

基于主成分分析的不同乳中脂肪酸组成及含量的比较

张璐*, 任佳琦, 何强, 王文瑞, 施妍婧

(西安海关技术中心, 陕西西安 710068)

摘要: 以市售的牛、羊、驼巴氏杀菌乳及乳粉为研究对象, 利用气相色谱-面积归一化法对不同类型的乳中脂肪酸 (Fatty Acid, FA) 进行分类及质量分数的分析, 从而开展脂肪酸作为特征因子对不同乳的差异化研究。结果表明, 肉豆蔻酸 (C14:0)、棕榈酸 (C16:0)、硬脂酸 (C18:0) 及油酸 (C18:1n9c) 是羊乳、牛乳及驼乳中脂肪酸的主要组成, 上述 4 种脂肪酸质量分数之和均大于 70%。驼乳中棕榈烯酸 (C16:1)、硬脂酸 (C18:0) 质量分数明显高于其在牛乳和羊乳中的质量分数; 牛乳中棕榈酸 (C16:0)、丁酸 (C4:0) 质量分数明显高于其在羊乳及驼乳中质量分数; 羊乳中辛酸 (C8:0) 及癸酸 (C10:0) 质量分数明显高于其牛乳中的质量分数。驼乳中检出 36 种脂肪酸组成, 羊乳中检出 35 种脂肪酸组成, 牛乳中检出 33 种脂肪酸组成。通过主成分分析发现不同乳中脂肪酸组成及含量有着较为明显的差别, 同时脂肪酸组成及质量分数可作为区分羊乳、驼乳及牛乳的重要指标。

关键词: 主成分分析; 羊乳; 驼乳; 牛乳; 脂肪酸; 含量

文章编号: 1673-9078(2025)06-190-197

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0377

Comparison on the Compositions and Contents of Fatty Acids in Different Milks Based on Principal Component Analysis

ZHANG Lu*, REN Jiaqi, HE Qiang, WANG Wenrui, SHI Yanjing

(Technology Center of Xi'an Customs, Xi'an 710068, China)

Abstract: In the study, taking commercially available pasteurized milk and milk powder from cows, sheep and camels as the research object, the classification and mass fraction of fatty acids (FA) in different types of milk were analyzed by gas chromatography-area normalization method, so as to carry out the differentiation study of different milks with fatty acids as characteristic factors. The result showed that myristic acid (C14:0), palmitic acid (C16:0), stearic acid (C18:0) and oleic acid (C18:1n9c) were the main fatty acid components in goat, bovine and camel milks. The sum of the mass fractions of the above four fatty acids was greater than 70%. The mass fractions of palmitenic acid (C16:1) and stearic acid (C18:0) in camel milk were significantly higher than those in cow milk and goat milk. The mass fractions of palmitic acid (C16:0) and butyric acid (C4:0) in the bovine milk were significantly higher than those of goat and camel milks. The mass fractions of caprylic acid (C8:0) and capric acid (C10:0) in goat milk were significantly higher than those in the bovine milk. A total of 36 fatty acids, 35 fatty acids and 33 fatty acids were detected in camel milk, goat milk and bovine milk, respectively. The

引文格式:

张璐,任佳琦,何强,等.基于主成分分析的不同乳中脂肪酸组成及含量的比较[J].现代食品科技,2025,41(6):190-197.

ZHANG Lu, REN Jiaqi, HE Qiang, et al. Comparison on the compositions and contents of fatty acids in different milks based on principal component analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 190-197.

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 海关总署科技计划 (2021HK209; 2023HK122); 西安海关科技计划 (西关 K-202301)

作者简介: 张璐 (1983 年), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品质量安全及营养, E-mail: lindazhanglu@126.com

principal component analysis revealed that there existed significant differences in the compositions and contents of fatty acids in different milks, and the composition and contents of fatty acids can be used for distinguishing goat milk, camel milk and bovine milk.

Key words: principal component analysis; caprine milk; camel milk; bovine milk; caprine milk; fatty acid; content

乳中营养成分丰富,是膳食结构中优质营养结构食物,可提供包括蛋白质、脂肪、生物活性肽、矿物质、维生素等在内的对身体有益的营养物质^[1,2]。通过对乳的营养学研究发现,乳中乳脂对于身体健康发挥重要作用,例如乳粉的摄入量与糖尿病等慢性代谢综合症的患病风险成负相关的关系^[3]。乳脂的重要组成脂肪酸(FA)种类丰富且具有良好的营养功能,例如丁酸(C4:0)等短链脂肪酸(SCSFA)具有抗菌活性,并影响多种疾病的发病机制^[4]、牛奶乳脂的甘油三酯(TAG)上大约4%的FA是丁酸(C4:0),丁酸(C4:0)是肠道上皮细胞的主要能量来源,对保护结肠黏膜、维持结肠健康起着十分重要的作用^[5];肉豆蔻酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)及硬脂酸(C18:0)作为反刍动物乳中最丰富的3种长链饱和脂肪酸(LCSFA)与膳食中碳水化合物的摄入量存在密切的关系^[6,7],肉豆蔻酸(C14:0)和棕榈酸(C16:0)直接参与翻译后蛋白的变化,其中肉豆蔻酸(C14:0)可发挥更多的代谢功能,可改善心血管健康,棕榈酸(C16:0)可促进蛋白质膜的交互及蛋白质的细胞内运动^[8]。由此可见,研究脂肪酸对于揭示其对人体健康可产生的作用具有十分重要的意义^[9-12]。脂肪酸也是乳的营养价值体现的重要成分之一,随着社会对乳中营养物质关注越来越高,研究乳中脂肪酸的组成及含量可更好的揭示不同乳的营养价值。

