

裴昱博, 于淼, 张国芳, 等. 水牛奶营养物质及其制品研究现状 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 344–354. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060170

PEI Yubo, YU Miao, ZHANG Guofang, et al. Research Status of Nutrients and Products of Buffalo Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 344–354. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060170

· 专题综述 ·

水牛奶营养物质及其制品研究现状

裴昱博¹, 于 淼¹, 张国芳¹, 李 春^{1,2,*}

(1. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学黑龙江省绿色食品科学研究院, 黑龙江哈尔滨 150028)

摘 要: 水牛奶中干物质含量较高, 其综合营养价值高于普通牛奶, 是多种生物活性成分的良好来源。因此, 水牛奶及其相关制品受到越来越多的消费者的关注。本文根据水牛奶营养物质及其制品相关研究的前沿成果, 介绍了水牛奶中蛋白质、脂肪、碳水化合物及其他营养物质的含量及其理化性质, 同时针对水牛奶乳制品, 如干酪、奶油、酸奶、冰淇淋等制备和相关研究进行了概述, 最后针对水牛奶中的生物活性物质开发功能性食品的可能性提供了见解, 为企业研发水牛奶相关产品提供参考。

关键词: 水牛奶, 营养物质, 酪蛋白, 乳脂肪, 水牛奶制品

中图分类号: TS252.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)18-0344-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060170

本文网刊:



Research Status of Nutrients and Products of Buffalo Milk

PEI Yubo¹, YU Miao¹, ZHANG Guofang¹, LI Chun^{1,2,*}

(1. College of Food Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Heilongjiang Academy of Green Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150028, China)

Abstract: The dry matter content in buffalo milk is relatively high, and its comprehensive nutritional value, which is higher than that of ordinary milk, is considered a good source of various bioactive components. Therefore, buffalo milk and its related products are receiving increasing attention from consumers. In this paper, the contents of protein, fat, carbohydrate and other nutrients in buffalo milk and their physical and chemical properties are introduced according to the cutting-edge research results on buffalo milk nutrients and their products. Meanwhile, the preparation and related research of buffalo milk dairy products, such as cheese, cream, yogurt and ice cream are summarized. Finally, this paper provides some insights on the possibility of developing functional food based on bioactive substances in buffalo milk and reference for enterprises to develop buffalo-milk-related products.

Key words: buffalo milk; nutrients; casein; milk fat; buffalo milk products

我国水牛的养殖地区主要集中在南方, 其中广西和云南的水牛业发展较好^[1], 同时产出的水牛奶的产量和品质也较高, 国外主要是欧盟、印度、意大利等地区^[2]。与牛奶相比, 较高的蛋白质、脂肪、乳糖、矿物质及酪蛋白胶束^[3]等营养成分, 促使水牛奶产业不断发展。此外, 有研究表明对荷斯坦牛奶过敏人群可以耐受水牛奶^[4]。水牛奶是一种重要的营养来源, 为特定地区的人们提供营养^[5]。因此, 水牛奶营养物

质及其生理功能以及在水牛奶产品上的应用已被广泛研究。

目前, 世界水牛奶生产量最多的国家分别是印度和巴基斯坦。在欧洲地区, 意大利是最强的奶水牛养殖区^[6]。我国在奶水牛产业发展方面, 主要是广西、云南发展较好且水牛奶产量也在增加, 但其他各省奶水牛业发展较慢。随着水牛奶的营养价值逐渐被关注并且开发利用, 水牛奶产业也得到发展。早在

收稿日期: 2023-06-19

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目重点项目 (CZKYF2021-2-B017); 中央引导地方科技发展专项资金 (贵科中引专项 2023-3)。

作者简介: 裴昱博 (2001-), 男, 大学本科, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: peiyubo2001@163.com。

* 通信作者: 李春 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能性乳基料和乳品微生物, E-mail: spxylch@126.com。

2006 年, 广西皇氏甲天下乳业股份有限公司“纯鲜水牛奶”产品通过出口检验开始出口中国香港。云南进行水牛奶加工的乳制品企业也不断增加, 如云南皇氏来思尔乳业有限公司、云南尼里-拉菲奶制品有限公司等企业不断研发水牛奶产品, 从普通的巴氏杀菌奶、酸奶, 到奶酪制作, 同时还根据不同地方的饮食风俗与制乳传统工艺特点, 用水牛奶制作奶饼、奶皮等, 丰富了水牛奶产品种类^[1]。

可见, 水牛奶产业正在迅速发展并且成为我国乳业发展中新的增长点。在水牛奶消费量快速增长、行业竞争加剧的同时, 消费者对水牛奶制品品质的要求也不断提高。本文根据水牛奶营养物质及其

制品的相关研究, 对水牛奶蛋白质、脂肪、碳水化合物等营养物质以及水牛奶相关的制品进行概述, 旨在为乳品企业研发水牛奶相关产品提供参考。

1 水牛奶营养物质

与常规的牛奶相比较, 张依等^[7]发现水牛奶的乳脂率、乳蛋白率及总固形物含量均显著高于牛奶, 但水牛奶的乳糖率显著低于牛奶。水牛奶中除了含有蛋白质、脂肪、乳糖等主要营养元素以外, 还含有丰富的氨基酸、中链脂肪酸、共轭亚油酸、钙和磷以及视黄醇和生育醇等, 符合我国居民的健康饮食需求。表 1 是牛奶、水牛奶和人乳常规营养成分含量的对比。

表 1 水牛奶、牛奶和人乳常规营养成分含量的比较^[8-12]
Table 1 Comparison of conventional nutrient contents of buffalo milk, milk and human milk^[8-12]

成分		水牛乳	牛乳	人乳
蛋白质(g/kg)	总酪蛋白	37.8	25.1	3.7
	α_s -酪蛋白	18.7	12.2	0.43
	β -酪蛋白	14.2	9.0	2.4
	κ -酪蛋白	4.9	3.2	0.87
	乳清蛋白	—	5.7	7.6
	β -乳球蛋白	3.9	1.14	—
	α -乳白蛋白	1.4	3.50	3.2
	免疫球蛋白	10.7	0.67	1.3
	血清白蛋白	0.3	0.35	0.5
	乳铁蛋白	0.3	0.47	2.3
	异亮氨酸	2.03	1.47	0.64
	亮氨酸	3.66	2.96	1.29
	苯丙氨酸	1.81	1.51	0.46
	赖氨酸	3.12	2.71	0.88
必需氨基酸(g/kg)	组氨酸	1.12	0.79	0.35
	精氨酸	1.14	0.98	0.31
	苏氨酸	1.82	1.31	0.56
	缬氨酸	2.19	1.84	0.75
	C4:0	3.84	3.30	0.60
	C6:0	1.38	1.60	0.07
饱和脂肪酸(%)	C8:0	0.91	1.30	0.21
	C10:0	1.54	3.00	1.39
	C12:0	2.07	3.10	4.71
	C14:0	9.38	3.10	3.92
	C16:0	28.62	26.50	18.68
	C18:0	16.32	微量	5.63
单不饱和脂肪酸(%)	C16:1	2.24	2.30	1.29
	C18:1	26.50	29.80	31.26
多不饱和脂肪酸(%)	C16:2	0.80	微量	微量
	C18:2	2.71	2.50	17.73
	C18:3	1.83	1.80	1.36
乳糖(g/L)		52	40~50	55~70
中性低聚糖(g/L)	乳糖-N-四糖	—	微量	0.5~1.5
	乳糖-N-岩藻五糖I	—	—	1.2~1.7
	乳糖-N-岩藻五糖II	—	—	0.3~1.0
	乳糖-N-岩藻五糖III	—	—	0.01~0.2
	乳糖-N-二岩藻六糖I	—	—	0.1~0.2
	NeuAc(α 2-6)乳糖	—	0.03~0.06	0.3~0.5
酸性低聚糖(g/L)	NeuAc(α 2-3)乳糖	—	—	0.1~0.3
	唾液酸-乳-N-四糖a	—	微量	0.03~0.2
	唾液酸-乳-N-四糖c	—	微量	0.1~0.6

