高邮鸭蛋特征品质指标分析

陈梦颖[1]，龚 兰[2]，何 涛[2]，朱 磊[2]，栾枫婷[2]，豆维胜[2]，邵雪梅[2]，方晓敏[2]，尤兆荣[3]，魏瑞成[2,*]，王 冉[2]
（1.江苏大学食品与生物工程学院，江苏 镇江 212013；2.江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所，江苏省食品质量安全重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地，江苏 南京 210014；3.高邮鸭蛋协会，江苏 扬州 225600）

摘 要：为挖掘高邮鸭蛋品质特征指标，采用代谢组学等技术对高邮鸭蛋的蛋品质指标、基础营养指标及小分子代谢物进行测定分析。结果显示，高邮鸭蛋的蛋质量、蛋形指数、蛋黄色度、哈夫单位、蛋白高度、蛋黄指数、粗蛋白质量分数指标高于其他品种；总氨基酸、鲜味氨基酸、支链氨基酸、总脂肪酸、不饱和脂肪酸含量较高，饱和脂肪酸含量低，表明高邮鸭蛋的部分感官蛋品品质参数、氨基酸和脂肪酸水平可表征高邮鸭蛋的特征品质。基于代谢组学技术绘制高邮鸭蛋的代谢指纹图谱，通过主成分分析（principal component analysis，PCA）、偏最小二乘法分析（partial least-squares discrimination analysis，PLS-DA）模型、层次聚类分析（hierarchical clustering analysis，HCA）等方法挖掘高邮鸭蛋的特征组分。蛋黄中鉴定出252 个化合物，差异化合物22 个，蛋清中鉴定出184 个化合物，差异化合物40 个。其中，尿苷5′-单磷酸、鸟苷5′-单磷酸、*N*-乙酰基-*D*-葡萄糖胺为主要差异营养物质，蛋黄中的花生四烯酸为高邮鸭蛋特有营养成分，蛋清中的吲哚在高邮鸭蛋中未检出。

关键词：高邮鸭蛋；常规蛋品质指标；基础营养指标；代谢组学

Analysis of Characteristic Quality Indexes of Gaoyou Duck Eggs

CHEN Mengying[1], GONG Lan[2], HE Tao[2], ZHU Lei[2], LUAN Fengting[2], DOU Weisheng[2], SHAO Xuemei[2], FANG Xiaomin[2], YOU Zhaorong[3], WEI Ruicheng[2,*], WANG Ran[2]
(1. College of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Key Laboratory for Food Quality and Safety-State Key Laboratory Cultivation Base, Ministry of Science and Technology, Nanjing 210014, China;
3. Gaoyou Duck Egg Association, Yangzhou 225600, China)

Abstract: To explore the quality characteristics of Gaoyou duck eggs, metabolomics was used to analyze the quality indexes, basic nutritional indexes and small molecule metabolites. The results showed that the mass, egg shape index, egg yolk color, Haugh unit, egg white height, egg yolk index and crude protein content of Gaoyou duck eggs were higher than those of the other studied breeds. The contents of total amino acids, umami amino acids, branched-chain amino acids, total fatty acids and unsaturated fatty acids were higher, and the content of saturated fatty acids was lower, indicating that sensory quality parameters, amino acids and fatty acids can characterize the quality of Gaoyou duck eggs. The characteristic components of Gaoyou duck eggs were uncovered by metabolomic fingerprinting, principal component analysis (PCA), partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), and hierarchical cluster analysis (HCA). Totally 252 compounds and 22 differential compounds were identified in egg yolk, and 184 compounds and 40 differential compounds in egg white. Among them, uridine 5′-monophosphate, guanosine 5′-monophosphate, and *N*-acetyl-*D*-glucosamine were the main differential nutrients, and arachidonic acid in egg yolk was the unique nutrient of Gaoyou duck eggs, while indole was not detected in the egg white of Gaoyou duck eggs.

Keywords: Gaoyou duck eggs; conventional egg quality indicators; basic nutritional indicators; metabolomics
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230417-157
中图分类号：TS253.2 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2024）02-0240-08

收稿日期：2023-04-17
基金项目：江苏省食品质量安全重点实验室开放课题项目（2022-SBGJZZ-16）；“高邮鸭蛋”地理标志农产品保护工程项目
第一作者简介：陈梦颖（1999—）（ORCID: 0009-0001-0405-2022），女，硕士研究生，研究方向为食品工程。
E-mail: cmy99163@163.com
*通信作者简介：魏瑞成（1979—）（ORCID: 0009-0007-8695-4401），男，研究员，博士，研究方向为畜禽产品品质评价。
E-mail: rcwei79@163.com

引文格式：
陈梦颖, 龚兰, 何涛, 等. 高邮鸭蛋特征品质指标分析[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 240-247. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230417-157. http://www.spkx.net.cn
CHEN Mengying, GONG Lan, HE Tao, et al. Analysis of characteristic quality indexes of Gaoyou duck eggs[J]. Food Science, 2024, 45(2): 240-247. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230417-157. http://www.spkx.net.cn

我国鸭蛋食用有几千年历史，是全球禽蛋生产和消费大国，鸭蛋生产量居世界首位[1]。高邮麻鸭作为我国三大名鸭之一，产于江苏省高邮市，所产鸭蛋个头大、品质好，腌制后蛋白细嫩、蛋黄油润翻沙，具有独特鲜味，于2002年被国家质监总局批准为“国家地理标志产品”[2]。高邮鸭蛋富含多种促进人体健康、提高人体免疫力的营养成分，如锌、锗、硒、钙等微量元素[3]，深受消费者喜爱。目前对高邮鸭蛋营养成分的研究较少，王珍珍等[4]基于常规蛋品质对4 个品种的鸭蛋进行分析，发现4 个品种中绍兴鸭蛋的蛋壳质量最优，缙云麻鸭的新鲜度最优。陶志云等[5]基于部分基础营养指标对高邮鸭蛋和金定鸭蛋的营养价值进行评价，发现两者在蛋白营养及风味上均无明显区别。现有研究多数从感官品质和基础营养指标进行评价分析，特征成分和品质优点不明，并且受限于分析手段的单一化，很多特征营养物质没有作为优质品质指标使用。研究表明，非靶向代谢组学技术通过高通量化学分析可对不同生物品种内小分子化合物进行深入定性分析[6]，该技术已广泛应用于食品、微生物、医疗等研究领域。Böttcher等[7]采用代谢组学技术对洋葱中的低聚果糖、氨基酸、*S*-半胱氨酸、皂苷类等极性及半极性成分进行了全面的轮廓分析，共表征出123 个代谢物，可用于全面阐明特异性代谢物模式。目前，在鸭蛋中采用代谢组学技术研究特征成分还鲜见报道。因此，本研究采用非靶向代谢组学技术，结合多元统计分析，对高邮鸭蛋及其他5 种鸭蛋的常规蛋品质指标、基础营养指标、小分子代谢物进行测定和分析，筛选出高邮鸭蛋的差异代谢物，明确高邮鸭蛋的特征营养品质指标，以期为高邮鸭蛋的品质评价研究提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验选取高邮鸭蛋、广西海鸭蛋、淇河缠丝鸭蛋（3 种地理标志鸭蛋来自各核心产区）及市场主要销售品种的3 类鸭蛋各30 枚作为主要材料，于养殖场蛋鸭生产后当天低温快速运回实验室，在3 d内进行常规蛋品质指标测定，将蛋清、蛋黄分离，存于－70 ℃冰箱，用于基础营养指标、代谢组学测定。