驼乳、牛乳、羊乳是目前市面上消费最多的三种乳,其营养价值长期受到广泛关注。脂肪酸作为乳中营养物质的重要组成部分之一,其在三种乳中的组成及含量差别对分析驼乳、牛乳、羊乳的不同营养特点十分重要。众所周知影响乳中脂肪酸组成和含量的因素较多,包括乳的品种、畜牧的生长环境、乳粉的加工工艺等。本文通过分析不同来源、不同品种的乳中脂肪酸组成及含量,利用主成分分析进一步揭示不同品种、不同来源乳中脂肪酸种类及含量之间的差异,进一步拓宽畜乳脂肪酸营养评价途径,为特色乳品品质鉴别提供新方法。

本研究以不同类型的乳(牛乳、羊乳、驼乳)为研究对象,采用气相色谱开展对其脂肪酸种类及类

别的分析,并对这三种乳的脂肪酸进行了主成分分析(PCA分析)研究,从而获得区分三种乳的关键性脂肪酸,同时为乳脂肪的营养价值分析提供了理论基础。

1 材料与方法

1.1 仪器、材料与试剂

2022~2023年收集来自不同产地及国家的羊乳20份(巴氏杀菌乳8份,有机乳粉6份,非有机乳粉7份),牛乳14份(其中巴氏杀菌乳7份,乳粉6份,进口乳粉3份),驼乳7份(其中巴氏杀菌乳2份,乳粉5份)共计41份。

氨水、焦性没食子酸、乙醚、石油醚、氢氧化钠、甲醇、三氟化硼、正庚烷、无水硫酸钠均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

37种脂肪酸甲酯标准品,安普公司。

GC 2030气相色谱,日本岛津公司;Allegra TMX-22R centrifuge 高速离心机,德国 Beckman 公司;SHZ-82 恒温水浴锅,西安瑞尔公司;Synoore/R-215 旋转蒸发仪,德国 Buchi 公司;Turbo VapLV 氮吹浓缩仪,美国 Caliper 公司。

1.2 样品前处理

本研究中样品前处理参照 GB 5009.168-2016 中样品前处理方法,样品前处理后进气相色谱测定。脂肪酸组成及含量分析采用面积归一化法进行。

1.3 仪器条件

色谱柱 HP-88 (100 m×0.25 mm×0.2 μm), 进样口温度为 270 °C, 火焰离子检测器, 检测器温度为 280 °C, 载气为高纯氮气, 流量为 0.8 mL/min, 进样量为 1.0 mL, 分流比为 100:1。采用程序升温: 初始温度 100 °C, 保持 13 min, 10 °C/min 升至 180 °C, 保持 6 min, 1 °C/min 升至 200 °C 保持 20 min, 4 °C/min 升至 230 °C 保持 10.5 min。

1.4 数据处理

采用 SPSS、Origin 软件对脂肪酸数据进行统计分析,并对其进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同乳中脂肪酸种类及相对含量分析

