

刘晓英, 慕春龙, 吴海琴, 等. 基于非靶向代谢组学技术探究约克夏猪不同泌乳阶段的乳成分差异 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (11): 23-29.

LIU X Y, MU C L, WU H Q, et al. Analysis of differences in pig milk fractions at different stages of lactation based on untargeted metabolomics [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (11): 23-29.

基于非靶向代谢组学技术探究约克夏猪不同泌乳阶段的乳成分差异

刘晓英, 慕春龙, 吴海琴, 李轩, 马季祥, 许来鹏, 赵德辉, 朱伟云, 潘龙*

(南京农业大学动物科技学院消化道微生物研究室/国家动物消化道营养国际联合研究中心/江苏省消化道营养与动物健康重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 旨在研究不同泌乳阶段母猪乳汁中的组成成分。选取年龄、胎次、体况相近, 饲养管理条件一致的同期分娩母猪 15 头, 跟踪采集泌乳 0、7 和 21 d 的猪乳, 利用非靶向代谢组学分析猪乳中的代谢物组成。结果: 从猪乳中共检测到 1 246 种代谢物, 303 种代谢物在泌乳不同时期存在差异; 差异性代谢物主要为碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类, 分别有 15、18 和 23 种; 初乳中 6-唾液酸乳糖、N-乙酰神经氨酸、N-乙酰基-D-乳糖胺、核糖-5-磷酸、葡萄糖-1-磷酸、D-葡萄糖-6-磷酸、D-核糖-1-磷酸、甘氨酸-L-苯丙氨酸、苯丙氨酸-苯丙氨酸、L-脯氨酸-L-亮氨酸和戊酸等 24 种碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类差异代谢物的相对含量高于 7 和 21 d 乳中的相对含量; 初乳中谷氨酸、L-(-)-蛋氨酸和癸酸等 32 种碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类差异代谢物的相对含量低于 7 和 21 d 乳中的相对含量。京都基因与基因组百科全书 (KEGG) 代谢物通路分析显示, 各种差异代谢物主要富集在抗坏血酸和醛酸、三羧酸循环、半乳糖、丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸、乙醛酸和二羧酸、嘌呤以及嘧啶代谢等通路。本研究结果有利于了解在不同泌乳期间猪乳中小分子营养成分的变化, 为研究母乳活性成分提供重要参考。

关键词: 猪乳; 非靶向代谢组; 差异代谢物; 代谢通路

中图分类号: S828.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-5130(2025)11-0023-07

Analysis of differences in pig milk fractions at different stages of lactation based on untargeted metabolomics

LIU Xiaoying, MU Chunlong, WU Haiqin, LI Xuan, MA Jixiang, XU Laipeng, ZHAO Dehui, ZHU Weiyun, PAN Long*

(Research Laboratory of Gastrointestinal Microbiology, College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University/National International Joint Research Center for Animal Gastrointestinal Nutrition/Jiangsu Key Laboratory of Gastrointestinal Nutrition and Animal Health, Nanjing 210014, China)

Abstract: The aim of this study was to analyze the compositional changes in sow milk across different lactation stages. Fifteen sows, matched for age, parity, body condition, and reared under identical management conditions, were selected for milk collection at 0, 7, and 21 days postpartum. Then, non-targeted metabolomic profiling was employed to investigate the metabolite composition of sow milk. The results were that a total of 1 246 metabolites were identified, with 303 exhibiting significant stage-specific variations. The differential metabolites were predominantly carbohydrates (15), amino acids (18), and fatty acids (23). Specifically, the colostrum contained higher relative concentrations of 24 metabolites, including 6-sialyllactose, N-acetylneuraminic acid, N-acetyl-D-lactosamine, and various phosphorylated sugars and amino acid derivatives, compared with the milk samples collected at 7th and 21st days. Conversely, 32 metabolites, including glutamic acid, L-methionine, and caproic acid, showed lower concentrations in the colostrum. The KEGG pathway analysis revealed that these differential metabolites were predominantly enriched in the pathways related to ascorbate and aldarate metabolism, the TCA cycle, galactose metabolism, alanine, aspartate, and glutamate metabolism, glyoxylate and dicarboxylate metabolism, purine metabolism, and pyrimidine

收稿日期: 2025-03-03; 修回日期: 2025-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1300403); 国家自然科学基金项目 (31902166)

第一作者: 刘晓英, 女, 硕士

* 通信作者: 潘龙, 副教授, 研究方向为动物营养与饲料科学, E-mail: panlong@njau.edu.cn.

metabolism. The present findings enhanced our understanding of the dynamic changes in small molecular nutrients in sow milk throughout lactation and provided a valuable reference for further research on bioactive milk components and their physiological roles.

