

# 母乳、牛乳和山羊乳中不同结合态唾液酸组成分析及其胃肠消化特性

陈青妍,邓泽元,张兵\*

(南昌大学 食品学院,江西 南昌 330047)

**摘要:**以母乳、牛乳和山羊乳为研究对象,采用高效液相色谱-质谱联用技术分析不同结合态唾液酸组成,模拟婴儿胃肠消化过程研究脂质、蛋白质和低聚糖结合态唾液酸的消化特性,对比分析3种乳中不同结合态唾液酸消化率。结果表明:母乳中的唾液酸主要是低聚糖结合态N-乙酰神经氨酸(N-acetylneuraminic acid, Neu5Ac),含量为734.65  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,消化率最高为6.13%;牛乳和山羊乳中的唾液酸主要与蛋白质结合,但其消化率较低,分别仅为0.24%~1.53%和0.08%~0.70%。母乳、牛乳和山羊乳中的脂质结合唾液酸的消化率均较高,最高分别为19.78%、38.07%和4.60%,但由于3种乳中的脂质结合态唾液酸含量很少,因此经消化后解离下来的游离唾液酸很少。总体上,母乳、牛乳和山羊乳中的3种结合态唾液酸经消化后解离下来的游离唾液酸均较少。

**关键词:**唾液酸;脂质;蛋白质;低聚糖;胃肠消化

## Composition and Gastrointestinal Digestion Characteristics of Bound Sialic Acids in Human, Bovine, and Goat Milk

CHEN Qingyan, DENG Zeyuan, ZHANG Bing\*

(College of Food, Nanchang University, Nanchang 330047, Jiangxi, China)

**Abstract:** High performance liquid chromatography and mass spectrometry were employed to analyze the composition of bound sialic acids in human, bovine, and goat milk. Then, the gastrointestinal digestion process of infants was simulated to study the digestive characteristics of lipid-bound, protein-bound, and oligosaccharide-bound sialic acids, and the digestibility of different bound sialic acids in the three kinds of milk was compared. The sialic acids in human milk were mainly oligosaccharide-bound N-acetylneuraminic acid (Neu5Ac), with the content of 734.65  $\mu\text{g}/\text{mL}$  and the highest digestibility of 6.13%. The sialic acids in bovine and goat milk were mainly bound to protein, while their digestibility was low, only 0.24%–1.53% and 0.08%–0.70%, respectively. The digestibility of lipid-bound sialic acids in human, bovine, and goat milk was high, peaking at 19.78%, 38.07%, and 4.60%, respectively. However, due to the low content of lipid-bound sialic acids in the three kinds of milk, there were few free sialic acids dissociated after digestion. In general, there were only small amounts of free sialic acids dissociated from bound sialic acids in human, bovine and goat milk after digestion.

**Key words:** sialic acids; lipid; protein; oligosaccharide; gastrointestinal digestion

引文格式:

陈青妍,邓泽元,张兵. 母乳、牛乳和山羊乳中不同结合态唾液酸组成分析及其胃肠消化特性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 130-136.

CHEN Qingyan, DENG Zeyuan, ZHANG Bing. Composition and Gastrointestinal Digestion Characteristics of Bound Sialic Acids in Human, Bovine, and Goat Milk[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 130-136.

唾液酸是九碳糖神经氨酸乙酰化衍生物的总称,其主要存在形式为N-乙酰神经氨酸(N-acetylneur-

aminic acid, Neu5Ac)和N-羟乙酰神经氨酸(N-glycolylneuraminic acid, Neu5Gc)<sup>[1]</sup>。唾液酸具有多种生物活性功

基金项目:江西省研究生创新专项资金项目(YC2022-s006)

作者简介:陈青妍(2000—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品营养。

\*通信作者:张兵(1984—),男,研究员,博士,研究方向:食品营养。

能,尤其是对促进婴幼儿大脑发育和认知具有重要作用<sup>[2-5]</sup>。乳是唾液酸的丰富来源,母乳中唾液酸的结构仅由 Neu5Ac 组成,这是因为人类自身缺乏编码胞苷 5'-单磷酸-Neu5Ac 羟化酶的 *CMAH* 基因而导致无法合成 Neu5Gc<sup>[6]</sup>。牛乳中唾液酸包括 Neu5Ac 和 Neu5Gc,且 Neu5Ac 的含量远高于 Neu5Gc<sup>[7]</sup>,而山羊乳中 Neu5Gc 的含量高于 Neu5Ac<sup>[8-9]</sup>。乳中的唾液酸主要是蛋白质和低聚糖结合态唾液酸,少部分以脂质结合和游离形式存在<sup>[10]</sup>。母乳中约 70%~83% 的唾液酸与低聚糖结合,14%~28% 的唾液酸与蛋白质结合,0.2%~0.4% 的唾液酸与脂质(主要是神经节苷脂)结合<sup>[11-12]</sup>,而牛乳中的唾液酸主要与蛋白质结合<sup>[13]</sup>。