续表 1

成分		水牛乳	牛乳	人乳
矿物质(mg/100 g)	钙	165	122	33
	磷	109.9	93	14
	镁	17.7	12	4
	钾	92.9	152	51
	钠	43.4	58	15
	氯	61.3	100	60
	铁	0.16	0.08	0.20
	铜	0.035	0.06	0.06
	锰	0.027	0.02	0.07
	锌	0.41	0.53	0.38
	碘	—	0.021	0.007
	硒(μg/100 mg)	—	0.96	1.52
	维生素A(μg/100 mL)	69	46	—
维生素	维生素C(mg/100 mL)	19.5~39	7.1~7.8	5.00
	维生素E(mg/100 mL)	0.19	0.07	—
	维生素B1(mg/100 mL)	0.05	0.05	0.017
	维生素B2(mg/100 mL)	0.17	0.11	0.036
	维生素B3(mg/100 mL)	0.09	0.017	0.17
	泛酸(mg/100 mL)	0.37	0.15	0.20
	维生素B6(mg/100 mL)	0.04	0.33	0.011
	叶酸(μg/100 mL)	0.6	5.0	5.5
	生物素(μg/10 mL)	2.02	2.0	0.4
	维生素B12(μg/100 mL)	0.4	0.45	0.03

1.1 蛋白质

水牛奶中蛋白质含量是普通牛奶的 1.5 倍^[13]。与牛奶相比,水牛奶中的蛋白质组成及其比例仍存在一些独特差异。水牛奶中酪蛋白含量约为 80%,乳清蛋白约为 20%^[14]。Nayak 等^[15]对水牛脱脂奶进行十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳分析,水牛奶蛋白质的主要组分有:α_{S1}-酪蛋白(α_{S1}-casein, α_{S1}-CN)、α_{S2}-酪蛋白(α_{S2}-casein, α_{S2}-CN)、β-酪蛋白(β-casein, β-CN)、κ-酪蛋白(κ-casein, κ-CN)、α-乳清蛋白(α-lactalbumin, α-La)、β-乳球蛋白(β-lactoglobulin, β-Lg)、免疫球蛋白、血清白蛋白(serum albumin, SA)和乳铁蛋白(lactoferrin, LF)等。

1.1.1 酪蛋白 水牛奶的酪蛋白存在着四种单体形式,它们分别为 α_{S1}-CN、α_{S2}-CN、β-CN 和 κ-CN^[16],其主要作用是给婴儿提供生长发育所需要的氨基酸、钙和磷酸盐的矿物质。

与牛奶酪蛋白相比,水牛奶酪蛋白中 α_{S1}、α_{S2}、β 和 κ 亚型的分布与占比不同:水牛奶和牛奶中的 α_{S1}-CN 占水牛奶酪蛋白组分的 40%,其一级结构由 199 个氨基酸组成;α_{S2}-CN 占水牛奶酪蛋白组分的 10%,由 207 个氨基酸组成;β-CN 占水牛奶酪蛋白组分的 45%,由 209 个氨基酸组成;κ-CN 约占水牛酪蛋白组分的 5%,其一级结构由 169 个氨基酸组成^[17]。

相比于其他大多数的酪蛋白,与牛奶相比,β-CN 作为水牛奶中含量最高的酪蛋白,在水牛奶中含量高达 35.4%^[18],并且具有一些独特的特性。β-CN 的两亲性结构在配方食品乳液体系中能赋予产

品良好的乳化性能,可作为表面活性剂分子,还可以用作口服药物的载体等^[19]。根据研究报道^[18],β-CN 可以分解多种功能性多肽,研究者们也认为 β-CN 具有免疫刺激和 ACE 活性抑制肽的潜在前体,有一定的发展潜力。

水牛奶中 κ-CN 含量为 15.7%,除了 β-CN 具有独特的特性,κ-CN 对酪蛋白胶束稳定性起着重要作用,其主要位于水牛奶中酪蛋白胶束的表面^[20]。κ-CN 可在凝乳酶的作用下水解成不溶性的 κ-CN 残基和可溶性的亲水性糖肽,这种水解导致不稳定的酪蛋白胶束形成凝胶沉淀^[21],利用这一特性可以制作奶酪。水牛乳中大量的 κ-CN 可以加速凝乳酶的酶促反应阶段,有利于降低干酪生产过程中凝乳酶的用量^[22],从而节省制作成本。此外,κ-CN 是真兽亚纲类动物乳中唯一的糖基化酪蛋白,其中含有的半胱氨酸和蛋氨酸均是含硫氨基酸。κ-CN 还可以为婴儿提供氨基酸、高利用率的钙和潜在的生物活性肽^[23]。

1.1.2 乳清蛋白 乳清蛋白约占乳蛋白的 20%,其种类有近几十种,最主要的四种是 β-Lg(50%),α-La(20%),牛血清白蛋白(10%)和免疫球蛋白^[24]。

β-Lg 是食品工业中使用最广泛的蛋白质之一。从水牛奶中纯化 β-Lg,同时保持其天然结构,对水牛奶乳制品行业具有实际影响。Zhao 等^[25]研究发现在 pH2.0 条件下,70 g/kg NaCl 可有效分离水牛奶乳清中的 β-Lg,并得到较高的 β-Lg 产率和活性。同时发现 NaCl 的存在和 pH 的变化对 β-Lg 的二级结构没有影响,但对 β-Lg 的三级结构有显著影响,随着

NaCl 浓度的增加,更多的疏水基团暴露出来。pH 的变化不影响色氨酸的暴露,但 pH 在 5.5~7.5 范围内会降低疏水基团对亲水环境的暴露。

α -La 作为乳品中的重要营养成分,具有易消化吸收、杀菌和诱导肿瘤细胞凋亡等功能^[26]。 α -La 富含人体必需的各种氨基酸,尤其是色氨酸、赖氨酸和半胱氨酸的相对含量较高,水牛奶中 α -La 含量更是高出普通牛奶的一倍多。此外, α -La 还可以调节乳糖形成,并在乳糖合成结束后从酶复合物中分离进入乳汁,成为生物活性蛋白成分。 α -La 与 Ca^{2+} 的结合对 α -La 的结构及其稳定性具有非常大的影响,甚至能够改变 α -La 的构象及物理化学性质等^[27]。根据上述特点,可以为水牛奶用于婴幼儿食品的开发提供一定帮助。

血清白蛋白是生物体内重要的载体蛋白,也是血液含量最丰富的蛋白质,能与小分子化合物结合起到储存的作用^[28],并将各种配体携带到各自的靶器官。水牛奶中的牛血清白蛋白(bovine serum albumin, BSA)与人血清白蛋白(human serum albumin, HSA)具有高度的同源性,所以通常使用 BSA 来研究血清白蛋白与小分子物质相互作用的机制^[29]。BSA 具有分子量为 66 kDa 的单个多肽链,由 583 个氨基酸残基组成,含有与 HAS 76% 的序列同源性,也是研究最多的蛋白质。

水牛奶中的免疫球蛋白主要包括免疫球蛋白 G(immunoglobulin G, IgG),也包括免疫球蛋白 M(immunoglobulin M, IgM)、免疫球蛋白 A(immunoglobulin A, IgA),其含量分别为 8.71、1.91 和 0.04 mg/mL。一般而言,牛初乳是免疫球蛋白的丰富来源,在婴儿自身免疫系统发育过程中赋予婴儿被动免疫力。Campanella 等^[30]通过免疫传感器测得水牛奶与荷斯坦牛奶中的 IgG 平均含量分别为 0.67 和 0.77 mg/mL。El-Loly 等^[31]采用单径向免疫扩散法对经过热处理的免疫球蛋白进行鉴定和检测。在温度高达 80 °C、15 s 的条件下,IgG 和 IgM 未完全变性,而 IgA 在此条件下完全变性;经过超滤后,总 IgG 含量较高,IgM、IgA 含量较低。