Keywords: porcine milk; non-targeted metabolome; differential metabolites; metabolic pathways

作为新生仔猪最安全、最完整的天然物质，猪乳中含有仔猪必需的碳水化合物、蛋白质、脂质、免疫细胞和生物活性因子等成分^[1]。猪乳是大部分仔猪哺乳期的重要营养供应来源，据报道，动物分娩后24 h内所分泌的初乳有助于仔猪健康发育，并且初乳可为仔猪提供体温调节和身体生长所需的能量以及刺激器官发育的必需生长因子^[2]。动物分娩后3~14 d内分泌的乳汁称为过渡乳，乳汁组成成分有所变化^[3]。泌乳14 d后乳汁成分趋于稳定，称为成熟乳。成熟乳组分较为稳定，各类营养素丰富且比例均衡，并且母乳中各种营养素极易被仔猪直接吸收利用，促进其生长发育^[1]。国内外多项研究已充分表明猪乳对新生哺乳仔猪的存活和早期发育有着重要意义，然而，各泌乳阶段的母猪乳汁中各组分尚未明确，了解母猪猪乳中的组成成分对于新生仔猪生长发育至关重要^[4-5]。此外，基于当前产业模式导致母猪产仔数不断增加这一原因，猪乳无法满足新生仔猪生长发育的营养需求^[6]。因此，深入了解不同泌乳阶段母猪猪乳的组成成分具有极其重要的研究价值。

代谢组学是继基因组学、转录组学、蛋白质组学后出现的新兴组学技术，是系统生物学的重要组成部分。代谢组学旨在考察生物体系（细胞、组织等）受到不同生理条件、外界刺激或扰动后，其代谢产物的变化，通过筛选差异代谢物，研究差异代谢物参与的生物过程，揭示其参与生命活动的机制。非靶向代谢组学以发现为目的，尽可能多地检测生物样本中的代谢物，最大程度反映总的代谢物信息^[7-8]。

本研究旨在通过非靶向代谢组学鉴定猪乳中的代谢物以及确定不同阶段猪乳中的差异代谢物的相互作用和代谢途径，为明确猪乳成分提供依据，为研究猪乳中活性成分提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取同一批次年龄、体况相近且饲养管理一致的15头健康的约克夏母猪进行产后连续跟踪采样。分别在产后0 d ($n=15$)、7 d ($n=14$)和21 d ($n=10$)采集乳汁样本，其中样本量变化主要因个别母猪产后乳汁分泌不足，无法满足采样需求所致。猪乳采集方法：乳头经生理盐水和75%酒精棉片消毒后，弃去前3滴乳汁，按摩乳房2 min刺激泌乳；使用无菌离心管收集中段乳汁，所有样本于上午9:00—

11:00完成采集。收集完成后，立即将采集好的母乳置于-80℃环境下保存，后续进行非靶向代谢组学分析。南京农业大学动物护理和使用委员会批准了本研究的所有程序（许可证编号：SYXK-2022-0073）。

1.2 试验方法

1.2.1 猪乳代谢物提取

该试验由上海凌恩生物科技有限公司完成，具体操作步骤如下：取100 μL样品置于离心管中，加入400 μL的80%甲醇水溶液涡旋震荡；将混合物冰浴静置5 min后离心（4℃，15 000 g）20 min；随后取适量上清液，用质谱级水稀释至甲醇浓度为53%，再在相同条件下离心20 min，收集上清液，最后将上清液注入LC-MS/MS系统进行分析^[9-10]。为保证试验结果的可靠性，本试验通过在检测序列中穿插质控（QC）样本监控数据采集过程：QC样本由各试验样品等体积混匀制备而成，运行序列初始先使用3个QC样本平衡仪器，后续每检测10个样本即穿插1个QC样本。此外，本试验所用空白样本为53%甲醇水溶液。