甲醇、乙腈（均为色谱纯） 美国Sigma公司；甲酸（色谱纯） 上海安谱公司；所有实验用水均为超纯水。

1.2 仪器与设备

EMT-7300II多功能蛋品品质测定仪 日本Robotmation股份有限公司；游标卡尺 无锡凯保鼎工具有限公司；Zeno TOF^{TM} 7600液相色谱-质谱联用仪 美国SCIEX公司；高速离心机 德国Eppendorf生命科学公司；氮吹仪 北京康林科技公司；HSS T3色谱柱（100 mm×2.1 mm，1.8 μm） 美国Waters公司。

1.3 方法

1.3.1 常规蛋品质指标测定

蛋质量、蛋白高度、蛋黄色度、哈夫单位：采用多功能蛋品品质测定仪测定。蛋形指数：蛋形指数＝长径/短径，其中长径、短径用游标卡尺测定。蛋壳厚度：分别选取鸭蛋的钝端、中部、锐端用游标卡尺进行测定，求3 个部位的平均值作为蛋壳厚度。蛋黄指数＝蛋黄高度/蛋黄直径，其中蛋黄高度、蛋黄直径由游标卡尺测定。每个指标设置6 个平行样品。

1.3.2 基础营养指标测定

水分质量分数测定参照GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》[8]；粗蛋白质量分数测定采用凯氏定氮法，参照GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》[9]；粗脂肪质量分数测定采用索氏提取法，参照GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》[10]；氨基酸相对含量测定参照GB 5009.124—2016《食品中氨基酸的测定》[11]；脂肪酸相对含量测定参照GB 5009.168—2016《食品中脂肪酸的测定》[12]。每个指标设置6 个平行样品。

1.3.3 代谢组学分析

1.3.3.1 前处理

冰上称取鸭蛋样品置于2 mL离心管中，放置4 ℃低温离心机，1 500 r/min离心30 s，加入200 μL 4 ℃水，匀浆仪进行匀浆破碎（6.1 m/s，60 s，3 次）。加入800 μL的乙腈-甲醇（1∶1，*V*/*V*）。涡旋30 s，超声10 min（冰浴），放置－20 ℃冰箱1 h。4 ℃、12 000 r/min离心15 min。取上清液置于氮吹仪中吹干（冰浴）。加乙腈-水（1∶1，*V*/*V*）复溶，涡旋30 s，超声5 min（冰浴），4 ℃、12 000 r/min离心15 min。取上清液，过滤膜于进样瓶中，分别从各样品中取15 μL溶液，混匀，置于进样小瓶中作为质量控制样品，待测定。每种鸭蛋设置6 个生物学平行样品。

1.3.3.2 仪器条件

柱温：40 ℃；流速：0.30 mL/min，进样量：2 μL；

正离子采集模式流动相：A相：0.05%甲酸-水溶液；B相：乙腈；负离子采集模式流动相：A相：0.05%甲酸-水溶液；B相：乙腈。

0.0～0.1 min，99% A、1% B；0.1～1.5 min，99% A、1% B；1.5～13.0 min，99%～1% A、1%～99% B；13.0～16.5 min，1% A、99% B；16.5～16.6 min，1%～99% A、99%～1% B；16.6～20.0 min，99% A、1% B。

采集模式：正电喷雾电离＋负电喷雾电离；质谱一级全扫描＋二级离子扫描；扫描范围：一级全扫描：*m/z* 50～1 000；累积时间：0.1 s；二级离子扫描：*m/z* 40～1 000；累积时间：0.05 s；化合物参数：去簇电压：80/－80 V；碰撞电压：（35±15）/（－35±15）V；源气参数：气帘气压：35 psi；加热气1气压：55 psi；加热气2气压：55 psi；加热温度：550 ℃；离子喷雾电压：5 500/－4 500 V。

1.4 数据处理

利用Excel软件整理记录数据，SPSS 23.0统计软件进行单因素方差分析，采用Duncan多重比较，$P<0.05$表示差异显著。实验结果以$\bar{x}\pm s$表示。代谢组学数据采集完成后，通过MarkerView软件进行提峰，MetDNA平台进行化合物鉴定，metaboanalyst平台及SIMCA-P软件进行数据的主成分分析（principal component analysis，PCA）、偏最小二乘法分析（partial least-squares discrimination analysis，PLS-DA）、层次聚类分析（hierarchical clustering analysis，HCA），找出高邮鸭蛋的差异代谢物，利用SCIEX OS软件对差异代谢物进行定性。

2 结果与分析

2.1 常规蛋品质结果分析

如表1所示，在6 种不同品种的鸭蛋中，高邮鸭蛋蛋质量为86.91 g/枚，显著高于其他5 种鸭蛋。蛋形指数以高邮鸭蛋最高，为1.41，显著高于市场鸭蛋2和市场鸭蛋3。蛋壳厚度高邮鸭蛋处于中间水平，显著高于广西海鸭蛋、淇河缠丝鸭蛋（$P<0.05$）。蛋黄色度以高邮鸭蛋最高，为15.67，分别比广西海鸭蛋、淇河缠丝鸭蛋、市场鸭蛋1、市场鸭蛋2、市场鸭蛋3显著高出2.54、1.67、1.42、1.85、2.77。鸭蛋的蛋白高度和哈夫单位是反映蛋品质新鲜度和蛋白质量的重要指标，在相同贮藏时间下，高邮鸭蛋的哈夫单位最高，显著高于淇河缠丝鸭蛋、市场鸭蛋1、市场鸭蛋2、市场鸭蛋3（$P<0.05$）。依据美国农业部分级标准，高邮鸭蛋定为AA级（哈夫单位不小于72）[13]。蛋白高度以高邮鸭蛋最高，为8.17 mm，显著高于其他5 种鸭蛋，分别高22.31%、35.04%、95.92%、74.57%、68.45%，表明高邮鸭蛋蛋白质量高于其他几种。蛋黄指数体现的是蛋黄在整蛋中的占比，本研究中高邮鸭蛋最高，为0.44，显著高于其他5 种鸭蛋（$P<0.05$）。

表 1 不同品种鸭蛋常规蛋品质指标对比

Table 1 Comparison of conventional quality indicators of duck eggs from different breeds