1.2 脂肪

脂肪酸(fatty acid, FA)在人体中负责正常生理功能和维持健康所必需的许多过程。饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)在膜形成所需的磷脂和鞘脂的合成以及各种调节蛋白的共价修饰中起着重要作用。单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFA)也参与其中的许多过程,并在维持膜脂质双层的最佳流动性方面发挥重要作用。部分多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)不能在人体内合成,但对健康至关重要。游离脂肪酸(free fatty acid, FFA)起源于食物中的脂肪分解^[32]。水牛奶的脂肪含有更多的饱和脂肪酸,包括棕榈酸、反式脂肪酸、亚麻酸(ω -3)和共轭亚麻酸。水牛奶的

脂肪球直径为 2.1~4.0 mm(平均 2.80 mm),有利于水牛奶的自然奶油化。

根据 Pegolo 等^[33]对 69 个地中海水牛奶样品中 272 种脂肪酸性状的谱状的实验,一共鉴定出 51 种单独的脂肪酸:包括 24 种饱和脂肪酸、13 种单不饱和脂肪酸和 14 种多不饱和脂肪酸。水牛奶中的主要脂肪酸分别为 16:0、18:1 顺式-9、14:0 和 18:0。SFA 在乳脂中占主导地位含量约为 70.49%;MUFA 和 PUFA 分别为 25.95% 和 3.54%。根据碳链长度分类,在水牛奶脂肪酸中,中链脂肪酸(11~16 个碳)占 53.7%,长链脂肪酸(17~24 个碳)和短链脂肪酸(4~10 个碳)分别占 32.73% 和 9.72%。n-3 和 n-6 脂肪酸含量分别为 0.46% 和 1.77%。水牛奶中的主要共轭亚油酸为瘤胃酸,占牛奶总脂肪酸的 0.45%。乳中短链脂肪酸和中链脂肪酸的含量在泌乳早期增加 0.6% 和 3.5%,而长链脂肪酸的含量减少 4.2%。

Abesinghe 等^[34]研究超声处理对水牛奶乳脂理化性质和剪切性质的影响,SFA 占乳脂总量的 1.87%,MUFA 占鲜水牛奶的 0.93%。与未经处理的牛奶相比,超声处理导致 SFA(0.05%)含量更高,丁酸(C4:0)、月桂酸(C12:0)、棕榈酸(C16:0)和硬脂酸(C18:0)在该组分中普遍存在。同样,剪切均质导致 SFA 分数(0.05%)高于鲜水牛奶,丁酸(C4:94)、月桂酸(C4:0)、肉豆蔻酸(C12:0)、棕榈酸(C14:0)和硬脂酸(C16:0)含量也高于鲜水牛奶。

油酸(C18:1)是哺乳动物乳脂中含量最高的 MUFA,在水牛奶中的含量与牛奶相近。与 C16:0 相比,它是一种低熔点 FA,因此有助于半结晶乳制品中的液相形成,从而有助于柔软性和铺展性^[35]。

磷脂(phospholipid, PL)是由甘油磷脂和鞘脂组成的极性脂质的一个亚类,具有公认的营养保健特性。牛奶的主要极性脂质是磷脂酰胆碱(phosphatidylcholine, PC),磷脂酰乙醇胺(phosphatidylethanolamine, PE),磷脂酰肌醇(phosphatidyl inositol, PI),磷脂酰丝氨酸(phosphatidylserine, PS)和鞘磷脂(sphingomyelin, SM)。水牛奶脂肪中的 PL 含量最低,但水牛奶的脂肪含量高于所研究的其他物种,脂肪球也更大,因此极性脂质相对于总脂肪的比例较低^[35]。

1.3 碳水化合物

乳糖是哺乳动物乳中最重要的碳水化合物,但是水牛奶中乳糖含量较低。其中乳寡糖的营养特性较多,但相关研究鲜见。

乳寡糖有调节肠道菌群、提高免疫力及抗感染等作用,并且与婴儿生长发育、智力机能发育等多方面关系密切^[36]。不同牛乳中的乳寡糖由于其巨大的结构复杂性而更难检测分析。孟宪璞等^[37]通过 UPLC-ESI-Q-TOF-MS 液相质谱对脱脂并去除蛋白质的广西水牛初乳中的乳寡糖组分进行测定,并与牛

乳进行了对比,最终测得奶牛初乳中19种及水牛初乳中的9种乳寡糖组分,水牛初乳中的中性寡糖含量比牛初乳高。通过该研究成果,水牛奶中的乳寡糖有望作为一种有潜力的生物活性分子,并应用于功能性食品和医疗保健。

1.4 其他物质

矿物质是人类健康的基础,因为它们是人类许多生理功能所必需的,例如组织生长、血液凝固、肌肉收缩和神经功能,但它们在乳制品制作中也起着重要作用,因为它们会影响酪蛋白胶束结构和聚集、凝乳酶凝固时间、凝乳结构,并最终影响产量。Stocco等^[38]利用傅里叶红外光谱对水牛奶中的钙、磷等含量分别和牛奶进行比较,发现水牛奶中的钙、磷均高于牛奶。水牛奶因为其钙磷比更高,蛋白质效率比更高,所以被认为是比牛奶更好的婴儿补充剂^[39]。

此外,与牛奶相比,水牛奶含有更多的生育酚、维生素A和 δ -戊甜菜碱,以及胆绿素、生物活性五糖和神经节苷脂^[40]。水牛奶中的 δ -戊甜菜碱在体外对内皮细胞具有抗氧化和抗炎作用。最后,针对水牛奶中的挥发性组分显示,50%的鉴定化合物是酯类、14%的醛类、13%的氮化合物、9%的酮类、5%的脂肪醇、2.5%的芳香族和4%的硫化物。

2 水牛奶制品

目前水牛奶的相关制品采用与牛奶相关制品相近的方法制备,目的是扩大具有高营养价值的产品供应并产生经济效益^[41]。水牛奶用于生产不同类型的干酪、奶油、乳饼、乳粉、酸奶、冰淇淋、功能性乳制品等。图1为水牛奶产品的加工流程。

2.1 干酪

水牛奶中总干物质含量较高,使其适合作为生产各种乳制品的原料。由于酪蛋白胶束的结构、较高的钙含量和较大的脂肪球尺寸,水牛奶还具有快速凝固的特性和较高的凝乳酶含量。水牛奶酪蛋白胶团直径大,容易形成弹性胶体状态和蛋白网络结构,而且这种胶束在适度的加热或冷却时不会产生明显的聚集或结构破坏。通过对其进行酸化或蛋白水解酶的处理,酪蛋白胶束容易变得不稳定,使得水牛奶在乳品加工上更具优势,特别有利于干酪的生产^[17]。由水牛奶生产的干酪,尤其以意大利的马苏里拉干酪、摩扎瑞拉干酪、里科塔乳清干酪、菲律宾的

白干酪和土耳其的凯玛干酪等^[47]闻名于世界。

在各种水牛奶酪产品中,最著名的水牛奶酪是马苏里拉干酪,这种干酪具有浓厚香醇的味道,具有独特的质地。Nguyen等^[48]使用共聚焦激光扫描显微镜和冷冻扫描电镜技术研究高水分水牛奶马苏里拉干酪的微观结构,并将其与牛奶马苏里拉干酪的物理化学性质进行比较。实验结果表明,二者在微观结构、化学成分、有机酸和蛋白水解谱方面存在显著差异,但硬度和熔融性相似。水牛奶酪具有更高的脂肪与蛋白质比例,微观结构包含更大的脂肪斑块和更少的密集蛋白质网络。液相色谱质谱法检测到水牛奶酪中仅存在 β -CN变体A2和单一 β -Lg变体,而牛奶酪中存在 β -CN变体A1和A2以及 β -Lg变体A和B。通过上述结果,可以分析企业和实验室环境中生产的干酪的物理化学特性,同时能够更好地区分水牛奶马苏里拉干酪和牛奶马苏里拉干酪的性质,以便更深入地了解不同类型的干酪对干酪质量和功能特性的影响。