1.2.2 UHPLC-MS/MS分析

本研究使用Vanquish UHPLC色谱仪与Q Exactive™ HF-X质谱仪联用技术。色谱仪柱温40℃。流动相条件如下：正离子模式，流动相A为0.1%甲酸，流动相B为甲醇；负离子模式，流动相A为5 mmol/L醋酸铵（pH=9.0），流动相B为甲醇。流动相洗脱梯度如表1所示。质谱仪扫描范围为100~1 500 m/z，喷雾电压为3.5 kV，鞘气流速为35 psi，辅助气流速为10 L/min，离子传输管温度为320℃，离子导入射频电平为60，辅助气加热器温度为350℃，二级扫描为数据依赖性扫描。

表1 流动相洗脱梯度

| 时间/min | 流动相 A/% | 流动相 B/% |
|--------|---------|---------|
| 0.0 | 98 | 2 |
| 1.5 | 98 | 2 |
| 3.0 | 15 | 85 |
| 10.0 | 0 | 100 |
| 10.1 | 98 | 2 |
| 11.0 | 98 | 2 |
| 12.0 | 98 | 2 |

1.3 数据统计与分析

使用京都基因与基因组百科全书 (KEGG) 数据库、人类代谢组数据库 (HMDB) 和脂质代谢物与途径策略 (LIPID Maps) 数据库对鉴定到的代谢物进行注释^[11]。应用 MetaboAnalyst 6.0 网站中 One-way ANOVA 进行差异分析, 得出校正后的 *P* 值 (FDR) 以及进行偏最小二乘法-判别分析 (PLS-DA), 进而得出每个代谢物的变量投影重要度 (VIP), 根据 VIP>1 和 FDR<0.05 筛选差异代谢物, 使用 MetaboAnalyst 6.0 网站中 Enrichment Analysis 进行富集分析等。

2 结果与分析

2.1 不同泌乳阶段猪乳代谢物分类

试验共检测到 1 246 种代谢物, 正、负离子模式

下分别有 541 和 705 种代谢物。将正、负离子模式下的代谢物进行合并, 并根据 Classyfire 分类信息进行分类统计, 各类代谢物占比分别是: 脂质和类脂质分子占 29.45%, 有机酸及其衍生物占 9.71%, 有机杂环化合物占 6.1%, 有机氧化合物占 4.33%, 核苷、核苷酸和类似物占 4.09%, 苯类占 3.45%, 苯丙素和聚酮占 2.25%, 有机氮化合物占 1.28%, 生物碱及其衍生物占 0.16%, 有机硫化合物占 0.08%, 其他代谢物占 39.1%。

2.2 不同泌乳阶段猪乳代谢物的 PLS-DA 分析

为了更好地评估不同泌乳阶段猪乳样本的差异, 采用 PLS-DA 方法进行模式识别。将筛选到的正、负离子模式下的代谢物进行合并, 结果如图 1 所示, 3 组样本被有效地区分开, 表明不同泌乳阶段猪乳代谢物具有差异。

