

基于主成分分析与马氏距离结合运用的婴幼儿配方奶粉营养综合评价

张雪¹, 葛武鹏^{1*}, 郝梦露¹, 杨莉¹, 何锐², 崔秀秀³

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西优利士乳业有限公司, 陕西 咸阳 712000; 3.陕西百跃羊乳集团有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:目的: 科学评价婴幼儿配方奶粉主成分营养, 为婴幼儿食品开发与优化提供技术参考。方法: 采用气相色谱、高效液相色谱、离子色谱等方法检测婴幼儿配方奶粉的脂肪、蛋白质和碳水化合物三大宏量营养素及其脂肪酸、氨基酸、乳糖和低聚糖组成及质量分数, 在多指标体系中提取出6个主成分, 利用马氏距离评分测算婴幼儿配方奶粉与母乳的营养吻合度, 对不同婴幼儿配方奶粉进行综合评价。结果表明: 1) 在所测9个配方奶粉样品中三大宏量营养素组成及质量分数与母乳相似, 但其分项指标与母乳仍有显著差异 ($P < 0.05$); 2) 所测样品中婴幼儿配方奶粉(以下简称婴配)羊奶粉D样品综合马氏距离评分最高, 为90.15, 其营养综合评价最佳; 婴配羊奶粉F样品次之, 为86.96; 婴配牛奶粉H、I样品得分均处于较低水平, 分别为82.32、82.11, 婴配羊奶粉马氏距离评分普遍高于婴配牛奶粉。同时综合马氏距离评分发现其受脂肪酸量影响最大, 碳水化合物对整体马氏距离评分影响最小, 各种营养素之间存在交互作用, 对整体马氏距离评分有影响。该方法对于多个营养指标体系的婴配奶粉营养评价较为科学合理。

关键词: 婴幼儿配方奶粉; 主成分分析; 马氏距离; 宏量营养素

Comprehensive Nutrition Evaluation of Infant Formula Based on Principal Component Analysis with Mahalanobis Distance

ZHANG Xue¹, GE Wupeng^{1*}, XI Menglu¹, YANG Li¹, HE Rui², CUI Xiuxiu³

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Youlishi Dairy Industry Co. Ltd., Xianyang 712000, China; 3. Shaanxi Baiyue Goat Group Co. Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: This study aimed to scientifically evaluate the main nutritional ingredients of infant formula in order to provide a technical basis for the development and optimization of new infant foods. Gas chromatography, high performance liquid chromatography and ion chromatography were used to detect the three macronutrients proteins, fats and carbohydrates as well as fatty acids, amino acids, lactose and oligosaccharides in infant formula. From the multi-index system, six principal components were extracted and the Mahalanobis distance (MD) was used to measure the nutritional coincidence degree between infant formula and breast milk, and a comprehensive nutritional evaluation was carried out. The results showed that: 1) The compositions and contents of the macronutrients in nine infant formula samples were similar to those in breast milk, but there was a significant difference in some individual components ($P < 0.05$); 2) Among the tested infant formula samples, goat milk sample D scored highest for Mahalanobis distance (MD = 90.15), followed by goat milk sample F (MD = 86.96), and bovine milk samples H and I showed lower MD scores (82.32 and 82.11, respectively). Accordingly, MD scores for goat milk infant formula were generally higher than those for bovine milk infant formula; 3) MD scores were most affected by fatty acids, and the effect of carbohydrates was the least. The interaction between various nutrients also had an effect. This method can be considered a scientific and reasonable method for the nutritional evaluation of infant formula using multiple nutritional indicators.

Keywords: infant formula; principal component analysis; Mahalanobis distance; macronutrients

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190305-051

中图分类号: TS252.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2020)05-0166-07

收稿日期: 2019-03-05

基金项目: 陕西省科技创新能力建设计划项目(2017XY-02); 陕西省企业创新项目(K4030218139)

第一作者简介: 张雪(1994—)(ORCID: 0000-0003-3172-6472), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品科学。

E-mail: 616741730@qq.com

*通信作者简介: 葛武鹏(1965—)(ORCID: 0000-0024-4194-488X), 男, 副教授, 博士, 研究方向为乳及乳制品科学。

E-mail: josephge@sina.com

引文格式:

张雪, 葛武鹏, 郝梦露, 等. 基于主成分分析与马氏距离结合运用的婴幼儿配方奶粉营养综合评价[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 166-172. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190305-051. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Xue, GE Wupeng, XI Menglu, et al. Comprehensive nutrition evaluation of infant formula based on principal component analysis with Mahalanobis distance[J]. Food Science, 2020, 41(5): 166-172. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190305-051. <http://www.spkx.net.cn>

婴幼儿阶段是身体和大脑发育的重要时期, 其充足均衡的营养供给对婴幼儿健康成长极其重要。母乳是婴幼儿喂养的金标准, 当母乳供应不足或因各种社会因素等不能进行母乳喂养时, 婴幼儿配方(以下简称婴配)奶粉就成了婴幼儿母乳的最佳替代品^[1]。婴配奶粉的营养成分必须满足婴幼儿的生长需要, 应最大程度地接近母乳, 其各营养成分及含量, 构成及量效关系对满足婴幼儿营养需求至关重要^[2]。特别是三大产能营养素蛋白质、脂肪、碳水化合物的热量供给更应科学合理, 且三者的摄入比例亦影响着微量营养素的摄入状况^[3], 因此对其进行合理科学的综合性评价显得尤其重要。

目前尚缺乏多营养指标体系的婴配奶粉的综合评价标准化方法。本研究首次利用马氏距离(Mahalanobis distance, MD)对婴配奶粉中三大宏量营养素进行综合评价, 营养素组成、含量与母乳的吻合度越高则表明营养价值越优。吻合度为样本与真值(理论值、标准值)两个或多个变量之间接近程度的量化指标^[4], 是通过计算样本与标准值之间的距离转化得到。马氏距离是1936年印度统计学家Mahalanobis^[5]提出的, 它是一种有效的计算一个样本与样本集“重心”的最近距离或者计算两个未知样本集相似度的方法。与欧氏距离相比, 马氏距离不受量纲的影响, 即两点之间的马氏距离与原始数据的测量单位无关; 且马氏距离考虑到各种特性之间的联系, 可以排除变量之间的相关性的干扰^[6]。

本研究采用气相色谱、高效液相色谱、离子色谱等方法对婴配奶粉的三大宏量营养素(蛋白质、脂肪、碳水化合物)及其氨基酸、脂肪酸、低聚糖、乳糖含量进行测定并分析, 首次利用主成分分析与马氏距离法相结合的方法对婴配奶粉进行营养综合评价, 比对不同婴配奶粉的优劣, 以期对婴配奶粉的开发及综合科学评价提供更多的参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

