彭丽君, 刘云鹤, 黄峰, 等. 不同热加工-复热方式组合对鸡肉关键营养组分与氧化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 167−179. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030391

PENG Lijun, LIU Yunhe, HUANG Feng, et al. Effects of Different Combinations of Heat Processing-reheating Methods on Key Nutrient Components and Oxidation Characteristics of Chicken[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 167−179. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030391

· 研究与探讨 ·

不同热加工-复热方式组合对鸡肉关键营养组分与氧化特性的影响

彭丽君[1,2], 刘云鹤[2], 黄　峰[2], 徐丽娜[2], 李　东[1,*], 张春晖[2,*]

（1.四川轻化工大学生物工程学院, 四川 宜宾 644005;
2.中国农业科学院农产品加工所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193）

摘　要: 本研究采用蒸、烤、炸三种加工方式与水浴、微波两种复热方式的组合实验设计，结合正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA），系统比较不同加工-复热组合对鸡胸肉营养与氧化特性的影响，以了解鸡胸肉营养与氧化变化规律。结果表明，在不同加工方式下，炸制鸡胸肉的硫代巴比妥酸反应物质含量显著高于蒸制与烤制鸡胸肉（$P<0.05$），α-螺旋含量降低、β-折叠含量增加，维生素 E 损失率低（12.90%~27.96%），且保留了更多的 C18:1n-9c、C18:2n-6c、C20:0、C18:3n-6、C18:3n-3、C22:0、C23:0、C20:5n-3 等脂肪酸（$P<0.05$）；蒸制与烤制的蛋白质含量、维生素 B_6 含量及 C12:0、C20:1 等脂肪酸、羰基含量显著高于炸制（$P<0.05$），其游离巯基含量显著低于炸制（$P<0.05$）。对比不同复热方式，蒸制-微波复热组合、烤制-微波组合的必需氨基酸与总氨基酸的比值、必需氨基酸与非必需氨基酸的比值、多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比值、维生素 B_1、维生素 B_6、维生素 E 等含量显著高于蒸制-水浴复热组合、烤制-水浴组合，而炸制组合反之（$P<0.05$）。综上，炸制保留了更多的脂肪酸及脂溶性维生素，而蒸制与烤制保留了更多的蛋白质、水溶性维生素、稳定的饱和脂肪酸与相对稳定的单不饱和脂肪酸；从保持营养关键成分的角度分析，蒸制与烤制鸡胸肉适合微波复热，炸制鸡胸肉适合水浴复热。研究结果有助于了解鸡胸肉加工-复热过程中营养成分及氧化变化，从而为健康饮食的加工及复热方法提供科学的建议。

关键词: 鸡胸肉, 加工, 复热, 营养, 氧化

中图分类号: TS251.55　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0167−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030391

本文网刊:

Effects of Different Combinations of Heat Processing-reheating Methods on Key Nutrient Components and Oxidation Characteristics of Chicken

PENG Lijun[1,2], LIU Yunhe[2], HUANG Feng[2], XU Lina[2], LI Dong[1,*], ZHANG Chunhui[2,*]

（1.College of Biological Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005, China;
2.Chinese Academy of Agricultural Sciences, Institute of Food Science and Technology, Comprehensive Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China）

Abstract: This study systematically investigated the effects of different cooking-reheating combinations (steaming, roasting, frying coupled with water bath or microwave reheating) on the nutritional and oxidative profiles of chicken breast using orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA). Results demonstrated that frying significantly

收稿日期: 2025−04−01

基金项目: 山东省重点研发计划（重大科技创新工程）项目（2023CXGC010712）。

作者简介: 彭丽君（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: 2170039715@qq.com。

*** 通信作者:** 李东（1982−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品精深加工与功能性食品开发, E-mail: 4469344@qq.com。

张春晖（1971−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品科学, E-mail: dr_zch@163.com。