实验中对羊乳、牛乳及驼乳的脂肪酸组成和相对含量进行了分析, 分析结果见图1及表1。

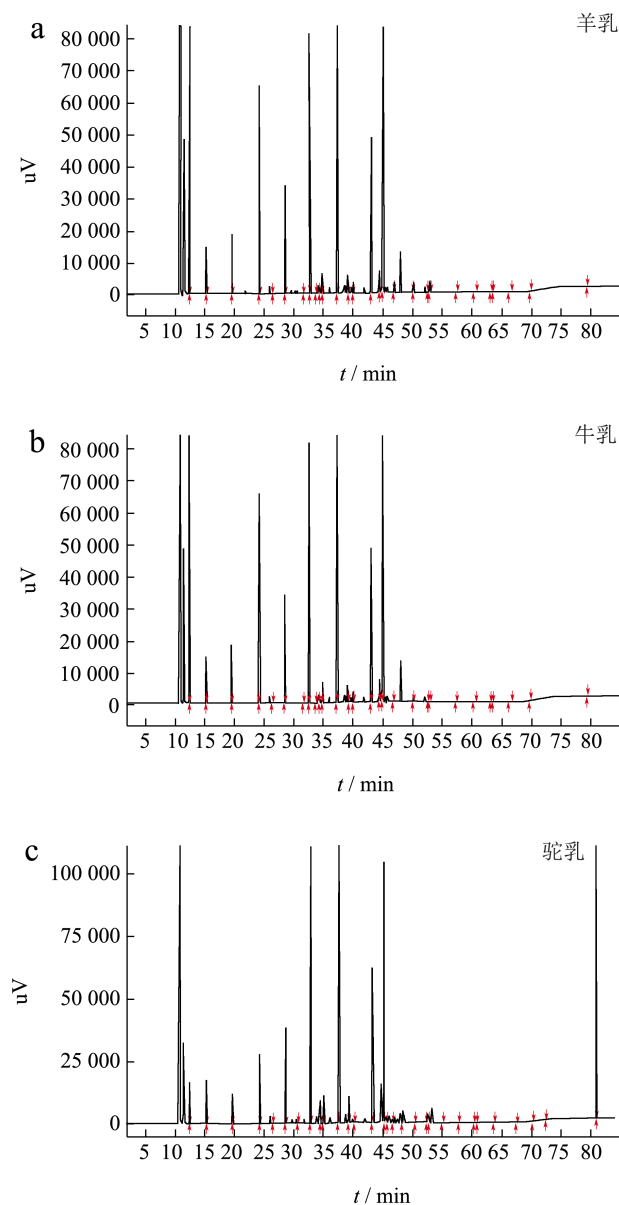


图1 羊乳、牛乳及驼乳的脂肪酸色谱图

Fig.1 Chromatography of fatty acid of bovine, caprine and camel milk

从实验分析结果看, 三种乳中均含有丰富的脂肪酸, 其中驼乳中检出36种脂肪酸组成, 羊乳中检出35种脂肪酸组成, 牛乳中检出33种脂肪酸组成, 驼乳中脂肪酸组成最为丰富。比较发现驼乳中含有其他两种乳中均不含有的顺-10-十五碳一烯酸(C15:1)。说明在脂肪酸组成方面这三种乳存在着

一定的差异。

实验中对三种乳中脂肪酸的质量分数进行分析发现: 肉豆蔻酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)、硬脂酸(C18:0)及油酸(C18:1n9c)是羊乳、牛乳及驼乳的主要组成, 上述4种脂肪酸质量分数之和均大于70%。上述四种脂肪酸质量分数之和在羊乳、牛乳及驼乳中占总脂肪酸分别为60%~83%、75%~83%及80%~86%

对三种乳中特定脂肪酸(棕榈酸(C16:0)、丁酸(C4:0)、棕榈烯酸(C16:1)、硬脂酸(C18:0)、十三碳酸(C13:0)、肉豆蔻酸(C14:0))的质量分数进行分析发现: (1) 牛乳中C16:0及C4:0相对含量分别为38.37%及1.18%明显高于其在羊乳(22.18%及0.98%)及驼乳(30.60%及0.02%)中的质量分数。驼乳中棕榈烯酸(C16:1)、硬脂酸(C18:0)相对含量分别为7.43%及14.94%明显的高于牛乳(1.57%及10.80%)和羊乳(0.88%及10.65%)中的质量分数。对比C13:0及C14:0发现, C13:0在不同乳中脂肪酸质量分数基本类似均不超过0.15%, C14:0在驼乳中脂肪酸相对含量为11.78%, 其占比明显高于羊乳和牛乳中占比。从以上分析中不难发现不同乳中各种脂肪酸质量分数存在的明显的差异。这一差异可用于区分不同乳的品种。

2.2 不同乳中饱和脂肪酸(SFA)、单不饱和脂肪酸(MUFA)、多不饱和脂肪酸(PUFA)相对含量分析

研究发现, 饱和脂肪酸(SFA)的摄入水平与脑血管疾病的发生率存在一定的正相关性^[13]。SFA能直接升高血清中甘油三酯及低密度脂蛋白的水平, 同时通过降低胆固醇7 α 羟化酶的表达来阻止血胆固醇的代谢。而MUFA对降低心血管疾病有着十分重要的意义, 尤其是油酸(C18:1n9c)。油酸具有降低低密度脂蛋白胆固醇的效果, 低密度脂蛋白是血浆中胆固醇含量占比最高的一类脂蛋白, 为蛋白质、胆固醇和磷脂的复合体, 通过降低低密度脂蛋白来降低胆固醇的含量^[14]。PUFA对人体有十分重要的生理功能, 可调节人体内的脂类代谢, 其 ω -3多不饱和脂肪酸及 ω -6多不饱和脂肪酸是合成类二十烷酸化合物的前体, 起到稳定细胞膜功能的作用^[15,16]、同时PUFA在调节免疫、降血压等方面具有显著的作用^[17], 该类脂肪酸是目前乳营养研究的热点之一^[18]。

表 1 驼乳、羊乳、牛乳中脂肪酸组成及相对含量 (质量分数)
Table 1 Composition and content of fatty acid in camel, bovine and caprine milk