I段(0~6月)婴配羊奶粉, 编号为A~G; I段婴配牛奶粉, 编号为H~I, 购于陕西某连锁超市。

邻苯二甲醛(*o*-phthalaldehyde, OPA)、9-芴甲氧羰酰氯(Fmoc-Cl)、脂肪酸-甲酯混合标准品 美国

Sigma-Aldrich公司; 17种氨基酸标准混合物、氨基酸补充剂盒 美国安捷伦科技有限公司。

1.2 仪器与设备

8400凯氏定氮仪 丹麦FOSS公司; 1100高效液相色谱仪、Poroshell HPH-C₁₈色谱柱(4.6 mm×100 mm, 2.7 μm)、HP-88气相色谱柱(100 m×0.25 mm, 0.20 μm) 美国安捷伦科技有限公司; GC-2014C气相色谱仪(配有火焰离子化检测器) 日本岛津公司; ICS5000+离子色谱仪 美国赛默飞世尔公司。

1.3 方法

1.3.1 基础营养指标含量的测定

蛋白质含量参照GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》, 采用8400全自动凯氏定氮仪测定。脂肪含量测定参照GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》。碳水化合物含量测定参照GB 10765—2010《食品安全国家标准 婴儿配方食品》。脂肪酸含量测定采用气相色谱法参照GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》中乙酰氯-甲醇法。乳糖质量分数测定参照GB 5413.5—2010《婴幼儿食品和乳品中乳糖、蔗糖的测定》。

1.3.2 16种水解氨基酸含量的测定

1.3.2.1 样品前处理

16种氨基酸(除色氨酸)参照GB/T 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》, 采用1100高效液相色谱仪测定。

1.3.2.2 OPA-FMOC柱前在线衍生分析

柱前在线衍生方法需在样品瓶1~5号位置依次放置0.4 mol/L硼酸钠缓冲液(pH 10.2)、超纯水、1% OPA、0.5% Fmoc-Cl、流动相A液; 设置程序: 先抽取1号瓶2.5 μL; 再抽取2号瓶2.5 μL, 最大速率, 空气混合5.0 μL 2次, 等待0.5 min; 抽取2号瓶0 μL; 接着抽取3号瓶1.0 μL, 最大速率空气混合6.0 μL, 6次; 再抽取2号瓶0 μL; 接着抽取4号瓶1.0 μL, 最大速率空气混合7.0 μL, 6次; 再抽取5号瓶20 μL, 最大速率空气混合20.0 μL, 2次; 接着进样20 μL^[7]。

1.3.2.3 色谱条件

色谱柱Poroshell HPH-C₁₈(4.6 mm×100 mm, 2.7 μm); 柱温40℃, 流速1.5 mL/min; 流动相A: 含10 mmol/L磷酸氢二钠、10 mmol/L硼酸钠的缓冲溶液,

用盐酸溶液调pH值至8.2；流动相B：甲醇-乙腈-水（45:45:10，V/V）；按表1进行梯度洗脱。紫外检测器波长338 nm，10 nm带宽，参比390 nm，20 nm带宽（一级氨基酸）；262 nm，16 nm带宽；参比324 nm，8 nm带宽（二级氨基酸）；于赖氨酸出峰后切换波长至262 nm。

表1 洗脱梯度程序
Table 1 Gradient elution program

时间/min	0	0.35	13.40	13.50	15.70	15.80	18.00
A相体积分数/%	98	98	43	0	0	98	98
B相体积分数/%	2	2	57	100	100	2	2

1.3.3 色氨酸测定

参照AOAC 988.15测定饲料中色氨酸的标准，采用1100高效液相色谱仪测定。衍生与色谱条件同1.3.2节。

1.3.4 低聚糖含量测定

低聚果糖含量的测定：采用离子色谱法，参照GB 5009.255—2016《食品安全国家标准 食品中果聚糖的测定》。低聚半乳糖含量的测定参考邵琪等^[8]的方法。

1.3.5 主成分与马氏距离的计算

主成分分析的目的就是将数据降维，以消除众多信息共存中相互重叠的信息部分。主成分分析得到多个变量的主成分和得分，得分为压缩后的变量数据，使用得分数据代替原始营养指标的数据计算马氏距离，不仅能反映全部数据信息，而且也能压缩参加计算马氏距离的变量数，并能保证 M 矩阵不存在共线问题^[9]。计算由多个主成分变量赋予的不同样品各自得分 T （式（1））。

$$T_{n \times f} = X_{n \times m} \times P_{m \times f} \quad (1)$$

式中： X 为指标变量矩阵； P 为载荷矩阵； n 为样品数； m 为变量数； f 为主成分数。

计算样品数据到标准值（母乳数据）的马氏距离矩阵（式（2））。

$$D^2 = (T_i - T) M^{-1} (T_i - T)' \quad (2)$$

式中： D 为马氏距离； M 为标准指标集因子分析中得分阵（Score）的协方差阵； T_i 为样本的得分向量； T 为 n 个样品参考的标准值； i 为不同的样本。

得到的马氏距离代表样品该营养指标与母乳的吻合程度，数值越大，距离越远，与母乳吻合度越低，呈负相关。为将其转换为呈正相关的最终得分，计算最终马氏距离评分MD（式（3））。

$$MD = 100 - D^2 \quad (3)$$

1.4 数据处理与分析

利用Excel 2010和Minitab 16.2.3软件进行数据整理、绘图、方差分析，利用Matlab 2014软件进行主成分分析、马氏距离评分计算。

2 结果与分析

2.1 基础营养指标的组成及含量

蛋白质、脂肪、碳水化合物（主要是乳糖）是婴幼儿从出生到断奶时期的主要营养物质，是母乳为婴幼儿提供的基本且重要的营养保障^[10]。作为食品中为婴幼儿的生长发育提供能量的三大宏量营养素，它们的质量及含量是首要考虑因素。

表2 不同品牌的要配奶粉宏量营养素组成

Table 2 Macronutrient composition of different brands of infant formula

成分	样品								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
脂肪含量/(g/100 g)	25.05	25.69	24.80	25.76	26.58	24.44	25.26	27.34	27.04
蛋白质含量/(g/100 g)	12.59	12.93	12.06	12.83	12.82	12.51	12.25	11.68	11.05
碳水化合物含量/(g/100 g)	55.38	54.62	56.23	54.97	54.27	57.71	57.23	55.82	56.06
乳糖含量/(g/100 g)	53.58	51.90	52.96	53.31	51.49	54.59	53.83	53.91	52.90
乳糖/碳水化合物/%	96.75	95.02	94.18	96.98	94.88	94.59	94.06	96.58	94.36