近年来主要对结合态唾液酸的研究较多,主要集中在唾液酸化低聚糖和神经节苷脂的功能性方面<sup>[14]</sup>。然而,Neu5Gc 已被证明与炎症、癌症进程、心血管疾病等具有相关性,可能会对人体健康造成不利影响<sup>[15-18]</sup>。游离唾液酸不会在人体长时间停留,会随尿液迅速排出,而结合态 Neu5Gc 可以稳定存在于肝脏、肾脏、肠道和血液中<sup>[19]</sup>。利用细菌唾液酸酶从红肉中释放 Neu5Gc 可以降低与红肉相关的炎症性疾病的风险,包括结直肠癌和动脉粥样硬化<sup>[20-21]</sup>。这表明结合态 Neu5Gc 是对人体健康产生不利影响的主要因素。

母乳、牛乳和山羊乳中唾液酸的组成和含量存在差异,尤其是结合态 Neu5Gc 的含量,可能会导致母乳、牛乳和山羊乳中不同结合态唾液酸在胃肠消化过程中的消化特性不同。目前尚无报道对比乳中脂质、蛋白质和低聚糖结合态唾液酸的组成和胃肠消化差异。因此,本研究建立婴儿体外胃肠消化模型,研究母乳、牛乳、山羊乳中脂质、蛋白质和低聚糖结合态唾液酸的消化性,以期为婴儿配方奶粉的设计与唾液酸添加含量提供理论依据,缩小婴儿配方奶粉与母乳的差异。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与仪器

硫酸、乙醇、盐酸、氢氧化钠(均为分析纯):四川西陇科学股份有限公司;磷酸盐缓冲溶液:北京兰杰柯科技有限公司;胃蛋白酶( $\geq 2500$  U/mg 干重)、胰蛋白酶(20 U/mg 干重):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;胆汁盐、N-乙酰神经氨酸标准品(纯度 $\geq 98\%$ ):北京索莱宝科技有限公司;N-羟乙酰神经氨酸标准品(纯度 $\geq 95\%$ ):上海甄准生物科技有限公司;甲醇、乙腈、甲酸(均为色谱级):赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

DW-86L726G -80℃低温保存箱:山东海尔生物医疗股份有限公司;Spring-R20 i 实验室纯水机:厦门锐思捷水纯化技术有限公司;H3-18KR 台式高速冷冻离心机:湖南可成仪器设备有限公司;HH-4 数显恒温水

浴锅:常州国华电器有限公司;SHZ-A 水浴恒温振荡器:上海博迅实业有限公司医疗设备厂;LGJ-1A 真空冷冻干燥机:北京亚泰科隆仪器技术有限公司;G6430-1260 高效液相色谱仪串联三重四极杆质谱联用仪:美国 Agilent 公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 结合态唾液酸含量测定

参考倪妮妮<sup>[22]</sup>和 Wei 等<sup>[23]</sup>的方法,稍作调整。分离乳中脂质、蛋白质和低聚糖,具体操作步骤如下:取 300  $\mu\text{L}$  液态乳,12 000 r/min 离心 30 min,轻轻摇晃,乳液分为 3 层,最上层为脂质,最下层为酪蛋白沉淀。待上层脂质溶解后取上清液。上清液再次离心(12 000 r/min, 30 min),吸走下层液体即可得到脂质,将下层液体与第一次离心得到的酪蛋白沉淀物混合,加入 2 倍体积的乙醇,混匀,-20℃放置 1 h,10 000 r/min 离心 10 min,下层为蛋白质沉淀,用真空冷冻干燥机浓缩上层液体,得到低聚糖(包括低聚糖结合唾液酸和少量游离唾液酸)。将得到的脂质块用 300  $\mu\text{L}$  甲醇溶解,蛋白质沉淀和低聚糖用 300  $\mu\text{L}$  水溶解,加入等体积 0.1 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液,80℃水浴 60 min,冷却后取 200  $\mu\text{L}$  液体通过 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤进行脂质、蛋白质和低聚糖结合态唾液酸的检测。将低聚糖用 300  $\mu\text{L}$  水溶解,加入等体积超纯水,80℃水浴 60 min,冷却后取 200  $\mu\text{L}$  溶液通过 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤进行游离唾液酸的检测。低聚糖加酸水解后的唾液酸含量与游离唾液酸含量之差即为低聚糖结合唾液酸含量。

#### 1.2.2 乳样品的采集

本研究中的母乳由哺乳期母亲自愿提供,包括 5 个初乳样(3~5 d)和 7 个过渡乳样(14 d)。所获得的母乳均装于 50 mL 离心管储存于-80℃低温保存箱中。牛乳采集于中国新疆,山羊乳采集于中国沈阳,牛羊乳均储存在-20℃冰箱中,备用。