序号	脂肪酸组成	保留时间/min	驼乳/%	牛乳/%	羊乳/%
1	丁酸 (C4:0)	12.507	0.02±0.01	1.18±0.07	0.98±0.12
2	己酸 (C6:0)	15.342	0.08 ± 0.01	1.35 ± 0.08	1.54 ± 0.13
3	辛酸 (C8:0)	19.637	0.13±0.02	1.02±0.07	1.91±0.41
4	癸酸甲酯 (C10:0)	24.300	0.17 ± 0.03	2.62 ± 0.21	6.49 ± 2.45
5	十一碳酸 (C11:0)	26.528	0.01 ± 0.00	0.07 ± 0.02	0.09 ± 0.01
6	十二碳酸 (C12:0)	28.641	0.96 ± 0.11	3.34 ± 0.35	4.29 ± 0.66
7	十三碳酸 (C13:0)	30.693	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.10 ± 0.02
8	十四碳酸 (C14:0)	32.788	11.78 ± 0.59	11.66 ± 0.78	10.99 ± 0.89
9	顺-9-十四碳一烯酸 (C14:1)	34.478	0.64 ± 0.17	0.91 ± 0.10	0.36 ± 0.24
10	十五碳酸 (C15:0)	35.018	1.40 ± 0.07	1.14 ± 0.12	0.95 ± 0.11
11	顺-10-十五碳一烯酸 (C15:1)	36.921	0.04 ± 0.00	—	—
12	十六碳酸 (C16:0)	37.472	30.60 ± 0.37	38.37 ± 1.54	22.18 ± 1.36
13	顺-9-十六碳一烯酸 (C16:1)	39.248	7.43 ± 0.65	1.57 ± 0.11	0.88 ± 0.31
14	十七碳酸 (C17:0)	40.204	0.76 ± 0.09	0.54 ± 0.05	0.55 ± 0.05
15	顺-10-十七碳一烯酸 (C17:1)	42.216	0.02 ± 0.00	—	0.11 ± 0.10
16	十八碳酸 (C18:0)	43.257	14.94 ± 1.06	10.80 ± 0.88	10.65 ± 0.95
17	反-9-十八碳一烯酸 (C18:1n9t)	44.543	0.82 ± 0.05	1.93 ± 0.69	0.94 ± 0.63
18	顺-9-十八碳一烯酸 (C18:1n9c)	45.205	21.03 ± 1.74	21.32 ± 1.09	33.28 ± 2.56
19	反, 反-9, 12-十八碳二烯酸 (C18:2n6t)	46.700	0.19 ± 0.03	0.09 ± 0.04	0.10 ± 0.05
20	顺, 顺-9, 12-十八碳二烯酸 (C18:2n6c)	48.307	2.55 ± 0.23	2.40 ± 0.63	3.19 ± 0.78
21	二十碳酸甲酯 (C20:0)	50.435	0.33 ± 0.03	0.12 ± 0.01	0.19 ± 0.03
22	顺, 顺, 顺-6, 9, 12-十八碳三烯酸 (C18:3n6)	50.775	0.02 ± 0.01	0.09 ± 0.09	0.03 ± 0.01
23	顺, 顺, 顺-9, 12, 15-十八碳三烯酸 (C18:3n3)	52.436	0.80 ± 0.33	0.36 ± 0.14	0.43 ± 0.17
24	顺-11-二十碳一烯酸 (C20:1)	52.982	0.16 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.14 ± 0.07
25	二十一碳酸甲酯 (C21:0)	54.934	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.10	0.05 ± 0.02
26	顺, 顺-11, 14-二十碳二烯酸 (C20:2)	57.325	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01
27	二十二碳酸 (C22:0)	60.325	0.09 ± 0.03	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.02
28	顺, 顺, 顺-8, 11, 14-十八碳三烯酸 (C20:3n6)	60.817	0.04 ± 0.01	0.11 ± 0.03	0.05 ± 0.04
29	顺, 顺, 顺-11, 14, 17-二十碳三烯酸 (C20:3n3)	63.197	0.03 ± 0.01	—	0.13 ± 0.08
30	顺-5, 8, 11, 14-二十碳四烯酸 (C20:4n6)	63.641	0.14 ± 0.01	0.15 ± 0.04	0.16 ± 0.04
31	顺-13-二十二碳一烯酸 (C22:1n9)	63.973	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
32	二十三碳酸 (C23:0)	66.859	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01
33	顺-13, 16-二十二碳二烯酸 (C22:2)	69.76	—	—	—
34	顺-5, 8, 11, 14, 17-二十碳 - 五烯酸 (C20:5n3)	70.281	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02
35	二十四碳酸 (C24:0)	72.432	0.05 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
36	顺-15-二十四碳一烯酸 (C24:1)	74.893	0.02 ± 0.00	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.00
37	顺-4, 7, 10, 13, 16, 19-二十二碳六烯酸 (C22:6n3)	81.646	0.02 ± 0.00	0.05 ± 0.02	0.07 ± 0.01

通过对比驼乳、羊乳及牛乳中 SFA、MUFA、PUFA 的总质量分数发现其存在较为明显的差异。结果表明：牛乳中 SFA 质量分数（72.57%）明显的高于羊乳和驼乳，羊乳中 MUFA 质量分数（36.18%）明显的高于牛乳和驼乳，驼乳中 PUFA 质量分数（3.26%）明显的高于牛乳中的占比，其与羊乳中 PUFA 质量分数（3.50%）基本接近。由此可以看出羊乳、牛乳及驼乳在营养价值方面呈现出不同的侧重点。