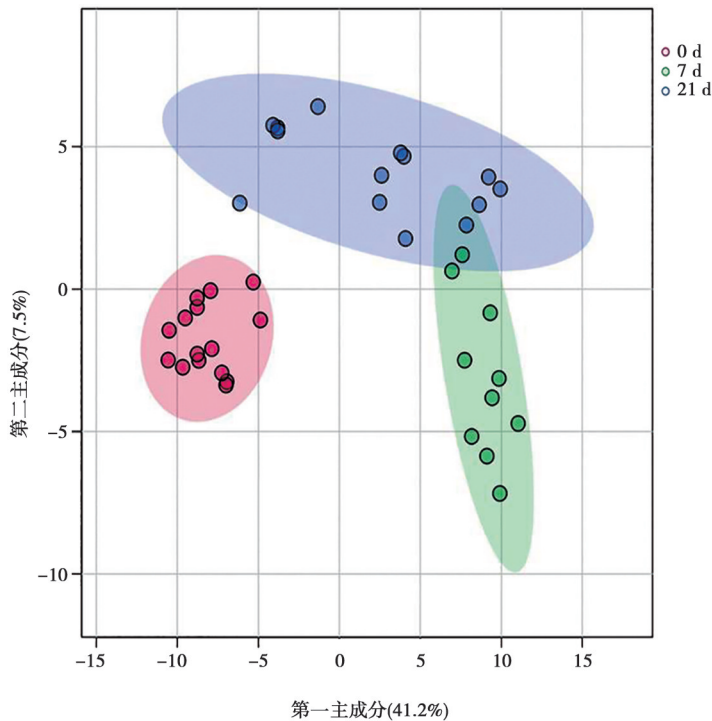


图 1 不同泌乳阶段猪乳代谢物的 PLS-DA 分析

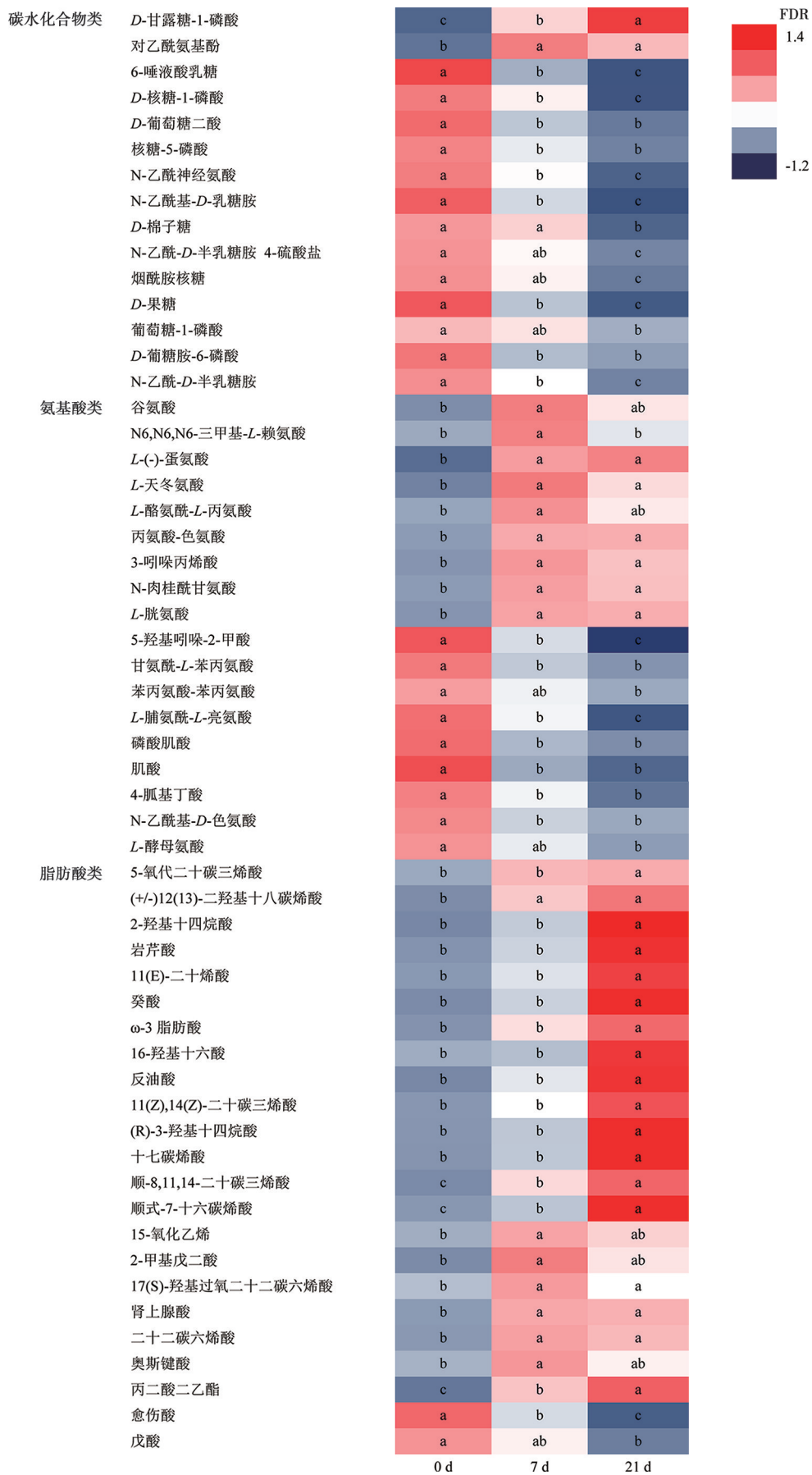
2.3 不同泌乳阶段猪乳差异代谢物的筛选

根据 VIP>1 和 FDR<0.05 筛选差异代谢物, 共有 303 种差异代谢物发生了显著的变化, 其中正、负离子模式下筛选出的差异代谢物分别为 139 和 164 种 (表 2)。接着, 本研究筛选了包含碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类差异代谢物, 分别为 15、18 和 23 种 (图 2)。初乳中 6-唾液酸乳糖、N-乙酰神经氨酸、N-乙酰基-D-乳糖胺、核糖-5-磷酸、葡萄糖-1-磷酸、D-葡萄糖胺-6-磷酸、D-核糖-1-磷酸、甘氨酸-L-苯丙氨酸、苯丙氨酸-苯丙氨酸、L-脯氨酸-

