

# 不同国家黄油和黄油乳脂理化性质的比较评价

邹孝强<sup>1</sup>, 蒋邦智<sup>1</sup>, 郑磊<sup>1</sup>, 胡纪洁<sup>1</sup>, 潘月起<sup>1</sup>, 王钦民<sup>2</sup>, IMAD Khan<sup>1</sup>, MUDASSAR Hussain<sup>1</sup>

(1. 江南大学食品学院, 食品科学与资源挖掘国家重点实验室, 国家功能食品工程技术研究中心, 粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心, 江苏无锡214122; 2. 伽力森食品生物科技(江苏)有限公司, 江苏泰州225700)

**摘要:**为帮助食品生产商和消费者选择适用于不同应用途径的黄油, 并为生产更受消费者喜爱的黄油替代品提供理论支持, 选取了11个国家的黄油并提取黄油乳脂, 对黄油及黄油乳脂的理化性质进行了系统的比较评价。结果表明:11个国家黄油中的脂肪、水分、蛋白质含量和滑动熔点分别为82.97%~86.40%、12.84%~16.14%、0.45%~0.78%、31.5~33.9℃, 酸值(KOH)和过氧化值分别不超过0.32 mg/g、0.029 g/100 g。中国黄油的*L*值最高(86.87), 而新西兰黄油的*b*值最高(35.28)。所有黄油共检出29种脂肪酸和42种甘油三酯, 蛋白质主要由 $\alpha_{s1}$ -酪蛋白、 $\beta$ -酪蛋白、 $\kappa$ -酪蛋白、 $\alpha$ -乳白蛋白和Adipophilin组成。爱尔兰黄油的不饱和脂肪酸含量最高(35.65%), 固体脂肪含量(SFC)较低, 而美国、荷兰和澳大利亚黄油的饱和脂肪酸和SFC含量较高。不同国家的黄油和黄油乳脂的晶体均为均匀精细的球晶, 其中美国黄油和黄油乳脂的晶体均呈现部分聚集, 且绝大多数晶体主要由 $\beta'$ 型晶体组成。质地和流变学分析表明, 爱尔兰黄油和黄油乳脂的硬度最低, 所有黄油和黄油乳脂都表现出良好的黏弹性和剪切变稀性能。综上, 不同国家黄油在基本理化性质、脂肪酸和甘油酯组成、SFC及硬度等方面存在差异, 在食品工业中需要根据成品、加工工艺等有针对性地选择黄油, 在新型人造奶油的构建中, 也可依据各黄油特点进行定向研究。

**关键词:**黄油; 黄油乳脂; 理化性质; 晶体; 质构; 流变

中图分类号: TS221; TS227

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2024)07-0029-11

## Comparative evaluation of physicochemical properties of butters and butter oils from different countries

ZOU Xiaoliang<sup>1</sup>, JIANG Bangzhi<sup>1</sup>, ZHENG Lei<sup>1</sup>, HU Jijie<sup>1</sup>, PAN Yuechao<sup>1</sup>, WANG Qinmin<sup>2</sup>, IMAD Khan<sup>1</sup>, MUDASSAR Hussain<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center of Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, National Engineering Research Center for Functional Food, State Key Laboratory of Food Science and Resources, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;

2. Kerisom Food Biotechnology (Jiangsu) Co., Ltd., Taizhou 225700, Jiangsu, China)

**Abstract:** For assisting both food producers and consumers to select butter for specific application, and providing support for the production of butter alternatives with enhanced consumer acceptability, butters from eleven countries were collected and butter oils were extracted. The physicochemical properties of butters and butter oils were comparatively evaluated. The results showed that the contents of fat, moisture, protein and melting point of butters were in the ranges of 82.97%–86.40%, 12.84%–16.14%, 0.45%–0.78% and 31.5–33.9℃ respectively, the acid value and peroxide value did not exceed 0.32 mgKOH/g and 0.029 g/100 g, respectively. The *L* value of China butter was the highest (86.87), while *b* value of New Zealand butter was the highest (35.28). A total of 29 fatty acids and 42

收稿日期: 2023-11-15; 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(31601433)

作者简介: 邹孝强(1983), 男, 副教授, 博士, 研究方向为功能性油脂制造与营养(E-mail) xiaoqiangzou@163.com。

triglycerides were detected in all butters, and the proteins were mainly composed of  $\alpha_{s1}$ -casein,  $\beta$ -casein,  $\kappa$ -casein,  $\alpha$ -lactalbumin, and Adipophilin. Ireland butter had the highest

content of unsaturated fatty acids (35.65%) and lower solid fat content (SFC), while butters from America, Netherlands and Australia had higher contents of saturated fatty acids and higher SFC. The crystals of butters and butter oils from different countries were all uniform and fine spherical crystals, in which the crystals of American butter and butter oil were partially aggregated, and the majority of crystals were mainly composed of  $\beta'$  crystal. The texture and rheological analysis showed that Ireland butter and butter oil exhibited the lowest hardness, and all butters and butter oils exhibited good viscoelastic and shear thinning. In conclusion, there are differences in the basic physicochemical properties, fatty acid and glyceride compositions, SFC, and hardness of butter from different countries. In the food industry, targeted selection of butter is required based on products, processing techniques, etc. In the construction of new types of margarine, targeted research can also be conducted based on the characteristics of butters.

**Key words:** butter; butter oil; physicochemical property; crystal; texture; rheology

黄油(Butter)又名奶油,是最受欢迎的高脂乳制品之一,全球约1/3的牛奶用于生产黄油<sup>[1]</sup>。GB 19646—2010规定黄油的脂肪含量应达到80%以上,稀奶油的脂肪含量在10%~80%之间。黄油是由水包油体系的乳或稀奶油进行搅拌、过滤除水得到的。相比人造奶油,黄油具有浓郁的奶香味和良好的适口性,不含有工业脂肪酸,富含矿物质与脂溶性维生素<sup>[2]</sup>,被广泛应用于冷冻甜点、蛋糕、面包和饼干等食品中。

由于环境、气候、养殖条件和生产工艺的多样性,不同国家黄油的理化性质存在差异,这会对其应用产生影响。如:各国地理位置及养殖技术的区别导致奶牛饮食资源的差异,而这种差异通常会导致乳脂中脂肪酸(FA)和甘油三酯(TAG)的变化,会使乳脂产生不同的结晶形式,从而影响黄油的保质期、质地、感官及营养特性<sup>[3-5]</sup>。另外,生产工艺是影响乳脂结晶和黄油物理性质的重要因素。冷却速度、搅拌速度和结晶温度等加工条件均会影响乳脂的结晶<sup>[6]</sup>。脂肪晶体的数量、大小和多态性以及固体脂肪含量(SFC)会影响脂肪结晶网络的微观结构,从而会影响黄油的质地和流变性能,改变黄油的硬度和可涂抹性<sup>[7-8]</sup>。然而,截至目前,很少有研究对不同国家黄油的理化性质进行对比。因此,本研究收集了11个国家生产的黄油,系统研究了其理化性质,包括水分、脂肪和蛋白质含量,色泽,滑动熔点,酸值,过氧化值,以及FA、sn-2位FA、TAG和甘油酯的组成,并对黄油和黄油乳脂晶体、SFC、质地和流变特性进行了比较,以期帮助食品生产商和消费者选择适用于不同应用途径的黄油,并为生产更受消费者喜爱的黄油替代品提供支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

市售中国(蒙牛,BA)、美国(蒙特胡,BB)、法国(总统,BC)、德国(欧德堡,BD)、丹麦(银保,BE)、阿根廷(多美鲜,BF)、荷兰(多美鲜,BG)、爱尔兰(金凯利,BH)、意大利(伯莱礼,BI)、澳大利亚(德运,BJ)以及新西兰(BK)黄油。乙腈、异丙醇均为色谱级,甲醇、三氟化硼、氢氧化钾、乙醚均为分析级,31种脂肪酸甲酯标准品。所有化学试剂均购自国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

NR100色差计,XH-C旋涡混合器,安捷伦7820A型气相色谱仪,安捷伦1260高效液相色谱仪〔配有Alltech 3300蒸发光散射检测器(ELSD)〕,高效液相色谱仪〔示差折光检测器(RID)〕,D2 PHASER型X射线衍射仪(XRD),Bruker PC120 plus型核磁共振仪(NMR),DM2700P偏振光显微镜(PLM),TA.XTPlus质构分析仪,Discovery HR-3流变仪,凝胶电泳仪。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 黄油乳脂的提取