测定指标	高邮鸭蛋	广西海鸭蛋	淇河缠丝鸭蛋	市场鸭蛋1	市场鸭蛋2	市场鸭蛋3
蛋质量/（g/枚）	86.91±1.39^{a}	68.47±2.32^{b}	70.02±2.78^{b}	63.40±1.56^{c}	62.98±2.31^{c}	65.40±3.27^{c}
蛋形指数	1.41±0.01^{a}	1.39±0.05^{a}	1.39±0.05^{a}	1.40±0.03^{a}	1.38±0.01^{b}	1.32±0.01^{b}
蛋壳厚度/mm	0.38±0.02^{a}	0.35±0.02^{bc}	0.33±0.03^{c}	0.37±0.02^{ab}	0.39±0.03^{a}	0.39±0.03^{a}
蛋黄色度	15.67±0.59^{a}	13.13±0.21^{c}	14.00±0.41^{b}	14.25±0.31^{b}	13.82±0.30^{b}	12.90±0.40^{c}
哈夫单位	83.47±6.59^{a}	78.58±3.78^{a}	59.67±7.30^{b}	57.30±12.44^{b}	63.04±11.63^{b}	63.45±12.82^{b}
蛋白高度/mm	8.17±1.08^{a}	6.68±0.48^{b}	6.05±0.19^{c}	4.17±1.14^{c}	4.68±1.14^{c}	4.85±1.27^{c}
蛋黄指数	0.44±0.03^{a}	0.39±0.02^{b}	0.35±0.01^{b}	0.33±0.02^{b}	0.34±0.02^{b}	0.36±0.02^{b}

注：同行不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

2.2 基础营养指标分析

2.2.1 水分、粗脂肪、粗蛋白含量分析

如表2所示，在6 种鸭蛋基础营养指标中，高邮鸭蛋的水分和粗脂肪质量分数处于中间水平；高邮鸭蛋粗蛋白质量分数为13.68%，显著高于其他品种鸭蛋0.37%～1.42%（$P<0.05$）。

表 2 不同品种鸭蛋基础营养指标对比

Table 2 Comparison of basic nutritional indicators of duck eggs from different breeds

%

测定指标	高邮鸭蛋	广西海鸭蛋	淇河缠丝鸭蛋	市场鸭蛋1	市场鸭蛋2	市场鸭蛋3
水分质量分数	70.70±0.73^{b}	71.04±0.76^{b}	71.07±0.56^{b}	72.11±0.17^{a}	69.23±0.19^{c}	68.92±0.16^{c}
粗脂肪质量分数	12.78±0.53^{b}	12.63±0.58^{b}	11.08±0.38^{c}	11.52±0.36^{c}	13.46±0.11^{a}	13.11±0.14^{a}
粗蛋白质量分数	13.68±0.19^{a}	13.16±0.72^{b}	13.31±0.44^{b}	12.26±0.21^{c}	13.30±0.26^{b}	13.25±0.22^{b}

2.2.2 氨基酸含量分析

氨基酸的含量和比例是蛋白质营养价值评价的重要指标，因此，对6 种不同品种鸭蛋的氨基酸相对含量进行测定。如表3所示，高邮鸭蛋的总氨基酸相对含量最高，与广西海鸭蛋差异显著（$P<0.05$）。联合国粮农组织/世界卫生组织规定的蛋白质理想模式为E/T（必需氨基酸/总氨基酸）40%左右，E/N（必需氨基酸/非必需氨基酸）60%以上[14]。高邮鸭蛋的E/T为44%、E/N为78%，均符合要求，表明高邮鸭蛋的蛋白符合理想蛋白的指标标准。高邮鸭蛋的鲜味氨基酸相对含量最高，为5.76%，其中，天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸含量最高，分别为1.29%、1.95%、0.45%，可能是影响高邮鸭蛋滋味的一个因素。谷氨酸除呈现鲜味外，在进入人体后还参与各种重要的生理代谢活动，如解除氨的毒害、保护肝脏等[15]。高邮鸭蛋的支链氨基酸（branched-chain amino acid，BCAAs）即亮氨酸、缬氨酸、异亮氨酸相对含量最高，分别为1.16%、0.89%、0.62%，BCAAs通过促进胰岛素释放和生长激素释放两种途径来促进肌肉增长，并减缓运动后的肌肉酸痛[16]，增强老年肌少症患者的肌

肉力量[17]。因此，相比其他鸭蛋品种，高邮鸭蛋更适合儿童、健身人群及老年人群。

表 3 不同品种鸭蛋氨基酸相对含量对比

Table 3 Comparison of amino acid contents of duck eggs from different breeds

%

氨基酸	高邮鸭蛋	广西海鸭蛋	淇河缠丝鸭蛋	市场鸭蛋1	市场鸭蛋2	市场鸭蛋3
天冬氨酸	1.29±0.06^{a}	1.12±0.06^{b}	1.22±0.05^{a}	1.22±0.06^{a}	1.17±0.09^{ab}	1.18±0.05^{a}
苏氨酸	0.81±0.03^{a}	0.72±0.04^{b}	0.78±0.03^{a}	0.76±0.03^{a}	0.81±0.01^{a}	0.77±0.02^{a}
丝氨酸	1.05±0.03^{ab}	0.91±0.05^{b}	1.00±0.04^{a}	0.99±0.05^{ab}	0.96±0.11^{ab}	0.97±0.03^{ab}
谷氨酸	1.95±0.08^{a}	1.70±0.09^{b}	1.84±0.09^{a}	1.84±0.07^{a}	1.92±0.00^{a}	1.90±0.05^{a}
甘氨酸	0.45±0.02^{a}	0.41±0.02^{b}	0.44±0.02^{a}	0.43±0.02^{a}	0.44±0.02^{a}	0.43±0.01^{a}
丙氨酸	0.64±0.04^{ab}	0.60±0.03^{b}	0.64±0.03^{a}	0.65±0.04^{a}	0.65±0.02^{a}	0.64±0.01^{a}
胱氨酸	0.28±0.01^{a}	0.25±0.02^{b}	0.27±0.13^{a}	0.27±0.02^{ab}	0.28±0.01^{a}	0.27±0.01^{a}
缬氨酸	0.89±0.05^{a}	0.81±0.04^{b}	0.88±0.04^{a}	0.87±0.03^{a}	0.87±0.02^{a}	0.87±0.01^{a}
蛋氨酸	0.65±0.02^{ab}	0.60±0.03^{b}	0.66±0.04^{a}	0.68±0.01^{a}	0.67±0.01^{a}	0.66±0.02^{a}
异亮氨酸	0.62±0.06^{a}	0.57±0.03^{b}	0.61±0.02^{a}	0.60±0.04^{ab}	0.60±0.04^{a}	0.60±0.02^{a}
亮氨酸	1.16±0.06^{a}	1.06±0.05^{b}	1.12±0.05^{a}	1.08±0.06^{ab}	1.15±0.04^{a}	1.10±0.03^{a}
酪氨酸	0.62±0.03^{ab}	0.58±0.03^{b}	0.61±0.02^{a}	0.60±0.03^{ab}	0.63±0.01^{a}	0.60±0.02^{ab}
苯丙氨酸	0.80±0.04^{ab}	0.74±0.03^{b}	0.81±0.05^{a}	0.80±0.00^{a}	0.77±0.06^{ab}	0.76±0.02^{ab}
赖氨酸	1.08±0.06^{ac}	0.99±0.05^{b}	1.02±0.04^{ab}	0.99±0.08^{bc}	1.07±0.01^{a}	1.00±0.01^{ab}
组氨酸	0.34±0.01^{a}	0.30±0.01^{b}	0.33±0.01^{a}	0.34±0.02^{a}	0.35±0.01^{a}	0.34±0.01^{a}
精氨酸	0.75±0.04	0.68±0.04	0.73±0.03	0.72±0.06	0.72±0.05	0.71±0.03
脯氨酸	0.33±0.01^{ac}	0.31±0.02^{bc}	0.33±0.01^{a}	0.32±0.02^{ac}	0.30±0.02^{b}	0.31±0.01^{a}
总氨基酸（T）	13.73±0.63^{a}	12.35±0.65^{b}	13.27±0.55^{a}	13.16±0.58^{a}	13.39±0.41^{a}	13.29±0.33^{a}
必需氨基酸（E）	6.02±0.29^{a}	5.49±0.28^{b}	5.88±0.26^{a}	5.78±0.23^{ab}	5.96±0.13^{a}	5.89±0.11^{a}
非必需氨基（N）	7.71±0.34^{a}	6.86±0.27^{b}	7.39±0.24^{a}	7.38±0.21^{a}	7.42±0.19^{a}	7.39±0.14^{a}
鲜味氨基酸（F）	5.76±0.27^{a}	5.15±0.37^{b}	5.54±0.29^{a}	5.54±0.36^{a}	5.58±0.30^{a}	5.56±0.25^{a}
E/T	44	44	44	44	45	44
E/N	78	80	80	78	80	80
F/T	42	42	42	42	42	42