L-亮氨酸和戊酸等 24 种差异代谢物的相对含量高于 7 和 21 d 乳中的相对含量, 初乳中谷氨酸、L-(-)-蛋氨酸和癸酸等 32 种差异代谢物的相对含量低于 7 和 21 d 乳中的相对含量。

表 2 不同离子模式下猪乳差异代谢物数目分析

| 项目 | 正离子模式 | 负离子模式 | 总计 |
|-------------|-------|-------|-----|
| 7 d vs 0 d | 136 | 156 | 292 |
| 21 d vs 0 d | 129 | 157 | 286 |
| 21 d vs 7 d | 78 | 87 | 165 |



同行数据相同小写字母表示差异不显著 (FDR>0.05), 不同小写字母表示差异显著 (FDR<0.05)。

图2 不同泌乳阶段猪乳碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类差异代谢物热图

2.4 差异代谢物的代谢通路富集分析

合并正、负离子模式下所有的差异代谢物，对差异代谢物进行 KEGG 通路富集分析。由图 3 可知，正、负离子模式下的差异代谢物显著富集在抗坏血酸

和醛酸、三羧酸酸循环、半乳糖、丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸、乙醛酸和二羧酸、嘌呤以及嘧啶代谢等差异代谢物通路 ($P < 0.05$)。

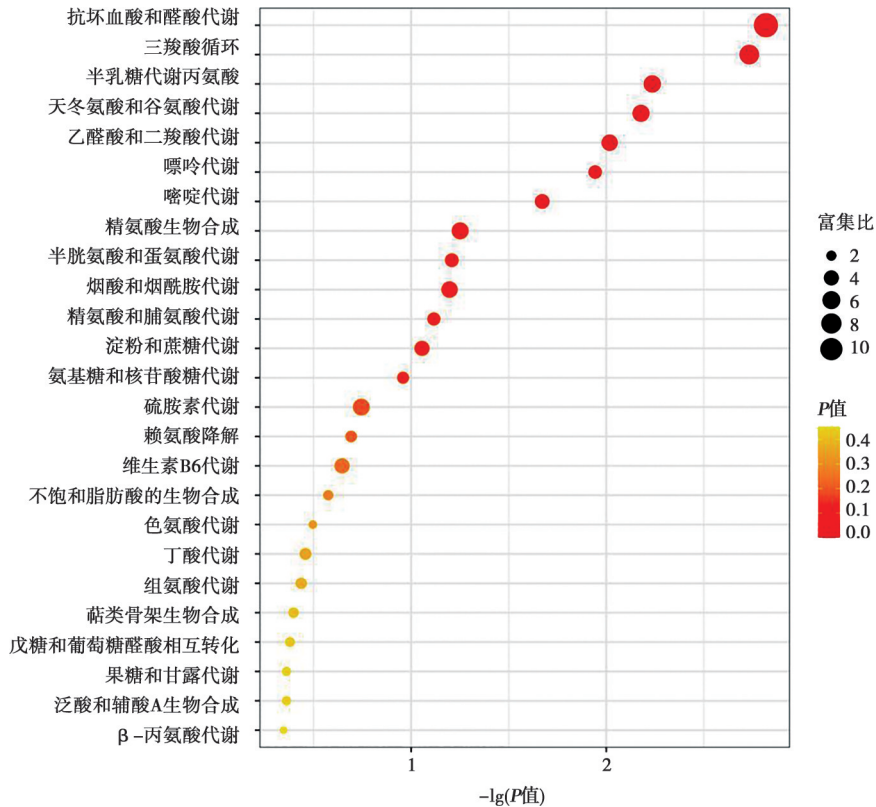


图 3 不同泌乳阶段猪乳差异代谢物 KEGG 通路富集分析 (TOP25)

3 讨论

猪乳作为新生哺乳仔猪最重要的营养来源，富含丰富营养物质、免疫细胞和生物活性因子等，可为新生仔猪生长发育提供营养并发挥抗炎和抗感染功能，促进免疫系统的形成和器官发育，在确保仔猪的生长发育和健康方面发挥着至关重要的作用^[12-14]。