在70℃下分别熔化11种黄油样品,以4000 r/min离心10 min,上层即为黄油乳脂。分别以BOA、BOB、BOC、BOD、BOE、BOF、BOG、BOH、BOI、BOJ、BOK代表对应国家黄油乳脂。

#### 1.2.2 基本理化性质的测定

参照ISO 3727-3:2003测定脂肪和水分含量;参照GB 5009.5—2016中凯氏定氮法测定蛋白质含量,换算系数为6.38;参照Krause等<sup>[9]</sup>的方法略作修改,使用色差计测定色泽,以亮度(L)、红-绿值

(*a*)和黄-蓝值(*b*)表示;采用毛细管法测定滑动熔点;分别参照 AOCS Official Method Cd 3d-63 和 Cd 8-53 测定酸值和过氧化值。

### 1.2.3 脂肪酸与 sn-2 位脂肪酸分析

采用气相色谱法测定黄油的脂肪酸组成。根据 AOAC 996.01 进行甲酯化。将 50 mg 黄油乳脂与 0.5 mL 2 mol/L NaOH-CH<sub>3</sub>OH 溶液混合,60℃下保持 30 min,加入 2 mL 17% BF<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub>OH 溶液,将混合物在 70℃下加热 3 min,离心后取上清液过 0.22 μm 有机滤膜后上机检测。气相色谱条件:TR-FAME 熔融二氧化硅毛细管柱(30 m×250 μm×0.25 μm);氢火焰离子化检测器,检测器温度 260℃;柱箱初始温度 80℃,保持 0.5 min,随后以 40℃/min 的速度升至 165℃,保持 1 min,再以 2℃/min 的速度升至 230℃,保持 2 min;载气(N<sub>2</sub>)流速 1.0 mL/min,进样量 1 μL;分流比 100:1。以脂肪酸甲酯标准品保留时间定性,峰面积归一化法定量。

sn-2 位脂肪酸组成测定参照孙聪<sup>[10]</sup>的方法并略作修改。将 50 mg 黄油乳脂、2 mL 正己烷、7 mL Tris-HCl 缓冲液(pH 7.6)、1.75 mL 0.05% 胆酸钠、0.7 mL 2.2% CaCl<sub>2</sub>和 50 mg 猪胰脂肪酶加入离心管中,充分混合,在 37℃下保持 9 min(间歇振荡 3 次)进行充分水解。加入 2 mL 乙醚并振荡 2 min,以 4 000 r/min 的转速离心 3 min。将上清液氮吹浓缩后使用 TLC 板进行分离,展开剂为己烷-乙醚-乙酸(体积比 50:50:1)。分离 2-单酰甘油的条带用于甲酯化和 sn-2 位脂肪酸组成分析,进样量为 2 μL,分流比为 20:1,sn-2 位脂肪酸的甲酯化方法和其余检测条件同上。

### 1.2.4 TAG 和甘油酯组成测定

#### 1.2.4.1 TAG 组成测定

称取 50 mg 黄油乳脂溶解于正己烷中,过 0.22 μm 有机滤膜后使用高效液相色谱仪测定。高效液相色谱条件:Hedera ODS-2 RP-C18 柱(250 mm×4.6 mm,5 μm);柱温 35℃;流动相为乙腈(A)和异丙醇(B),采用二元线性梯度洗脱,洗脱梯度为 0~10 min 从 70% A 下降到 65% A 并保持 5 min,15~30 min 从 65% A 下降到 60% A,30~40 min 从 60% A 下降到 50% A 并保持 20 min,60~65 min 从 50% A 上升到 65% A,65~70 min 从 65% A 下降到 60% A 并保持 25 min,流速 1.1 mL/min;进样量 10 μL。TAG 的类型和含量分别通过保留时间和峰面积归一化法确定。

#### 1.2.4.2 甘油酯组成测定

TAG、甘油二酯(DAG)、甘油一酯(MAG)和游离脂肪酸(FFA)含量参照文献[11]进行测定。

### 1.2.5 蛋白质类型的分析

参考文献[12]采用凝胶电泳(SDS-PAGE)测定蛋白质类型。将黄油熔化,取 0.5 mL 下层水相并加入等体积的样品溶解液(4% SDS,20% 甘油,pH 6.8、0.125 mol/L Tris-HCl 缓冲液)和 10 μL 溴酚蓝指示剂,上样缓冲液为 25 mmol/L Tris 和 192 mmol/L 甘氨酸,pH 8.05,上样体积 10 μL,分离胶和浓缩胶质量分数分别为 12.5% 和 3%,电泳条件为电流 13 mA、电压 260 V。电泳完成后,使用考马斯亮蓝 G-250 染色,脱色,采用凝胶成像仪扫描并保存图片,然后用 Image Lab 软件(Bio-Rad 公司,美国)对电泳条带进行分析,以条带的灰度计算蛋白质的含量。

### 1.2.6 晶体多态性和形态分析

通过 XRD 分析黄油样品的晶型。取适量样品置于玻片上进行检测,检测条件:Cu 靶,工作电压 40 kV,电流 40 mA,防反射以及反射狭缝设置为 1.0 mm,接受狭缝 0.1 mm,室温 25℃,扫描范围 2θ 为 3°~30°,步长 0.05°(2θ),扫描速度 0.5 s/step。

采用 PLM 观察黄油和黄油乳脂的晶体形态。将黄油直接涂抹在载玻片上,并用盖玻片压制透明薄片。将黄油乳脂在 70℃下融化 20 min 后滴在载玻片上并用盖玻片覆盖。上述所有样品在观察前均在 4℃下保存 24 h。通过 Leica DFC450 相机(Leica,德国)拍摄图像。

### 1.2.7 固体脂肪含量(SFC)的测定

参照 AOCS CD 16b-93 方法,使用 NMR 测定黄油及黄油乳脂的 SFC。在分析之前,将黄油样品直接放入 NMR 管中并压实;将熔化的黄油乳脂样品放入 NMR 管并在 70℃下保持 30 min,以确保所有晶体都熔化。将上述黄油及黄油乳脂样品在 0℃下保持 60 min,然后在 0~35℃范围内以 5℃间隔测量 SFC,每个温度保持 30 min。

### 1.2.8 硬度和流变学分析

参考 Lima 等<sup>[13]</sup>的方法,使用配备 P5 探头的 TA.XTplus 质构分析仪测定硬度。将样品置于塑料容器(直径 60 mm,深度 30 mm)中并压实,然后分别在 0℃和 25℃恒温器中保持 24 h。检测条件:测试前速度 5 mm/s,测试速度 2 mm/s,下压深度 12 mm,触发力 5 g。

使用配有直径为 40 mm 平板夹具的 Discovery HR-3 流变仪进行黄油和黄油乳脂的流变学分析。平板间隙为 1 mm,温度保持在 25℃,在 1 Hz 的频率下进行 0.01%~100% 的剪切应力扫描,确定样品的线性黏弹性区域(LVR)。然后,在 LVR 内以 0.05% 剪切应力进行振荡频率测试,频率扫描范围为 0.1~100 Hz,以确定储能模量(*G'*)和损耗模量(*G''*)。在

0.1 ~ 100 s<sup>-1</sup>的剪切速率范围内测量表观黏度。

### 1.2.9 数据处理

数据采用 SPSS 统计分析软件进行分析,结果以“平均值 ± 标准差”(n = 3)表示,  $p < 0.05$  表明差异

具有统计学意义。

## 2 结果和讨论

### 2.1 不同国家黄油的基本理化性质

不同国家黄油的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 不同国家黄油的基本理化性质

黄油	水分含量/%	脂肪含量/%	蛋白质含量/%	色泽			滑动熔点/°C	酸值(KOH)/(mg/g)	过氧化值/(g/100 g)
				L	a	b			
BA	15.03abc	83.41ab	0.54cde	86.87a	1.10c	14.19i	33.6a	0.22d	0.029ab
BB	14.91abc	84.32ab	0.53cde	80.37e	0.00e	20.31g	33.9a	0.24cd	0.024bc
BC	14.94abc	84.24ab	0.59bcd	83.35cd	-0.19ef	25.40d	33.3ab	0.15f	0.024bc
BD	14.27bcd	84.38ab	0.51de	86.12a	-0.34fg	21.63f	33.7a	0.26bc	0.029ab
BE	14.66bcd	83.77ab	0.65b	78.73f	0.48d	23.79e	33.4ab	0.26bc	0.021c
BF	15.51ab	83.82ab	0.46e	85.72ab	-0.87h	26.74c	33.1ab	0.29ab	0.025abc
BG	14.17cd	84.30ab	0.66b	84.59bc	-0.48g	26.86c	33.6a	0.29ab	0.025abc
BH	15.27abc	84.02ab	0.62bc	77.09g	0.62d	26.76c	31.5d	0.21de	0.029a
BI	13.48de	85.23ab	0.55cde	82.91d	-0.25fg	19.17h	32.8bc	0.16f	0.028ab
BJ	12.84e	86.40a	0.45e	73.07h	2.01a	29.07b	33.8a	0.32a	0.027ab
BK	16.14a	82.97b	0.78a	78.45fg	1.34b	35.28a	33.6cd	0.18ef	0.028ab