除了最被人们熟知的马苏里拉干酪外,水牛奶还会被用于其他的干酪制品中。Onur等^[49]研究水牛奶在生产富含嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌益生菌培养物的夸克类干酪时的潜在应用。结果显示,与水牛奶样品相比,水牛奶样品的总固形物、脂肪和蛋白质含量最高、硬度值最高。二者的乙酸、丁酸、3-甲基丁酸和己酸含量均较高。对于风味而言,酸味占主导地位,其次是甜味,奶油、熟味和发酵味是样品最突出的风味。水牛奶主要用于马苏里拉干酪,但由于其缓冲能力高、酸发育少、脱水收缩过度、脂肪分解较低等,导致感官评分较低,因此使用水牛奶制备切达干酪难度较大。Batoool等^[50]研究了加速成熟对奶牛和水牛切达干酪的脂肪分解和抗氧化性能的影响。实验结果表明:常规成熟和加速成熟期间,二者的脂肪酸谱相互差异。加速成熟后,水牛切达干酪胆固醇含量低于对照干酪,同时乳酸含量最高,丙酸含量最低。水牛切达干酪抗氧化能力高于对照干酪。加速成熟的80 d和120 d的水牛切达干酪的颜色、风味和质地得分与奶牛切达干酪没有区别。加速成熟可以增强切达干酪的脂肪分解能力并改善其感官特性,使得水牛奶切达干酪风味特征与牛切达干酪相似。因此,加速成熟可用于水牛奶制备切达干酪的行

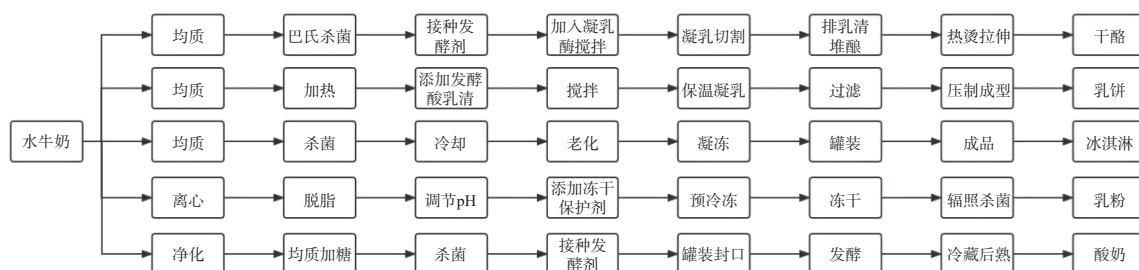


图1 水牛奶产品加工流程^[42-46]

Fig.1 Processing flow of buffalo milk products^[42-46]

业中。

水牛奶干酪中的营养物质含量比牛奶干酪丰富, 同时在微观结构、化学成分等方面存在显著差异。此外, 水牛奶干酪风味主要以甜味、奶油香气为主, 抗氧化能力高于牛奶干酪, 不仅保证水牛奶干酪高营养的要求, 同时因其较强的抗氧化能力, 水牛奶干酪的风味可以保持在良好水平中。

2.2 奶油

水牛奶中除了干物质含量高以及有较大的脂肪球外, 丁酸比例较大, 从而水牛奶的乳化能力较强, 因此常常根据这一特点用于稀奶油分离和奶油搅拌, 其奶油生产量可观^[4]。根据 Valeria 等^[35] 对于水牛奶、山羊奶、羊奶、牛奶四种奶制成的奶油的研究, 图 2 为水牛奶及其他奶油的研究情况。水牛奶中蛋白质含量为 3.68%, 定性蛋白质组学分析从其中鉴定出 685 个蛋白质组, 脂肪含量为 84.4%。相比之下, 水牛奶的脂肪含量高于其他物种, 但脂肪球也更大, 极性脂质相对于总脂肪的比例较低。通过对不同奶样奶油比较, 水牛奶有可能具有与牛奶脂肪球膜相关的功能, 包括支持婴儿免疫和胃肠道系统的发育、认知功能、预防感染以及心血管和肌肉健康。因此, 将水牛奶应用于奶油制备对于水牛奶产品研究具有重要意义。

水牛奶中脂肪含量较高, 并且乳脂中含大量甘油脂肪酸酯, 但香气很弱, 然而在脂肪酶的作用下, 这些物质被水解, 能够显著提升乳脂香气。为了了解水牛奶奶油在酶解后风味的变化, 冯玲等^[51] 利用固相微萃取 (solid-phase microextraction, SPEM) 结合气

相色谱-质谱联用 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 的方法检测水牛奶稀奶油酶解前后挥发性风味体系的变化。结果表明, 水牛奶稀奶油中主要的挥发性风味物质为甲基酮类化合物, 占整个挥发性风味物质的 41.104%, 主要包括 2-庚酮、2-戊酮、2-壬酮、2-丁酮等; 而酶解产物中短链脂肪酸为主要的挥发性风味物质, 其中丁酸、己酸、辛酸、癸酸这 4 类化合物占总挥发性风味物质的 88.009%, 酯类化合物的种类相对酶解前更丰富。因为水牛奶的高脂肪含量以及水牛奶奶油酶解前后产物的变化, 可以通过该方式得到风味更加柔和、更加安全的酶解增香基料。

根据水牛奶中丁酸含量高, 乳化能力强的特点可以用于生产稀奶油, 其脂肪含量相较其它奶油更加丰富, 同时为了得到风味更加醇厚的风味基料, 可以采用酶解水牛奶奶油的方法得到风味增强的酶解产物, 这对于单体香料和合成香料相比更加天然、更加安全, 丰富了水牛奶奶油的应用途径。

2.3 酸奶

水牛奶在生产时不需要预先浓缩或添加奶粉就能成形^[52], 根据这一特性, 水牛奶也可以用于酸奶制备。水牛奶酸奶发酵速度较快, 能够产生良好的风味。Muhammad 等^[53] 分别用水牛奶、牛奶和牛奶与水牛奶比例为 50:50 的三种原料进行酸奶的制作, 并在 3 种酸奶中分别添加 0.5% 的羧甲基纤维素研究特性。结果表明, 与另两种酸奶相比, 水牛奶酸奶在整个储存过程中保持了高脂肪和蛋白质含量, 同时具有更好的风味和香气, 更加利于消费者接受, 这为