脂类成分的摄入能满足机体能量供应及基础的脂肪酸需求，对于脂溶性维生素、类胡萝卜素和胆固醇的消化吸收至关重要，同时也促进了风味的传递及饱腹感的产生^[11]。乳糖是婴幼儿奶粉中含量较高的一种糖，GB 10765—2010中规定0~6个月适龄的配方奶粉中乳糖含量应占碳水化合物的90%以上，乳糖经乳糖酶作用形成有机酸，可以促进钙离子吸收、有益菌成长^[12]。由表2可以看出，几种配方奶粉的乳糖含量均占碳水化合物90%以上，符合GB 10765—2010。

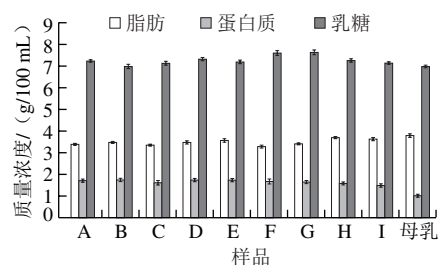


图1 要配奶粉冲调乳及母乳中宏量营养素的质量浓度

Fig. 1 Comparison of macronutrient contents in infant formula and breast milk

母乳中的主要营养成分含量通常作为婴幼儿营养需求的标准，是各类婴儿配方食品配料选择的基础。母乳中蛋白质平均质量浓度为0.9~1.2 g/100 mL^[13]，脂肪占总能量的47%，乳糖质量分数为7%；由图1可看出，除脂肪质量浓度外，要配奶粉中蛋白质、乳糖质量浓度均高于母乳，均能满足婴幼儿的能量需求。不同基料的要配奶粉蛋白质质量浓度为1.49~1.75 g/100 mL，远高于母乳。这与逢金柱等^[14]研究结果一致。蛋白质含量过高会加重婴幼儿肾脏的代谢负担，已有多项临床实验证明^[15]：低蛋白含量的配方奶粉不影响婴儿的各项生理指标，且有降低肥胖和患慢性疾病的几率。同时平衡要配奶粉中总蛋白含量与必需

氨基酸含量,是婴配奶粉在蛋白质和氨基酸组成上能够更贴近母乳的关键技术要点。

2.2 低聚糖组成及含量

母乳作为“金标准”,天然含有牛乳中不存在的益生元(即低聚糖)。有研究表明,低聚糖种类及含量的不同是导致婴儿肠道菌群存在差异的重要原因,母乳中的低聚糖有重要的益生作用(特别是对双歧杆菌),在婴儿配方奶中添加低聚半乳糖和菊粉可以促进双歧杆菌增殖^[16]。Arslanogru等^[17]研究表明,含短链低聚半乳糖和长链低聚果糖的婴儿配方食品能够降低出生6个月的婴儿患过敏性皮炎及其他传染病的风险。为模拟母乳,目前较多婴配奶粉中都添加了低聚半乳糖和低聚果糖。

表3 婴配奶粉低聚半乳糖和低聚果糖含量

Table 3 Contents of oligolactose and oligofructose in infant formula

成分	样品								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
低聚半乳糖含量/(g/100 g)	1.73	0.63	—	0.72	0.61	0.67	0.66	—	1.60
低聚果糖含量/(g/100 g)	1.61	1.79	1.83	0.64	0.73	0.44	0.41	1.72	1.48
低聚糖总含量/(g/100 g)	3.34	2.62	1.83	1.36	1.34	1.11	1.07	1.72	3.08

注:—,未检出。

由表3可以看出,不同品牌的婴配奶粉低聚半乳糖和低聚果糖的添加量差异显著。其中羊奶粉样品C和牛奶粉样品H中未添加低聚半乳糖,其余样品中,低聚半乳糖添加量最少的是样品E,仅为0.61 g/100 g,最多的是样品A,为1.73 g/100 g。低聚果糖添加量最少为样品G(0.41 g/100 g),最多的是样品C(1.83 g/100 g)。国内外的研究发现,母乳中益生元的质量分数为7‰,对应奶粉中益生元质量分数应为5.5‰^[18]。样品A中益生元添加量最高,为3.34 g/100 g;样品G中益生元添加量最低,为1.07 g/100 g,均与母乳存在较大差异。

2.3 婴配奶粉氨基酸含量分析结果

由表4及图2可知,通过柱前衍生高效液相色谱法检测到婴配奶粉中的17种氨基酸,氨基酸总含量最高的为婴配羊奶粉B样品(12.72 g/100 g),最低的为婴配牛奶粉样品I(10.67 g/100 g);由氨基酸热图可以看到:婴配羊奶粉B样品多种氨基酸颜色均最深,表明其含量最高;婴配牛奶粉I颜色均最浅,表明其氨基酸含量较低。总体而言,所测样品中婴配羊奶粉氨基酸含量高于婴配牛奶粉,氨基酸总量与蛋白质含量呈正相关。其中包括色氨酸在内的9种EAA占氨基酸总含量的41.42%~44.10%,EAA/NEAA为70.70%~78.88%,均高于联合国粮食及农业组织/世界卫生组织理想蛋白质标准(40%和60%以上)^[19]。婴配牛奶粉样品H的EAA/TAA和EAA/NEAA均最低;婴配羊奶粉A样品最高。所有样品的17种氨基酸含量中最高和最低的分别为Glu和Trp,与李菁等^[20]用氨基酸自动分析仪测定婴配奶粉中的氨基酸研究结果一致。有研究显示母乳氨基酸含量中谷氨酸含量最丰富^[21]。所测样品中婴配羊奶粉B的Glu含量最

高,为2.61 g/100 g。Glu是谷胱甘肽的前体,是中枢神经系统重要的兴奋性递质,其对婴幼儿的生长发育有更大的益处,同时是肠道细胞能量的重要底物^[22]。9种EAA中,Leu均含量最高,为1.02~1.26 g/100 g,其次为Lys、Val、Thr和Ile。Leu在机体中发挥着重要的营养生理作用,主要包括氧化供能、调节机体免疫功能和调节机体(尤其是骨骼肌)的蛋白质代谢^[23]。Leu、Ile和Val又称为支链氨基酸,不仅是合成蛋白质的前体物质,而且具有许多其他特殊生物学功能,属于功能性氨基酸^[24-25]。BCAA/TAA的比值中,婴配羊奶粉B样品最高,为21.17;婴配牛奶粉H样品支链氨基酸含量较少,比值较低,为18.11,其余样品均在20以上。不同基料、不同品牌的婴配粉在多种氨基酸含量上均存在差异,但除His外,其余氨基酸的差异并不显著。婴配牛奶粉H、I样品在多种氨基酸含量上均低于其余样品。顾浩峰等^[26]研究表明,与牛奶婴配奶粉相比,羊奶婴配奶粉中的蛋白质的消化率更高,且EAA含量更高,能更好地被机体吸收利用。王逸斌等^[27]分析发现与配方牛奶粉相比,全羊乳蛋白配方羊奶粉可以明显促进婴儿的体质量及头围等一系列指标增长,对整体生长发育促进作用明显优于配方牛奶粉,可能因为羊奶所特有的理化性质如蛋白质的组成和性质、EAA含量等更有益于其营养价值的发挥,从而导致婴儿对羊奶的消化率以及消化吸收速率高于牛奶。