饱和脂肪酸：单不饱和脂肪酸：多不饱和脂肪酸（SFA:MUFA:PUFA）是评价脂肪酸营养功效的重要指标之一。根据 FAO/WHO 推荐^[19]，SFA:MUFA:PUFA 的黄金比例为 1:1:1。驼乳、牛乳及羊乳的这三类脂肪酸比例如图 1 所示，实验中得到羊乳、牛乳及驼乳的 SFA:MUFA:PUFA 比例分别为 1:0.59:0.06、1:0.36:0.04 及 1:0.50:0.06（图 2），通过对比发现驼乳及羊乳的 SFA:MUFA:PUFA 比例更接近 FAO/WHO 的推荐。因此目前驼乳及羊乳逐渐受到消费者青睐。目前市面上购买的婴儿配方乳粉多以牛乳及羊乳作为乳基来源，但两种乳中脂肪酸含量及比例存在一定差异，羊乳中的脂肪酸含量及比例接近于母乳，因此近年来被广泛的应用于婴儿配方乳粉的开发^[20-22]。

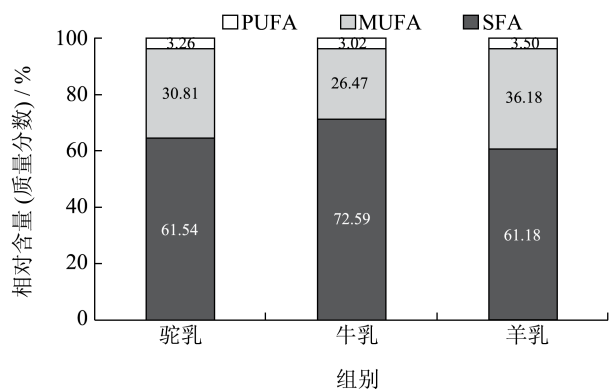


图2 不同乳的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸比较

Fig.2 Comparison of SFA, MUFA and PUFA in different type milk

实验中分析其中几种典型的 SFA、MUFA、PUFA。结果发现其在驼乳、羊乳及牛乳中分布各不相同。SFA 中 C14:0 及 C16:0 在牛乳中的相对含量（质量分数）较高分别为 11.66% 及 38.37%。MUFA 的典型脂肪酸—C18:1n9c 在羊乳中的质量分数（33.28%）较高，而其在牛乳及驼乳中其相对含量在 22% 左右。对于 PUFA 的典型 α -亚麻酸来讲，其在驼乳中的相对含量（0.80%）要明显的高于其

在羊乳及牛乳中相对含量。DHA 作为人体机能中不可或缺的脂肪酸之一，其在乳品中天然含量较低一般不超过 0.1%，通过实验反映出与文献报道基本一致的结果，但其在不同乳中含量也存在一定的差异，可以看出其在羊乳中相对含量较高^[23]。因此开展不同乳中不同饱和度脂肪酸的研究对进一步开发乳品营养价值具有指导意义。

2.3 不同乳中短、中、长碳链脂肪酸相对含量分析

不同碳链长度的脂肪酸对乳品风味、营养价值均有十分重要的影响，分析不同链长短的脂肪酸发现，驼乳、牛乳及羊乳中的中短链脂肪酸含量存在明显差异。对比不同乳中的中链脂肪酸占比情况发现，羊乳中的中链脂肪酸质量分数（12.88%）明显高于牛乳及驼乳中的质量分数。尤其是 C6:0、C8:0 及 C10:0，羊乳中 C8:0 及 C10:0 质量分数明显高于牛乳中的质量分数，以 C10:0 为例，其在羊乳中的相对含量为 6.49%，在牛乳中质量分数为 2.62%，甚至有的羊乳中 C10:0 质量分数是牛乳中的 4.5 倍。尽管 C6:0、C8:0 及 C10:0 在脂肪酸总量中占比较小，但却是决定乳风味的重要指标。根据文献报道^[24]，羊乳膻味强度与游离脂肪酸中 C6:0、C8:0 及 C10:0 呈现极显著正相关（ $P < 0.01$ ），羊乳的膻味主要由中链脂肪酸贡献。这是因为羊乳的中短链脂肪酸如 C6:0、C8:0 及 C10:0 在一定条件下形成一种较为稳定的络合物，或以相互结合的形式存在就会产生典型的羊膻味^[25]。李林强等^[26]通过对比羊乳和牛乳的中短链脂肪酸也发现羊乳中 C10:0 质量分数远高于牛乳中。Margrete^[27]在研究山羊饲养条件对脂肪酸及羊乳风味的影响时也发现 C6:0~C10:0 是造成羊乳膻味的主要影响因素。

短链饱和脂肪酸可以直接进入肝脏，分解转化为能量，更易被机体吸收^[28]。分析不同乳中短链饱和脂肪酸发现，牛乳及羊乳的中短链饱和脂肪酸含量在 3% 左右，驼乳的中短链饱和脂肪酸只占不到 0.1%，因此短链饱和脂肪酸可作为区分驼乳与其他两种乳的标志性成分，也说明在能量转化方面羊乳及牛乳优于驼乳。