注:同列中不同字母代表差异显著( $p < 0.05$ )

由表 1 可看出,不同国家黄油的水分含量在 12.84% ~ 16.14% 之间,大部分样品的水分含量在 15% 左右,水分含量最高的是新西兰黄油,最低的是澳大利亚黄油。黄油生产过程中搅拌速度、捏合速度和温度等工艺参数的差异会导致黄油水分含量的变化<sup>[2,14]</sup>。水分含量的增加会改变水滴之间的相互作用,改变脂肪结晶网络的强度,进一步影响黄油的物理特性<sup>[15]</sup>。油相是黄油的重要组成部分,不仅影响黄油结构和口感,还会影响挥发性物质的释放及消费者对挥发性物质的感知程度<sup>[16]</sup>。由表 1 可看出,11 种黄油的脂肪含量均不低于 82%,其中澳大利亚黄油脂肪含量最高,为 86.40%,新西兰黄油脂肪含量最低,为 82.97%,且二者之间表现出显著差异。一项关于荷兰黄油的研究表明,相较于传统的饲养方式,通过有机饲养方式获得黄油的脂肪含量明显更高<sup>[17]</sup>。新西兰黄油的蛋白质含量(0.78%)显著高于其他国家的,澳大利亚黄油的蛋白质含量最低,为 0.45%。11 种黄油的滑动熔点在 31.5 ~ 33.9°C 之间,酸值(KOH)和过氧化值分别在 0.15 ~ 0.32 mg/g 和 0.021 ~ 0.029 g/100 g 之间,均满足 GB 15196—2015 的要求[酸值(KOH) ≤ 1 mg/g, 过氧化值 ≤ 0.13 g/100 g]。

黄油的颜色会影响消费者对于黄油可涂抹性的感官评价<sup>[18]</sup>。由表 1 可看出,不同国家黄油的 L 值在 73.07 ~ 86.87 之间,其中,中国黄油的 L 值最高,澳大利亚黄油的 L 值最低。澳大利亚黄油的 a 值最高(2.01),阿根廷黄油的 a 值最低(-0.87)。所有

黄油的 b 值均不低于 14.19,其中新西兰黄油最高(35.28),中国黄油最低(14.19),所有国家黄油均呈黄色,这与其中所含的反式  $\beta$ -胡萝卜素有关<sup>[5]</sup>。黄油中的胡萝卜素来源于饲料,相较于喂养干草饲料,喂养青贮饲料获得的黄油具有更高水平的  $\beta$ -胡萝卜素<sup>[19]</sup>。

### 2.2 不同国家黄油脂肪酸和 sn-2 位脂肪酸组成

脂肪酸组成决定了黄油的热性能和结晶行为,进而会影响黄油的质构、流变等物理性能<sup>[18]</sup>。不同国家黄油脂肪酸组成如表 2 所示。不同国家黄油 sn-2 位脂肪酸组成如表 3 所示。

由表 2 可知,在 11 种黄油样品中,棕榈酸(C16:0, 28.09% ~ 35.22%)含量最高,其次是油酸(C18:1, 20.96% ~ 28.23%)、硬脂酸(C18:0, 10.13% ~ 12.49%)和肉豆蔻酸(C14:0, 10.20% ~ 12.22%)。此外,月桂酸(C12:0)含量在 2.87% ~ 4.20% 之间,亚油酸(C18:2)含量在 1.76% ~ 3.40% 之间,癸酸(C10:0)含量在 2.32% ~ 2.90% 之间,辛酸(C8:0)、十五烷酸(C15:0)、丁酸(C4:0)、己酸(C6:0)、棕榈油酸(C16:1)含量基本在 1% ~ 2% 的范围内,其余脂肪酸含量基本低于 1%。这与 Ziarno 等<sup>[20]</sup>的研究结果类似。黄油中饱和脂肪酸(SFA)含量最高,14 种 SFA 占总脂肪酸的 64.35% ~ 71.07%。在黄油中发现 7 种单不饱和脂肪酸(MUFA)和 8 种多不饱和脂肪酸(PUFA),含量分别为 25.85% ~ 31.89% 和 3.04% ~ 4.76%。不

饱和脂肪酸(UFA)含量最高的是爱尔兰黄油(35.65%),最低的是荷兰黄油(28.93%)。11种黄油中含有0.89%~2.18%的反式脂肪酸(TFA)。饲料中的UFA通过反刍动物瘤胃中微生物的生化