表4 婴配奶粉氨基酸含量

Table 4 Amino acid contents of infant formula

成分	样品								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Leu含量/(g/100 g)	1.139 ^{acd}	1.260 ^a	1.131 ^{ac}	1.200 ^{ab}	1.160 ^{abc}	1.135 ^{acd}	1.116 ^{acd}	1.018 ^d	1.019 ^{cd}
Lys含量/(g/100 g)	0.886 ^{ab}	0.976 ^a	0.883 ^{ab}	0.892 ^{ab}	0.900 ^{ab}	0.856 ^b	0.834 ^b	0.961 ^d	0.844 ^b
Val含量/(g/100 g)	0.761 ^{ab}	0.774 ^a	0.716 ^{ab}	0.768 ^{ab}	0.726 ^{ab}	0.749 ^{ab}	0.697 ^b	0.543 ^c	0.601 ^c
Ile含量/(g/100 g)	0.619 ^{abc}	0.658 ^a	0.617 ^{bc}	0.650 ^{ab}	0.641 ^{ab}	0.640 ^{ab}	0.597 ^{bc}	0.499 ^d	0.556 ^{cd}
Phe含量/(g/100 g)	0.486 ^{ab}	0.504 ^a	0.483 ^{ab}	0.490 ^{ab}	0.502 ^{ab}	0.480 ^{ab}	0.473 ^{ab}	0.407 ^c	0.414 ^c
Thr含量/(g/100 g)	0.652 ^{ab}	0.603 ^a	0.596 ^a	0.570 ^{ab}	0.662 ^{ab}	0.671 ^{ab}	0.684 ^{ab}	0.623 ^{ab}	0.600 ^{ab}
His含量/(g/100 g)	0.277 ^b	0.241 ^{bc}	0.167 ^c	0.420 ^a	0.189 ^d	0.242 ^{bc}	0.247 ^{bc}	0.206 ^c	0.187 ^d
Met含量/(g/100 g)	0.245 ^{ab}	0.257 ^a	0.251 ^{ab}	0.264 ^a	0.236 ^{abc}	0.245 ^{ab}	0.249 ^{ab}	0.207 ^c	0.220 ^{bc}
Trp含量/(g/100 g)	0.227 ^c	0.210 ^d	0.200 ^d	0.229 ^c	0.261 ^a	0.258 ^a	0.229 ^c	0.248 ^b	0.185 ^e
Tyr含量/(g/100 g)	0.379 ^{abc}	0.387 ^a	0.383 ^{abc}	0.386 ^{abc}	0.385 ^{abc}	0.405 ^{ab}	0.367 ^{bc}	0.413 ^a	0.351 ^c
Ser含量/(g/100 g)	0.656 ^{ab}	0.637 ^a	0.645 ^{ab}	0.667 ^a	0.651 ^{ab}	0.647 ^{ab}	0.622 ^{ab}	0.596 ^b	0.616 ^{ab}
Ala含量/(g/100 g)	0.486 ^b	0.514 ^a	0.468 ^{bc}	0.505 ^{ab}	0.539 ^a	0.514 ^{ab}	0.469 ^{bc}	0.423 ^c	0.425 ^c
Gly含量/(g/100 g)	0.219 ^b	0.232 ^b	0.229 ^b	0.296 ^c	0.221 ^b	0.209 ^b	0.215 ^b	0.217 ^b	0.207 ^b
Arg含量/(g/100 g)	0.322 ^{bc}	0.307 ^a	0.312 ^{bc}	0.308 ^{bc}	0.332 ^{bc}	0.348 ^b	0.300 ^c	0.330 ^{bc}	0.231 ^d
Asp含量/(g/100 g)	1.192 ^b	1.397 ^a	1.244 ^b	1.254 ^b	1.430 ^b	1.257 ^b	1.207 ^b	1.260 ^b	1.139 ^b
Glu含量/(g/100 g)	2.511 ^{ab}	2.610 ^c	2.589 ^a	2.604 ^a	2.596 ^a	2.535 ^a	2.442 ^{ab}	2.393 ^{ab}	2.098 ^b
Pro含量/(g/100 g)	0.942 ^c	1.150 ^a	1.073 ^{abc}	1.126 ^{ab}	1.142 ^{ab}	1.071 ^{abc}	1.035 ^{bc}	1.028 ^{bc}	0.979 ^c
TAA含量/(g/100 g)	12.00	12.72	11.99	12.63	12.57	12.26	11.78	11.37	10.67
EAA含量/(g/100 g)	5.29	5.48	5.04	5.48	5.28	5.28	5.13	4.71	4.63
NEAA含量/(g/100 g)	6.71	7.23	6.94	7.15	7.30	6.99	6.66	6.66	6.05
EAA/TAA/%	44.10	43.12	42.08	43.41	41.96	43.03	43.51	41.42	43.35
EAA/NEA/%	78.88	75.79	72.65	76.71	72.29	75.52	77.01	70.70	76.52
BCAA/TAA/%	20.99	21.17	20.56	20.73	20.09	20.60	20.45	18.11	20.39

注:同行无相同字母表示差异显著($P<0.05$);TAA,氨基酸总量(total amino acids);EAA,必需氨基酸总量(total essential amino acids),包括表中前9种氨基酸;NEAA,非必需氨基酸总量(total non-essential amino acids);BCAA,支链氨基酸(branch chain amino acids)(包括Ile、Leu和Val)。Cys在酸水解、碱水解过程中遭到破坏,数据暂无,下同。

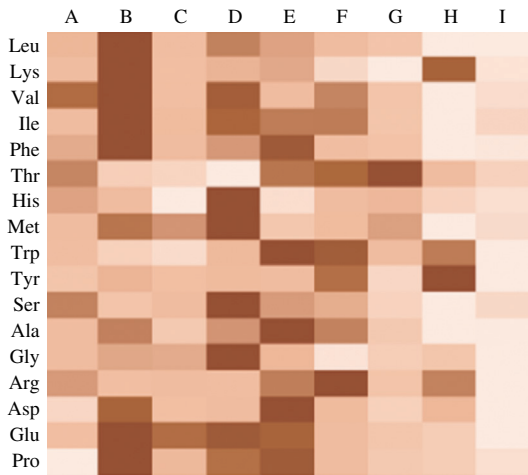


图2 不同品牌婴配奶粉氨基酸热图

Fig. 2 Heatmap for amino acids in different brands of infant formula

2.4 婴配奶粉脂肪酸含量分析结果

通过表5和图3可以看出，不同品牌、基料的婴配奶粉中脂肪酸组成相似，但各种脂肪酸含量差异较大，与母乳仍有较大差距。母乳中主要脂肪酸组成为棕榈酸C_{16:0}、油酸C_{18:1c}和亚油酸C_{18:2c}，其含量占总量的70%以上。婴配奶粉中主要脂肪酸与母乳一致，婴配羊奶粉中其含量占总量的72%~80%；婴配牛奶粉中其含量占总量的80%以上。