长链饱和脂肪酸在不同乳的饱和脂肪酸占比均最高，但也存在一定差异。其中牛乳中长链饱和脂肪酸占饱和脂肪酸的 63%，占比最高，羊乳中长链饱和脂肪酸占饱和脂肪酸的 45.1%，占比最低。通过分析发现 C16:0 是长链饱和脂肪酸中质量分数最

高的，占比均超过 20%。据文献报道^[20]，母乳中 C16:0 也是质量分数最高的饱和脂肪酸，平均相对含量（质量分数）为 20.9%。棕榈酸在甘油三酯的位置分布对于婴儿的吸收十分重要，母乳脂肪中棕榈酸主要分布在甘油三酯的 Sn-2 位上，因此在婴儿配方乳粉生产过程中通过添加适量的 1,3- 二油酸 -2- 棕榈酸甘油三酯（OPO）来提高棕榈酸在 Sn-2 位上的含量，该位置上的棕榈酸能促进婴儿对脂肪酸和钙的吸收^[29]。

奇数链脂肪酸^[23]是一类特殊的脂肪酸，其在生物体内的代谢和作用有着独特的特点，奇数链脂肪酸首先需要经过羧化后，再通过 *b*- 氧化途径被分解为乙酰辅酶 A，因此其代谢速度较慢。奇数链脂肪酸在体内可促进胰岛素分泌，因此在降低糖尿病、心血管疾病风险方面十分重要^[30]。通过实验分析发现，驼乳中奇数链脂肪酸（2.38%）含量高于羊乳、牛乳中，该结论与文献报道一致^[31]。

2.4 不同乳脂肪酸主成分分析

主成分分析（PCA 分析）是一种数据降维的方法，其目的在于利用较少的变量代替原来较多的变量，从而反映出多个变量的信息。PCA 分析中得分图可直观的反映出不同乳品之间是否存在差异，得分图中距离相近的数据表示相似性较强，距离远的点表示相似性较弱，说明存在一定的差异性。采用 Origin 2022 软件，以脂肪酸甲酯峰面积值为变量，计算主成分特征值、累计贡献率及主成分得分等。

2.4.1 特征值与方差贡献率

从表 2 主成分因子特征值和累计贡献率（表 2）及主成分分析碎石图（图 3）可知，排名前三的主成分因子的特征值分别为： $l_1=5.97$ ， $l_2=2.19$ ， $l_3=1.27$ ，而其他值均小于 1；其中特征值 l_1 的贡献率为 50.88%， l_2 的贡献率 19.89%， l_3 的贡献率为 11.58%，前 3 个特征值的累计贡献率达 82.36%，故取前 3 个为主成分，其余值不进行主成分因子分析。

表 2 主成分因子特征值和贡献率			
Table 2 Eigenvalue and variance contribution rate			
主成分因子	特征值 l	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.60	50.88	50.88
2	2.19	19.89	70.77
3	1.27	11.58	82.36

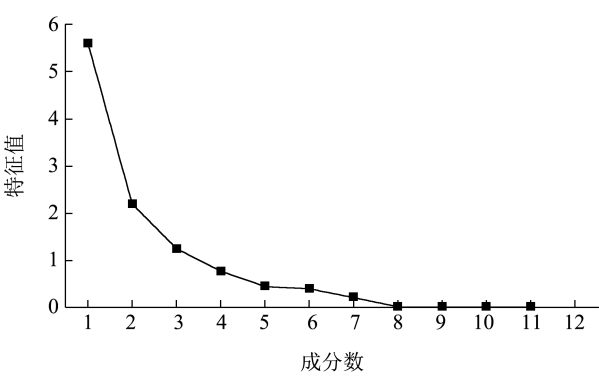


图 3 主成分分析碎石图

Fig.3 Scree plot of principal component analysis

表 3 主成分因子载荷矩阵

Fig.3 Main factors loading matrix

化合物	主成分因子 1	主成分因子 2	主成分因子 3
C6:0	0.34	0.35	-0.16
C8:0	0.38	0.14	0.02
C10:0	0.34	0.07	0.08
C12:0	0.37	0.18	0.01
C14:0	-0.33	0.26	-0.09
C16:0	-0.19	0.44	-0.37
C16:1	-0.39	-0.17	0.078
C18:0	-0.35	-0.04	0.05
C18:1n9t	-0.03	0.36	0.67
C18:1n9c	0.20	-0.43	-0.44
18:2n6c	0.16	-0.46	0.40

从表 3 初始因子载荷矩阵可知，6 个变量均与主成分因子 1 成正相关，其中 C6:0、C8:0、C10:0、C12:0 对贡献较大；6 个变量均与主成分因子 2 成正相关，其中 C6:0、C14:0、C16:0 对贡献较大；7 个变量均与主成分因子 3 成正相关，其中 C18:1n9t、C18:2n6c 对贡献较大。