注：E/T.必需氨基酸/总氨基酸；E/N.必需氨基酸/非必需氨基酸；F/T.鲜味氨基酸/总氨基酸。

2.2.3 脂肪酸含量分析

鸭蛋中脂肪酸含量对蛋营养品质有较大影响，6 种鸭蛋中脂肪酸含量的测定结果见表4。高邮鸭蛋的总脂肪酸、不饱和脂肪酸相对含量最高，分别为96.602%、69.312%，6 种鸭蛋的脂肪酸相对含量均表现为单不饱和脂肪酸＞饱和脂肪酸＞多不饱和脂肪酸。饱和脂肪酸中，高邮鸭蛋的相对含量最低，为27.290%，6 种不同品种鸭蛋的饱和脂肪酸占总脂肪酸相对含量分别为28.25%、33.46%、31.72%、31.78%、31.22%、33.13%。6 种不同品种鸭蛋单不饱和脂肪酸的碳链数为16～18，其含量占总脂肪酸含量比例分别为59.72%、52.03%、58.44%、56.58%、53.44%、49.54%，高邮鸭蛋占比最高，为57.688%；其中，高邮鸭蛋的油酸含量最高，与广西海鸭蛋、市场鸭蛋2、市场鸭蛋3差异显著（P＜0.05）。6 种不同品种鸭蛋的多不饱和脂肪酸碳链数为18～22，高邮鸭蛋的花生烯酸和二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid，DHA）含量最高，分别为0.518%、0.260%，与其他品种鸭蛋存在显著差异（P＜0.05）。研究表明，单不饱和脂肪酸在正向调节血脂代谢、降低低密度脂蛋白胆固醇氧化敏感性等方面发挥重要作用[18-20]。多不饱和脂肪酸具有明显的降血脂、降血压、抗氧化、抗肿瘤和免疫调节作用，能显著降低心血管疾病的发病率[21]。DHA是人体中不可或缺的多不饱和脂肪酸，对大脑细胞发育有着极其重要的作用[22]。因此，高邮鸭蛋相比其他品种鸭蛋，含有丰富的不饱和脂肪酸，更有利于人体健康。

表 4 不同品种鸭蛋脂肪酸相对含量对比

Table 4 Comparison of fatty acid contents of duck eggs from different breeds

%

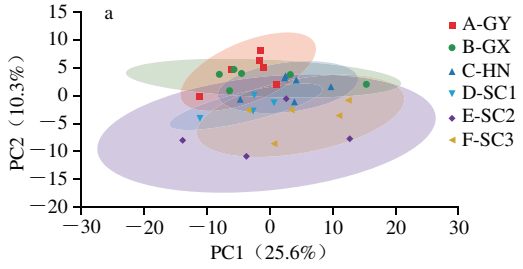
脂肪酸	高邮鸭蛋	广西海鸭蛋	淇河缠丝鸭蛋	市场鸭蛋1	市场鸭蛋2	市场鸭蛋3
肉豆蔻酸	0.332±0.074^{b}	0.418±0.103^{ab}	0.374±0.021^{b}	0.325±0.007^{b}	0.401±0.014^{ab}	0.531±0.028^{a}
棕榈酸	22.118±3.934	24.828±1.426	24.128±1.178	24.485±1.252	23.855±0.092	24.87±0.071
棕榈油酸	2.242±0.645	2.158±0.393	2.388±0.425	2.701±0.354	2.145±0.021	2.564±0.141
十七碳酸	0.100±0.009	0.120±0.010	0.105±0.021	ND	0.110±0.014	0.120±0.012
硬脂酸	4.418±0.533^{c}	6.032±0.414^{a}	5.206±0.734^{b}	4.911±0.042^{bc}	4.893±0.358^{bc}	5.492±0.141^{ab}
油酸	54.928±5.233^{a}	47.124±2.628^{b}	53.066±1.297^{ac}	50.885±2.539^{ab}	48.512±0.354^{bc}	44.510±0.354^{b}
亚油酸	9.466±1.514^{c}	10.986±1.049^{b}	6.888±0.949^{d}	8.410±1.273^{cd}	11.801±0.269^{a}	13.764±0.212^{a}
亚麻酸	0.120±0.010^{b}	0.195±0.041^{a}	0.140±0.021^{b}	0.105±0.007^{b}	0.115±0.007^{b}	0.123±0.003^{b}
花生烯酸	0.518±0.074^{a}	0.372±0.048^{b}	0.214±0.036^{c}	0.210±0.028^{c}	0.330±0.014^{bc}	0.440±0.141^{b}
二十一烷酸	0.162±0.018^{c}	0.238±0.019^{b}	0.155±0.041^{c}	0.175±0.021^{c}	0.275±0.007^{b}	0.370±0.014^{a}
二十二碳烷酸	0.160±0.039^{c}	0.298±0.075^{b}	0.242±0.044^{b}	0.315±0.021^{b}	0.255±0.007^{b}	0.395±0.021^{a}
花生三烯酸	1.778±0.388^{b}	2.466±0.157^{a}	2.224±0.159^{a}	2.410±0.071^{a}	2.525±0.120^{a}	2.560±0.071^{a}
二十二碳六烯酸	0.260±0.070^{a}	0.200±0.028^{b}	0.122±0.008^{c}	0.145±0.021^{bc}	0.185±0.007^{bc}	0.175±0.007^{bc}
总脂肪酸	96.602	95.435	95.252	95.077	95.402	95.914
饱和脂肪酸	27.290	31.934	30.210	30.211	29.789	31.778
单不饱和脂肪酸	57.688	49.654	55.668	53.796	50.987	47.514
多不饱和脂肪酸	11.624	13.847	9.374	11.070	14.626	16.622
不饱和脂肪酸	69.312	63.501	65.042	64.866	65.613	64.136