氢化转化为SFA,在这个过程中,产生了一些TFA的中间体,这些中间体存在于乳脂中,故黄油中会含有TFA<sup>[21]</sup>。

表2 不同国家黄油的脂肪酸组成

脂肪酸	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	%
C4:0	1.66a	1.87a	1.85a	1.76a	1.72a	1.75a	1.76a	1.84a	1.65a	1.75a	1.76a	
C6:0	1.41a	1.52a	1.59a	1.55a	1.48a	1.42a	1.56a	1.59a	1.41a	1.56a	1.48a	
C8:0	1.03cd	1.04bcd	1.10abc	1.10abc	1.07abc	0.98d	1.13ab	1.15a	1.03cd	1.10abc	1.09abc	
C10:0	2.71a	2.59a	2.78a	2.87a	2.74a	2.32a	2.89a	2.90a	2.66a	2.76a	2.65a	
C11:0	0.09a	0.07ab	0.05b	0.07ab	0.07ab	0.04b	0.07ab	0.06ab	0.07ab	0.05b	0.05b	
C12:0	3.37cd	3.10e	3.45cd	3.77b	3.38cd	2.87f	3.95b	3.54c	3.30de	3.45cd	4.20a	
C13:0	0.13a	0.12ab	0.10ab	0.12ab	0.12ab	0.08b	0.11ab	0.09ab	0.13a	0.09ab	0.10ab	
C14:0	10.50a	10.20a	11.99a	12.09a	11.04a	10.54a	12.22a	10.76a	11.08a	12.16a	10.82a	
C14:1	1.07c	0.72f	1.08c	1.14b	0.94d	1.23a	1.18ab	0.77f	0.84e	1.15b	0.61g	
C15:0	1.13a	1.05a	1.19a	1.22a	1.11a	1.14a	1.18a	1.07a	1.22a	1.22a	1.00a	
C15:1	0.20c	0.24abc	0.30a	0.24abc	0.22bc	0.30a	0.22bc	0.20c	0.27abc	0.29ab	0.21c	
C16:0	35.22a	35.03ab	32.17abcde	33.84abcd	29.95cde	30.00bcde	35.19a	28.09e	30.95abcde	34.91abc	29.36de	
C16:1	1.99a	1.32d	1.56bcd	1.74abc	1.56bcd	1.38cd	1.76ab	1.63abcd	1.46bcd	1.60bcd	1.71abc	
C17:0	0.53g	0.61ef	0.74cd	0.68de	0.59fg	0.77c	0.73cd	0.93b	0.69de	0.80c	1.02a	
C17:1	0.17e	0.22de	0.31bc	0.25bcd	0.17e	0.24cde	0.33b	0.49a	0.26bcd	0.30bc	0.46a	
C18:0	10.13b	12.35ab	11.02ab	10.31ab	11.96ab	12.49a	10.15b	12.20ab	11.69ab	10.71ab	12.19ab	
C18:1 <sub>t</sub>	1.56a	1.10c	1.39b	0.44d	1.59a	0.46d	0.41d	0.33d	1.46ab	1.33b	0.33d	
C18:1	22.16de	22.18de	23.63cde	23.34cde	26.13abc	27.06ab	21.80e	28.23a	25.02bcd	20.96e	26.92ab	
C18:2 <sub>t</sub>	0.54bcd	0.53bcde	0.47de	0.45e	0.60ab	0.56bc	0.50cde	0.60ab	0.57bc	0.54bcd	0.66a	
C18:2	3.40a	2.99ab	1.94bcde	1.91cde	2.27bcde	2.83abcd	1.80de	2.02bcde	2.88abc	1.81de	1.76e	
C18:3 <sub>n-6</sub>	0.04a	0.11a	0.09a	0.08a	0.10a	0.11a	0.07a	0.07a	0.09a	0.09a	0.07a	
C18:3 <sub>n-3</sub>	0.37f	0.40ef	0.51de	0.35f	0.46ef	0.69bc	0.43ef	0.78ab	0.46ef	0.62cd	0.82a	
C20:0	0.11b	0.10b	0.12b	0.13b	0.14b	0.11b	0.11b	0.11b	0.14b	0.13b	0.19a	
C20:1	0.05b	0.16ab	0.18ab	0.19a	0.21a	0.21a	0.15ab	0.23a	0.19a	0.24a	0.18ab	
C20:2	0.02a	0.04a	0.04a	0.02a	0.03a	0.03a	0.02a	0.03a	0.04a	0.03a	0.03a	
C20:3	0.15a	0.08a	0.09a	0.07a	0.12a	0.11a	0.10a	0.07a	0.14a	0.11a	0.05a	
C20:4	0.19a	0.13abc	0.13abc	0.11bc	0.11bc	0.15abc	0.11bc	0.09c	0.18ab	0.11bc	0.10bc	
C20:5	0.04e	0.05de	0.07bcd	0.06de	0.06de	0.07bcd	0.04e	0.11ab	0.06cde	0.09abc	0.13a	
C22:0	0.01c	0.07ab	0.08a	0.07ab	0.07ab	0.06ab	0.03bc	0.03bc	0.06ab	0.07ab	0.06ab	
SFA	68.03ab	69.74a	68.23ab	69.60a	65.44bc	64.57c	71.07a	64.35c	66.07bc	70.74a	65.96bc	
UFA	31.97bc	30.26c	31.77bc	30.40c	34.56ab	35.43a	28.93c	35.65a	33.93ab	29.26c	34.04ab	
MUFA	27.21de	25.94e	28.43bcde	27.36cde	30.80ab	30.88ab	25.85e	31.89a	29.51abcd	25.86e	30.42abc	
PUFA	4.76a	4.32abcd	3.34de	3.04e	3.75abcde	4.55ab	3.08e	3.75abcde	4.42abc	3.40cde	3.62bcde	
TFA	2.10a	1.63c	1.86b	0.89d	2.18a	1.02d	0.91d	0.93d	2.03ab	1.87b	0.99d	

注:同行中不同字母代表差异显著( $p < 0.05$ )。结果以黄油乳脂为基准,下同

表3 不同国家黄油sn-2位脂肪酸组成

脂肪酸	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	%
C4:0	2.25bc	2.50b	2.55b	2.17bc	2.53b	2.19bc	1.99c	2.19bc	2.41bc	2.04c	3.20a	
C6:0	5.62f	6.52e	8.49b	7.27d	9.12a	6.26e	6.44e	6.26e	7.84c	6.64e	6.61e	
C8:0	10.63d	13.95bc	19.63a	16.36b	20.69a	12.72cd	14.31bc	12.72cd	15.43bc	13.82bc	14.92bc	
C10:0	1.73a	1.40a	1.41a	1.72a	1.64a	1.98a	1.68a	1.98a	1.69a	1.71a	2.16a	

续表 3

脂肪酸	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK
C11:0	1.39d	2.23bc	3.13a	2.62b	3.27a	1.67d	2.12c	1.67d	2.46bc	2.09c	2.37bc
C12:0	3.33ab	2.91b	2.92b	3.42ab	2.91b	3.73ab	3.64ab	3.73ab	3.12b	3.43ab	4.31a
C13:0	0.14b	0.10b	0.07b	0.10b	0.09b	0.11b	0.10b	0.11b	0.12b	0.10b	0.24a
C14:0	11.96abc	11.46bc	11.74abc	12.92ab	9.53c	13.68ab	13.70ab	13.68ab	12.20ab	14.37a	12.57ab
C14:1	0.88e	0.95de	1.36a	1.16bc	0.98de	1.10cd	1.35a	1.10cd	1.22abc	1.31ab	1.21abc
C15:0	0.96bc	0.95bc	0.93c	1.02abc	0.75d	1.09ab	1.03abc	1.09ab	1.04abc	1.16a	0.94bc
C15:1	0.22abc	0.24abc	0.27ab	0.25abc	0.19c	0.23abc	0.21bc	0.23abc	0.27ab	0.29a	0.21bc
C16:0	33.92a	34.82a	26.33d	29.61bc	20.93e	30.00bc	32.36ab	30.00bc	27.34cd	33.05a	27.32cd
C16:1	1.99bcd	1.67d	2.10bc	2.07bc	2.36ab	2.07bc	2.10bc	2.07bc	1.62d	1.74cd	2.53a
C17:0	0.42a	0.43a	0.39a	0.38a	0.28a	0.53a	0.36a	0.53a	0.41a	0.41a	0.48a
C17:1	0.18b	0.13b	0.18b	0.19b	0.19b	0.31a	0.18b	0.31a	0.20b	0.19b	0.40a
C18:0	7.73a	7.06ab	5.44bc	5.45bc	5.86bc	6.19abc	5.55bc	6.19abc	6.31abc	5.28c	4.84c
C18:1 <sub>t</sub>	1.22a	0.47c	0.45c	0.31d	0.69b	0.48c	0.28d	0.48c	0.50c	0.32d	0.31d
C18:1	12.90a	9.55b	9.90b	10.11b	13.88a	12.95a	10.00b	12.95a	12.45a	9.25b	13.23a
C18:2 <sub>t</sub>	0.40a	0.28bc	0.21d	0.22d	0.31b	0.32b	0.24cd	0.32b	0.33b	0.22d	0.41a
C18:2	0.95b	0.50f	0.36g	0.59de	1.10a	0.55ef	0.36g	0.55ef	0.94b	0.65d	0.81c
C20:1	0.53d	0.87c	1.19a	0.89c	1.26a	0.84c	0.92bc	0.84c	0.98b	0.87c	0.06e
C22:0	0.63f	0.98cde	0.95de	1.18b	1.42a	1.01cde	1.07bcd	1.01cde	1.13bc	1.05bcd	0.89e
SFA	80.72bc	85.33a	83.99a	84.21a	79.03c	81.16bc	84.37a	81.16bc	81.50b	85.16a	80.84bc
UFA	19.28ab	14.67c	16.01c	15.79c	20.97a	18.84ab	15.63c	18.84ab	18.50b	14.84c	19.16ab
MUFA	17.92a	13.89c	15.44bc	14.98c	19.56a	17.98a	15.03bc	17.98a	17.24ab	13.97c	17.94a
PUFA	1.36a	0.79d	0.57e	0.81cd	1.41a	0.87c	0.60e	0.87c	1.26b	0.88c	1.22b
TFA	1.62a	0.76cd	0.66e	0.53f	1.00b	0.80c	0.52f	0.80c	0.83c	0.54f	0.72de

由表 3 可看出, sn-2 位 C16:0 含量最高, 在 20.93% ~ 34.82% 之间, 其次是 C8:0, 含量在 10.63% ~ 20.69% 之间, 不同样品之间差异较大。sn-2 位的 SFA 和 UFA 含量分别在 79.03% ~ 85.33% 和 14.67% ~ 20.97% 之间。与总脂肪酸组成相比, 更多的 SFA 分布在 sn-2 位。sn-2 位的 MUFA 和 PUFA 含量分别在 13.89% ~ 19.56% 和

0.57% ~ 1.41% 之间。不同黄油 sn-2 位的 TFA 含量在 0.52% ~ 1.62% 之间。

### 2.3 不同国家黄油 TAG 和甘油酯组成

TAG 组成会影响脂肪的结晶, TAG 的构型对称性与晶体形成过程中的多态性有关<sup>[22]</sup>。不同国家黄油的 TAG 和甘油酯组成分别如表 4、表 5 所示。