在短链、中链和长链脂肪酸中，不同品牌奶粉中短链脂肪酸的含量差异性显著，含量最高的为婴配方羊奶粉样品D（5.73%），含量最低的为婴配牛奶粉样品I（0.88%）。可以看出，婴配羊奶粉中短链脂肪酸的含量明显高于婴配牛奶粉。羊乳中的短中链脂肪酸（C₄~C₁₀）含量显著高于牛乳和母乳，研究表明脂肪酶分解短中链脂肪酸的能力要比分解长链脂肪酸强的多，这也是山羊乳脂比牛乳脂更易消化的原因之一^[28]。短链脂肪酸具有易消化的特性，能够抑制胆固醇沉积、预防和治疗肠功能紊乱等疾病，还可调节肠道菌群，维持体液和电解质平衡^[29-30]。长链多不饱和脂肪酸中ARA和DHA含量较高，它们均来源于添加的微生物油脂。婴配奶粉中ARA和DHA含量远低于母乳（分别为0.84%、0.58%），婴配牛奶粉样品I中含量较高，分别为0.37%和0.33%。且同种基料的配方奶粉间差异不显著，婴配牛奶粉含量高于婴配羊奶粉（ $P<0.05$ ）。DHA对婴儿大脑、视网膜、皮肤和肾的发育十分重要，其摄入或合成不足时可直接影响学习能力及视力发育^[31]。ARA在脑和神经组织中，占多不饱和脂肪酸总量的40%以上，在神经末梢甚至高达70%。它与婴儿的智力和神经发育及视觉敏锐度直接相关。ARA和DHA可以协同促进海马神经细胞生长^[32]。GB 10765—2010规定，若添加DHA，至少要添

加等量的ARA，因此，ARA和DHA的比值至关重要。由表5可知，婴配奶粉中ARA/DHA均大于1，婴配羊奶粉F样品中其比值高达1.9。

表5 不同品牌婴配奶粉与母乳中脂肪酸质量分数
Table 5 Comparison of fatty acid contents in different brands of infant formula and breast milk