#### 1.2.3 乳中唾液酸超高效液相色谱-三重四级杆质谱分析

色谱条件为色谱柱:Hypercarb(100 mm $\times$ 2.1 mm, 3  $\mu\text{m}$ );柱温:40℃;进样量:5  $\mu\text{L}$ 。流动相 A:0.1% 甲酸乙腈,流动相 B:0.1% 甲酸水,梯度洗脱程序:0~6 min, 5%~30%B; 6~8 min, 30~5%B; 8~10 min, 5%B, 流速:0.2 mL/min。

质谱条件为离子源:电喷雾离子源(electron spray ionization, ESI);扫描方式:负离子( $\text{ESI}^-$ )扫描;检测方式:多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM);干燥气体温度:300℃,干燥气体流速:11 L/min;雾化器压力:15 psi(1 psi=6.895 kPa);毛细管电压:4 000 V;保温气体温度:300℃;保温气体流速:12 L/min。

#### 1.2.4 体外模拟消化

取 3 mL 乳按照 1.2.1 中的方法分离脂质、蛋白质

和低聚糖。脂质用 3 mL 甲醇和 3 mL 磷酸盐缓冲溶液 (phosphate buffered saline, PBS) 复溶, 蛋白质和低聚糖用 3 mL 水和 3 mL PBS 缓冲溶液复溶, 用 1 mol/L 的盐酸调节至 pH3, 加入胃蛋白酶至浓度达 1.3 mg/mL, 将试管置于 37 °C 水浴中振荡加热 2 h。胃部体外消化结束后, 用 1 mol/L NaOH 溶液调节消化液到 pH5.8, 加入最终浓度为 0.175 mg/mL 的胰蛋白酶溶液和最终浓度为 1.1 mg/mL 的胆汁盐, 用 1 mol/L NaOH 溶液调节至 pH7, 然后在相同水浴条件下反应 4 h。分别在胃消化和小肠消化结束后, 沸水浴 5 min 终止相应的体外消化反应。在体外模拟胃肠反应试验中, 分别在人工模拟胃液反应的 0、30、60、120 min (G0、G30、G60、G120) 取样, 在人工模拟肠液反应的 60、120、180、240 min (I60、I120、I180、I240) 取样, 12 000 r/min 离心 10 min 后收集消化液, 待测。

表 1 母乳、牛乳和山羊乳中唾液酸含量

Table 1 Content of sialic acids in human, bovine, and goat milk

μg/mL

样品	低聚糖结合态 Neu5Ac	蛋白质结合态 Neu5Ac	脂质结合态 Neu5Ac	游离 Neu5Ac	低聚糖结合态 Neu5Gc	蛋白质结合态 Neu5Gc	脂质结合态 Neu5Gc	游离 Neu5Gc
母乳	734.65±38.99 <sup>a</sup>	118.20±4.21 <sup>a</sup>	6.99±0.27 <sup>a</sup>	7.41±0.25 <sup>b</sup>	ND	ND	ND	ND
牛乳	50.82±5.89 <sup>b</sup>	61.33±11.75 <sup>b</sup>	6.51±0.28 <sup>a</sup>	12.75±3.52 <sup>a</sup>	0.63±0.05 <sup>b</sup>	2.93±0.16 <sup>b</sup>	ND	ND
山羊乳	28.81±1.74 <sup>b</sup>	43.04±1.62 <sup>c</sup>	5.45±0.81 <sup>b</sup>	2.30±0.40 <sup>c</sup>	30.91±2.47 <sup>a</sup>	52.59±3.54 <sup>a</sup>	6.11±0.91 <sup>a</sup>	3.47±0.58 <sup>a</sup>

注: ND 表示未检测出; 同列不同小写字母表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

含量最高 (734.65 μg/mL), 其次为蛋白质结合态 Neu5Ac, 含量为 118.20 μg/mL。牛乳和山羊乳中 Neu5Ac 含量最高的唾液酸均为蛋白质结合态 Neu5Ac, 分别为 61.33、43.04 μg/mL。母乳、牛乳和山羊乳中与脂质结合的 Neu5Ac 含量均较少, 分别为 6.99、6.51、5.45 μg/mL。母乳中未检测出结合态和游离态 Neu5Gc, 而牛乳中仅检测出少量的低聚糖和蛋白质结合态 Neu5Gc, 含量分别为 0.63、2.93 μg/mL。山羊乳中结合态 Neu5Gc 含量丰富且主要为与蛋白质和低聚糖结合, 含量分别为 52.59、30.91 μg/mL, 以及少量的脂质结合 Neu5Gc (6.11 μg/mL)。结果表明, 母乳中的 Neu5Ac 含量远高于牛乳和山羊乳, 而牛乳中的 Neu5Gc 含量远低于山羊乳。母乳中的唾液酸主要是低聚糖结合态 Neu5Ac, 牛乳中主要是蛋白质和低聚糖结合态 Neu5Ac, 而山羊乳中主要是蛋白质结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc。从乳中不同结合态唾液酸组成和含量上分析, 相比于山羊乳, 牛乳与母乳更接近。