表 4 不同国家黄油的 TAG 组成

TAG	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK
BuOLa	0.69c	0.66cd	0.50e	0.41f	0.55e	0.58de	0.36fg	0.97a	0.83b	0.30g	0.41f
BuMM	0.89ef	1.46bcd	1.44bcd	1.31d	0.85f	1.57b	1.34cd	1.86a	1.52bc	1.34d	1.04e
BuOM	1.41cd	1.29de	1.14e	1.83b	1.79b	1.81b	1.36d	2.17a	1.43cd	1.80b	1.55c
BuMP	1.86a	1.19e	1.86a	1.60bc	1.55c	1.49cd	1.91a	1.75ab	1.62bc	1.31de	1.19e
CaLaM	0.30e	0.58c	0.53cd	0.85b	0.30e	0.60c	0.48d	0.49d	0.99a	0.14f	0.58c
BuOP	1.22ef	2.57bc	1.59de	2.76ab	3.23a	1.88d	2.06cd	0.98f	1.95d	1.83d	1.71de
BuPP	3.12b	2.52c	3.11b	1.55e	3.00b	2.14cd	1.74de	3.91a	4.28a	4.21a	3.04b
MLaCa	4.65a	4.18b	3.52cd	4.22b	4.15b	2.27e	3.58c	3.15d	2.66e	3.64c	4.50ab
BuOS	1.29f	1.49ef	2.67b	2.35c	1.56e	1.61e	1.56e	3.02a	2.21c	1.85d	2.94a
CyOO	2.70de	2.58e	2.93de	2.66de	3.22d	4.28c	5.41b	4.50c	5.40b	6.51a	4.73c
CoOP	7.28ab	7.02bc	6.87bc	7.14bc	8.17a	6.40bc	6.51bc	6.28c	6.68bc	6.88bc	7.06bc
CoPP	6.84cd	6.24d	7.05bc	7.73b	8.69a	7.78b	6.28d	7.30bc	6.69cd	6.84cd	7.62b
BuPS	1.38cd	2.19a	1.36d	1.48cd	1.07e	1.49cd	1.54bcd	1.40cd	1.55bcd	1.57bc	1.70b
MLaLa	3.73a	3.47ab	3.17bcd	2.67f	2.21g	2.84def	2.88def	2.68ef	2.96cdef	3.31bc	3.04cde
OLaCa	3.59abc	3.89a	3.78ab	3.41bc	2.99d	3.89a	3.32cd	3.76ab	3.53abc	3.77ab	3.87a
OLaLa	2.49a	1.85de	1.50f	1.04g	1.97cd	2.47a	2.17bc	1.59ef	1.44f	1.39f	2.33ab

续表 4

TAG	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK
LLLn	0.86f	1.22d	1.10de	1.09de	1.45c	0.95ef	1.00ef	2.60a	0.62g	1.72b	1.64b
CaOM	0.63f	0.50fg	0.39g	1.09bc	1.14bc	0.80e	1.92a	1.05bcd	1.19b	1.00cd	0.93de
MMLa	1.73a	1.67a	0.27e	0.57d	1.52ab	0.46de	1.32b	1.04c	1.06c	0.84c	0.88c
CaOP	0.78bc	0.94a	0.55e	0.73c	0.75bc	0.70cd	0.85ab	0.59e	0.77bc	0.70cd	0.60de
LLL	1.94d	1.50e	1.42e	2.05cd	1.23e	2.32c	2.82ab	2.29c	2.77b	2.37c	3.13a
PLLa	0.34fg	0.29g	0.75ab	0.81a	0.77ab	0.67bc	0.52de	0.62cd	0.65bc	0.44ef	0.17h
LLaO	2.86a	2.08e	2.61bc	1.58g	2.30de	1.66f	2.66abc	2.09e	2.48cd	2.84ab	2.38d
MOLa	2.90a	2.94a	2.23bc	1.74e	2.42b	1.72e	2.45b	1.78de	2.08cd	2.77a	1.75e
PMLa	0.90h	1.39g	1.74f	3.65a	2.20e	1.00h	2.36de	3.03b	2.60cd	2.11e	2.87bc
PLL	3.84b	3.39cde	4.81a	3.04f	2.28g	3.73bc	3.23ef	3.28def	3.60bcd	3.26def	3.44cde
POLa	3.41a	3.11abc	3.17ab	2.27ef	2.22ef	2.12f	2.58de	1.93f	2.77cd	2.95bcd	2.27ef
PML	0.67e	0.73e	1.44b	0.51f	1.58a	1.21c	0.72e	1.26c	0.96d	0.67e	1.71a
LOO	2.95f	3.91c	4.40b	5.05a	3.44d	3.36de	3.58cd	2.87f	3.58cd	3.34de	3.01ef
PLO	6.55abc	6.01cd	5.84cd	7.25a	4.89e	6.30bcd	5.96cd	6.95ab	6.33bcd	6.60abc	5.60de
PPL	3.61bc	2.33fg	4.54a	2.78e	2.23fg	2.20g	3.26cd	1.35h	2.64ef	3.00de	3.74b
PSM	1.75de	1.45f	2.46a	2.51a	2.36ab	1.79de	1.46f	1.90cd	1.56ef	1.48f	2.13bc
OOO	3.99a	3.72ab	2.61d	3.48b	3.55ab	3.62ab	2.89cd	3.54ab	3.24bc	2.91cd	2.84cd
POO	6.71bcd	6.53cde	7.30ab	6.32de	6.31de	7.67a	6.57bcde	7.08abc	5.86ef	5.23f	5.25f
PPO	2.48a	2.04b	1.47d	1.71cd	1.79c	2.60a	1.78c	1.16e	1.80c	1.86bc	1.20e
PPP	0.44de	0.48cd	0.56bc	0.68a	0.49cd	0.36e	0.48cd	0.71a	0.50cd	0.51cd	0.62ab
PSL	0.63de	0.57de	0.89cd	0.64de	1.14bc	1.29b	1.83a	1.14bc	0.45e	0.61de	0.80cde
SOO	2.77b	3.79a	2.42bc	2.53bc	2.14c	3.96a	2.76b	1.56d	2.45bc	1.33d	1.72d
PSO	2.07bc	2.74a	1.39ef	1.83cd	2.33b	2.74a	1.63de	1.26f	2.09bc	1.95c	1.20f
SSP	0.44g	0.97cd	0.67f	1.08c	1.47a	1.26b	1.05c	0.85de	0.59f	0.80e	0.89de
SSO	0.95d	1.85a	1.20bcd	1.27bc	1.75a	1.74a	1.35bc	1.40b	1.09cd	1.41b	1.29bc
SSS	0.39e	0.66cd	0.74bc	0.70bc	0.94a	0.65cd	0.44e	0.86ab	0.53de	0.63cd	0.66cd

注: Bu. 丁酸; Co. 己酸; Cy. 辛酸; Ca. 癸酸; La. 月桂酸; M. 肉豆蔻酸; P. 棕榈酸; S. 硬脂酸; O. 油酸; L. 亚油酸; Ln. 亚麻酸。  
TAG 构型包括可能的位置异构体

表 5 不同国家黄油的甘油酯组成

甘油酯	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK
TAG	98.24a	98.30a	98.11a	98.19a	98.13a	97.90a	98.40a	98.12a	98.56a	98.10a	98.51a
DAG	1.30bcd	1.20ef	1.59a	1.23cde	1.20ef	1.36bc	0.84g	1.43b	1.12f	1.11f	1.15f
FFA	0.47e	0.50e	0.29g	0.58d	0.66c	0.73b	0.76ab	0.45e	0.32fg	0.80a	0.34f

由表 4 可看出,从黄油中检测出 42 种 TAG,不同国家黄油的 TAG 种类一致,但含量不同。总体来说,MLaCa、CyOO、CoOP、CoPP、MLaLa、OLaCa、PLL、LOO、PLO、OOO 和 POO 的含量在所有国家中均在 2% 以上。不同饱和度的 TAG 的熔点不同<sup>[23]</sup>,不同国家黄油中均存在三饱和、单不饱和、二不饱和、三不饱和型 TAG,这使得高、中、低熔点的 TAG 同时存在,不同熔点 TAG 的存在使黄油在 0~30℃ 之间均存在固态脂肪,这使得黄油具有良好的塑性<sup>[24]</sup>。