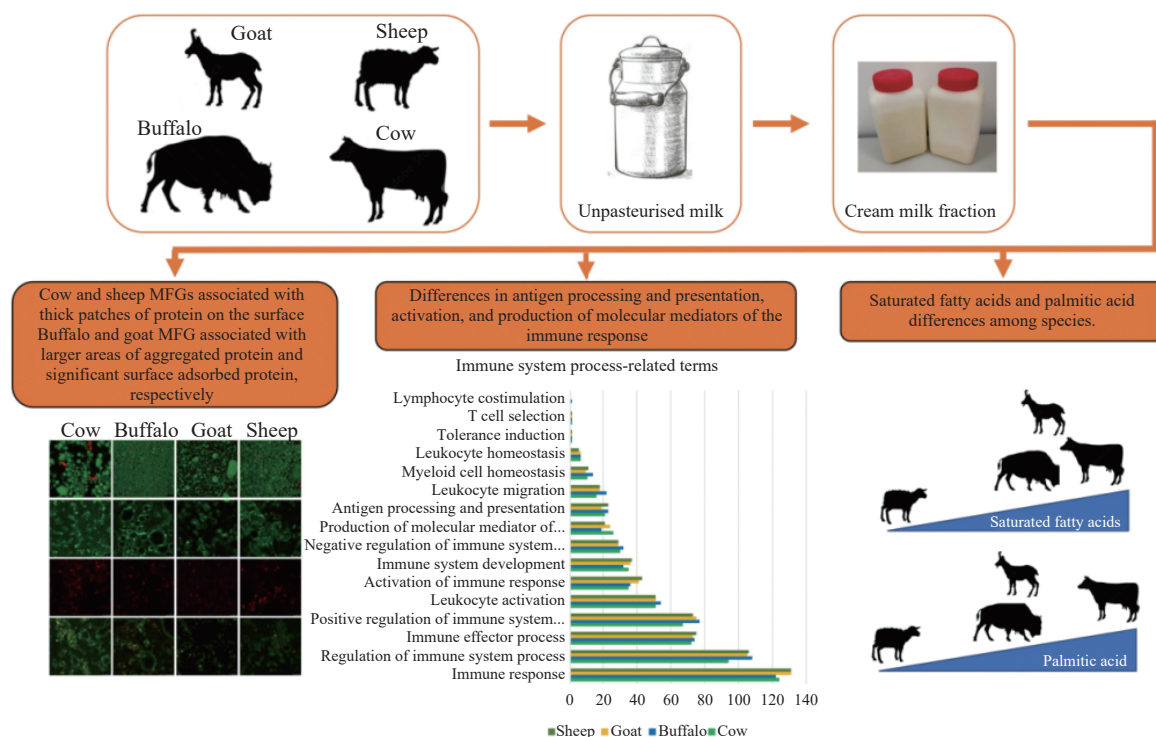


图 2 水牛奶及其他奶油的研究^[35]

Fig.2 Research on buffalo milk and other creams^[35]

水牛奶酸奶的开发可行性奠定了基础。

针对酸奶品质属性而言,乳脂肪在酸奶制作中起着至关重要的作用,低脂肪含量可能会降低粘度并增加乳清脱水收缩,影响酸奶的品质。因此减少乳脂含量会导致酸奶出现不良品质,例如缺乏风味、口感粗糙和质地差等^[54]。目前,许多成分,如浓缩乳清蛋白(whey protein concentrate, WPC)、酪蛋白酸钙(Ca-caseinate, Ca-CN)和发酵剂菌株等已被用于改善酸奶和其他发酵乳制品的感官、化学、质构和营养特性,经研究,这些成分对人们的健康有益。Hassan等^[55]研究添加了WPC和Ca-CN的低脂水牛奶酸奶的微观结构、挥发性化合物、感官特性、微生物学等特征。实验结果表明:添加1%WPC的酸奶具有最佳的感官特性和挥发性成分浓度。WPC处理的酸奶的微观结构有规则,气孔小,酪蛋白丝长;Ca-CN处理的样品微观结构更为致密和粗糙。添加WPC和Ca-CN的酸奶具有较高的总干物质、总蛋白质含量和pH,利用SPEM与GC-MS共鉴定出36种挥发性成分,其中乙酸、丁酸、乙醛、乙酮、2,3-丁二酮、乙醇和1-庚醇含量显著,同时也是对感官质量具有重要贡献的化合物。与纯酸奶或只添加了Ca-CN的酸奶相比,添加了WPC的酸奶中改善风味的挥发性化合物含量更高,并且保加利亚菌活菌数也高于普通酸奶和只添加了Ca-CN的酸奶。此外,含有WPC的酸奶口感更加柔和,持水性更好。综上,在低脂水牛奶酸奶中添加WPC和Ca-CN等对人体有益的成分不但可以改善其口感,而且还可以保证人们的身体健康,这让它们作为低脂水牛奶酸奶生产的优质材料具有一定的潜力。

除了通过向低脂水牛奶酸奶中添加成分来改善其风味口感,也有研究人员尝试使用脂肪替代品制作无脂水牛奶酸奶。Huang等^[56]以聚葡萄糖作为脂肪替代品,研究无脂水牛奶酸奶的理化、感官和流变特性。这项研究表明,聚葡萄糖可以用作脂肪替代品和益生元材料的替代来源,以提高无脂水牛奶酸奶的质量属性。聚葡萄糖的添加显著改善了酸奶的持水能力、质构特性和感官属性。该项试验中,3%聚葡萄糖的添加在无脂水牛奶酸奶的持水能力、pH和培养活力方面显示出潜在改善,并且在21±4℃下储存1d期间,与全脂酸奶的感官特性几乎相近。添加聚葡萄糖作为其脂肪替代品可以克服无脂肪水牛奶酸奶质量差的问题。企业可以选择像聚葡萄糖等能够保持酸奶口感的脂肪替代品,开发出令消费者满意的无脂水牛奶酸奶,不会因为摄入过多的脂肪而感到担心。

水牛奶酸奶与牛奶酸奶相比脂肪和蛋白质含量更加丰富,同时具有更好的风味。若需要产生味道更加丰富的酸奶可以添加部分营养物质如WPC等改善其口感和风味。此外,因为水牛奶脂肪对于产品口感影响较大,所以可以利用聚葡萄糖代替乳脂肪从而改善水牛奶酸奶质地风味的改变,这也为开发无脂水

牛奶酸奶提供了重要依据。

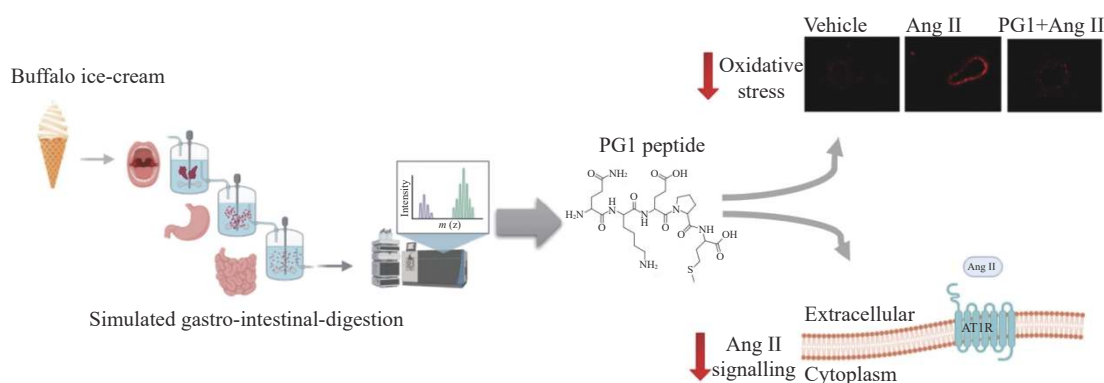
2.4 冰淇淋

冰淇淋是碳水化合物、脂肪、蛋白质的丰富来源,这体现了它的能量价值。冰淇淋产品营养价值高,不同年龄段的人都会消费,这体现了它的商业价值。当今的消费者对于健康乳制品的需求也推进了冰淇淋的研究。