## 2.2 母乳中结合态唾液酸消化率对比

母乳中结合态唾液酸在人工模拟胃液和人工模拟肠液中的消化率结果如图 1 所示。

由图 1 可知, 母乳中低聚糖、蛋白质和脂质结合态 Neu5Ac 的消化率均随着消化时间的延长呈现先上升后下降, 然后逐渐趋于平稳的趋势。在模拟胃反应阶

消化率的计算公式如下。

$$X = C_1 / C_2 \times 100$$

式中:  $X$  为结合态唾液酸胃肠消化率, %;  $C_1$  为结合态唾液酸消化后游离出来的唾液酸含量, μg/mL;  $C_2$  为结合态唾液酸含量, μg/mL。

## 1.3 统计分析

用 SPSS 20.0、Origin 2021 软件对数据进行分析以及图表绘制, 结果以平均值±标准差表示; 所有试验均重复 3 次, 采用单因素方差分析比较均值,  $P < 0.05$  表示差异显著。

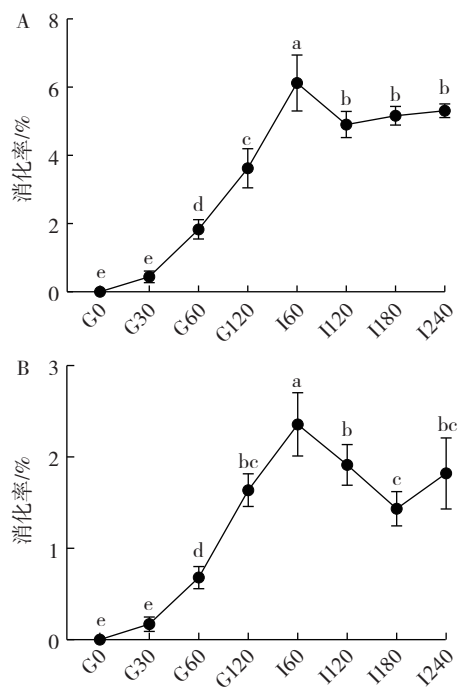
## 2 结果与分析

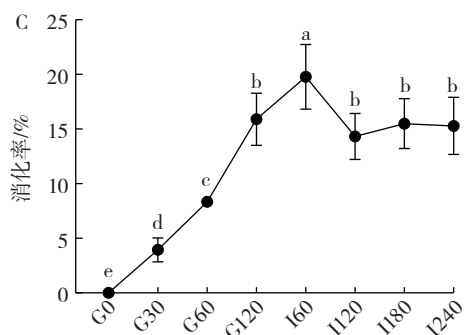
### 2.1 母乳、牛乳和山羊乳中不同结合态唾液酸组成分析

母乳、牛乳和山羊乳中唾液酸含量见表 1。

从表 1 中可以看出, 母乳中低聚糖结合的 Neu5Ac

段消化率是一直上升的, 母乳中 3 种结合态唾液酸在 160 时消化率均最高, 且显著高于其他时间点消化率。此时, 母乳中低聚糖、蛋白质和脂质结合态 Neu5Ac 的消化率分别为 6.13%、2.36% 和 19.78%。在 I120 时消化率又显著下降, 低聚糖、蛋白质和脂质结合 Neu5Ac





A. 低聚糖结合态 Neu5Ac; B. 蛋白质结合态 Neu5Ac; C. 脂质结合态 Neu5Ac; 不同小写字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

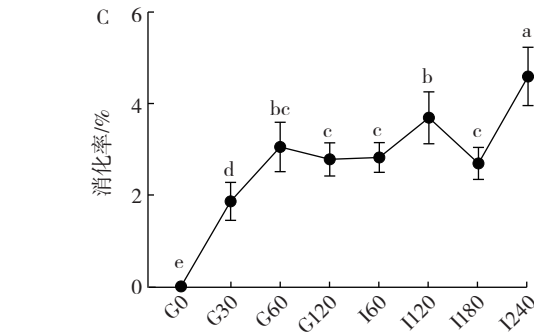
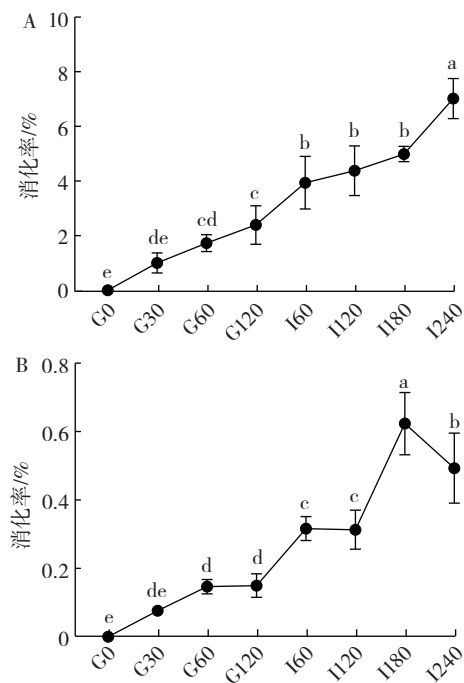
图1 母乳中3种结合态唾液酸的体外胃肠消化率