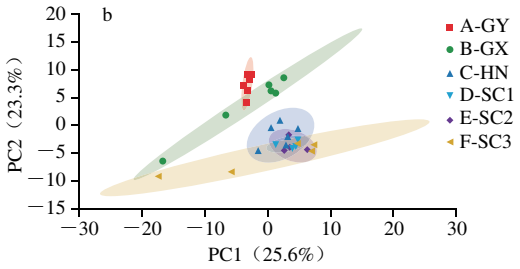
注：ND.未检出。

2.3 非靶向代谢组学分析

2.3.1 PCA

PCA可以反映不同样品间的变异度大小[23]。不同品种鸭蛋蛋黄与蛋清的PCA如图1所示，在蛋黄中，PC1的贡献率是25.6%，PC2的贡献率是10.3%；在蛋清中，PC1的贡献率是25.6%，PC2的贡献率是23.3%。结果表明，蛋黄中6 个不同品种鸭蛋存在部分重叠，但总体呈现分离趋势；蛋清中，高邮鸭蛋除与广西海鸭蛋有部分重叠外，与其他品种鸭蛋均能明显区分，并且检测样本均在各组95%置信区间内，结果可靠，可从整体上体现6 种不同品种鸭蛋的差异性。





A-GY.高邮鸭蛋；B-GX.广西海鸭蛋；C-HN.淇河缠丝鸭蛋；D-SC1.市场鸭蛋1；E-SC2.市场鸭蛋2；F-SC3.市场鸭蛋3。图2、4同。

图1 蛋黄（a）与蛋清（b）的代谢物PCA得分图

Fig. 1 PCA score plots of metabolites in egg yolk (a) and egg white (b)

2.3.2 PLS-DA

由于PCA为反映数据原始状态的无监督分析方法，只能用来观察实验样品的自然分布和组别关系，不能忽略组内误差以及消除与研究目的无关的随机误差[24]。因此，为了深入明确高邮鸭蛋与其他品种鸭蛋之间的代谢差异性，采用PLS-DA，构建PLS-DA模型，得到6 个不同品种鸭蛋样品的得分图。如图2所示，高邮鸭蛋的蛋黄、蛋清除与广西海鸭蛋有部分重合外，与其他品种鸭蛋均能完全区分开，说明高邮鸭蛋与其他品种鸭蛋之间代谢物存在明显差异。

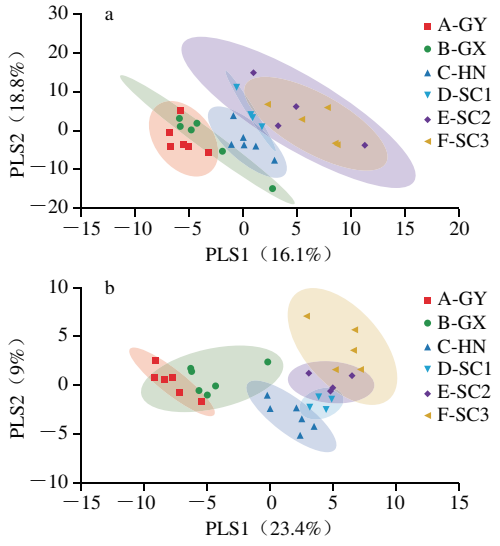


图2 蛋黄（a）与蛋清（b）的代谢物PLS-DA得分图

Fig. 2 PLS-DA score plots of metabolites in egg yolk (a) and egg white (b)

在PLS-DA模型中，R^2代表所建立的模型对数据的解释率，Q^2代表模型的预测能力，R^2与Q^2越接近1表明模型越稳定可靠，其中Q^2大于0.5认为该模型有效[25]。本研究中，蛋黄的R^2为0.915，Q^2为0.733；蛋清的R^2为0.931，Q^2为0.631。为防止模型拟合过度，采用200 次响应对模型进行置换验证。置换检验是通过随机改变分类变量Y的排列顺序，多次建立对应的PLS-DA模型以获取随机模型的R^2与Q^2值。此检验在避免模型过拟合以及评估模型的统计显著性上有重要作用[26]。如图3所示，从左到右，最右边为R^2和Q^2的原始点，所有R^2点均低于原始的R^2点，所有Q^2点均低于原始的Q^2点，且Q^2点的回归线与纵坐标的交叉点小于等于0[27]。证明此模型可靠，可进行后续差异化合物的查找。

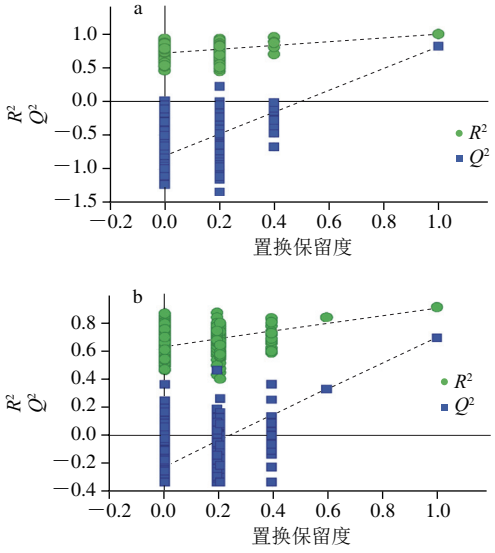
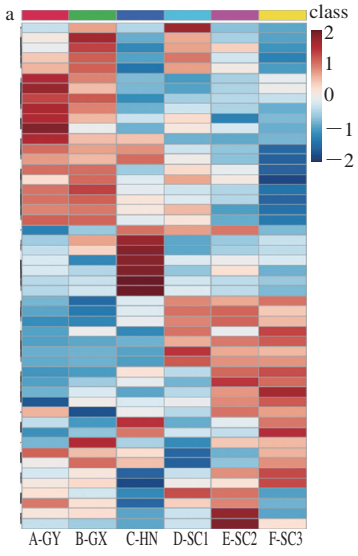