成分	样品									母乳
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
C ₄₀ 质量分数/%	0.45 ^c	0.34 ^d	0.33 ^{de}	1.38 ^b	1.35 ^b	1.46 ^b	0.34 ^d	0.30 ^d	0.18 ^e	0.06 ^f
C ₄₀ 质量分数/%	0.80 ^f	0.83 ^e	0.87 ^d	1.33 ^b	1.27 ^b	1.41 ^b	1.40 ^b	0.61 ^e	0.21 ^f	0.20 ^f
C ₄₀ 质量分数/%	2.75 ^b	2.43 ^c	2.31 ^c	3.02 ^a	2.92 ^a	2.77 ^a	2.77 ^a	0.85 ^c	0.49 ^d	1.14 ^d
C ₁₂₀ 质量分数/%	0.02 ^b	0.02 ^b	0.02 ^b	0.03 ^b	0.03 ^b	0.02 ^b	0.02 ^b	ND	0.04 ^b	0.14 ^a
C ₁₂₀ 质量分数/%	1.20 ^f	2.19 ^d	2.64 ^d	4.76 ^b	4.52 ^b	5.55 ^a	5.52 ^a	2.61 ^d	0.58 ^e	4.85 ^b
C ₁₂₀ 质量分数/%	0.02 ^b	0.01 ^c	0.01 ^c	0.02 ^b	0.03 ^b	0.02 ^b	0.02 ^b	0.01 ^c	ND	0.15 ^a
C ₁₄₀ 质量分数/%	3.29 ^f	3.24 ^f	3.17 ^f	5.27 ^b	5.40 ^b	4.51 ^b	4.5 ^b	3.25 ^c	1.95 ^d	5.06 ^a
C ₁₄₀ 质量分数/%	0.05 ^b	0.05 ^b	0.05 ^b	0.15 ^b	0.16 ^b	0.04 ^b	0.04 ^b	0.14 ^b	0.13 ^b	0.16 ^b
C ₁₅₀ 质量分数/%	0.27 ^{ab}	0.23 ^b	0.20 ^b	0.33 ^b	0.36 ^b	0.21 ^b	0.21 ^b	0.21 ^b	0.20 ^b	0.20 ^b
C ₁₆₀ 质量分数/%	25.80 ^f	22.75 ^b	14.75 ^c	15.48 ^c	16.39 ^d	17.90 ^d	18.05 ^d	22.17 ^b	10.05 ^e	18.85 ^b
C ₁₆₁ 质量分数/%	0.36 ^c	0.30 ^d	0.32 ^d	0.49 ^b	0.51 ^b	0.28 ^d	0.28 ^d	0.37 ^c	0.37 ^c	1.68 ^a
C ₁₇₀ 质量分数/%	0.33 ^a	0.26 ^c	0.24 ^c	0.31 ^{ab}	0.32 ^a	0.26 ^c	0.26 ^c	0.21 ^d	0.19 ^d	0.31 ^{ab}
C ₁₇₁ 质量分数/%	0.09 ^{bc}	0.08 ^c	0.08 ^c	0.10 ^b	0.10 ^b	0.07 ^c	0.07 ^c	0.05 ^d	0.06 ^d	0.19 ^a
C ₁₈₀ 质量分数/%	5.82 ^b	4.45 ^d	3.89 ^d	4.39 ^d	4.54 ^d	4.61 ^d	4.64 ^d	5.52 ^b	4.36 ^d	5.99 ^a
C ₁₈₁ 质量分数/%	0.62 ^b	0.40 ^d	0.41 ^d	0.58 ^c	0.85 ^c	0.57 ^c	0.57 ^c	0.50 ^d	0.24 ^e	ND
C ₁₈₁ 质量分数/%	28.07 ^f	35.92 ^c	30.95 ^d	33.25 ^d	33.08 ^d	29.45 ^e	29.84 ^e	37.46 ^b	52.16 ^a	31.65 ^b
C ₁₈₂ 质量分数/%	0.09 ^b	0.07 ^{bc}	0.06 ^c	0.12 ^b	0.13 ^b	0.06 ^c	0.08 ^c	0.06 ^c	0.07 ^{bc}	ND
C ₁₈₂ 质量分数/%	24.51 ^f	22.34 ^d	34.18 ^c	23.95 ^d	22.97 ^d	25.68 ^d	26.06 ^d	21.43 ^e	24.05 ^e	19.86 ^f
C ₁₈₃ 质量分数/%	0.13 ^a	0.11 ^b	0.13 ^a	0.13 ^a	0.13 ^a	0.13 ^a	0.13 ^a	0.12 ^b	0.12 ^b	0.10 ^b
C ₂₀₀ 质量分数/%	0.11 ^a	0.23 ^a	0.29 ^a	0.13 ^a	0.12 ^a	0.13 ^a	0.15 ^a	0.22 ^a	0.08 ^b	0.22 ^a
C ₁₈₃ 质量分数/%	4.06 ^{ab}	2.60 ^d	4.14 ^a	4.16 ^a	3.57 ^b	3.93 ^b	4.12 ^b	2.83 ^d	3.29 ^d	3.51 ^d
C ₂₀₁ 质量分数/%	0.13 ^a	0.12 ^a	0.12 ^a	0.24 ^a	0.22 ^a	0.12 ^a	0.13 ^a	0.06 ^b	0.10 ^b	0.31 ^a
C ₂₀ 质量分数/%	0.03b	0.01d	0.02 ^c	0.03 ^b	0.02 ^c	0.02 ^c	0.01 ^d	0.04 ^b	ND	ND
C ₂₀₂ 质量分数/%	0.03d	0.04c	0.04 ^c	0.04 ^c	0.05 ^c	0.05 ^c	0.05 ^c	0.04 ^c	0.04 ^c	0.87 ^a
C ₂₀ +C ₂₀₁ 质量分数/%	0.26 ^d	0.27 ^d	0.32 ^c	0.25 ^{de}	0.24 ^d	0.23 ^d	0.24 ^d	0.33 ^c	0.72 ^a	0.59 ^b
C ₂₀₃ 质量分数/%	0.03 ^b	0.03 ^b	0.03 ^b	0.03 ^b	0.03 ^b	0.03 ^b	0.03 ^b	0.06 ^b	0.02 ^c	0.06 ^b
C ₂₁ 质量分数/%	ND	ND	0.01 ^d	0.02 ^c	0.02 ^c	0.01 ^d	0.01 ^d	0.03 ^b	ND	0.15 ^a
C ₂₄ 质量分数/%	0.29 ^f	0.23 ^e	0.25 ^d	0.24 ^{de}	0.23 ^d	0.25 ^d	0.24 ^d	0.37 ^b	0.37 ^b	0.84 ^a
C ₂₅ 质量分数/%	0.04 ^c	0.09 ^b	0.07 ^b	0.04 ^c	0.04 ^c	0.05 ^c	0.02 ^d	0.05 ^c	0.04 ^c	0.01 ^d
C ₂₅ 质量分数/%	0.21 ^a	0.21 ^a	0.26 ^a	0.05 ^d	0.11 ^b	ND	ND	ND	0.07 ^c	0.13 ^b
C ₂₆ 质量分数/%	ND	ND	ND	0.13 ^{bc}	0.08 ^d	0.11 ^c	0.10 ^c	0.14 ^c	0.19 ^b	0.14 ^b
C ₂₆ 质量分数/%	ND	ND	ND	0.03 ^b	0.03 ^b	0.01 ^d	ND	0.02 ^c	ND	0.16 ^b
C ₂₆ 质量分数/%	0.18 ^c	0.15 ^d	0.17 ^c	0.16 ^c	0.16 ^c	0.13 ^d	0.13 ^d	0.28 ^b	0.33 ^b	0.58 ^b
SCFA (C ₄ ~C ₁₀) 质量分数/%	3.94 ^d	3.61 ^d	3.51 ^d	5.73 ^b	5.57 ^b	5.65 ^b	4.51 ^b	1.76 ^e	0.88 ^f	1.40 ^f
MCFA (C ₁₁ ~C ₁₇) 质量分数/%	31.43 ^d	29.12 ^b	21.48 ^d	26.94 ^d	27.81 ^d	28.84 ^d	28.94 ^d	29.03 ^d	13.58 ^e	31.59 ^c
LCFA (≥C ₁₈) 质量分数/%	64.63 ^d	67.27 ^d	75.33 ^b	67.91 ^d	66.62 ^d	65.51 ^e	66.54 ^d	69.54 ^d	86.25 ^a	65.17 ^d
SFA 质量分数/%	41.00	37.22	28.97	36.77	37.53	39.11	38.12	36.34	18.92	37.62
MUFA 质量分数/%	29.32	36.86	31.94	34.83	34.97	30.54	30.94	38.63	53.07	34.30
PUFA 质量分数/%	29.68	25.92	39.42	28.98	27.5	30.35	30.95	25.36	28.73	26.24
SFA:MUFA:PUFA	1.37:0.98:1	1.42:1.41:1	0.73:0.81:1	1.26:1.2:1	1.35:1.27:1	1.28:1:1	1.22:1:1	1.42:1.51:1	0.64:1.82:1	1.43:1.21:1
LA:ALA	6.04:1	8.59:1	8.30:1	5.75:1	6.43:1	6.53:1	6.33:1	7.57:1	7.31:1	5.66:1
ARA:DHA	1.61	1.53	1.47	1.50	1.44	1.92	1.85	1.32	1.12	1.45

注：ND.未检出。SCFA.短链脂肪酸（short-chain fatty acids）；MCFA.中链脂肪酸（medium-chain fatty acids）；LCFA.长链脂肪酸（long-chain fatty acids）；SFA.饱和脂肪酸（saturated fatty acid）；MUFA.单不饱和脂肪酸（monounsaturated fatty acid）；PUFA.多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acid）；LA.亚油酸（linoleic acid）；ALA.α-亚麻酸（α-linoleic acid）；ARA.花生四烯酸（arachidonic acid）；DHA.二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid）。

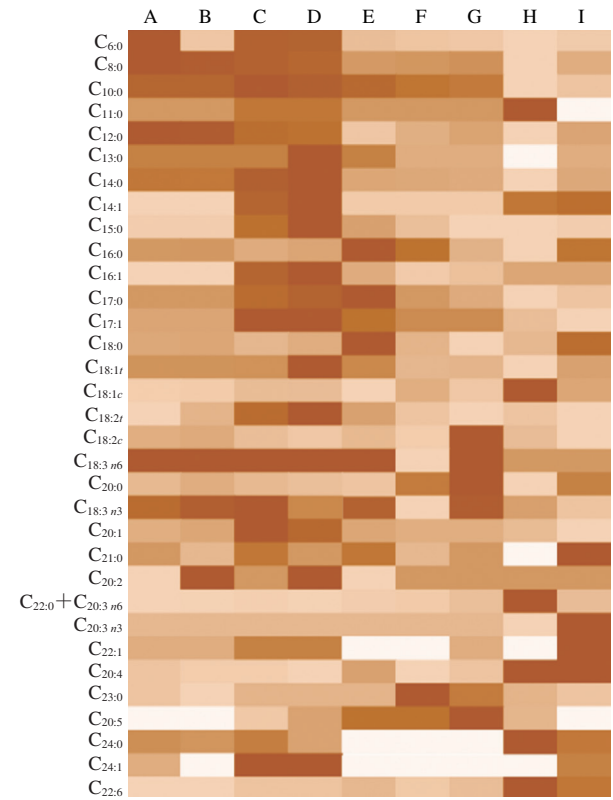


图3 不同品牌婴儿奶粉脂肪酸热图
Fig. 3 Heatmap for fatty acids in different brands of infant formula