Fig.1 *In vitro* gastrointestinal digestibility of three types of bound sialic acids in human milk

的消化率分别下降到 4.91%、1.91% 和 14.32%，这可能是由于游离唾液酸又分解成了其他小分子物质。由以上结果可知，母乳中3种结合态唾液酸的消化率变化趋势一致，且脂质结合态 Neu5Ac 的消化率要远高于低聚糖和蛋白质结合 Neu5Ac，母乳中低聚糖和蛋白质结合态 Neu5Ac 的消化率很低。虽然母乳中脂质结合态 Neu5Ac 的消化率最高，但由于母乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 的含量最高，因此，母乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 经胃肠 6 h 消化后游离唾液酸含量最多 (38.99  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )，其次是蛋白质结合态 Neu5Ac (2.15  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )，最后是脂质结合态 Neu5Ac (0.92  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )。

### 2.3 山羊乳中结合态唾液酸消化率对比

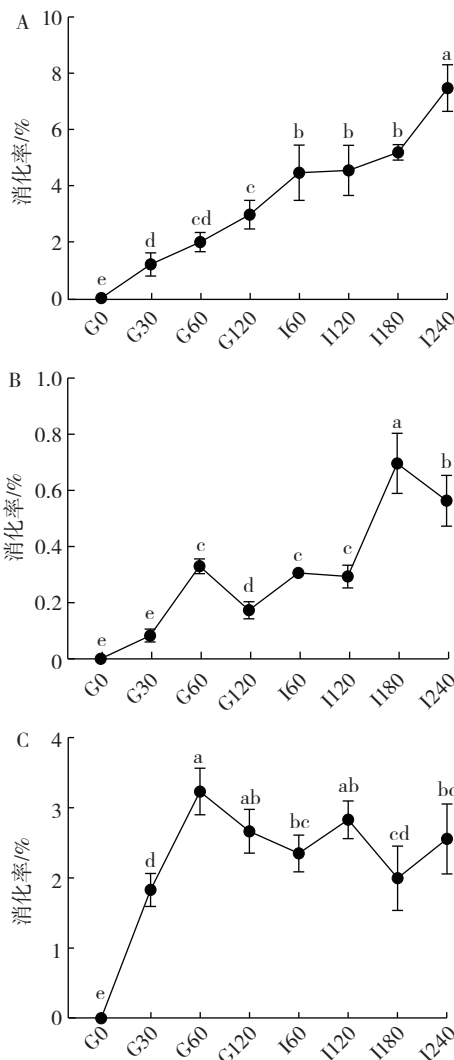
山羊乳中结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc 在人工模拟胃液和人工模拟肠液中的消化率结果分别如图 2 和图 3 所示。



A. 低聚糖结合态 Neu5Ac; B. 蛋白质结合态 Neu5Ac; C. 脂质结合态 Neu5Ac; 不同小写字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

图2 山羊乳中3种结合态 Neu5Ac 的体外胃肠消化率

Fig.2 *In vitro* gastrointestinal digestibility of three types of bound Neu5Ac in goat milk



A. 低聚糖结合态 Neu5Gc; B. 蛋白质结合态 Neu5Gc; C. 脂质结合态 Neu5Gc; 不同小写字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

图3 山羊乳中3种结合态 Neu5Gc 的体外胃肠消化率

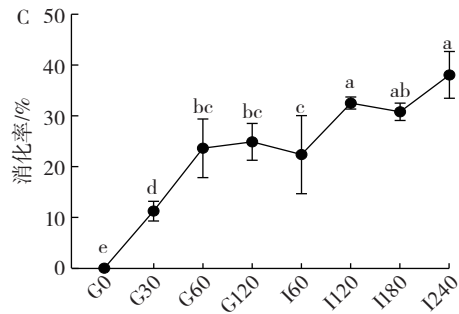
Fig.3 *In vitro* gastrointestinal digestibility of three types of bound Neu5Gc in goat milk