图3 蛋黄（a）与蛋清（b）的PLS-DA的置换检验图

Fig. 3 Premutation tests of PLS-DA models for egg yolk (a) and egg white (b)

2.3.3 HCA

为找出高邮鸭蛋与其他品种鸭蛋的差异性成分，对代谢物在不同鸭蛋中的积累模式进行层次聚类分析，建立样品聚类分析热图[28]。如图4所示，横坐标和纵坐标分别为样品和代谢质谱特征，不同颜色为数据标准化处理后得到的数值，红色区域代表高表达含量，蓝色区域代表低表达含量。在蛋黄与蛋清中，高邮鸭蛋热图的色块分布除与广西海鸭蛋有部分相似之外，与其他品种鸭蛋有显著差异。说明高邮鸭蛋与其他品种鸭蛋之间的代谢物有较大差异，可以筛选出差异化合物。



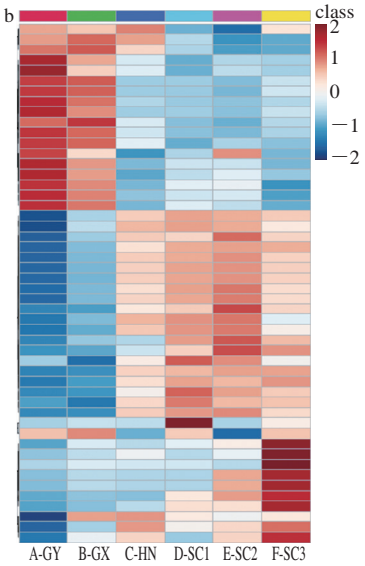


图4 蛋黄（a）与蛋清（b）的聚类分析热图

Fig. 4 Cluster analysis heatmaps of egg yolk (a) and egg white (b)

2.3.4 差异代谢物的筛选和分析

采用单变量统计分析与多变量统计分析相结合的方法，根据$P<0.05$、$|\log_2$差异倍数（fold change，FC）$|>1$以及变量投影重要度（variable importance in the projection，VIP）>1筛选差异代谢物。P值表示差异显著，P值越小，差异性越显著；计算样品之间代谢物浓度的FC，$\log_2$FC的绝对值越大，表示差异越大；VIP是根据PLS-DA生成的变量投影重要性，数值越大表明该差异代谢物对样品组间的分类判别的影响强度和解释能力越强[29]。如表5所示，对高邮鸭蛋及其他品种鸭蛋进行两两比较，发现蛋黄中鉴别到代谢物252 个，筛选差异化合物22 个，主要是氨基酸（6 种）、有机酸（2 种）、脂类（8 种）、核苷酸（2 种）、其他小分子代谢物（4 种）；蛋清中鉴别出184 个代谢物，筛选差异化合物40 个，主要是氨基酸（12 种）、脂类（4 种）、核苷酸（15 种）、糖类（2 种）、其他小分子代谢物（7 种）。蛋黄中，尿苷5′-单磷酸、顺式-5,8,11,14-二十碳四烯酸为主要差异代谢物，相对含量显著高于其他品种鸭蛋（$P<0.05$），且顺式-5,8,11,14-二十碳四烯酸仅在高邮鸭蛋黄中发现，其他品种鸭蛋黄中未检出；蛋清中，鸟苷5′-单磷酸、*N*-乙酰基-*D*-葡萄糖胺、吲哚为主要差异代谢物，鸟苷5′-单磷酸和*N*-乙酰基-*D*-葡萄糖胺在高邮鸭蛋蛋清中显著高于其他品种鸭蛋（$P<0.05$），而吲哚在高邮鸭蛋清中未检出。

尿苷5′-单磷酸与鸟苷5′-单磷酸均为呈味核苷酸，尿苷5′-单磷酸是由尿嘧啶、核糖和磷酸组成的单核苷酸，可通过从头合成途径或体内核苷酸和核酸的降解产物获得，在生物体内广泛参与糖代谢、氨基酸代谢和脂质代谢[30]。鸟苷5′-单磷酸具有独特的香菇样鲜味和抗氧化活性，可以保护细胞免受活性自由基的侵害，促进肝功能恢复。*N*-乙酰基-*D*-葡萄糖胺是生物体内多种多糖的组成单位，可增强人体免疫力，抑制癌细胞或纤维细胞的过度生长。顺式-5,8,11,14-二十碳四烯酸即花生四烯酸，属于*n*-6系列的长链多不饱和脂肪酸，主要以磷脂的形式存在于哺乳动物的器官、肌肉和血液里，尤其是脑和神经组织中，是大脑功能和视网膜发育中必不可少的物质。花生四烯酸及其代谢产物在降血脂、抑制血小板聚集、抗炎症、抗癌、抗脂质氧化、促进脑组织发育等方面具有独特的生物活性[31]。吲哚存在于植物和微生物中[32]，可作为饲料添加剂[33]，而本实验选取的高邮鸭蛋采取核心养殖模式——湖区外放养，此模式下高邮鸭食用天然的高蛋白饵料，如鱼、虾、螺丝、蚌、水藻等，因此可能是造成吲哚在高邮鸭蛋清中未鉴定出的原因。