由表 5 可看出,不同国家的黄油乳脂主要由 TAG 组成,含量在 97.90%~98.56% 之间,且不同国家黄油之间无显著差异( $p > 0.05$ ),DAG 含量在 0.84%~1.59% 之间,FFA 含量在 0.29%~0.80% 之间,不同国家黄油乳脂的 DAG、FFA 含量均存在

显著差异。FFA 含量与先前研究报道的大致相同<sup>[8,17]</sup>。不同国家的黄油乳脂中均未检测出 MAG。

#### 2.4 不同国家黄油蛋白质类型

蛋白质分子中氨基和羧基的存在使蛋白质具有两亲性,在黄油中起到乳化剂的作用,可提高黄油的稳定性。不同国家黄油主要蛋白质的含量如图 1 所示。

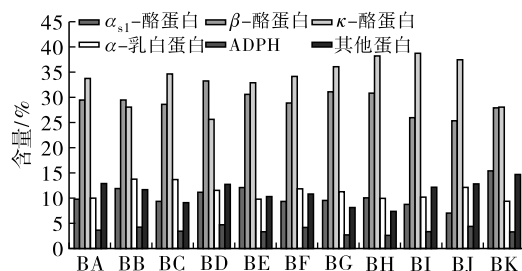


图 1 不同国家黄油主要蛋白质的含量

由图 1 可看出,不同国家黄油中主要存在 Adipophilin (ADPH)、 $\beta$ -酪蛋白、 $\alpha_{s1}$ -酪蛋白、 $\kappa$ -酪蛋白和  $\alpha$ -乳白蛋白 5 种蛋白质,总的来说  $\kappa$ -酪蛋白的含量最高,在 25.89% ~ 38.88% 之间。11 个国家中意大利黄油的  $\kappa$ -酪蛋白含量最高,德国黄油的  $\kappa$ -酪蛋白含量最低。 $\beta$ -酪蛋白在德国黄油中的含量最高(33.30%)、在澳大利亚黄油中的含量最低(25.42%)。除美国和德国黄油中  $\kappa$ -酪蛋白含量低于  $\beta$ -酪蛋白的外,其余国家黄油中  $\kappa$ -酪蛋白含量均高于  $\beta$ -酪蛋白的。不同国家黄油中  $\alpha$ -乳白蛋白含量在 9.59% ~ 13.95% 之间,其中美国黄油的  $\alpha$ -乳白蛋白含量最高。与其他国家黄油比较,

新西兰、丹麦和爱尔兰的黄油中  $\alpha$ -乳白蛋白含量相对较少,分别为 9.59%、9.95% 和 10.01%。值得注意的是,这 3 个国家黄油中的  $\alpha$ -乳白蛋白含量低于  $\alpha_{s1}$ -酪蛋白,而其余国家黄油显示出相反的趋势。新西兰黄油的  $\alpha_{s1}$ -酪蛋白含量最高,为 15.65%,而澳大利亚黄油的最低,为 7.12%。ADPH 是一种与脂肪酸转运有关的蛋白质,其含量相对较低,在 2.69% ~ 4.84% 之间,其中德国黄油中含量最高,爱尔兰黄油中含量最低。

## 2.5 不同国家黄油及黄油乳脂晶体多态性和形态

不同国家黄油和黄油乳脂的晶型如图 2 所示。

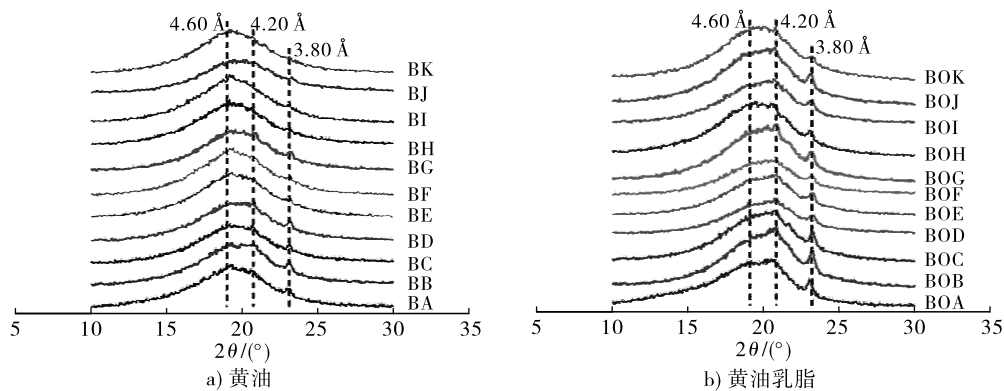


图 2 不同国家黄油和黄油乳脂的晶型

由图 2 可知:所有黄油及黄油乳脂均不含  $\alpha$  晶型(短间距 4.15 Å),绝大多数黄油及黄油乳脂主要以  $\beta'$  晶型(短间距 4.20、3.80 Å)为主,含有少量的  $\beta$  晶型(短间距 4.60 Å);而阿根廷、爱尔兰、意大利黄油中则主要以  $\beta$  晶型为主。晶体多态性受多种加

工因素的影响,快速冷却会产生更多均匀细小的  $\beta'$  晶体<sup>[25]</sup>。黄油中的  $\beta'$  晶体可以为提供良好的质地<sup>[26]</sup>。

不同国家黄油和黄油乳脂的晶体形态如图 3 所示。

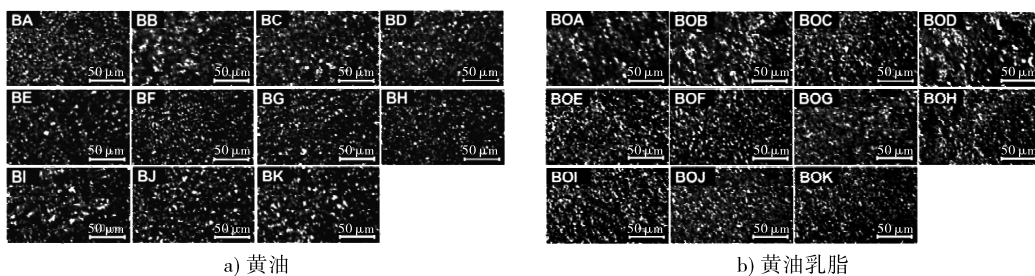


图 3 不同国家黄油和黄油乳脂的晶体形态

由图 3 可看出,所有黄油的晶体形态均表现出均匀精细的球晶,且具有较为致密的晶体网络结构,其中阿根廷和爱尔兰黄油晶体最为细小,美国、法国和意大利黄油中的一些小晶体颗粒相互聚集,形成稍大的晶体颗粒。黄油乳脂的晶体同样为细小的晶体,其中中国、美国和德国的黄油乳脂表现出轻微的晶体聚集,导致晶体略大。晶体之间的相互作用会决定晶体网络的性质,大量存在的小晶体会使产品的硬度提高,进而影响黄油的铺展性及

口感<sup>[7]</sup>。

## 2.6 不同国家黄油和黄油乳脂 SFC 分布

不同国家黄油和黄油乳脂的 SFC 如图 4 所示。

由图 4 可看出,随着温度的升高,不同国家黄油的 SFC 下降趋势差异较大,而黄油乳脂的 SFC 下降趋势大致相同。在测定温度范围内,黄油乳脂的 SFC 高于黄油的,但随着温度的升高,二者 SFC 之间的差异逐渐减小。在 0 ~ 10 °C 及 25 ~ 30 °C 区间内,黄油乳脂 SFC 下降趋势较为平缓,在 10 ~ 20 °C