elevated thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) levels compared to steaming and roasting (P<0.05), accompanied by reduced α-helix and increased β-sheet content in proteins. Fried samples exhibited lower vitamin E loss (12.90%~27.96%) and retained higher levels of key fatty acids, including C18:1n-9c, C18:2n-6c, C20:0, C18:3n-6, C18:3n-3, C22:0, C23:0, and C20:5n-3 (P<0.05). In contrast, steamed and roasted samples showed superior protein content, vitamin B_6 retention, and elevated levels of C12:0 and C20:1 fatty acids, alongside higher protein carbonyls and lower free sulfhydryl groups versus fried samples (P<0.05). Regarding reheating, microwave synergistic steam or roast reheated samples displayed significantly higher ratios of essential to total amino acids (EAA/TAA), essential to non-essential amino acids (EAA/NEAA), polyunsaturated to saturated fatty acids (PUFA/SFA), and greater retention of vitamins B_1, B_6, and E compared to water bath-reheated counterparts (P<0.05). Conversely, fried chicken breast retained higher nutritional quality when reheated via a water bath. Collectively, frying better preserves fatty acids and fat-soluble vitamins, while steaming and roasting favor protein integrity, water-soluble vitamins, and stable saturated/monounsaturated fatty acids. From the perspective of preserving key nutritional components, microwave reheating is recommended for steamed or roasted chicken breast, whereas water bath reheating optimizes fried samples. These findings elucidate the nutritional and oxidative dynamics during cooking-reheating processes, offering science-based insights that will enlighten and inform professionals about healthier dietary practices.

Key words: chicken breast; cooking processing; reheating; nutritional quality; oxidation dynamics

鸡肉具有“一高三低”的特点[1],广受消费者喜爱。我国鸡肉生产量已达世界第二位[2]。热加工影响食品的风味和营养,复热促进风味物质的释放[3],而热加工-复热双重处理体系对产品的最终品质起到了决定性作用。蒸、烤、炸是分别以水蒸气、热空气、油为传热介质的典型热加工方式,水浴复热与微波复热是食品加工中两种普遍且省时的方法。不同的热处理方式会因传热介质、时间和温度的差异,导致营养成分发生变化[4]。Li 等[5] 研究表明,牛肉经过微波、煮制、蒸制再使用相同的方式进行复热,煮制复热后的游离氨基酸含量显著高于其他方式,其增长了 9.15%。

在肉类加工及复热过程中,蛋白质与脂质氧化也会对其营养价值产生影响。蒸制过程中的水蒸气会覆盖在肉表面,形成水膜屏障,从而减少了空气中氧气与肉表面直接接触,发生非酶促氧化反应[6];烤制过程中的热空气导致肉表面快速脱水,形成多孔或干燥层,氧气渗透至内部组织,发生非酶促氧化反应[7];炸制过程中的油进入肉的表面和孔隙,与肉中内源性脂质混合,发生油脂氧化与非酶促氧化反应[8]。Dong 等[9] 研究发现,蒸制鲑鱼的脂肪氧化降解,脂肪酸和甘油二酯含量的降低,改善脂肪酸的比例。Li 等[10] 研究表明,直接烘烤的羊肉硫代巴比妥酸反应物质和羰基含量增加,同时饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸及氨基酸(如赖氨酸、谷氨酸、天冬氨酸)含量较高,营养价值更高。Sun 等[11] 对猪肉经过煮、炸、烤后再使用相同(煮、炸、烤)的方式进行复热,其中烤制的氧化程度(脂肪氧化、蛋白氧化)最高。Mei 等[12] 发现红烧肉在蒸制-微波复热组合后抑制了蛋白质氧化、脂质氧化和美拉德反应,且呈现出最佳的口感特性。综上,现有研究主要集中在同源复热策略(如烤制后再烤制复热),而对不同加工-复热方式结合,特别是不同传热介质对营养与氧化变化研究较少。

本研究旨在突破传统单一阶段研究范式,构建加工方式(蒸、烤、炸)-复热方式(水浴、微波)组合实验设计,系统解析工艺参数(温度、时间、介质)对营养成分(蛋白质、脂肪、氨基酸、脂肪酸等)与氧化稳定性(TBARS 值、羰基含量、巯基含量等)的影响。这为肉类营养的保持及后续不同加工-复热的消化与吸收的研究奠定基础,进一步为消费者、企业提供更好的科学饮食、营养选择与更优良高端的鸡肉产品开发建议。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷鲜白羽鸡胸肉 北京聚雪福商贸有限公司,40~45 日龄,净重(260±10)g;金龙鱼大豆油(食品级)、食盐(食品级) 北京幸福荣耀超市;ACCQ-Tag 氨基酸试剂包 美国 Waters 公司;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、尿素 分析纯,北京广达恒益科技有限公司;盐酸胍 分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;乙酸乙酯、2-硝基苯甲酸等 分析纯,生工生物工程(上海)股份有限公司;甲醇、石油醚、氢氧化钠、硼酸等 分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