根据水牛奶中营养物质丰富这一特点,研究人员针对水牛奶冰淇淋的理化性质及其配方进行优化研究。Taj等^[57]研究牛奶和水牛奶冰淇淋的组成以及化学性质的差异。实验结果表明:水牛奶冰淇淋中C26~C36的甘油三酯显著高于牛奶冰淇淋。水牛奶冰淇淋的不饱和脂肪酸的含量高于牛奶冰淇淋,总抗氧化能力比牛奶冰淇淋高18%,具有较低的过氧化值和较高的氧化稳定性,维生素A和维生素E的浓度高于牛奶冰淇淋,两种冰淇淋的感官特性没有差异。赵叶等^[44]通过单因素实验、结合二次通用旋转组合设计优化以及感官评分确定了水牛奶奶油冰淇淋最佳工艺配方:奶粉19.1%、水牛奶奶油47.7%、蛋黄粉1.2%、白砂糖1.7%、复配增稠剂28.6%、浓缩蛋白粉1.7%,其感官评分为83.7分,口感细腻清爽。比起市面上常见的牛奶冰淇淋,水牛奶冰淇淋在营养价值方面更为突出,并且与牛奶冰淇淋的感官近乎一致。研究人员对于水牛奶冰淇淋配方的研究也为水牛奶冰淇淋的研发提供了帮助。

冰淇淋的微观结构决定了冰淇淋的感官特性、抗熔性、硬度和粘弹性,均质化处理是影响冰淇淋结构的基本生产步骤之一^[58]。Durmuş等^[58]研究经过高压均质化(high pressure-homogenisation, HPH)处理的水牛奶冰淇淋的物理化学性质、质地和微观结构特征。结果表明:HPH提高了水牛奶冰淇淋的硬度和稠度值,降低了黏性值和黏度指数。HPH处理时,原料混合物冷却得更快,可以在更有利的条件下让冰淇淋硬化,硬度也随压力的增加而增加。此外,HPH显著提高了冰淇淋的抗融化性。扫描电子显微镜图像显示,HPH减小了气泡的尺寸,在150MPa时冰淇淋出现泡沫状结构。通过对水牛奶冰淇淋经HPH处理可以改变其硬度、微观结构和融化特性的结论,在水牛奶冰淇淋及其他制品的开发和应用中,进一步修改配方和加工参数并且结合HPH处理对冰淇淋物理化学性质的改变,生产出基于水牛奶冰淇淋的新型冷冻乳制品甜点。

除了研究水牛奶冰淇淋的常规营养物质、冰淇淋配方及其加工工艺,其营养价值也具有开发潜力。Albino等^[59]对水牛奶冰淇淋在小鼠模型中进行LC-MS/MS分析、体外血管研究等检测PG1的血管作用,如图3所示。实验发现一种新的水牛奶冰淇淋衍生的五肽“QKEPM”,即PG1可以在水牛奶冰淇淋经胃肠道消化后获得较高的浓度,是一种稳定的肽。它具有强大的血管效应,抵消血管紧张素II引

图 3 水牛奶冰淇淋在小鼠模型中的研究^[59]Fig.3 Study on Buffalo milk ice cream in murine models^[59]

起的血管收缩和高血压水平的影响,减少氧化应激。这些结果有力地证明了经过水牛奶冰淇淋消化得到的 PG1 可能会有效预防和治疗高血压,基于此,可以为水牛奶冰淇淋对于降血压及减少相关的心脑血管疾病并发症提供一种新思路。

水牛奶冰淇淋的营养价值比牛奶冰淇淋高,在高压均质化处理的过程中其抗氧化性和硬度升高,粘度降低,在消化过程中产生的肽有助于人们降血压。水牛奶冰淇淋无论是在饮食以及药食方面相比牛奶冰淇淋具有更高的开发价值。市场上针对水牛奶冰淇淋的销售并不常见,企业可以根据其高价值特点尝试让水牛奶走进冰淇淋市场。

2.5 功能性食品的开发

目前,研究人员正将水牛奶本身的产品研发逐步向水牛奶中的生物活性物质进行研究,并根据其特点尝试具有潜力的功能性食品。Abdel-Hamid 等^[60]研究了水牛奶中多肽的血管紧张素转换酶(angiotensin converting enzyme, ACE)抑制活性和抗氧化能力。用木瓜蛋白酶、胃蛋白酶和胰蛋白酶水解水牛脱脂奶中的保留物,通过超高效液相色谱-串联质谱法鉴定。这些活性组分含有已知的生物活性序列以及具有 ACE 抑制活性和抗氧化活性的新肽。结果表明,水牛奶中的牛乳蛋白具有释放 ACE 抑制肽和抗氧化肽的潜力。Li 等^[61]针对 α_{S1} -CN 的多态性进行模拟胃肠消化条件下水牛奶蛋白消化特性和生物活性的研究。在酸性胃条件下, α_{S1} -CN 变异体 BB(Ser193)比变异体 AA(Leu193)粒径更小,消化率更高。从 AA 和 BB 的模拟胃肠道消化中分别鉴定出 154 和 149 个肽段。其中三种多肽具有 ACE 抑制、抗癌、抗氧化和抗焦虑活性,表明 α_{S1} -CN 多态性会影响消化特性和生物活性肽的形成。贺小龙等^[62]借助植物乳杆菌 B 联合酸奶发酵剂制备水牛奶酸奶,通过紫外分光光度法和液相质谱联用系统分析了水牛奶酸奶 ACE 抑制活性和 ACE 抑制肽分布特征。结果表明,添加植物乳杆菌 B 的水牛奶酸奶的 ACE 抑制率高达 84.51%,经超滤膜处理后,ACE 抑制活性进一步提高。肽鉴定结果表明,含植物乳杆

菌 B 的水牛乳酸奶发酵过程中产生了 9 种已知 ACE 抑制肽和许多潜在的 ACE 抑制肽。

水牛奶含有大量的生物活性肽和免疫球蛋白,具有多种生理作用,如 ACE 活性抑制、抗氧化等等。这些生物活性物质有助于人体健康,并且可以应用于功能性食品的研发,为水牛奶的应用以及功能性食品市场拓宽了道路。

3 结论

本文对水牛奶中的营养物质,主要包括蛋白质、脂肪、碳水化合物和其它物质进行概述,对一些水牛奶制品,包括干酪、奶油、酸奶、冰淇淋等乳制品的研究状况进行总结,表明水牛奶可根据其自身独特的物理化学性质应用于不同类型的乳制品加工。因水牛奶中丰富的生物活性物质,将其应用于功能性食品的开发具有一定潜力。

然而,我国市场上水牛奶制品仍旧局限于液态乳和水牛奶酸奶,而水牛奶奶酪、奶油、冰淇淋等特色乳制品的开发仍有不足。此外,通过研究水牛奶生物活性物质从而进行功能性食品的研究在我国鲜见。在未来,相关企业及从业人员还需不断加强水牛奶产品的开发,加大水牛奶酸奶、干酪、冰淇淋等产品的生产,根据水牛奶的理化特点开发新型水牛奶制品,使我国乳制品行业发展添加动力。此外,还可以利用水牛奶中的生物活性物质开发相关的功能性食品,满足不同消费者的需求。未来水牛奶产值仍将增长,同时带动南方地区水牛奶产业的发展,以此来拓宽水牛奶经济市场。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 王金梅, 杨远, 苗永旺. 我国奶水牛业发展现状及对策研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(2): 177-180. [WANG J M, YANG Y, MIAO Y W. Research on the development status and counter-measures of dairy cattle industry in China[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2020, 56(2): 177-180.]
- [2] 杨炳壮. 全球水牛业发展现状与我国奶水牛业的发展趋势