的区间内下降更为剧烈。与黄油乳脂相比,黄油 SFC 随温度升高而下降的趋势更为平缓,这与黄油

中含有的水分、蛋白质等物质有关。

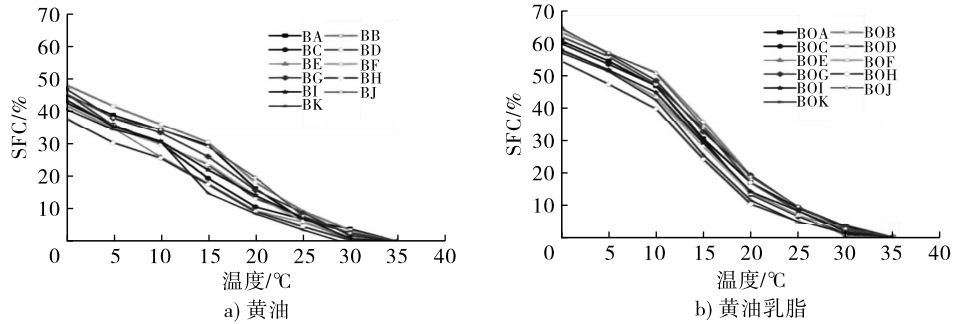


图4 不同国家黄油和黄油乳脂的 SFC

由图4可看出,在0~10℃下爱尔兰黄油的 SFC 最低。10~15℃内,新西兰黄油的 SFC 下降速率最快,并在15~30℃内 SFC 最低。除20℃外,美国黄油的 SFC 在其余温度范围内高于其他国家黄油的。不同国家黄油在15℃下的 SFC 差异较大, SFC 在14.75% (新西兰黄油)~30.45% (美国黄油)范围内。25℃时只有新西兰黄油乳脂的 SFC 低于爱尔兰黄油乳脂的,30℃时新西兰和丹麦的黄油乳脂的 SFC 低于爱尔兰黄油乳脂的,除这两种情况外,其他温度下爱尔兰黄油乳脂的 SFC 均低于其他

国家黄油乳脂的。0℃时澳大利亚和荷兰黄油乳脂的 SFC 高于美国黄油乳脂的,20℃时只有荷兰黄油乳脂的 SFC 比美国黄油乳脂的高,除这两种情况外,其他温度下美国黄油乳脂的 SFC 最高。这是因为在11个样品中,爱尔兰黄油的 UFA 含量最高,而美国、荷兰和澳大利亚黄油的 SFA 处于较高含量。

## 2.7 不同国家黄油和黄油乳脂的硬度和流变性

不同国家黄油和黄油乳脂在0℃和25℃下的硬度分别如图5和图6所示。

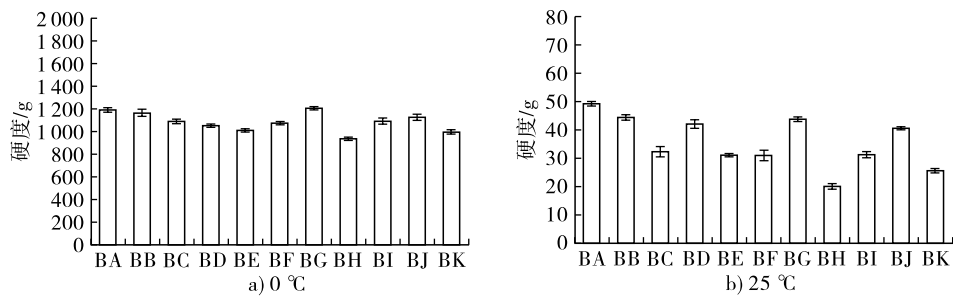


图5 不同国家黄油的硬度

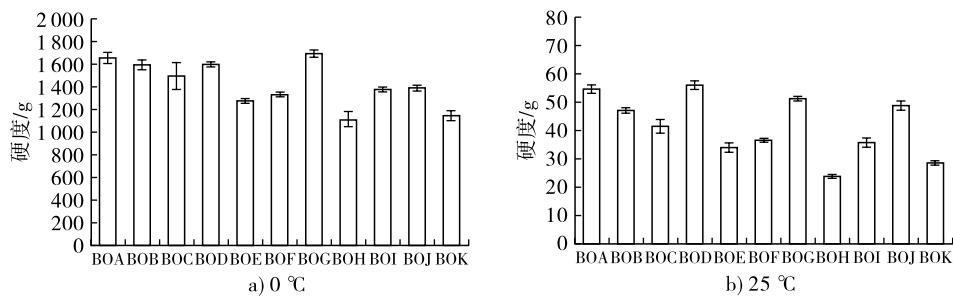


图6 不同国家黄油乳脂的硬度

由图5可看出,不同国家黄油在0℃下的硬度为938.13~1210.44 g,其中荷兰黄油的硬度最高,爱尔兰黄油的硬度最低。25℃下,中国黄油的硬度最高,为48.99 g,爱尔兰黄油的硬度最低,为20.15 g。由图6可看出,0℃和25℃下黄油乳脂的硬度分别为1109.65~1690.93 g和23.90~59.72 g。黄

油和黄油乳脂的硬度随着温度的升高下降,这是由于温度升高样品的 SFC 显著降低造成的。在0℃时,黄油和黄油乳脂的硬度差异很大,而在25℃时两者的硬度差异很小,这与0℃和25℃下黄油和黄油乳脂的 SFC 差异一致。脂肪酸组成在影响黄油硬度方面起着重要作用,SFA 含量越高,黄油的硬度

越高<sup>[27]</sup>。此外,黄油制备过程中的冷却速率,水分含量,老化或捏合的温度、时间,以及剪切速率等因素也会影响黄油的硬度<sup>[14,28]</sup>。

图7、图8分别为不同国家黄油和黄油乳脂的流变性质。

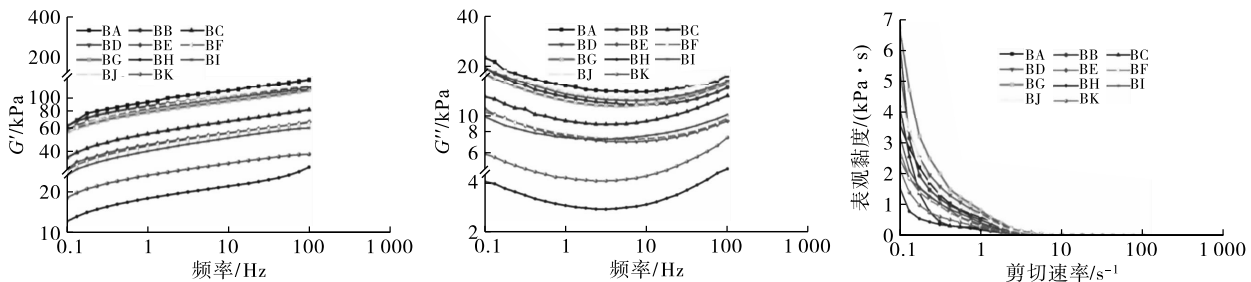


图7 不同国家黄油的流变性质

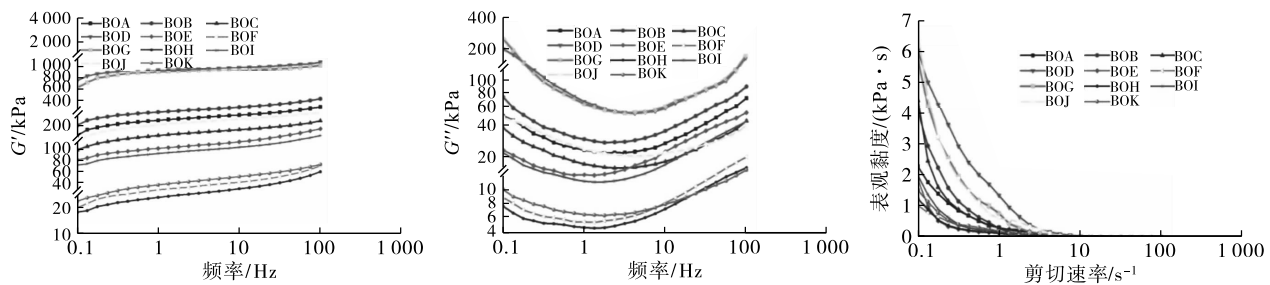


图8 不同国家黄油乳脂的流变性质

由图7、图8可知,在测定范围内,所有黄油和黄油乳脂的 $G'$ 都高于 $G''$ ,不同国家黄油和黄油乳脂均表现出良好的固体性质。当剪切速率低于 $1\text{ s}^{-1}$ 时,不同国家黄油和黄油乳脂的表观黏度都随着剪切速率的增加而降低。在剪切速率高于 $1\text{ s}^{-1}$ 时,不同国家黄油和黄油乳脂的表观黏度基本保持不变。所有的黄油和黄油乳脂都表现出典型的剪切变稀的非牛顿流体的特征行为。黄油出现剪切变稀行为是由于固体脂肪颗粒在流体中的定向、延伸、变形或分散导致流动阻力降低<sup>[29]</sup>。此外,脂肪与总固体的比例以及样品的硬度也会影响黄油的表观黏度<sup>[30]</sup>。