本研究对 21 头泌乳母猪在泌乳期 0、7 和 21 d 的乳样进行了非靶向代谢组学分析。结果显示，不同泌乳阶段猪乳中共有 303 种代谢物发生显著变化，主要包括碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类差异代谢物。猪乳低聚糖是一种复杂的碳水化合物，一般由 3~10 个单糖通过糖苷键连接而成，组成低聚糖的单糖有 D-葡萄糖、D-半乳糖、N-乙酰氨基葡萄糖、L-岩藻糖、N-乙酰神经氨酸和 N-羟乙酰神经氨酸^[15]。唾液酸乳糖在新生仔猪的消化道激活和肠内被动免疫中起到重要作用，被特定的肠道菌群代谢后释放出唾液酸经肠道吸收对脑部神经发育具有不可替代的作用^[16]。N-乙酰神经氨酸是唾液酸的主要形式

之一，具有益生元功能，可增强机体的免疫力，影响神经细胞的完整性、渗透性及活性^[17]。N-乙酰基-D-乳糖胺以游离二糖的形式存在于母乳中，通常连接到唾液酸和岩藻糖单糖上，发挥益生元功能^[18]。6-唾液酸乳糖、N-乙酰神经氨酸和 N-乙酰基-D-乳糖胺随着泌乳时间的增加，其相对含量逐渐减少，这与其他研究相符^[12-13,19]。6-唾液酸乳糖、N-乙酰神经氨酸和 N-乙酰基-D-乳糖胺随着泌乳时间的增加，其相对含量逐渐减少，这可能与仔猪不同生长发育阶段的需求有关，如仔猪肠道微生态的变化，免疫系统的发展完善等^[20-21]。此外，猪初乳中有 4 种磷酸化糖的相对含量高于 7 和 21 d 乳中的相对含量，其中，核糖-5-磷酸直接参与磷酸戊糖途径，葡萄糖-1-磷酸和 D-葡糖胺-6-磷酸参与葡萄糖代谢，D-核糖-1-磷酸是合成核苷酸的前体，在细胞内广泛参与 DNA 与 RNA 的合成，它们均可以为机体提供能量^[16]。这说明猪乳中这 4 种磷酸化糖相对含量的降低可能与仔猪早期存活所需能量更高有关。

氨基酸在蛋白质的合成和分解中起到关键作用，

是动物机体内必需的营养成分,在机体的脑发育、神经系统、脂质和糖类代谢等生理功能中均起到重要作用^[11]。本研究发现,初乳中存在一些二肽,随泌乳时间的增加其相对含量逐渐降低,如甘氨酸-L-苯丙氨酸、苯丙氨酸-苯丙氨酸和L-脯氨酸-L-亮氨酸。有研究表明,肠黏膜细胞上存在着可以吸收二肽的主动耗能转运体系,二肽在新生仔猪机体内能被二肽酶水解为2个游离氨基酸,因此,相比游离氨基酸,乳汁中存在二肽更容易被新生仔猪所吸收^[16]。这说明猪乳中这些二肽相对含量的降低可能与新生仔猪在生命早期的存活有关。谷氨酸作为非必需脂肪酸,除了可以调节食欲外,还在保护机体肝脏以及促进机体脑发育中发挥重要作用^[22]。本研究中,初乳中谷氨酸的相对含量低于7和21 d乳中的相对含量,这说明猪乳中谷氨酸相对含量的升高可能与新生仔猪脑发育有关。蛋氨酸是唯一的含硫必需氨基酸,参与机体多胺和蛋白质合成代谢,是许多动物生长的主要限制性氨基酸。研究表明,补充适量蛋氨酸可促进蛋白质的合成,改善动物的肌肉发育,有效提高动物的产肉性能,然而,蛋氨酸添加过量亦会引起动物生长抑制、蛋白质合成障碍等一系列疾病,严重时甚至会导致死亡^[23-25]。本研究发现,猪乳中L-(-)-蛋氨酸的相对含量随着泌乳时间的增加而逐渐升高,这说明猪乳中L-(-)-蛋氨酸相对含量的增加可能与仔猪的肌肉发育相关。