由图2和图3可知,低聚糖结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc 的消化率均最高,且其消化率在 I240 时最高,分别为 7.02% 和 7.47%。与母乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 消化率变化趋势不同,山羊乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 的消化率随着消化时间的延长不断升高,这可能是由于结合态 Neu5Ac 游离出来的速度大于游离 Neu5Ac 的降解速度。山羊乳中脂质结合态 Neu5Ac 的消化率总体呈现上升趋势,消化率最高为 4.60%,而脂质结合态 Neu5Gc 的消化率呈现先上升后下降的趋势,G60 时消化率最高,为 3.24%。蛋白质结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc 的消化率总体呈现先上升后下降的趋势,I180 的消化率显著高于其他时间点的消化率,此时,山羊乳中蛋白质结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc 的消化率分别为 0.62% 和 0.70%。在羊乳中低聚糖结合唾液酸的消化率最高,其次是脂质结合唾液酸,蛋白质结合唾液酸的消化率最低。山羊乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 消化后游离 Neu5Ac 含量也最多,而蛋白质和脂质结合态 Neu5Ac 消化后游离 Neu5Ac 含量接近,3 种结合态 Neu5Ac 消化 6 h 后游离 Neu5Ac 含量为 2.47  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。山羊乳中 Neu5Gc 含量丰富,结合态 Neu5Gc 经胃肠消化 6 h 后释放的游离 Neu5Gc 也较多,为 2.76  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

#### 2.4 牛乳中结合态唾液酸含量消化率对比

牛乳中结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc 在人工模拟胃液和人工模拟肠液中的消化率结果分别如图4和图5所示。

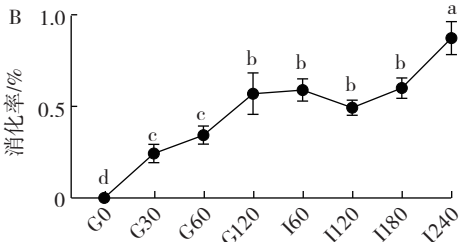
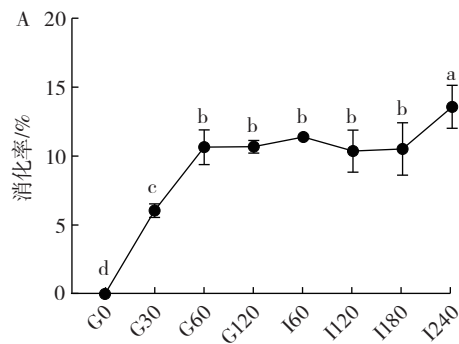
由图4和图5可知,牛乳中脂质结合态 Neu5Ac 的消化率在3种乳中结合态唾液酸的消化率中最高,且消化率在 I240 到达最高,为 38.07%,但牛乳中脂质



A. 低聚糖结合态 Neu5Ac; B. 蛋白质结合态 Neu5Ac; C. 脂质结合态 Neu5Ac; 不同小写字母表示有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

图4 牛乳中3种结合态 Neu5Ac 的体外胃肠消化率

Fig.4 *In vitro* gastrointestinal digestibility of three types of bound Neu5Ac in bovine milk

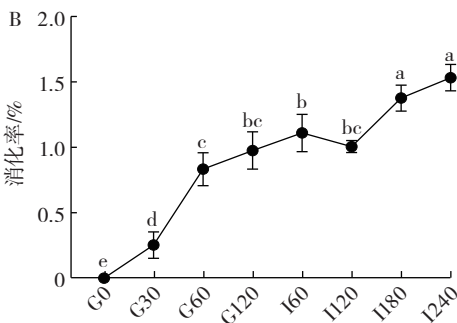
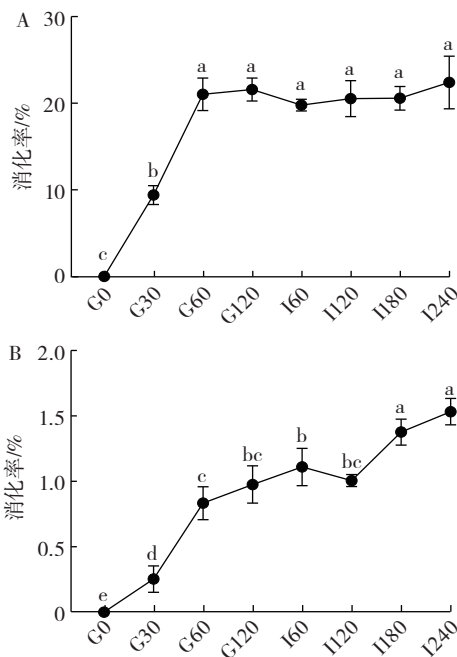


A. 低聚糖结合态 Neu5Gc; B. 蛋白质结合态 Neu5Gc; 不同小写字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

图5 牛乳中2种结合态 Neu5Gc 的体外胃肠消化率

Fig.5 *In vitro* gastrointestinal digestibility of three types of bound Neu5Gc in bovine milk