- [J]. *广西农学报*, 2011, 26(1): 40–48. [YANG B Z. The development status of global buffalo industry and the development trend of Chinese dairy cattle industry[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2011, 26(1): 40–48.]
- [3] HUSSAIN I, YAN J, GRANDISON A S, et al. Effects of gelation temperature on Mozzarella-type curd made from buffalo and cows' milk; 2. Curd yield, overall quality and casein fractions[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(3): 1404–1410.
- [4] 谢秉铨, 瓦云超, 伍云, 等. 水牛乳资源及其理化特性研究进展[J]. *中国乳品工业*, 2018, 46(11): 22–25, 44. [XIE B Q, WA Y C, WU Y, et al. Progress on distribution and physicochemical characteristics of buffalo milk[J]. *China Dairy Industry*, 2018, 46(11): 22–25, 44.]
- [5] LI S S, YANG Y X, CHEN C, et al. Differences in milk fat globule membrane proteins among Murrah, Nili-Ravi and Mediterranean buffaloes revealed by a TMT proteomic approach[J]. *Food Research International*, 2020, 139: 109847.
- [6] 简保权, 秦学敏, 龚芳. 世界水牛奶业发展现状和典型模式分析[J]. *世界农业*, 2015(3): 115–118. [JIAN B Q, QIN X M, GONG F. Analysis of development status and typical mode of world buffalo milk industry[J]. *World Agricultural*, 2015(3): 115–118.]
- [7] 张依, 苏俊东, 罗雪路, 等. 水牛奶与奶牛奶常规营养成分与脂肪酸含量的差异及季节变化规律[J]. *中国奶牛*, 2021, 369(1): 35–41. [ZHANG Y, SU J D, LUO X L, et al. Analysis of the differences and characteristics of fatty acids and unsaturated fatty acids in dairy milk and buffalo milk[J]. *China Dairy Cattle*, 2021, 369(1): 35–41.]
- [8] 戴江河, 石昭意, 潘斌, 等. 水牛奶营养与功能研究进展[J]. *中国奶牛*, 2017, 326(6): 10–13. [DAI J H, SHI Z Y, PAN B, et al. Research progress on nutrition and function of buffalo milk[J]. *China Dairy Cattle*, 2017, 326(6): 10–13.]
- [9] 温佩佩, 肖彬彬, 褚楚, 等. 常见动物乳与人乳的营养成分比较分析[J]. *中国乳业*, 2023, 253(1): 96–102. [WEN P P, XIAO B B, CHU C, et al. Comparison and analysis of nutritional composition between common animal milk and human milk[J]. *China Dairy*, 2023, 253(1): 96–102.]
- [10] 邱冀, 孟阳, 赵恽, 等. 不同哺乳动物乳中主要营养成分研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2021, 44(3): 50–54. [QIU J, MENG Y, ZHAO Y, et al. A review on the major nutritional components in milks of humans and domesticated mammals[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2021, 44(3): 50–54.]
- [11] MEHRA R, KELLY P. Milk oligosaccharides: Structural and technological aspects[J]. *International Dairy Journal*, 2006, 16(11): 1334–1340.
- [12] 刘翠, 潘健存, 李媛媛, 等. 人乳营养成分及其生理功能[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(1): 286–291. [LIU C, PAN J C, LI Y Y, et al. Nutrients and physiological functions of human milk[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(1): 286–291.]
- [13] 黄子珍, 黄丽, 杨攀, 等. 基于主成分指标变化分析水牛乳中掺入普通牛乳的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(12): 176–181. [HUANG Z Z, HUANG L, YANG P, et al. Study on the identification of buffalo milk adulterated by bovine milk with principal component analysis[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(12): 176–181.]
- [14] BONFATTI V, GIANTIN M, ROSTELLATO R, et al. Separation and quantification of water buffalo milk protein fractions and genetic variants by RP-HPLC[J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(2): 364–367.
- [15] NAYAK S K, ARORA S, SINDHU J S, et al. Effect of chemical phosphorylation on solubility of buffalo milk proteins[J]. *International Dairy Journal*, 2005, 16(3): 268–273.
- [16] FAN X Y, GAO S S, FU L, et al. Polymorphism and molecular characteristics of the CSN1S2 gene in river and swamp buffalo[J]. *Archives Animal Breeding*, 2020, 63(2): 345–354.
- [17] 黄星晨. 水牛奶酪蛋白鉴定和药物残留检测技术的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022. [HUANG X C. Study on the casein identification and detection technology of residual veterinary drugs in buffalo milk[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.]
- [18] 赵炬影, 郭鸽, 任大喜, 等. 水牛乳 β -酪蛋白基因多态性与消化性能及抗氧化性能的关联研究[J]. *中国奶牛*, 2022, 381(1): 12–16. [ZHAO X Y, GUO L, REN D X, et al. Study on the association between β -casein gene polymorphism and digestive performance and antioxidant performance of buffalo milk[J]. *China Dairy Cattle*, 2022, 381(1): 12–16.]
- [19] WU K Y, YANG T X, LI Q Y. The effects of pH and NaCl concentration on the structure of β -casein from buffalo milk[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(5): 2436–2445.
- [20] FAN X Y, ZHANG Z F, QIU L H, et al. Polymorphisms of the kappa casein (CSN 3) gene and inference of its variants in water buffalo (*Bubalus bubalis*) [J]. *Archives Animal Breeding*, 2019, 62(2): 585–596.
- [21] HOBOR S, KUNEJ T, DOVC P. Polymorphisms in the kappa casein (CSN3) gene in horse and comparative analysis of its promoter and coding region[J]. *Animal Genetics*, 2008, 39(5): 520–530.
- [22] GRIFFITHS M. Improving the safety and quality of milk[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2010, 64(2): 315–316.
- [23] CAROLI A M, CHESSA S, ERHARDT G J. Invited review: Milk protein polymorphisms in cattle: Effect on animal breeding and human nutrition[J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(11): 5335–5352.
- [24] LI S S, LI L, ZENG Q K, et al. Quantitative differences in whey proteins among Murrah, Nili-Ravi and Mediterranean buffaloes using a TMT proteomic approach[J]. *Food Chemistry*, 2018, 269: 228–235.
- [25] ZHAO Z T, LI H, LI Q Y. Isolation of β -lactoglobulin from buffalo milk and characterization of its structure changes as a function of pH and ionic strength[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017, 11(3): 948–955.
- [26] 刘建忠, 田为宇, 敖敬, 等. 水牛 α -乳清蛋白基因的克隆及序列分析[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(5): 31–34. [LIU J Z, TIAN W Y, AO J, et al. Cloning and sequence analysis of the α -lactalbumin gene in *Bubalus bubalis* [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(5): 31–34.]
- [27] 陈文亮, 苏米亚, 贾宏信, 等. α -乳白蛋白的功能特性及其在婴儿配方乳粉中的应用[J]. *乳业科学与技术*, 2019, 42(1): 33–38. [CHEN W L, SU M Y, JIA H X, et al. Functional characteristics and application in infant formula of alpha-lactalbumin[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2019, 42(1): 33–38.]
- [28] GABRIELLA D, Z J T, DÁVID B, et al. Identification of the binding site between bovine serum albumin and ultrasmall SiC fluorescent biomarkers[J]. *Physical chemistry chemical physics: PCCP*, 2018, 20(19): 13419–13429.
- [29] 王军, 王周利, 程晶晶. 多光谱法结合分子对接研究柠檬黄