脂肪酸代谢是机体内重要代谢之一,它可以调节动物机体的许多生理功能,并对改善动物机体健康和促进其他代谢功能的发挥,尤其对肉的营养、品质、风味及口感的调控有很大影响^[26-27]。戊酸属于短链脂肪酸化合物,具有抗癌、抗糖尿病、抗高血压、抗炎和免疫调节活性,可影响阿尔茨海默病、帕金森症和癫痫等不同疾病的分子途径^[28]。本研究发现,戊酸的丰度随着泌乳时间的增加而逐渐降低,这说明戊酸可能与仔猪不同生长阶段的营养需求有关。癸酸属于中链脂肪酸,能够被肠道高效吸收和代谢,提供即时的能量,具有促生长、广谱抗菌和维护肠道健康及其他益生功能,参与机体许多能量和代谢过程,包括糖、脂代谢、脂肪沉积和肠道发育等^[29]。本研究发现,癸酸的丰度随着泌乳时间的增加而逐渐升高,这说明癸酸可能参与仔猪机体能量和代谢过程,从而提高乳中癸酸的含量。

4 结论

基于非靶向代谢组学,从0、7和21 d的猪乳中共检测到1 246种代谢物,不同泌乳阶段的差异代谢物303种,初乳中6-唾液酸乳糖、N-乙酰神经氨酸、

N-乙酰基-D-乳糖胺、核糖-5-磷酸、葡萄糖-1-磷酸、D-葡糖胺-6-磷酸、D-核糖-1-磷酸、甘氨酸-L-苯丙氨酸、苯丙氨酸-苯丙氨酸、L-脯氨酸-L-亮氨酸和戊酸等24种碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类差异代谢物的相对含量高于7和21 d乳中的相对含量,初乳中谷氨酸、L-(-)-蛋氨酸和癸酸等32种碳水化合物类、氨基酸类和脂肪酸类差异代谢物的相对含量低于7和21 d乳中的相对含量。各种差异代谢物主要富集在抗坏血酸和醛酸、三羧酸循环、半乳糖、丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸、乙醛酸和二羧酸、嘌呤以及嘧啶等代谢通路。

参考文献:

- [1] 付力立,江婧,陶金忠,等.基于代谢组学的乳汁中代谢物研究进展[J].动物营养学报,2019,31(9):4000-4007.
- [2] RYO I, TAKAMITSU T. Composition and physiological functions of the porcine colostrum [J]. *Animal Science Journal*, 2021, 92: e13618.
- [3] BARDANZELLU F, FANOS V, STRIGINI F A L, et al. Human breast milk: exploring the linking ring among emerging components [J]. *Frontiers in Pediatrics*, 2018, 6: 215.
- [4] PRINCE C, UFFE K, KAPPEL P T, et al. Characteristics of sows' milk and piglet nutrient utilization during a 28-d lactation period [J]. *Journal of Animal Science*, 2023, 101: 261.
- [5] SHIHAI Z, FANG C, YINZHI Z, et al. Recent progress of porcine milk components and mammary gland function [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2018, 9(1): 77.
- [6] VOS D M, HUYGELEN V, WILLEMEN S, et al. Artificial rearing of piglets: effects on small intestinal morphology and digestion capacity [J]. *Livestock Science*, 2014, 159: 165-173.
- [7] CHRISTOPH B, BERNHARD K, MARC L, et al. A novel stable isotope labelling assisted workflow for improved untargeted LC-HRMS based metabolomics research [J]. *Metabolomics*, 2014, 10(4): 754-769.
- [8] PATTI G J, YANES O, SIUZDAK G. Metabolomics: the apogee of the omics trilogy [J]. *Molecular Cell Biology*, 2012, 13(4): 263-269.
- [9] WANT E J, O'MAILLE G, SMITH C A, et al. Solvent-dependent metabolite distribution, clustering, and protein extraction for serum profiling with mass spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(3): 743-752.
- [10] BARRI T, DRAGSTED L O. UPLC-ESI-QTOF/MS and multivariate data analysis for blood plasma and serum metabolomics: effect of experimental artefacts and anticoagulant [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, 768: 118-128.
- [11] 刘晓晓,曾亚琦,王建文,等.高、低乳脂率哈萨克马血浆代谢组比较分析[J].动物营养学报,2024,36(6):3845-3856.
- [12] JIN HUA W, A Z W, BING W, et al. Characterization of porcine milk oligosaccharides over lactation between primiparous and multiparous female pigs [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4688.