结合态 Neu5Ac 含量很少,消化后解离下来的 Neu5Ac 也仅为 2.48  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。牛乳中低聚糖结合态唾液酸的消化率呈现先上升后趋于平稳的趋势,胃消化阶段唾液酸消化率的变化率较大,而低聚糖结合 Neu5Ac 在肠消化阶段的消化率均无显著性差异。牛乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 的消化率在 I240 达到最高,为 22.40%,其消化率远高于母乳中低聚糖结合态 Neu5Ac,但由于母乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 含量显著高于牛乳中低聚糖结合态 Neu5Ac 含量,所以母乳低聚糖结合 Neu5Ac 消化 6 h 后解离的游离 Neu5Ac (38.99  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 含量远高于牛乳 (11.39  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )。牛乳中低聚糖结合态 Neu5Gc 在 I240 时的消化率显著高于 I60、I120 和 I180 时的消化率,而 I60、I120 和 I180 的消化率之间无



显著性差异。蛋白质结合态唾液酸的消化率整体呈现逐渐上升的趋势,其消化率在 I240 达到最高,此时,蛋白质结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc 的消化率分别为 1.53% 和 0.87%。牛乳中脂质结合态唾液酸的消化率最大,其次是低聚糖结合态唾液酸,蛋白质结合态唾液酸的消化率最低,这与母乳中的唾液酸消化模式相似。而牛乳中 3 种结合态 Neu5Ac 消化后游离 Neu5Ac 含量由高到低依次为低聚糖结合态 Neu5Ac>脂质结合态 Neu5Ac>蛋白质结合态 Neu5Ac, 3 种结合态 Neu5Ac 消化 6 h 后游离 Neu5Ac 总量为 14.81  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。牛乳中结合态 Neu5Gc 含量很少,经胃肠消化 6 h 后释放的游离 Neu5Gc 含量仅为 0.11  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

### 3 讨论

本研究采用的母乳为初乳和过渡乳,其唾液酸含量显著高于牛乳和山羊乳,且主要是低聚糖结合态 Neu5Ac,牛乳中主要是蛋白质和低聚糖结合态 Neu5Ac,而山羊乳中主要是蛋白质结合态 Neu5Ac 和 Neu5Gc。此外,山羊乳中的总 Neu5Gc 的含量高达 93.08  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,显著高于牛乳中总 Neu5Gc (3.56  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 的含量,母乳中未检测到 Neu5Gc。因此,牛乳的唾液酸组成和含量更接近于母乳。

山羊乳中结合态唾液酸的消化率由高到低依次为低聚糖结合态唾液酸>脂质结合态唾液酸>蛋白质结合态唾液酸,而母乳和牛乳中结合态唾液酸的消化率由高到低依次为脂质结合态唾液酸>低聚糖结合态唾液酸>蛋白质结合态唾液酸,母乳和牛乳中脂质结合态唾液酸的消化率高可能与乳中脂质结合态唾液酸的结构和种类有关。

由于母乳中的唾液酸含量远高于牛乳和山羊乳,低聚糖和蛋白质结合 Neu5Ac 经消化后解离下来的 Neu5Ac 含量最高的是母乳,其次是牛乳,最少的是山羊乳,而脂质结合 Neu5Ac 经消化后解离下来的 Neu5Ac 含量最高的是牛乳,其次是母乳,最后是山羊乳。母乳、山羊乳和牛乳中低聚糖、蛋白质和脂质结合态唾液酸消化后的游离唾液酸均不多,尤其是蛋白质结合态唾液酸经过胃肠模拟消化后解离下来的唾液酸含量非常少,这意味着通过摄入山羊乳或牛乳带来的外源性结合态 Neu5Gc 主要以结合态形式留存在体内,且在胃和小肠内稳定存在,其对健康影响还有待进一步研究。

### 4 结论

本研究结果表明,与山羊乳相比,牛乳中唾液酸的含量和组成更接近母乳。母乳中结合态唾液酸消化后释放的游离唾液酸含量明显高于牛乳和山羊乳,但牛乳中 3 种结合态唾液酸消化后的游离唾液酸含量和消

化模式更加接近于母乳。总体来说,母乳、牛乳和山羊乳经胃肠消化后解离下来的唾液酸含量很少,可进一步探究通过婴儿粪便发酵实验模拟结肠中微生物对结合态唾液酸的降解吸收,分析婴儿粪便中微生物的作用是否会提高结合态唾液酸的消化率。本研究为婴儿配方奶粉的设计以及配料的添加提供了参考。