K9840 自动凯氏定氮仪 海能未来技术集团股份有限公司;DH-101-3BS 电热恒温鼓风干燥箱 天津市中环实验电炉有限公司;ST1004 多路温度测定仪 东莞万创电子制品有限公司;Agilent 6545 Q-TOF 液相色谱-质谱联用仪 美国安捷伦科技有限公司;MOS-500 圆二色光谱仪 法国 Bio-Logic 公司;M1-L213C 微波炉 广东美的厨房电器制造有限公司;iX6U 光波烤箱 格兰仕集团有限公司;Thermo TRACE GC ULTRA 气相色谱仪(检测器为 FID)、Agilent 1260 Ⅱ 高效液相色谱仪 安捷伦科技有限公司;SCIEX ExionLC™ 超高效液相色谱仪 美国 SCIEX 公司;LC-20A 岛津高效液相色谱仪 日本岛津有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　原料肉处理　取市售鸡胸肉去除脂肪与结缔组织，切成 1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm 规格肉块（约 4±0.5 g），随机分为 4 组。每组 4 个样本，加入 1.5% 氯化钠腌制 20 min，进行不同的加工及复热处理。

1.2.2　鸡胸肉热加工　参考 Yang 等[13] 与 Luo 等[14] 方法，并稍作修改。对照（CK），不进行加热处理；蒸（Stewed, ST），用 500 W 电磁炉密封蒸制；烤（Roasted, RO），鸡胸肉在预热至 200 ℃ 的烤箱中烤制；炸（Fried, FR），鸡胸肉在预热至 180 ℃ 的油炸锅中炸制。各组均加热至中心温度 72 ℃（多路温度测定仪测定中心温度）后立即冷水冷却，一部分用于理化指标的测定（测定的结果以干基计），一部分真空包装后在−18 ℃ 贮藏 7 d。

1.2.3　鸡胸肉复热　贮藏后的样品分别进行沸水浴（Boiling Reheat, BR）和微波（Microwave Reheat, MR, 2450 MHz、700 W）复热至中心温度 72 ℃，冷却后测定理化指标（干基计）。

1.2.4　关键营养成分的测定

1.2.4.1　蛋白质含量的测定　鸡胸肉的蛋白质含量根据美国分析家协会（Association of Official Analytical Chemists, AOAC）方法的 955.04[15] 进行测定。

1.2.4.2　游离氨基酸含量的测定　参考 Gao 等[16] 方法，稍作修改。称取 5 g 经过热处理与复热后的鸡胸肉样品，加入 20 mL 超纯水冰浴匀浆 3 次（14000 r/min, 10 s/次，间隔 10 s），再加入 20 mL 5%（V/V）三氯乙酸溶液摇匀混匀，并在 4 ℃ 放置 12 h，收集上清液，用 4 mol/L KOH 调 pH 至 6.0，转移至 50 mL 容量瓶中定容，过 0.45 μm 的膜，备用。衍生管中加入 10 μL 滤液、70 μL AccQ Fluor Buffer、20 μL 现配的 AccQ Fluor 衍生剂，持续涡旋振荡混合 10 s，室温平衡 1 min 后 55 ℃ 反应 10 min 取出待测。液相色谱参数条件：Nova-Pak 色谱柱 C18（3.9 mm×150 mm, 4 μm）；AccQ Tag A-水溶液（1∶10, v/v）；柱温维持 37 ℃；紫外检测器波长设置为 248 nm；进样量为 10 μL。洗脱程序如表 1 所示。

表 1　氨基酸洗脱程序
Table 1　Elution program of amino acids

时间（min）	体积分数（%）			流速（mL/min）
	流动相A	流动相B	流动相C	
0.00	100.0	0.0	0.0	1.0
17.00	91.0	5.4	3.6	1.0
24.00	80.0	17.0	3.0	1.0
32.00	68.0	20.0	12.0	1.0
45.00	68.0	20.0	12.0	1.0
46.00	0.0	60.0	40.0	1.0
49.00	100.0	0.0	0.0	1.0
56.00	100.0	0.0	0.0	1.0

1.2.4.3　脂肪及脂肪酸含量的测定　脂肪含量参照 Bligh 等[17] 方法进行测定。参考 Tan 等[18] 方法测定脂肪酸的含量。称取 5 g 经热加工及复热后的鸡胸肉样品，对其进行水解-提取并定量。用带有火焰离子化检测器的气相色谱仪对脂肪酸甲酯进行定量、熔融石英毛细管柱（0.25 mm×100 m, Supelco SPTM-2362）实现分离。柱温箱温度从 100 ℃ 提高到 230 ℃，进样器和检测器温度分别设置为 270 ℃ 和 280 ℃。使用氮气作为载气，流速为 0.6 mL/min，进样量为 1.0 μL。通过保留时间与已知标准品进行比较来定性与定量。