LA和ALA是人体的必需脂肪酸，LA/ALA对于新生儿的生长发育有重要作用，新生儿配方乳中该值推荐范围5:1~15:1，且在5:1~6:1时最佳^[33]。如表5所示，不同品牌的婴儿奶粉中的亚油酸和 α -亚麻酸差异不大，除个别品牌外，亚油酸质量分数主要集中在22%~26%。其中婴儿羊奶粉C样品亚油酸质量分数最高，34.18% α -亚麻酸质量分数主要集中在3%~4%，9种婴儿奶粉中油酸和 α -亚麻酸的比值均符合5:1~15:1的要求，其中大部分集中在6:1左右。

此外，不同种类脂肪酸的比例是评价脂肪酸营养价值的重要指标，世界卫生组织推荐SFA:MUFA:PUFA=1:1:1^[34]。在9种奶粉中，婴儿羊奶粉样品G中SFA:MUFA:PUFA最接近1:1:1，与脂肪酸理想比例模式最接近。

2.5 主成分分析结合马氏距离计算评分

表6 特征值与方差贡献率 Table 6 Eigenvalues and their contributions to the variance			
主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
F1	4.45	32.60	32.60
F2	2.69	19.75	52.35
F3	1.66	12.17	64.52
F4	1.40	10.23	74.75
F5	1.30	9.53	84.28
F6	0.81	5.91	90.19

利用Matlab软件对婴儿奶粉氨基酸质量分数、脂肪酸质量分数、乳糖与低聚糖含量进行标准化等数据预处理，消除不同维度的数据差异性，再对数据进行主成分分析，根据累积贡献率大于90%的原则，提取出6个主成分，累积贡献率达到90.19%，说明这6个主成分基本包含了全部变量信息，因此选择前6个成分进行马氏距离分析。提取的主成分及贡献率见表6。对提取出的主成分进行马氏距离分析，得到马氏距离评分。

表7 不同品牌婴儿奶粉的马氏距离评分 Table 7 MD scores for different brands of infant formula									
样品	A	B	C	D	E	F	G	H	I
马氏距离评分	82.15	86.70	85.78	90.15	83.41	86.96	86.70	82.32	82.10

如表7所示，马氏距离评分最高的样品为婴儿羊奶粉D(90.15)；婴儿羊奶粉F样品评分次之，为86.96。婴儿配牛奶粉H、I样品评分均处于较低水平，分别为82.32、82.10。所测样品中婴儿羊奶粉评分普遍高于婴儿配牛奶粉。马氏距离评分越高，表明该样品与母乳马氏距离越小，即样品与母乳中营养成分的相似程度越高。

为进一步探究各营养素对整体得分的影响，对氨基酸、脂肪酸数据进行标准化等预处理、主成分分析，根据累积贡献率大于90%的原则，氨基酸提取出4个主成分，脂肪酸提取出4个主成分，并分别计算其马氏距离评分。碳水化合物数据(乳糖、低聚糖)进行标准化等预处理，计算马氏距离评分。

表8 不同品牌配方奶粉中的氨基酸、脂肪酸、碳水化合物马氏距离评分 Table 8 MD scores for amino acids, fatty acids, and carbohydrates in different brands of infant formula									
马氏距离评分	样品								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
氨基酸	90.04	85.71	88.99	85.38	85.09	87.26	89.36	82.47	84.37
脂肪酸	85.71	87.75	85.53	87.65	86.64	86.97	87.54	84.23	82.26
碳水化合物	95.18	89.01	89.04	89.64	88.13	89.97	89.72	90.54	93.09

由表8可知，整体的马氏距离评分受脂肪酸数据影响最大，若脂肪酸组成和含量与母乳差异较大，则其综合评分也较母乳差异较大，而碳水化合物数据对整体马氏距离评分的影响最小，各种营养素之间的交互作用对整体马氏距离评分造成影响。

3 结论

本研究通过对婴儿奶粉的三大宏量营养素、乳糖、低聚半乳糖、低聚果糖、脂肪酸与氨基酸的种类及含量分析，并选择主成分分析与马氏距离相结合的方法对婴儿奶粉进行多指标综合评价，以期为婴儿奶粉的开发、配方调整提供依据。婴儿奶粉三大宏量营养素均能满足婴幼儿的能量需求，其组成及质量分数与母乳相似，但其分项指标与母乳仍有差异；为模拟母乳，均添

加了低聚糖（低聚果糖或低聚半乳糖+低聚果糖），平均含量为1.94 g/100 g，但远低于母乳中益生元的水平（5.5%）。氨基酸总量最高的是婴配羊奶粉B样品，12.72 g/100 g，在所测样品中羊奶粉氨基酸含量均高于牛奶粉；婴配奶粉脂肪酸组成与母乳相似，但各种脂肪酸含量差异较大，其中C_{16:0}、C_{18:1c}、C_{18:2c}为主要脂肪酸，占总量80%左右。通过对氨基酸、脂肪酸、乳糖、低聚糖数据预处理，并提取了6个主成分，代表了90.19%的指标信息；选择马氏距离测算样品中该营养成分与母乳的吻合度，马氏距离评分最高的是婴配羊奶粉D样品，为90.15；婴配羊奶粉F样品次之，为86.96；婴配牛奶粉H、I样品评分均处于较低水平，分别为82.32、82.11，婴配羊奶粉样品评分普遍高于婴配牛奶粉。马氏距离评分越高，表明与母乳营养素含量与组成越相近，吻合度越好。同时综合马氏距离评分发现其受脂肪酸量效影响最大，碳水化合物对整体马氏距离评分影响最小，各种营养素之间存在交互作用对整体马氏距离评分有影响。可以看出婴配奶粉与母乳之间营养素组成相似，但各种营养素的含量存在较大差异，以母乳为“金标准”，婴幼儿奶粉配方达到母乳仍有较大提升空间。