- [13] BARDANZELLU F, FANOS V, REALI A. “Omics” in human colostrum and mature milk: looking to old data with new eyes [J]. *Nutrients*, 2017, 9 (8): 843.
- [14] QUESNEL H, FARMER C. Review: nutritional and endocrine control of colostrumogenesis in swine [J]. *Animal*, 2019, 13: s26-s34.
- [15] 蓝航莲, 施悦, 张丽娜, 等. 4种哺乳动物乳中低聚糖的定性和定量分析研究进展 [J]. *食品科学*, 2022, 43 (13): 370-378.
- [16] 付力立. 基于代谢组学研究奶牛初乳与常乳组分差异及补饲酵母硒的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- [17] 吴燕. 微生物合成唾液酸及唾液酸乳糖的研究进展 [J]. *工业微生物*, 2024, 54 (3): 93-97.
- [18] ARNOLD J W, WHITTINGTON H D, DAGHER S F, et al. Safety and modulatory effects of humanized galacto-oligosaccharides on the gut microbiome [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 640100.
- [19] SUNDEKILDE K U, DOWNEY E, O' MAHONY A J, et al. The effect of gestational and lactational age on the human milk metabolome [J]. *Nutrients*, 2016, 8 (5): 304.
- [20] 刘爽, 毛颖异, 蔡小堃, 等. 不同泌乳阶段中6种母乳低聚糖的含量及其变化趋势 [C]. 中国食品科学技术学会第十七届年会. 西安, 2020.
- [21] 朱婧, 石羽杰, 吴立芳, 等. 不同阶段母乳中10种游离低聚糖的检测及含量分析 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2017, 29 (4): 417-422.
- [22] 宋婉莹, 李墨翰, 张秀敏, 等. 牛初乳与牛常乳中游离氨基酸和不溶性蛋白质氨基酸对比研究 [J]. *乳业科学与技术*, 2021, 44 (5): 1-6.
- [23] 夏茂, 赵小刚, 郭吉余, 等. 蛋氨酸代谢及其对动物繁殖性能的影响研究进展 [J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59 (5): 17-23.
- [24] 李莉. 过瘤胃蛋氨酸对奶山羊产奶性能和血液指标的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [25] 符慧慧, 王海波, 钟金城. 蛋氨酸调控肌肉发育的研究进展 [J]. *动物营养学报*, 2024, 36 (5): 2856-2871.
- [26] 杨媛丽, 沙坤, 孙宝忠, 等. 不同养殖模式对牦牛背最长肌挥发性风味物质及脂肪酸组成的影响 [J]. *肉类研究*, 2020, 34 (4): 46-52.
- [27] 冯润芳, 孟风华, 安晓雯, 等. 小尾寒羊不同部位挥发性风味物质和脂肪酸分析 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42 (21): 285-293.
- [28] KUMARI B, KUMARI U, SINGH K D, et al. Molecular targets of valeric acid: a bioactive natural product for endocrine, metabolic, and immunological disorders [J]. *Endocrine Metabolic Immune Disorders Drug Targets*, 2024, 24 (13): 1506-1517.
- [29] 马洪庆, 刘霞. 中链脂肪酸的理化特性、代谢特点、功能特性及在猪生产中的应用 [J]. *饲料研究*, 2022, 45 (11): 143-148.

· 信息 ·

倡导健康养殖新理念 解读疫病防控新技术 欢迎订阅 2026年《畜牧与兽医》

ISSN 0529-5130, CN 32-1192/S

《畜牧与兽医》月刊由教育部主管、南京农业大学主办。1935年创刊,由原中央大学畜牧兽医系编辑出版,著名兽医学家罗清生教授任主编,至今已有90年的办刊历史。始终遵循“为社会服务,为畜牧生产服务”和“理论与实践相结合,普及与提高并举”的办刊宗旨。本刊连续入选中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、《中文核心期刊要目总览》,先后荣获华东地区优秀期刊、江苏期刊方阵双效期刊、江苏省优秀科技期刊、全国高校优秀期刊、全国畜牧兽医类优秀期刊等。

读者对象: 畜牧、兽医科技工作者和大专院校师生等。

主要内容: 主要刊登畜牧、兽医两学科各领域的研究报告、文献综述等。主要栏目有遗传繁育、动物营养、环境卫生、基础兽医、预防兽医、临床兽医和专题综述等。

征订办法: 本刊为月刊,大16开,定价:28.00元,全年12期共336.00元。邮发代号:28-42,全国各地邮局均可订阅。邮局漏订者可直接汇款至本刊杂志社补订。

地址: 江苏省南京市江北新区滨江大道666号南京农业大学行政楼A320《畜牧与兽医》编辑部

邮编: 211800

电话: 025-84395701

E-mail: muyizz@njau.edu.cn