1.2.4.4　维生素 B_1、B_6 含量的测定　不同加工及复热后鸡胸肉样品中维生素 B_1 的测定参考 Yoshida 等[19] 方法。称取 4.00 g 处理后的样品，对其进行提取与衍生化并定量。为了定量硫胺素，使用带有荧光检测器的液相色谱仪、C_{18} 反向色色谱柱（粒径 5 μm, 250 mm×4.6 mm）。液相色谱参数条件：激发波长与发射波长分别为 375、435 nm，流速为 1.0 mL/min，进样量为 20 μL。

不同加工及复热后鸡胸肉样品中维生素 B_6 的测定参考 Bergaentzlé 等[20] 方法。液相色谱-串联质谱参数条件：称取 2.00 g 处理后的样品，对其进行提取、衍生化、定量。定量使用带有电喷雾离子源的液相色谱-串联质谱仪、硅胶基质五氟苯基柱（粒径 1.8 μm, 3.0 mm×150 mm）。液相色谱-串联质谱参数条件：激发波长与发射波长分别为 375、435 nm，色谱柱温为 30 ℃、流速为 0.4 mL/min、进样量为 10 μL；质谱电离方式为 ESI^+、监测方式为多反应监测、毛细管电压为 3.10 kV、锥孔电压为 30 V、离子源温度为 150 ℃、锥孔反吹气流量为 150 L/h、脱溶剂气温度为 350 ℃、脱溶剂气流量为 600 L/h。

1.2.4.5　维生素 E 含量的测定　不同加工及复热后鸡胸肉样品中维生素 E 的测定参考 Woollard 等[21] 方法。对热加工及复热处理后的样品经提取、浓缩后，用含有荧光检测器的正向高效液相色谱仪定量、酰氨基柱（柱长 150 mm，内径 3.0 mm，粒径 1.7 μm）分离。激发波长与发射波长分别为 294、328 nm，柱温为 30 ℃，流速为 1.0 mL/min，进样量为 10 μL。通过保留时间与 α、β、γ、δ-生育酚标准品进行比较来定性与定量。

1.2.5　蛋白质与脂肪氧化指标的测定

1.2.5.1　羰基及游离巯基含量的测定　羰基含量的测定参考 Wang 等[22] 的方法并稍作修改。称取 0.8 g 经热加工及热处理的鸡胸肉于 4 mL 20 mmol/L 磷酸盐缓冲液（pH6.5，含 0.6 mol/L NaCl）中进行匀浆（11000 r/min, 10 s, 3 次），4 ℃ 离心 10 min（10000 r/min），移取上清液 400 μL，加入含 10 mmol/L 2,4-二硝基苯肼（2,4-Dinitrophenylhydrazine, DNPH）的 200 μL 2 mol/L HCl，30 ℃ 避光反应 1 h。加 1 mL 40% 三氯乙酸（Trichloroacetic Acid, TCA）沉淀蛋白，静置 20 min 后离心 15 min，弃去上清液，用 1 mL 乙酸乙酯-乙醇溶液（1∶1, V/V）洗涤沉淀以除

去未反应的 DNPH，重复上述步骤至上清液无色，用 3 mL 6 mol/L 盐酸胍溶液溶解蛋白，沉淀完全溶解后在 370 nm 波长处测吸光度，用 BCA 试剂盒测定各处理组的蛋白浓度。按式(1)计算羰基含量：

$$羰基值(nmol/g)=\frac{A_{370}\times n\times 10^6}{C\times 22000} \quad 式（1）$$

式中，A_{370} 为 370 nm 波长处的吸光度值；n 为溶液的稀释倍数；C 为样品中蛋白质浓度(mg/mL)；22000 L/(mol·cm) 为摩尔消光系数。