2.4.2 PCA 得分图

根据特征值及累计贡献率得到 PCA 得分图（图 4），在得分图中距离相近的数据表示相似性越强，距离远的点表示相似性越弱，即存在一定的差异性^[32]。从得分图中可见，同一种乳脂肪酸基本聚集在一起，驼乳与牛乳及羊乳的在图中距离较远，存在显著性区分度，羊乳与牛乳在图中有一定的距离，存在一定区别度。从上图中可以说明，这三种乳的脂肪酸之间存在一定的差异性。

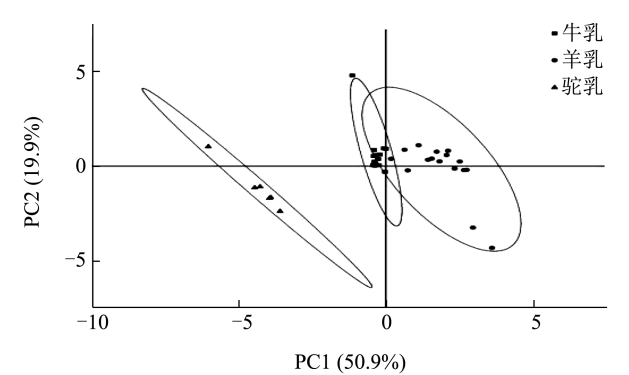


图 4 驼乳、牛乳及羊乳脂肪酸含量的主成分分析图

Fig.4 Principal component analysis of fatty acids of bovine, camel and caprine milk

表 4 有机乳粉及非有机乳粉脂肪酸相对含量
(质量分数) 比较

脂肪酸	有机羊乳 粉/%	非有机羊乳 粉/%
反,反-9,12-十八碳二烯酸 (C18:2n6t)	0.12 ± 0.05	0.084 ± 0.03
顺,顺-9,12-十八碳二烯酸 (C18:2n6c)	4.97 ± 0.15	2.73 ± 0.65
顺-11-二十碳一烯酸 (C20:1)	0.34 ± 0.03	0.041 ± 0.06
顺,顺,顺-8,11,14-十八碳三烯酸 (C20:3n6)	0.02 ± 0.04	0.08 ± 0.04
顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸 (C20:4n6)	0.11 ± 0.04	0.15 ± 0.05
顺-13-二十二碳一烯酸 (C22:1n9)	0.02 ± 0.01	0.012 ± 0.01
顺-13,16-二十二碳二烯酸 (C22:2)	0.02 ± 0.01	—
顺-5,8,11,14,17-二十碳-五烯酸 (C20:5n3)	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02
顺-4,7,10,13,16,19-二十二碳 六烯酸 (C22:6n3)	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.01
多不饱和脂肪酸/%	5.71 ± 0.36	3.21 ± 0.87
w-3 脂肪酸/%	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.03
w-6 脂肪酸/%	5.23 ± 0.28	3.05 ± 0.77

2.5 有机羊乳和非有机羊乳脂肪酸比较分析

课题组开展针对附加值高的羊乳开展有机羊乳粉及非有机羊乳粉中脂肪酸含量的分析（见表4）。在对有机乳及非有机乳中脂肪酸分析时发现，有机羊乳中 C18:0、C18:1n9c 和 C18:2n6c 的质量分数均明显的高于非有机羊乳，但 C14:0 和 C16:0 的质量分数明显偏低。分析多不饱和脂肪酸、ω-3 脂肪酸及 ω-6 脂肪酸在有机乳及非有机乳中脂肪酸占比发现，这三类脂肪酸在有机乳中的相对含量（质量分

数）均高于非有机乳中的相对含量。ω-6 脂肪酸中的 C18:2n6c 在有机乳中的含量极明显高于非有机乳，是非有机乳的 1.82 倍。故课题组认为这几个指标成为区分有机乳及非有机乳的特征指标。

3 结论

通过对羊乳、牛乳、驼乳中脂肪酸种类及含量的分析，通过比较不同乳中脂肪酸组成、不同乳中短、中、长碳链脂肪酸、不同乳的主成分分析得出以下结论：羊乳、牛乳、驼乳在脂肪酸组成中呈现的区别。如肉豆蔻酸、棕榈烯酸、硬脂酸可用于区分出驼乳、棕榈酸、丁酸、葵酸可区分出牛乳，葵酸可区分出羊乳；对比羊乳、牛乳、驼乳脂肪酸组成发现驼乳中奇数链脂肪酸含量高于羊乳、牛乳，预示着驼乳在低糖尿病、心血管疾病风险方面更具有优势。同时驼乳及羊乳的 SFA:MUFA:PUFA 比值更接近于 FAO/WHO 推荐的比值；同时对比有机乳及非有机乳发现，多不饱和脂肪酸、-3 脂肪酸及-6 脂肪酸在有机乳中占比明显的高于非有机乳，这可能与饲养过程有关。

参考文献

[1] 顾浩峰,张富新,梁蕾,等.山羊奶与牛奶和人奶营养成分的比较[J].食品工业科技,2012,33(8):369-373.

[2] 李龙柱,张富新,贾润芳,等.不同哺乳动物乳中主要营养成分比较的研究进展[J].食品工业科技,2012,33(9):396-400.