参考文献：

- [1] 郭明若, 王喜波, 姜云庆, 等. 人乳生物化学与婴儿配方乳粉工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018: 1-8.
- [2] NGAN M, DURAZO-ARVIZU R, WEISS M G, et al. Nutrient-enriched infant formula is associated with higher weight gain for low birth weight infants[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition, 2017, 64(6): 975-978. DOI:10.1097/MPG.0000000000001465.
- [3] 程义勇. 《中国居民膳食营养素参考摄入量》2013修订版简介[J]. 营养学报, 2014, 36(4): 313-317. DOI:10.13325/j.cnki.acta.nutr.sin.2014.04.002.
- [4] 张慧, 顾世梁, 李韬. 一种新的符合度算法及其应用[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 141-148. DOI:10.3724/SP.J.1006.2016.00141.
- [5] MAHALANOBIS P C. On the generalized distance in statistics[J]. Proceedings of the National Institute of Science of India, 1936, 2(1): 49-55.
- [6] 林彬, 宋东, 和麟. 基于马氏距离与组距估计的复杂系统健康评估[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2022-2028. DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.2016.09.012.
- [7] 孙慧阳. 西部特色小品种乳及其发酵乳蛋白质及氨基酸分析与评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 19-21.
- [8] 邵琪, 张丽茹, 王为, 等. 离子色谱法测定乳粉中低聚半乳糖含量[J]. 食品工业, 2017, 38(11): 302-305.
- [9] 陈斌, 邹贤勇, 朱文静. PCA结合马氏距离法剔除近红外异常样品[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 277-279; 292.
- [10] 马守庆, 边高瑞, 朱伟云. 母乳的生物学功能研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(5): 233-238. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201505043.
- [11] CAREY M C, HEMELL O. Digestion and absorption of fat[J]. Seminars in Gastrointest Disease, 1992, 3: 189-208. DOI:10.1007/978-0-387-44952-4_88.
- [12] 赵丹霞, 王力清, 黄秋研, 等. 国内市售婴幼儿配方乳粉中葡萄糖、果糖、乳糖及蔗糖含量的检测与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(3): 942-947.
- [13] BALLARD O, MORROW A L. Human milk composition: nutrients and bioactive factors[J]. Pediatric Clinics, 2013, 60(1): 49-74. DOI:10.1016/j.pcl.2012.10.002.
- [14] 逢金柱, 刘正冬, 贾妮, 等. 我国南北城市0~12月不同泌乳阶段母乳蛋白质和氨基酸构成的纵向研究[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 167-174. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180306-060.
- [15] ZHANG Z Y, ADELMAN A S, RAI D, et al. Amino acid profiles in term and preterm human milk through lactation: a systematic review[J]. Nutrients, 2013, 5(12): 4800-4821. DOI:10.3390/nu5124800.
- [16] VANDENPLAS Y. Oligosaccharides in infant formula[J]. British Journal of Nutrition, 2002, 87(Suppl 2): 293-296. DOI:10.1079/bjn/2002551.
- [17] ARSLANOGRU S, MORO G E, SCHMITT J, et al. Early dietary intervention with a mixture of prebiotic oligosaccharides reduces the incidence of allergic manifestations and infections during the first two years of life[J]. The Journal of Nutrition, 2008, 138(6): 1091-1095. DOI:10.1093/jn/138.6.1091.
- [18] 马可. 益生元行业的全球机遇和挑战[J]. 销售与市场(管理版), 2015(4): 25-28.
- [19] FAO/WHO/UNU. Protein and amino acid requirements in human nutrition: report of a Joint FAO/WHO/UNU expert consultation[R]. Geneva: WHO, 2007.
- [20] 李菁, 舒森, 陈文彬. 用氨基酸自动分析仪测定婴幼儿配方奶粉中的16种氨基酸[J]. 食品工业科技, 2012, 33(4): 64-69. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.04.083.
- [21] GARCIA-RODENAS C L, AFFOLTER M, VINYES-PARES G, et al. Amino acid composition of breast milk from urban Chinese mothers[J]. Nutrients, 2016, 8(10): 606-615. DOI:10.3390/nu8100606.
- [22] MALACARNE M, MARTUZZI F, SUMMER A, et al. Protein and fat composition of mare's milk: some nutritional remarks with reference to human and cow's milk[J]. International Dairy Journal, 2002, 12(11): 869-877. DOI:10.1016/S0958-6946(02)00120-6.
- [23] 毛湘冰, 黄志清, 陈小玲, 等. 亮氨酸调节哺乳动物骨骼肌蛋白质合成的研究进展[J]. 动物营养学报, 2011, 23(5): 709-714. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2011.05.001.
- [24] KIM S W, MATEO D R, YIN Y, et al. Functional amino acids and fatty acids for enhancing production performance of sows and piglets[J]. Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2007, 20(2): 295-306. DOI:10.5713/ajas.2007.295.
- [25] WU G Y. Amino acids: metabolism, functions, and nutrition[J]. Amino Acids, 2009, 37(1): 1-17. DOI:10.1007/s00726-009-0269-0.
- [26] 顾达峰, 张富新, 张怡. 羊奶婴儿配方奶粉中蛋白质体外模拟消化研究[J]. 食品科学, 2013, 34(19): 302-305. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201319062.
- [27] 王逸斌, 朱晗, 朱凌燕, 等. 全羊乳蛋白配方羊奶粉对婴儿生长发育的影响研究[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(8): 78-81. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2013.08.021.
- [28] 陈天鹏, 刘翠, 冷友斌, 等. 羊乳营养成分及功能特性的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(3): 71-76. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2016.03.017.
- [29] CHILLIARD Y, FERLAY A, ROUEL J, et al. A review of nutritional and physiological factors affecting goat milk lipid synthesis and lipolysis[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86: 1751-1770. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(03)73761-8.
- [30] SORYAL K A, ZENG S S, MIN B R, et al. Effect of feeding treatments and lactation stages on composition and organoleptic quality of goat milk Domiat cheese[J]. Small Ruminant Research, 2004, 52(1): 109-116. DOI:10.1016/s0921-4488(03)00249-9.
- [31] 杜芳芳, 李建平, 郑晓辉, 等. 母乳及婴幼儿配方奶粉中脂肪酸的组成及分布特点[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 245-250. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201511046.
- [32] 陈超刚, 苏宜香, 谭炳炎, 等. 多烯脂肪酸对海马神经细胞脂肪酸构成和生长的作用[J]. 营养学报, 2002, 24(3): 265-268. DOI:10.3321/j.issn: 0512-7955.2002.03.011.
- [33] AGGETT P J, HASCHKE F, HEINE W, et al. Comment on the content and composition of lipids in infant formulas[J]. Acta Paediatrica, 1991, 80(8/9): 887-896. DOI:10.1111/j.1651-2227.1991.tb11969.x.
- [34] 葛武鹏, 李元瑞, 陈瑛, 等. 牛、羊乳及其制品的脂肪酸组成分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 173-178. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2008.07.035.