游离巯基(free sulfhydryl groups, SH)含量的测定参照 Liu 等[23] 的方法测定并稍作修改。称取 150 mg 经热加工及复热处理的冻干鸡胸肉，加入 2 mL Tris-甘氨酸缓冲液(含 4.43 mmol/L 乙二胺四乙酸二钠、0.16 mol/L 尿素、0.1 mol/L 盐酸胍缓冲液，pH8.0)，振荡 1 h，常温离心 15 min(10000 r/min)。移取 0.5 mL 混合液与 20 μL 的 4 mg/mL5,5′-二硫双-2-硝基苯甲酸(5,5'-Dithiobis-2-Nitrobenzoic Acid, DTNB)振荡，在 25 ℃ 避光反应 30 min，再次离心 15 min 取上清液，在 412 nm 处测定。按式(2)计算游离巯基的含量：

$$C_{SH}(\mu mol/g)=\frac{10^6\times A_{412}\times D}{13600\times \rho} \quad 式（2）$$

式中，C_{SH} 为游离巯基含量(μmol/g)；A_{412} 为 412 nm 波长处的吸光度值；D 为溶液的稀释倍数；ρ 为样品中蛋白质浓度(mg/mL)；13600 L/(mol·cm) 为摩尔消光系数。

1.2.5.2 蛋白质二级结构测定 参照 Yuan 等[24] 的方法测定蛋白质二级结构。用 5 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液(pH7.0)作空白，并调整蛋白浓度为 0.5 mg/mL。将光程 0.1 mm 的石英比色皿放置在 MOS-500 圆二色光谱(Circular Dichroism, CD)内进行扫描(190~260 nm)。具体参数设定如下：扫描速度 100 nm/min、响应时间 1.0 s。最后，蛋白质的二级结构含量用 CDNN 软件进行计算。

1.2.5.3 硫代巴比妥酸反应物质(Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)的测定 参照 Manzoor[25] 方法，经三氯乙酸提取，建立标曲 y=0.6143x+0.0005(R^2=0.9996)并定量，结果以 mg MDA/kg 表示。

1.3 数据处理

所有实验平行测定 3 次，所有数据均以平均值±标准差(Standard Deviation, SD)表示；采用 IBM SPSS Statistics 27 软件对数据进行差异显著性分析，当 P<0.05 时不同样品之间存在显著差异；用 Origin 2022、SIMCA 14、GraphPad Prism 9 对数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同加工-复热方式组合对鸡胸肉关键营养组分的影响

2.1.1 蛋白质含量的变化 蛋白质是鸡胸肉中主要的营养成分，不同加工复热方式的鸡胸肉蛋白质含量变化见表 2，原料肉的蛋白质含量为 90.72 g/100 g(干基)。在不同加工方式下，蒸制、烤制的鸡胸肉蛋白含量显著高于炸制(P<0.05)，炸制鸡胸肉的蛋白质含量在热加工、水浴复热、微波复热后分别降低了 11.12%、10.43%、12.11%。这可能是因为炸制过程中油的传热速率高使其快速升温与蛋白质氧化改变了蛋白质的结构，暴露更多的切割位点，水溶性蛋白更易随着大量水分流失而损失或炸制高温低水分的环境使蛋白质参与非酶促褐变反应[26]。

Tonfack 等[27] 在蒸煮、油炸过程中得到了类似的结果。在不同加工阶段，鸡胸肉经热加工、加工-复热(水浴、微波)组合的蛋白质含量都没有显著差异(P>0.05)，说明水浴复热及微波复热几乎不会造成不同加工方式的鸡胸肉中蛋白质的流失。

2.1.2 游离氨基酸含量的变化 氨基酸是鸡胸肉中的重要营养物质，其中游离氨基酸更易于吸收，其数量及比例会影响蛋白质的营养价值。必需氨基酸与总氨基酸的比值(Essential Amino Acids/Total Amino Acids, EAA/TAA)、必需氨基酸与非必需氨基酸的比值(Essential Amino Acids/Non-Essential Amino Acids, EAA/NEAA)都是蛋白质质量的重要评价指标。表 3 与图 1 显示了不同加工复热方式的鸡胸肉氨基酸含量变化，在不同加工方式及加工阶段，苏氨酸(必需氨基酸)的含量显著高于其他氨基酸(P<0.05)，在 501.93~766.39 mg/100 g 范围内变化。苏氨酸对蛋白质合成、能量代谢和营养吸收具有重要的介导作用，可以促进生长发育、增强免疫功能、维持肠道健康。在不同加工方式下，蒸制、炸制的鸡胸肉 EAA/TAA、EAA/NEAA 比值略高于烤制，但没有显著性差异(P>0.05)。烤制鸡胸肉的脯氨酸、

表 2 不同加工与复热组合的鸡胸肉的营养成分变化

Table 2 Changes in nutrient content of chicken breasts with different combinations of processing and reheating

