳区分标志物的潜力。

参考文献

[1] 王加启，郑楠，张养东. 面对新冠肺炎疫情:需要树立奶类具有双重营养功能的新认识[J].中国乳业，2021（8）：123.

[2] Abbas Syed Q，Hassan A，Sharif S，et al. Structural and functional properties of milk proteins as affected by heating，high pressure，Gamma and ultraviolet irradiation:A review[J]. International Journal of Food Properties，2021，24（1）：871－884.

[3] Tonolo F，Folda A，Cesaro L，et al. Milk-derived bioactive peptides exhibit antioxidant activity through the Keap1-Nrf2 signaling pathway[J]. Journal of Functional Foods，2020，64：103696.

[4] Chatterton D E，Nguyen D N，Bering S B，et al. Anti-inflammatory mechanisms of bioactive milk proteins in the intestine of newborns[J]. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology，2013，45（8）：1730－1747.

[5] Ilesanmi-Oyelere B L，Kruger M C. The role of milk components，pro-，pre-，and synbiotic foods in calcium absorption and bone health maintenance[J]. Frontiers in Nutrition，2020，7：578702.

[6] Coutinho N M，Silveira M R，Rocha R S，et al. Cold plasma processing of milk and dairy products[J]. Trends in Food Science & Technology，2018，74：56－68.

中国乳业线上阅读

[7] 郭利亚，赵广英，武旭芳，等.牛奶主要热处理工艺对比分析 [J]. 中国乳业，2021（4）：70–4.

[8] Sakkas L，Moutafi A，Moschopoulou E，et al. Assessment of heat treatment of various types of milk[J]. Food Chemistry，2014，159：293－301.

[9] Benabdelkamel H，Masood A，Alanazi I O，et al. Proteomic profiling comparing the effects of different heat treatments on camel （Camelus dromedarius） milk whey proteins[J]. International Journal of Molecular Sciences，2017，18（4）：721.

[10] Wang Y，Xiao R，Liu S，et al. The Impact of thermal treatment intensity on proteins，fatty acids，macro/micro–Nutrients，flavor，and heating markers of milk–A comprehensive review[J]. International Journal of Molecular Sciences，2024，25（16）：8670

[11] Claeys W L，Verraes C，Cardoen S，et al. Consumption of raw or heated milk from different species：An evaluation of the nutritional and potential health benefits[J]. Food Control，2014，42：188－201.

[12] 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.

[13] Raynal–Ljutovac K，Park Y W，Gaucheron F，et al. Heat stability and enzymatic modifications of goat and sheep milk[J]. Small Ruminant Research，2006，68（1）：207－220.

[14] Gathercole J，Reis M G，Agnew M，et al. Molecular modification associated with the heat treatment of bovine milk[J]. International Dairy Journal，2017，73：74－83.

[15] 王秋岭，李艳君，张海斌，等. 一种长货架期的常温牛奶及其制备方法，CN112841302A [P/OL].

[16] 彭小霞，吴岳指，甘扶佩，等. 蒸汽喷射式及蒸汽浸入式杀菌对ESL牛乳品质的影响[J]. 现代食品，2024，30（21）：75–79.

[17] Hu L Y，Jiang W W，Fan Z，et al. Formation of the oxidized flavor compounds at different heat treatment and changes in the oxidation stability of milk[J]. Food Science & Nutrition，2019，7（1）：238－246.

[18] Clarke H J，Griffin C，Rai D K，et al. Dietary compounds influencing the sensorial，volatile and phytochemical properties of bovine milk[J]. Molecules，2020，25（1）：26.

[19] 武旭芳. 乳中短链脂肪酸检测方法建立及应用[D].北京：中国农业科学院，2023.

[20] Wu X F，Wang F E，Chen M Q，et al. Quantification of free short–chain fatty acids in raw cow milk by Gas Chromatography–Mass Spectrometry[J]. Foods，2023，12（7）：1367.

[21] Wu X F，Wang F E，Chen M Q，et al. A comprehensive study of the whole profiles of short–chain fatty acids in milk[J]. Journal of Dairy Science，2024，108（3）：2206–2214.

[22] Pestana J M，Gennari A，Monteiro B W，et al. Effects of pasteurization and ultra–high temperature processes on proximate composition and fatty acid profile in bovine milk[J]. American Journal of Food Technology，2015，10（6）：265－272.

[23] Kim H Y，Kim S H，Choi M J，et al. The effect of high pressure－low temperature treatment on physicochemical properties in milk[J]. Journal of Dairy Science，2008，91（11）：4176－4182.

[24] Fan R，Shi R，Ji Z，et al. Effects of homogenization and heat treatment on fatty acids in milk from five dairy species[J]. Food Quality and Safety，2023，7：fyac069.