### 3 结论

本研究对11个国家的黄油和黄油乳脂的理化性质进行了系统的评价和比较。结果表明,中国黄油的 $L$ 值最高,新西兰黄油 $b$ 值最高。11个国家黄油的水分和脂肪含量分别为 $12.84\% \sim 16.14\%$ 和 $82.97\% \sim 86.40\%$ ,蛋白质含量为 $0.45\% \sim 0.78\%$ 。所有黄油的滑动熔点在 $31.5 \sim 33.9\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,酸值(KOH)均不超过 $0.32\text{ mg/g}$ ,过氧化值不高于 $0.029\text{ g/100 g}$ 。11个国家黄油共检测出29种脂肪酸,其中包括14种SFA、7种MUFA和8种PUFA,TFA的含量在 $0.89\% \sim 2.18\%$ 。爱尔兰黄油的UFA含量最高,SFC( $0 \sim 10\text{ }^\circ\text{C}$ )和硬度最低。相比之下,美国黄油的SFA含量较高,其SFC和硬度相对较高。黄油主要由TAG组成,且含有少量的DAG和FFA,11个国

家黄油中共检测出42种TAG。SDS-PAGE分析表明,11个国家黄油中的蛋白质主要由ADPH、 $\beta$ -酪蛋白、 $\alpha_{s1}$ -酪蛋白、 $\kappa$ -酪蛋白和 $\alpha$ -乳白蛋白组成,各个蛋白组分的含量存在差异。PLM和XRD结果表明,不同国家黄油和黄油乳脂均具有精细的晶体形态,多数晶体类型以 $\beta'$ 晶体为主。不同国家黄油乳脂在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的硬度均大于黄油的硬度。流变学分析表明,所有黄油和黄油乳脂都表现出良好的黏弹性,并具有典型的剪切变稀性能。综上,不同国家黄油的理化性质存在差异。

### 参考文献:

- [1] PĂDUREȚ S. The effect of fat content and fatty acids composition on color and textural properties of butter[J/OL]. *Molecules*, 2021, 26(15): 4565 [2023-11-15]. <https://doi.org/10.3390/molecules26154565>.
- [2] 孙剑锋,王颖. 黄油的加工方法及其物理性质和营养成分[J]. *中国食物与营养*, 2011, 17(11): 33-35.
- [3] RUTKOWSKA J, ADAMSKA A, BIALEK M. Fatty acid profile of the milk of cows reared in the mountain region of Poland[J]. *J Dairy Res*, 2012, 79(4): 469-476.
- [4] STANIEWSKI B, OGRODOWSKA D, STANIEWSKA K, et al. The effect of triacylglycerol and fatty acid composition on the rheological properties of butter[J/OL]. *Int Dairy J*, 2021, 114: 104913 [2023-11-15]. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104913>.
- [5] O'CALLAGHAN T F, FAULKNER H, MCAULIFFE S, et al. Quality characteristics, chemical composition, and

- sensory properties of butter from cows on pasture versus indoor feeding systems[J]. *J Dairy Sci*, 2016, 99(12): 9441–9460.
- [6] 李殿宝. 黄油的生产及品质营养评价[J]. *中国油脂*, 2005, 30(3): 30–31.
- [7] 陈寸红, 张虹, 毕艳兰, 等. 人造奶油结晶影响因素的研究进展[J]. *中国油脂*, 2013, 38(12): 17–22.
- [8] MTIBAA I, ZOUARI A, ATTIA H, et al. Effects of physical ripening conditions and churning temperature on the butter – making process and the physical characteristics of camel milk butter[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2021, 14(8): 1518–1528.
- [9] KRAUSE A J, MIRACLE R E, SANDERS T H, et al. The effect of refrigerated and frozen storage on butter flavor and texture[J]. *J Dairy Sci*, 2008, 91(2): 455–465.
- [10] 孙聪. 人乳替代脂的组成、相似性评价及制备研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2018.
- [11] YANG Z, JIN W, CHENG X, et al. Enzymatic enrichment of *n* – 3 polyunsaturated fatty acid glycerides by selective hydrolysis[J/OL]. *Food Chem*, 2021, 346: 128743[2023 – 11 – 15]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128743>.
- [12] LIU Y, XIONG L, KONTOPODI E, et al. Changes in the milk serum proteome after thermal and non – thermal treatment[J/OL]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 66: 102544[2023 – 11 – 15]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102544>.
- [13] LIMA I M, GURAYA H S. Optimization analysis of sunflower butter[J/OL]. *J Food Sci*, 2005, 70(6): 11457[2023 – 11 – 15]. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb11457.x>.
- [14] RØNHOLT S, KIRKENSGAARD J J K, MORTENSEN K, et al. Effect of cream cooling rate and water content on butter microstructure during four weeks of storage [J]. *Food Hydrocolloid*, 2014, 34: 169–176.
- [15] ROUSSEAU D, GHOSH S, PARK H. Comparison of the dispersed phase coalescence mechanisms in different table spreads[J]. *J Food Sci*, 2009, 74(1): E1–E7.
- [16] BAYARRI S, TAYLOR A J, HORT J. The role of fat in flavor perception: Effect of partition and viscosity in model emulsions[J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(23): 8862–8868.
- [17] PUSTJENS A M, BOERRIGTER – EENLING R, KOOT A H, et al. Characterization of retail conventional, organic, and grass full – fat butters by their fat contents, free fatty acid contents, and triglyceride and fatty acid profiling[J/OL]. *Foods*, 2017, 6(4): 26[2023 – 11 – 15]. <https://doi.org/10.3390/foods6040026>.
- [18] ROHM H, STROBL M, JAROS D. Butter colour affects sensory perception of spreadability[J]. *Z Lebensm Unters F A*, 1997, 205(2): 108–110.
- [19] NOZIÈRE P, GROLIER P, DURAND D, et al. Variations in carotenoids, fat – soluble micronutrients, and color in cows' plasma and milk following changes in forage and feeding level[J]. *J Dairy Sci*, 2006, 89(7): 2634–2648.
- [20] ZIARNO M, DEREWIAKA D, FLOROWSKA A, et al. Comparison of the spreadability of butter and butter substitutes[J/OL]. *Appl Sci*, 2023, 13(4): 2600[2023 – 11 – 15]. <https://doi.org/10.3390/app13042600>.
- [21] JENKINS T C, WALLACE R J, MOATE P J, et al. Board – invited review: Recent advances in biohydrogenation of unsaturated fatty acids within the rumen microbial ecosystem[J]. *J Anim Sci*, 2008, 86(2): 397–412.
- [22] PRATAMA Y, SIMONE E, RAPPOLT M. The unique crystallization behavior of buffalo milk fat [J]. *Cryst Growth Des*, 2021, 21(4): 2113–2127.
- [23] OH J H, MCCURDY A R, CLARK S, et al. Stabilizing polymorphic transitions of tristearin using diacylglycerols and sucrose polyesters[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2005, 82(1): 13–19.
- [24] ALI OMAR K, GOUNGA M E, LIU R, et al. Triacylglycerol composition, melting and crystallization profiles of lipase catalysed anhydrous milk fats hydrolysed [J]. *Int J Food Prop*, 2017(12): 1230–1245.
- [25] CAMPOS R, NARINE S S, MARANGONI A G. Effect of cooling rate on the structure and mechanical properties of milk fat and lard[J]. *Food Res Int*, 2002, 35(10): 971–981.
- [26] MENG Z, LIU Y, SHAN L, et al. Specialty fats from beef tallow and canola oil: Establishment of reaction conditions, characterization of products, and evaluation of crystal stability[J]. *Food Biophys*, 2011, 6(1): 115–126.
- [27] HURTAUD C, PEYRAUD J L. Effects of feeding camelina (seeds or meal) on milk fatty acid composition and butter spreadability[J]. *J Dairy Sci*, 2007, 90(11): 5134–5145.
- [28] 周绪霞, 戚雅楠, 丁玉庭. 黄油 – 代可可脂基奶油生产工艺优化及其晶型形成分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 276–282.
- [29] 王一川, 邓梓萌, 毛立科. 基于蜂蜡油凝胶的植物奶油制备与性质表征[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 43–50.
- [30] GLIBOWSKI P, ZARZYCKI P, KRZEPKOWSKA M. The rheological and instrumental textural properties of selected table fats[J]. *Int J Food Prop*, 2008, 11(3): 678–686.