### 参考文献:

- [1] HAO J J, BALAGURUMOORTHY P, SARILLA S, et al. Cloning, expression, and characterization of sialic acid synthases[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2005, 338(3): 1507-1514.
- [2] WANG B. Sialic acid is an essential nutrient for brain development and cognition[J]. *Annual Review of Nutrition*, 2009, 29: 177-222.
- [3] CHIURAZZI M, COZZOLINO M, REINELT T, et al. Human milk and brain development in infants[J]. *Reproductive Medicine*, 2021, 2(2): 107-117.
- [4] CHO S, ZHU Z L, LI T F, et al. Human milk 3'-Sialyllactose is positively associated with language development during infancy[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2021, 114(2): 588-597.
- [5] HOBBS M, JAHAN M, GHORASHI S A, et al. Current perspective of sialylated milk oligosaccharides in mammalian milk: Implications for brain and gut health of newborns[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 473.
- [6] GHADERI D, ZHANG M, HURTADO-ZIOLA N, et al. Production platforms for biotherapeutic glycoproteins. Occurrence, impact, and challenges of non-human sialylation[J]. *Biotechnology & Genetic Engineering Reviews*, 2012, 28: 147-175.
- [7] PUENTE R, HUESO P. Lactational changes in the N-glycolylneuraminic acid content of bovine milk gangliosides[J]. *Biological Chemistry Hoppe-Seyler*, 1993, 374(7): 475-478.
- [8] DE SOUSA Y R F, DA SILVA VASCONCELOS M A, COSTA R G, et al. Sialic acid content of goat milk during lactation[J]. *Livestock Science*, 2015, 177: 175-180.
- [9] TOLENAARS L, ROMANAZZI D, CARPENTER E, et al. Minor dietary components intrinsic to goat milk and goat milk formulas[J]. *International Dairy Journal*, 2021, 117: 105012.
- [10] 茹元朴, 陈历俊, 陈树兴, 等. 唾液酸及在母婴食品中的应用[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(2): 402-412.  
RU Yuanpu, CHEN Lijun, CHEN Shuxing, et al. Sialic acid and its application in maternal and infant food[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(2): 402-412.
- [11] WANG B, BRAND-MILLER J, MCVEAGH P, et al. Concentration and distribution of sialic acid in human milk and infant formulas[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2001, 74(4): 510-515.
- [12] MARTÍN-SOSA S, MARTÍN M J, GARCÍA-PARDO L A, et al. Distribution of sialic acids in the milk of Spanish mothers of full term infants during lactation[J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2004, 39(5): 499-503.
- [13] CARLSON S E. N-acetylneuraminic acid concentrations in human milk oligosaccharides and glycoproteins during lactation[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1985, 41(4): 720-726.
- [14] LIS-KUBERKA J, ORCZYK-PAWIŁOWICZ M. Sialylated oligosaccharides and glycoconjugates of human milk. the impact on infant and newborn protection, development and well-being[J]. *Nutrients*, 2019, 11(2): 306.
- [15] 曹旭, 逢越, 李庆伟. N-羟乙酰神经氨酸(Neu5Gc)参与肿瘤进程

- 的研究进展[J]. 中国免疫学杂志, 2021, 37(21): 2625-2633.
- CAO Xu, PANG Yue, LI Qingwei. Advance in involvement of Neu5Gc in tumor progression[J]. Chinese Journal of Immunology, 2021, 37(21): 2625-2633.
- [16] VARKI A. Sialic acids in human health and disease[J]. Trends in Molecular Medicine, 2008, 14(8): 351-360.
- [17] BASHIR S, FEZEU L K, LEVIATAN BEN-ARYE S, et al. Association between Neu5Gc carbohydrate and serum antibodies against it provides the molecular link to cancer: French NutriNet-Santé study [J]. BMC Medicine, 2020, 18(1): 262.
- [18] CHEESEMAN J, KUHNLE G, STAFFORD G, et al. Sialic acid as a potential biomarker for cardiovascular disease, diabetes and cancer[J]. Biomarkers in Medicine, 2021, 15(11): 911-928.
- [19] BANDA K, GREGG C J, CHOW R, et al. Metabolism of vertebrate amino sugars with N-glycolyl groups: Mechanisms underlying gastrointestinal incorporation of the non-human sialic acid xeno-auto-antigen N-glycolylneuraminic acid[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2012, 287(34): 28852-28864.
- [20] ALISSON-SILVA F, KAWANISHI K, VARKI A. Human risk of diseases associated with red meat intake: Analysis of current theories and proposed role for metabolic incorporation of a non-human sialic acid[J]. Molecular Aspects of Medicine, 2016, 51: 16-30.
- [21] KAWANISHI K, DHAR C, DO R, et al. Human species-specific loss of CMP-N-acetylneuraminic acid hydroxylase enhances atherosclerosis via intrinsic and extrinsic mechanisms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(32): 16036-16045.
- [22] 倪妮妮. 母乳低聚糖对 DSS 诱导肠炎小鼠肠道菌群及短链脂肪酸的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- NI Weiwei. Effects of breast milk oligosaccharides on intestinal flora and short-chain fatty acids in mice with DSS-induced enteritis [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [23] WEI J H, WANG Z A, WANG B, et al. Characterization of porcine milk oligosaccharides over lactation between primiparous and multiparous female pigs[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4688.

责任编辑:张璐  
收稿日期:2024-03-08