[25] Fox P F，Uniacke–Lowe T，McSweeney P L H，et al. Dairy Chemistry and Biochemistry[M].Springer，Cham，2015：69－144.

[26] Ahlam E，Amr A，Maria A，et al. Microbial profile of heat–treated milk sold at local markets[J]. Alexandria Journal of Veterinary Sciences，2017，55（1）：133.

[27] Khan I T，Nadeem M，Imran M，et al. Antioxidant capacity and fatty acids characterization of heat treated cow and buffalo milk[J]. Lipids in Health and Disease，2017，16（1）：163.

[28] Ajmal M，Nadeem M，Imran M，et al. Lipid compositional changes and oxidation status of ultra–high temperature treated Milk[J]. Lipids in Health and Disease，2018，17（1）：227.

[29] 魏光强,陈越,卓加珍,等.酸奶发酵和冷藏过程中品质评价及主要风味成分变化分析[J].食品与发酵工业，2019，45（18）：113–119.

[30] Kilic–Akyilmaz M，Ozer B，Bulat T，et al. Effect of heat treatment on micronutrients，fatty acids and some bioactive components of milk[J]. International Dairy Journal，2022，126：105231.

[31] Yaru S，Chuantao P，Jicheng W，et al. Mesopic fermentation contributes more to the formation of important flavor compounds and increased growth of *Lactobacillus casei* Zhang than does high temperature during milk fermentation and storage[J]. Journal of Dairy Science，2022，105（6）：4857－4867.

[32] 刘振民. 乳脂及乳脂产品科学与技术[M].北京：中国轻工业出版社，201907：330.

[33] 曹茜，王丹，袁永俊. 脂肪酶位置选择性及其应用在功能性结构甘油三酯合成中的研究进展[J].食品与发酵工业，2020，46（11）：295–301.

[34] Deeth H C. Lipolysis and Hydrolytic Rancidity[M]//McSweeney P L H，McNamara J P. Encyclopedia of Dairy Sciences （Third Edition）. Oxford：Academic Press，2022：827－834.

中国乳业线上阅读

[35] Lu L，Xiuxiu Z，Yibo L，et al. Simulated in vitro infant gastrointestinal digestion of infant formulas containing different fat sources and human milk：Differences in Lipid Profiling and Free Fatty Acid Release[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2021，69（24）：6799–6809.

[36] Chen Y J，Zhou X H，Han B，et al. Composition analysis of fatty acids and stereo–distribution of triglycerides in human milk from three regions of China[J]. Food Research International，2020，133：109196.

[37] Kang S，Yun J，Park H Y，et al. Analytical factors for eight short–chain fatty acid analyses in mouse feces through headspace solid–phase microextraction–triple quadrupole gas chromatography tandem mass spectrometry[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry，2023，415（25）：6227–6235.

[38] Wang F，Chen M，Luo R，et al. Fatty acid profiles of milk from Holstein cows，Jersey cows，buffalos，yaks，humans，goats，camels，and donkeys based on gas chromatography–mass spectrometry[J]. Journal of Dairy Science，2022，105（2）：1687–1700.

Effects of Heat Treatment Intensity on the Short–chain Fatty Acid Profile in Milk

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

[1]Institute of Animal Sciences，Chinese Academy of Agricultural Sciences；Key Laboratory of Dairy Quality and Digital Monitoring Technology，State Administration for Market Regulation，Beijing 100193

[2]Mengniu Fresh Dairy 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 aimed to investigate the effects of heat treatment intensity on the content and composition of short-chain fatty acids（SCFAs）in milk.[Method] Using raw milk from the same batch subjected to indirect heat treatments（75 °C/15 s，122 °C/4 s，137 °C/4 s）and direct heat treatment（130 °C/0.5 s），the contents of SCFAs and free short-chain fatty acids Free short-chain fatty acids（FSCFAs）were determined by gas chromatography-mass spectrometry（GC-MS），and differential analysis was performed.[Result] Both direct and indirect heat treatments led to unavoidable losses in total short-chain fatty acids（TSCFAs）and total free short-chain fatty acids（TFSCFAs）in raw milk. At the FSCFAs level，heat treatment alters the proportions of each FSCFAs，especially C2:0，C3:0 and C5:0，which may serve as potential markers for differentiating raw milk from heat-treated milk.[Conclusion] This study reveals the variation patterns of SCFAs and FSCFAs in milk under different heat treatment conditions，enriches the research data on the impact of heat treatment intensity on short-chain fatty acids in milk，and provides a reference for dairy quality evaluation and safety control.

Keywords：heat treatment；short-chain fatty acids（SCFAs）；milk；free short-chain fatty acids（FSCFAs）

中国乳业线上阅读