表5 蛋黄和蛋清差异化合物

Table 5 Differential compounds in egg yolk and egg white

分类	差异代谢物	质荷比（*m/z*）	保留时间/s	*P*	VIP	$\log_2$ FC
		蛋黄				
氨基酸	*D*-焦谷氨酸	130.049 3	126	0.026 965	1.911 9	1.034 3
	N-乙酰基-*L*-天冬氨酸	174.040 8	172.8	0.017 711	1.554 5	1.758 9
	L-蛋氨酸	148.060 6	88.2	0.026 677	1.286 9	1.118 0
	L-谷氨酰胺	145.062 4	91.8	0.000 012 5	1.836 9	−1.00 9
	L-天冬酰胺	131.046 2	86.4	0.002 216	1.806 8	−1.181 8
	*N*2,*N*5-二苯甲酰基-*L*-鸟氨酸	339.134 2	430.2	0.000 679 4	1.827 2	2.662 6
有机酸	柠檬酸	191.020 0	129.6	0.017 036	1.357 1	1.516 3
	16-羟基十六烷酸	271.226 8	586.2	0.011 682	1.822 6	2.495 0
脂类	5-羟基-6*E*,8*Z*,11*Z*,14*Z*-二十碳四烯酸	319.227 4	612	0.011 396	1.412 8	3.157 0
	2-(5-氧代戊酰基)磷脂酰胆碱	594.376 4	640.8	0.009 367 3	2.127 4	−2.257 9
	顺式-7-十六烯酸	253.216 5	700.8	0.037 723	1.595 1	1.189 3
	3-吲哚丙烯酸酯	186.055 9	354.6	0.000 000 0	2.402 8	2.685 1
	顺式-5,8,11-二十二碳三烯酸	305.248 0	750.6	0.016 16	1.767 6	1.791 6
	顺式-5,8,11,14-二十碳四烯酸	305.247 1	664.2	0.015 281	1.646 3	−2.376 2
	花生四烯酸酯	303.232 6	503.4	0.001 784 9	1.745 7	2.577 0
	3-酮鞘氨醇	298.273 4	501.6	0.002 946 9	2.167 3	1.552 4
核苷酸	尿苷5′-单磷酸	323.028 6	126	0.016 513	1.468 2	−3.809 9
	肌苷	267.073 5	304.2	0.035 568	1.329 1	−1.131 9
其他	5-异前列腺素-*F*2.α.-VI	353.232 5	462	0.000 200 2	1.963 6	3.367 4
	牛磺胆酸盐	514.284 1	424.2	0.006 754 4	1.476 8	1.336 0
	甘胆酸	464.301 3	455.4	0.028 734	1.655 6	1.663 1
	3-(4-羟基苯基)乳酸	181.050 4	357.6	0.002 465 6	2.323 4	−1.060 0
		蛋清				
氨基酸	烟酰胺	123.054 1	148.8	0.000 003 8	1.495 6	−3.084 2
	L-异亮氨酸	130.087 5	158.4	0.000 029 4	1.579 4	2.387 7
	L-缬氨酸	116.071 7	140.4	0.000 983	1.447 2	4.360 1
	L-酪氨酸	180.066 7	153.6	0.000 000 1	1.762 5	1.994 0
	L-蛋氨酸	150.057 7	145.2	0.000 041 8	1.483 5	2.927 1
	L-脯氨酸	116.070 4	112.2	0.000 000 9	1.563 7	2.586 7
	L-亮氨酸	132.101 5	186.6	0.014 409	1.203 4	4.432 8
	D-泛酸	218.103 7	355.8	0.000 158	1.526 7	1.543 6
	DL-苯丙氨酸	166.086 1	352.2	0.000 955	1.346 3	1.152 9
	L-苯丙氨酸	164.072 1	356.4	0.000 298	1.489 3	1.406 0
	L-焦谷氨酸	130.049 5	147	0.026 883	1.034 3	1.300 6
	L-色氨酸	203.082 7	378	0.002 815	1.344 3	1.871 7

续表5

分类	差异代谢物	质荷比（*m/z*）	保留时间/s	*P*	VIP	$\log_2$ FC
脂类	亚油酸	279.232 7	675.6	0.005 981	1.275 8	1.595 4
	顺式-5,8,11,14-二十碳四烯酸	303.232 8	659.4	0.022 983	1.116 1	1.763 2
	黄嘌呤	153.040 4	151.2	0.000 595	1.373 6	1.061 5
	甘油磷酸胆碱	258.109 9	104.4	0.000 153	1.421 7	1.464 1
核苷酸	胞苷酸	322.044 8	129.6	0.025 412	1.126 6	−1.427 0
	β-烟酰胺单核苷酸	335.063 6	127.8	0.003 334	1.261 1	−3.262 0
	D-核糖-5-磷酸	211.001 7	131.4	0.000 054 6	1.520 9	−2.463 9
	腺苷3-单磷酸	348.070 4	142.8	0.009 62	1.183 7	−2.308 1
	尿苷5′-单磷酸	325.042 9	146.4	0.000 371	1.398 1	−3.860 9
	鸟苷5′-单磷酸	362.050 9	162	0.000 009 2	1.594 4	−4.981 9
	尿苷单磷酸	323.029 3	150.6	0.000 021 9	1.578 8	−3.625 5
	β-二磷酸吡啶核苷酸	664.116 7	143.4	0.000 896	1.350 1	−2.673 2
	鸟苷5′-二磷酸	444.031 2	130.2	0.009 211	1.703 3	−1.173 4
	鸟苷5′-二磷酸-*α*-*D*-甘露糖	606.084 7	127.8	0.000 048	1.440 9	−4.046 6
	环磷酸腺苷核糖	540.053 1	151.2	0.003 013	1.338 6	−2.863 5
	腺苷5-单磷酸	346.055 5	149.4	0.000 010 7	1.606 7	−5.687 9
	尿嘧啶	113.034 2	148.8	0.003 396	1.256 4	1.049 0
	尿苷	245.076 4	148.8	0.000 552	1.377 7	1.451 9
	腺苷	268.103 6	332.4	0.003 998	1.259 1	−3.697 6
糖类	*N*-乙酰基-*D*-葡萄糖胺	222.097 2	115.8	0.001 209	1.948 7	−2.152 8
	D-果糖-6-磷酸	259.022 2	120	0.005 631	1.292 4	1.117 1
其他	乙酰-左旋肉碱	204.122 3	154.2	0.000 000 1	1.510 7	−4.960 5
	3-(3-羟基苯基)丙酸	165.055 7	412.2	0.000 020 2	1.590 2	2.245 4
	牛磺胆酸	514.283 0	427.8	0.002 064	1.468 6	3.112 1
	苯乙酰甘氨酸	192.066 9	403.2	0.002 044	1.402 6	3.530 2
	1-甲基腺苷	282.119 3	338.4	0.000 274	2.067 2	2.725 5
	吲哚	116.050 7	377.4	0.009 103	1.231 8	3.431 0
	β-甘油磷酸盐	171.006 3	111	0.000 049 2	1.563 1	1.489 5

3 结 论

本研究对高邮鸭蛋与其他5 种鸭蛋的常规蛋品质、基础营养指标及小分子代谢物进行测定，采用单变量统计与多变量统计相结合的方法进行分析，结果表明，高邮鸭蛋的蛋质量、蛋形指数、蛋黄色度、哈夫单位、蛋白高度、蛋黄指数均为最高；基础营养指标中，高邮鸭蛋的粗蛋白含量最高；氨基酸含量中，高邮鸭蛋的总氨基酸、鲜味氨基酸、支链氨基酸含量均为最高，利于人体吸收转化，适合健身人群及老年人群；高邮鸭蛋的不饱和脂肪酸含量最高，利于大脑发育和人体健康。代谢组学数据分析得到，蛋黄中筛选出差异化合物22 种，蛋清中40 种差异化合物。其中，花生四烯酸、尿苷5′-单磷酸、鸟苷5′-单磷酸、*N*-乙酰基-*D*-葡萄糖胺、吲哚为主要差异代谢物。花生四烯酸仅在高邮鸭蛋黄中发现，尿苷5′-单磷酸在高邮鸭蛋黄中的表达量显著高于其他品种鸭蛋（$P<0.05$），鸟苷5′-单磷酸和*N*-乙酰基-*D*-葡萄糖胺在高邮鸭蛋清中的表达量显著高于其他品种鸭蛋（$P<0.05$），且吲哚在高邮鸭蛋清中未检出。该研究从感官、基础营养指标和代谢组学层面比较了高邮鸭蛋与其他品种鸭蛋的品质指标，明确了高邮鸭蛋的特征品质指标并筛选出小分子差异代谢物质，可为后期高邮鸭蛋特征品质研究及分级评价提供一定的参考。

参考文献：

[1] 纪荣超, 吕海玲, 杨伟光, 等. 6 个不同品种鸭的蛋品质差异[J]. 农技服务, 2021, 38(12): 41-43. DOI:10.3969/j.issn.1004-8421.2021.12.njfw202112014.