营养成分(以干基计)	RW-ST	RW-RO	RW-FR	HE-ST	HE-RO	HE-FR	BR-ST	BR-RO	BR-FR	MR-ST	MR-RO	MR-FR
水分(%)	74.23 ± 0.27^{Aa}	74.23 ± 0.27^{Aa}	74.23 ± 0.27^{Aa}	71.01 ± 0.25^{Ba}	70.55 ± 0.18^{Ba}	62.44 ± 0.32^{Bb}	63.46 ± 0.24^{Db}	64.12 ± 0.03^{Da}	57.91 ± 0.11^{Cc}	68.83 ± 0.27^{Ca}	66.39 ± 0.31^{Cb}	57.01 ± 0.16^{Dc}
蛋白质(g/100 g)	90.72 ± 2.82^{Aa}	90.72 ± 2.82^{Aa}	90.72 ± 2.82^{Aa}	89.4 ± 0.58^{Aa}	85.96 ± 2.07^{Ab}	80.63 ± 0.78^{Bc}	88.15 ± 0.44^{Aa}	89.07 ± 0.57^{Aa}	81.26 ± 1.29^{Bb}	91.03 ± 4.82^{Aa}	87.46 ± 2.36^{Aa}	79.73 ± 1.35^{Bb}
脂肪(g/100 g)	0.88 ± 0.38^{Ca}	0.88 ± 0.38^{Da}	0.88 ± 0.38^{Ca}	0.72 ± 0.15^{Cc}	2.01 ± 0.33^{Cb}	11.57 ± 1.02^{Aa}	4.26 ± 0.10^{Ac}	5.14 ± 0.31^{Ab}	10.61 ± 0.26^{Aba}	2.72 ± 0.34^{Bb}	3.17 ± 0.39^{Bb}	10.35 ± 0.61^{Ba}
维生素B_1(μg/100 g)	28.43 ± 0.01^{Aa}	28.43 ± 0.01^{Ba}	28.43 ± 0.01^{Aa}	26.18 ± 0.01^{Bb}	29.09 ± 0.01^{Aa}	21.04 ± 0.01^{Cc}	20.61 ± 0.00^{Dc}	23.47 ± 0.28^{Ca}	21.68 ± 0.01^{Bb}	25.37 ± 0.01^{Cb}	28.47 ± 0.01^{Ba}	20.42 ± 0.00^{Dc}
维生B_6(mg/kg)	6.73 ± 0.49^{Aa}	6.73 ± 0.49^{Ba}	6.73 ± 0.49^{Aa}	5.48 ± 0.1^{Bb}	8.82 ± 0.34^{Aa}	1.15 ± 0.02^{Bc}	1.51 ± 0.07^{Db}	2.68 ± 0.11^{Ca}	0.34 ± 0.01^{Cc}	3.01 ± 0.10^{Cb}	6.33 ± 0.10^{Ba}	0.75 ± 0.03^{BCc}
维生素E(mg α-TE/100 g)	0.49 ± 0.03^{Aa}	0.49 ± 0.03^{Ba}	0.49 ± 0.03^{Da}	0.4 ± 0.01^{Bc}	0.66 ± 0.01^{Ab}	1.86 ± 0.04^{Aa}	0.16 ± 0.00^{Cc}	0.34 ± 0.01^{Cb}	1.34 ± 0.02^{Ca}	0.18 ± 0.01^{Cc}	0.51 ± 0.01^{Bb}	1.62 ± 0.03^{Ba}

注：同一行大写字母不同表示同一加工方式不同加工阶段之间差异显著，同一行小写字母不同表示同一加工阶段不同加工方式之间差异显著(P<0.05)；表3~表4相同。

表 3　不同加工与复热组合的鸡胸肉氨基酸含量变化

Table 3　Changes in amino acid content of chicken breasts with different combinations of processing and reheating