[3] ROOKE J A, FLOCKHART J F, SPARKS N H. The potential for increasing the concentrations of micro-nutrients relevant to human nutrition in meat, milk and eggs [J]. Journal of Agricultural Science, 2010, 148(5): 603-614.

[4] SORYAL K A, ZENG S S, MIN B R. Effect of feeding treatments and lactation stages on composition and organoleptic quality of goat milk domiati cheese [J]. Small Ruminant Research, 2004, 52(1-2): 109-116.

[5] HAMER H M, JONKERS D, VENEMA K, et al. Review article: the role of butyrate on colonic function [J]. Alimentary Pharmacology & Therapeutics, 2008, 27(2): 104-119.

[6] 李朝旭.石家庄地区牛乳脂肪中脂肪酸成分的分析[J].中国乳品工业,2004,32(5):41-43.

[7] 董静,陈钢粮,齐新林,等.驼乳的理化指标及影响因素[J].新疆畜牧业,2016,(8):34-35.

[8] RISERUS U, WILLETT W C, HU F B. Dietary fats and prevention of type 2 diabetes [J]. Progress in Lipid Research, 2009, 48(1): 44-51.

[9] 乔莉蓉,郝志云,王建清,等.不同泌乳时期甘肃高山细毛

- 羊与小尾寒羊的泌乳量、乳成分和脂肪酸含量比较[J]. 西北农业学报,2023,32(4):510-518.
- [10] 翁晨,邓泽元,李静.乳制品脂质组成的比较[J].食品科学,2020,41(40):149-156.
- [11] EILIDH H, AIDEN F, HILARY O, et al. Are oral essential fatty acids alone an effective treatment for symmetrical lupoid onychodystrophy/onychomadesis [J]. The Veterinary Record, 2020, 186 (14): 452-454.
- [12] 谢璇洁,程煜,方小伟.食品中脂肪酸的分析方法研究进展[J].现代食品科技,2023,39(5):329-339.
- [13] 时皎皎,糜漫天,韦娜,等.不同脂肪酸构成比对大鼠血脂影响的研究[J].第三军医大学学报,2007,29(9):824-827.
- [14] 李鹏,孙京新,王凤舞.白牦牛肉脂肪酸分析及功能性评价[J].食品科学,2008,29(4):106-108.
- [15] 宋宏新,韩燕.免疫学检测羊乳中掺入牛乳成分[J].中国乳品工业,2007,35(10):43-46.
- [16] 任皓威,李贺佳,张振,等.婴幼儿配方乳粉中脂肪酸的种类和质量分数分析[J].中国乳品工业,2015,43(2):4-8.
- [17] 袁成凌,姚建铭,余增亮.花生四烯酸及其代谢物的生物学作用[J].中国药物化学杂志,2000,10(1):75-78.
- [18] BRENNAN J T, VARAMINI B, JENSEN R G, et al. Docosahexaenoic and arachidonic acid concentrations in human breast milk worldwide [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2007, 85(6): 1457-1464.
- [19] 林观平.湖光牛奶脂肪酸的气相色谱-质谱联用分析[J].现代预防医学,2007,34(19):3619-3620.
- [20] 李琳瑶,华家才,康巧娟,等.婴儿配方奶粉中脂肪酸的研究[J].中国乳品工业,2022,50(6):39-43.
- [21] 侯建平.婴儿配方奶粉中不饱和脂肪酸的分析[J].中国乳品工业,2018,46(1):17-20.
- [22] 任皓威,李贺佳,张振,等.婴幼儿配方乳粉中脂肪酸的种类和质量分数分析[J].中国乳品工业,2015,43(2):4-8.
- [23] 王峰恩.生乳脂肪酸组成特征及加工处理对其影响的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.
- [24] 叶月丹.不同热加工条件对牛羊乳脂肪酸的影响及差异性分析[D].西安:西北农林科技大学,2015.
- [25] 晏慧莉.羊奶脂肪酸与羊奶膻味关系的研究[D].西安:陕西师范大学,2014.
- [26] 李林强,咎林森.西农萨能奶山羊如和荷斯坦牛乳挥发性游离脂肪酸组成比较及分子机理分析[J].食品与生物技术学报,2011,30(6):822-826.
- [27] EKNAS M, HAVREVOLL Y, VOLDEN H, et al. Fat content, fatty acid profile and off-flavours in goats milk-effects of feed concentrates with different fat sources during the grazing season [J]. Animal Feed Science and Technology, 2009, 152: 112-122.
- [28] 宋宏新,韩燕.免疫学检测羊乳中掺入牛乳成分[J].中国乳品工业,2007,35(10):43-46.
- [29] 常桂芳,侯建平.婴儿配方奶粉中饱和脂肪酸的分析[J].中国乳品工业,2016,44(8):47-51.
- [30] 李磊,王昆,何静,吉日本图.驼、牛、羊乳中脂肪酸含量的比较分析[J].食品科学,2019,40(6):223-227.
- [31] 顾翔宇.内蒙古牛马驼乳脂肪中脂肪酸构成的比较[J].中国乳品工业,2016,44(3):16-19.
- [32] 马露.奶牛、水牛、牦牛、娟珊牛、山羊、骆驼和马乳特征性成分分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.