[2] 陈雪莲. 高邮鸭蛋: 水乡的味道[J]. 中国质量万里行, 2008(12): 78-79.

[3] 孙义, 盛龙, 王晨, 等. 基于GC-MS比较3 种地方特色生鲜原料鸭蛋的脂肪酸和挥发性物质[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 344-351. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.06.060.

[4] 王珍珍, 芦治学, 屈元启, 等. 不同品种蛋鸭蛋品质比较分析[J]. 中国家禽, 2019, 41(12): 55-58. DOI:10.16372/j.issn.1004-6364.2019.12.012.

[5] 陶志云, 胡艳, 朱春红, 等. 鸭蛋中总氨基酸和游离氨基酸含量的比较分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 297-299. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2013.09.024.

[6] 许彦阳, 姚桂晓, 刘平香, 等. 代谢组学在农产品营养品质检测分析中的应用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3163-3176. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2019.18.009.

[7] BÖTTCHER C, KRÄHMER A, STÜRTZ M, et al. Comprehensive metabolite profiling of onion bulbs (*Allium cepa*) using liquid chromatography coupled with electrospray ionization quadrupole time-of-flight mass spectrometry[J]. Metabolomics, 2017, 13(4): 35. DOI:10.1007/s11306-017-1175-1.

[8] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[9] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[10] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[11] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中氨基酸的测定: GB 5009.124—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[12] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[13] 韩鹏, 徐廷生, 雷雪芹, 等. 缠丝鸭蛋蛋品质及营养成分测定[J]. 中国畜牧兽医, 2013, 40(7): 192-194. DOI:10.3969/j.issn.1671-7236.2013.07.046.

[14] 李洪林, 李维, 祖盘玉, 等. 平坝灰鹅蛋品质及营养成分的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(2): 60-62. DOI:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2017.04.0003.

[15] 王曜, 陈舜胜. 野生与养殖克氏原螯虾游离氨基酸的组成及比较研究[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 269-273. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201411054.

[16] FEDEWA M V, SPENCER S O, WILLIAMS T D, et al. Effect of branched-chain amino acid supplementation on muscle soreness following exercise: a meta-analysis[J]. International Journal for Vitamin and Nutrition Research, 2019, 89(5/6): 348-356. DOI:10.1024/0300-9831/a000543.

[17] TAKEUCHI I, YOSHIMURA Y, SHIMAZU S, et al. Effects of branched-chain amino acids and vitamin D supplementation on physical function, muscle mass and strength, and nutritional status in sarcopenic older adults undergoing hospital-based rehabilitation: a multicenter randomized controlled trial: BCAA and rehabilitation[J]. Geriatrics & Gerontology International, 2019, 19(1): 12-17. DOI:10.1111/ggi.13547.

[18] 庄红卫, 陈建华, 王森, 等. 不同种源五味子油化学组分的差异性分析[J]. 中国食品学报, 2014, 14(11): 237-251. DOI:10.16429/j.1009-7848.2014.11.042.

[19] 安苗, 姜海波, 姜志强, 等. 唇鲮肌肉中营养成分分析与品质评价[J]. 大连水产学院学报, 2010, 25(1): 88-92. DOI:10.16535/j.cnki.dlhyxb.2010.01.014.

[20] 刘跟生, 徐贵发. 单不饱和脂肪酸对心血管的保护作用[J]. 卫生研究, 2006, 35(3): 3. DOI:10.3969/j.issn.1000-8020.2006.03.019.

[21] 王辉敏, 李冠文, 杨金梅, 等. 多不饱和脂肪酸降脂作用机理的研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(5): 73-77. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220192.

[22] 唐丽君, 邓泽元, 范亚苇. 加工鸭蛋蛋黄脂类变化的GC分析[J]. 食品科学, 2006(12): 588-590. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2006.12.147.

[23] 赵晓喆, 赵思俊, 田俊生, 等. 基于^{1}H-NMR代谢组学比较不同品种海马化学成分差异性[J]. 中草药, 2018, 49(3): 536-543. DOI:10.7501/j.issn.0253-2670.2018.03.005.

[24] 白璐, 许晓双, 张福生, 等. 基于UPLC/Q-TOF MS代谢组学技术研究远志不同品种间的化学差异性[J]. 中药材, 2015, 38(9): 1819-1824. DOI:10.13863/j.issn1001-4454.2015.09.008.

[25] 范玛莉, 邢婕, 李震宇, 等. 基于NMR代谢组学技术的白芍与赤芍化学成分比较研究[J]. 中草药, 2014, 45(22): 3230-3237. DOI:10.7501/j.issn.0253-2670.2014.22.004.

[26] 汤丽华, 马雪梅, 张瑶, 等. 基于非靶向代谢组学分析不同品种宁夏枸杞差异性代谢物[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(24): 8083-8090. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.24.051.

[27] QUINTÁS G, PORTILLO N, GARCÍA-CAÑAVERAS J C, et al. Chemometric approaches to improve PLSDA model outcome for predicting human non-alcoholic fatty liver disease using UPLC-MS as a metabolic profiling tool[J]. Metabolomics, 2012, 8(1): 86-98. DOI:10.1007/s11306-011-0292-5.

[28] LIU H H, YANG Q L, GUO R, et al. Metabolomics reveals changes in the metabolite composition of duck eggs under the impact of long-term storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(11): 4647-4656. DOI:10.1002/jsfa.11825.

[29] DENG X M, SHANG H, CHEN J J, et al. Metabolomics combined with proteomics a novel interpretation of the changes in flavonoid glycosides during white tea processing[J]. Foods, 2022, 11(9): 1226. DOI:10.3390/foods11091226.

[30] 李彪, 吴信, 张彬, 等. 尿苷酸的营养代谢与生理功能研究进展[J]. 动物营养学报, 2019, 31(6): 2487-2494. DOI:10.3969/j.issn.1006-267X.2019.06.006.

[31] 杨朝霞, 张丽, 李朝阳. 花生四烯酸的营养保健功能[J]. 食品与药品, 2005(1): 69-71. DOI:10.3969/j.issn.1672-979X.2005.01.025.

[32] KIM J, PARK W. Indole: a signaling molecule or a mere metabolic byproduct that alters bacterial physiology at a high concentration[J]. Journal of Microbiology, 2015, 53(7): 421-428. DOI:10.1007/s12275-015-5273-3.

[33] 李巨银, 闫伟, 周根来, 等. 吲哚对高邮鸭肠形态和盲肠菌群的影响[J]. 饲料研究, 2022, 45(21): 44-49. DOI:10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2022.21.009.