氨基酸种类	含量(mg/100 g)(以干基计)											
	RW-ST	RW-RO	RW-FR	HE-ST	HE-RO	HE-FR	BR-ST	BR-RO	BR-FR	MR-ST	MR-RO	MR-FR
天门冬氨酸	169.99±8.89^{Aa}	169.99±8.89^{Aa}	169.99±8.89^{Aa}	106.4±20.53^{Ba}	61±2.76^{Bb}	37.16±9.78^{Bb}	57.99±15.1^{Ca}	55.06±10.83^{Ba}	48.83±10.63^{Ba}	36.19±10.87^{Ca}	68.76±21.32^{Ba}	46.42±16.76^{Ba}
丝氨酸	37.32±4.11^{Ca}	37.32±4.11^{Ca}	37.32±4.11^{Aa}	79.54±20.42^{ABa}	99.7±0.73^{Aa}	74.86±23.93^{Ba}	61.25±9.22^{Ba}	76.33±5.23^{Ba}	82.35±14.24^{Ba}	84.34±4.86^{Aa}	97.5±10.48^{Aa}	79.69±11.45^{Ba}
谷氨酸	90.43±7.91^{Ba}	90.43±7.91^{Ca}	90.43±7.91^{Ca}	128.08±33.72^{Aa}	172.69±4.58^{Aa}	167.22±39.93^{Aa}	82.44±0.07^{Bb}	131.57±13.65^{Ba}	119.09±3.18^{BCa}	130.6±7.74^{Ab}	162.83±3.91^{Aa}	136.22±0.55^{ABb}
甘氨酸	97.07±4.97^{Aa}	97.07±4.97^{Aa}	97.07±4.97^{Aa}	69.24±18.37^{Ba}	73.71±11.67^{Ba}	60.03±12.41^{Ba}	55.35±11.87^{Ba}	70.14±4.38^{Ba}	63.67±4.72^{Ba}	64.34±3.99^{Bb}	76.24±3.16^{Ba}	70.17±3.91^{Bab}
组氨酸	139.71±8.61^{Aa}	139.71±8.61^{Aa}	139.71±8.61^{Aa}	110.97±22.17^{Bab}	130.98±25.05^{Aa}	84.91±14.46^{Bb}	85.13±5.95^{Ca}	95.68±13.85^{Ba}	80.6±3.79^{Ba}	110.06±10.86^{BCb}	130.9±4.97^{Aa}	95.74±8.08^{Bb}
精氨酸	489.69±46.65^{Aba}	489.69±46.65^{BCa}	489.69±46.65^{Aa}	532.13±28.93^{Aab}	556.89±4.02^{Aa}	498.88±9.08^{Ab}	357.13±7.1^{Cc}	473.92±19.62^{Ca}	429.28±17.45^{Bb}	448.86±6.14^{Bb}	542.77±22.51^{Aba}	434.35±20.43^{Bb}
苏氨酸▲	672.8±53.5^{Ba}	672.8±53.5^{Ba}	672.8±53.5^{Aa}	766.39±6.64^{Ab}	744.59±20.94^{Aa}	692.96±25.78^{Ab}	501.93±19.95^{Cc}	553.08±3.99^{Cb}	606.98±17.6^{Ba}	626.31±5.41^{Bb}	737.55±31.78^{Aa}	602.62±10.92^{Bb}
丙氨酸	152.72±7.54^{Aa}	152.72±7.54^{Aa}	152.72±7.54^{Aa}	126.76±6.02^{Ba}	113.86±33.41^{Ba}	95.36±21.54^{Ba}	80.97±7.9^{Db}	111.61±13.16^{Ba}	94.37±1.79^{Bab}	105.93±7.96^{Cb}	130.36±4.71^{ABa}	94.9±12.37^{Bb}
脯氨酸	30.62±10.86^{Aa}	30.62±10.86^{Ba}	30.62±10.86^{Aa}	43±19.41^{Aa}	45.21±11.03^{ABa}	36.99±7.84^{Aa}	29.62±0.79^{Ab}	38.25±3.57^{ABa}	32.31±0.21^{Ab}	38.86±2.27^{Ab}	47.89±1.77^{Aa}	34.32±3.59^{Ab}
半胱氨酸	7.65±2.52^{Aa}	7.65±2.52^{Ba}	7.65±2.52^{Aa}	8.12±3.49^{Aa}	12.37±5.94^{ABa}	7.77±2.61^{Aa}	9.98±6.87^{Aa}	11.9±2^{ABa}	8.93±0.62^{Aa}	7.6±1.36^{Ab}	15.77±1.13^{Aa}	9.35±2.48^{Ab}