- 与牛血清白蛋白的相互作用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(3): 904–909. [WANG J, WANG Z L, CHENG J J. Interaction between tartrazine and bovine serum albumin using multispectral method and molecular docking[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(3): 904–909.]
- [30] CAMPANELLA L, MARTINI E, PINTORE M, et al. Determination of lactoferrin and Immunoglobulin G in animal milks by new immunosensors[J]. *Sensors*, 2009, 9(3): 2202–2221.
- [31] EL-LOLY M M, HASSAN L K, FARAHAT E S A. Impact of heat treatments and some technological processing on immunoglobulins of Egyptian buffalo's milk[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 123: 939–944.
- [32] MUBIN K, SONGÜL B. The effects of modified atmosphere packaging on the quality properties of water buffalo milk's concentrated cream[J]. *Molecules*, 2023, 28(3): 1310.
- [33] PEGOLO S, STOCCO G, MELE M, et al. Factors affecting variations in the detailed fatty acid profile of *Mediterranean buffalo* milk determined by 2-dimensional gas chromatography[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(4): 2564–2576.
- [34] ABESINGHE A M N L, VIDANARACHCHI J K, ISLAM N, et al. Effects of ultrasonication on the physicochemical properties of milk fat globules of *Bubalus bubalis* (water buffalo) under processing conditions: A comparison with shear-homogenization[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 59(C): 102237.
- [35] VALERIA D F, REBECCA A O, DEIRDRE K, et al. Comparative structural and compositional analyses of cow, buffalo, goat and sheep cream[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2643.
- [36] LI R, ZHOU Y L, XU Y J. Comparative analysis of oligosaccharides in the milk of human and animals by using LC-QE-HF-MS[J]. *Food Chemistry*; X, 2023, 18: 100705.
- [37] 孟宪璞, 焦思明, 秦胜旗, 等. 奶牛与水牛初乳中乳寡糖组分比较研究[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2017, 44(10): 942–948. [MENG X P, JIAO S M, QIN S Q, et al. Comparative study on milk oligosaccharides in buffalo and cow colostrum milk[J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2017, 44(10): 942–948.]
- [38] STOCCO G, CIPOLAT-GOTET C, BONFATTI V, et al. Short communication: Variations in major mineral contents of *Mediterranean buffalo* milk and application of Fourier-transform infrared spectroscopy for their prediction[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(11): 8680–8686.
- [39] MÁRCIO V, MIRIAN P, ARISTIDE M, et al. Buffalo milk as a source of probiotic functional products[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(11): 2303.
- [40] PATIÑO E M, POCHON D O, FAISAL E L, et al. Influence of breed, year season and lactation stage on the buffalo milk mineral content[J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2007, 6(2s): 1046–1049.
- [41] SAMARA G P L, REGINA A E, ANTÔNIO M D C R, et al. World scenario for the valorization of byproducts of buffalo milk production chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 364: 132605.
- [42] 王钰潭, 侯坤辉, 王雪峰, 等. 水牛奶干酪功能活性肽的研究[J]. *中国奶牛*, 2019(4): 46–51. [WANG Y T, HOU K H, WANG X F, et al. Study on functional peptides of buffalo milk cheese[J]. *China Dairy Cattle*, 2019(4): 46–51.]
- [43] 赵琼, 朱志伟, 赵存朝, 等. 功能型水牛奶乳饼制作工艺的研究[J]. *中国奶牛*, 2018(12): 38–43. [ZHAO Q, ZHU Z W, ZHAO C C, et al. Study on the development of functional buffalo milk cake[J]. *China Dairy Cattle*, 2018(12): 38–43.]
- [44] 赵叶, 李渊, 赵存朝, 等. 水牛奶奶油冰淇淋的研制[J]. *中国乳品工业*, 2021, 49(3): 60–64. [ZHAO Y, LI Y, ZHAO C C, et al. Development of a kind of buffalo grandma oil ice cream[J]. *China Dairy Industry*, 2021, 49(3): 60–64.]
- [45] 陈瑞芳, 郭傲民, 耿丹, 等. 水牛初乳粉和常乳粉对新生仔猪小肠组织形态结构的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2014, 41(4): 137–143. [CHEN R F, GUO A M, GENG D, et al. Effects of colostrum powder and mature milk powder of buffalo on small intestine tissue morphological structure in newborn piglets[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2014, 41(4): 137–143.]
- [46] 谢芳, 杨承剑, 李孟伟, 等. 黄秋葵水牛乳酸奶的制备工艺研究[J]. *中国乳品工业*, 2019, 47(1): 56–59. [XIE F, YANG C J, LI M W, et al. Preparation of okra buffalo milk yogurt and its technology[J]. *China Dairy Industry*, 2019, 47(1): 56–59.]
- [47] 谢秉铨, 解冠华, 陈红兵. 水牛奶乳制品深加工的研究进展[J]. *食品科技*, 2007(7): 9–12. [XIE B Q, XIE G H, CHEN H B. Progress on buffalo milk products[J]. *China Dairy Industry*, 2007(7): 9–12.]
- [48] NGUYEN H T H, ONG L, LOPEZ C, et al. Microstructure and physicochemical properties reveal differences between high moisture buffalo and bovine Mozzarella cheeses[J]. *Food Research International*, 2017, 102: 458–467.
- [49] ONUR G, BÜŞRA A. Characterization of Quark-like probiotic cheese produced from a mixture of buffalo milk and cow milk[J]. *Mljekarstvo*, 2022, 72(3): 172–188.
- [50] BATOOL M, NADEEM M, IMRAN M, et al. Lipolysis and antioxidant properties of cow and buffalo cheddar cheese in accelerated ripening[J]. *Lipids in Health and Disease*, 2018, 17(1): 1–10.
- [51] 冯玲, 农皓如, 黄丽, 等. 水牛乳稀奶油及其酶解产物挥发性风味物质分析[J]. *食品科技*, 2018, 43(3): 251–254. [FENG L, NONG H R, HUANG L, et al. Analysis on the volatile flavor substance of buffalo milk cream and their enzymatic hydrolyzed product[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(3): 251–254.]
- [52] 武志霞, 赵家明, 黄艾祥. 水牛奶研究开发进展[J]. *食品研究与开发*, 2006(3): 139–141, 145. [WU Z X, ZHAO J M, HUANG A X. Research and development progress of buffalo milk[J]. *Food Research and Development*, 2006(3): 139–141, 145.]
- [53] MUHAMMAD J, SAIMA I, NABILA G, et al. Physical, chemical, microbial, and sensory evaluation and fatty acid profiling of value-added drinking yogurt (laban) under various storage conditions[J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 106(1): 39–46.
- [54] EL-SALAM M H A, EL-SHIBINY S. A comprehensive review on the composition and properties of buffalo milk[J]. *Dairy Science & Technology*, 2011, 91(6): 663–699.
- [55] HASSAN B, AHMED M, G D G, et al. Microstructural, volatile compounds, microbiological and organoleptical characteristics of low-fat buffalo milk yogurt enriched with whey protein concentrate and Ca-caseinate during cold storage[J]. *Fermentation*, 2021, 7(4): 250.
- [56] HUANG L, HAMID M A, ROMEIH E, et al. Textural and organoleptic properties of fat-free buffalo yogurt as affected by polydextrose[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1):

1-8.

[57] TAJ K I, MUHAMMAD N, RAHMAN U, et al. Triglyceride, fatty acid profile, antioxidant characteristics, vitamins, lipid oxidation and induction period of ice cream produced from cow and buffalo milk[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(12).

[58] DURMUŞ S, EMIN M, MEHMET K. Development of buffalo milk ice-cream by high pressure-homogenisation of mix: Physico-chemical, textural and microstructural characterisation[J]. *LWT*, 2021, 150: 112013.

[59] ALBINO C, GIOVANNA B M, GIACOMO P, et al. A novel vasoactive peptide "PG1" from buffalo ice-cream protects from angiotensin-evoked high blood pressure[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(3): 441.

[60] ABDEL-HAMID M, OTTE J, GOBBA C D, et al. An-

giotensin I-converting enzyme inhibitory activity and antioxidant capacity of bioactive peptides derived from enzymatic hydrolysis of buffalo milk proteins[J]. *International Dairy Journal*, 2017, 66: 91-98.

[61] LI S S, HU Q, CHEN C, et al. Formation of bioactive peptides during simulated gastrointestinal digestion is affected by α_{s1} -casein polymorphism in buffalo milk[J]. *Food Chemistry*, 2020, 313(C): 126159.

[62] 贺小龙, 姜铁民, 陈历俊, 等. 含母乳植物乳杆菌水牛乳酸奶的 ACE 抑制肽分布研究[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(2): 35-42. [HE X L, JIANG T M, CHEN L J, et al. Distribution of ACE inhibitory peptides in buffalo milk yoghurt containing *Lactobacillus plantarum*[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(2): 35-42.]