酪氨酸	50.76±3.24^{Aa}	50.76±3.24^{Aa}	50.76±3.24^{Aa}	15.94±2.63^{Ba}	9.23±1.55^{Cb}	17.73±1.18^{Ba}	13.79±1.01^{BCa}	13.55±0.75^{Ba}	14.87±0.2^{Ba}	11.61±0.96^{Cb}	7.18±1.47^{Cc}	16.52±1.65^{Ba}
缬氨酸▲	4.48±0.88^{Aa}	4.48±0.88^{Aa}	4.48±0.88^{Aa}	4.06±0.48^{ABa}	3.85±0.18^{Aa}	3.25±0.74^{ABa}	11.13±14.09^{Ba}	3.59±0.38^{ABa}	3.03±0.65^{Ba}	3.65±0.25^{ABa}	3.43±0.33^{Aa}	2.67±0.41^{Bb}
蛋氨酸▲	102.14±12.56^{Aa}	102.14±12.56^{Aa}	102.14±12.56^{Aa}	70.16±20.01^{Ba}	78.21±17.23^{Ba}	58.77±11.32^{Ba}	54.69±4.42^{Bb}	70.03±4.90^{Ba}	58.06±2.16^{Bb}	69.78±4.27^{Bb}	84.73±3.64^{ABa}	60.44±5.88^{Bc}
赖氨酸▲	76.15±4.30^{Aa}	76.15±4.30^{Aa}	76.15±4.30^{Ba}	76.34±33.29^{Aa}	77.47±25.01^{Aa}	106.61±7.11^{Aa}	60.02±1.90^{Aa}	82.00±8.20^{Aa}	80.41±18.01^{ABa}	75.85±5.52^{Aa}	81.13±4.13^{Aa}	78.43±17.26^{Ba}
异亮氨酸▲	47.11±4.42^{Aa}	47.11±4.42^{Aa}	47.11±4.42^{Aa}	33.55±9.92^{Ba}	36.45±9.26^{ABa}	27.42±5.09^{Ba}	25.03±0.96^{Bb}	33.19±3.99^{Ba}	27.08±1.03^{Bb}	31.65±1.01^{Ba}	40.18±3.17^{ABa}	29.07±3.03^{Ba}
亮氨酸▲	84.8±6.16^{Aa}	84.8±6.16^{Aa}	84.8±6.16^{Aa}	63.76±19.76^{ABa}	68.16±17.57^{ABa}	53.85±10.2^{Ba}	47.78±1.71^{Bb}	62.67±7.16^{Ba}	52.69±1.46^{Bb}	66.15±9.59^{ABab}	75.18±5.61^{ABa}	56.61±5.56^{Bb}
苯丙氨酸▲	48.52±9.87^{Aa}	48.52±9.87^{Aa}	48.52±9.87^{Aa}	41.34±8.67^{Aa}	43.57±7.59^{ABa}	30.94±2.47^{Ba}	25.29±0.74^{Bb}	32.56±2.37^{Ba}	30.74±4.08^{Bab}	36.91±4.73^{Aba}	42.35±2.11^{ABa}	35.45±3.74^{Ba}
EAA/TAA(%)	45.01±0.6^{Ba}	45.01±0.6^{ABa}	45.01±0.6^{Ba}	46.4±0.58^{Aab}	45.18±0.6^{ABb}	47.42±1.18^{Aa}	46.26±0.72^{Aa}	43.74±1.05^{Bb}	46.86±0.48^{ABa}	46.72±0.23^{Aa}	45.4±0.56^{Aa}	45.98±1.19^{ABa}
EAA/NEAA(%)	81.88±1.99^{Ba}	81.88±1.99^{ABa}	81.88±1.99^{Ba}	86.59±2^{Aab}	82.43±2^{ABb}	90.26±4.26^{Aa}	86.1±2.51^{Aa}	77.8±3.31^{Bb}	88.18±1.68^{ABa}	87.67±0.8^{Aa}	83.17±1.87^{Aa}	85.18±4.1^{ABa}

注：▲.必需氨基酸.

丙氨酸、组氨酸等非必需氨基酸的含量较高是其原因之一。蒸、烤、炸分别以水蒸气、热空气、油为传热介质进行热加工，氨基酸残基在不同烹饪介质、温度和时间下的不同修饰程度可能是蛋白质质量差异的主要原因[28]。在不同加工阶段，不同加工-复热组合后鸡胸肉的 EAA/TAA、EAA/NEAA 比值无显著差异（P>0.05），而烤制-微波复热组合（MR-RO）的鸡胸肉 EAA/TAA、EAA/NEAA 比值显著高于烤制-水浴复热组合（BR-RO）（P<0.05），说明不同的加工方式对复热过程中蛋白质质量的变化影响较小，而不同的复热方式会对特定加工方式（烤）的蛋白质量产生影响。

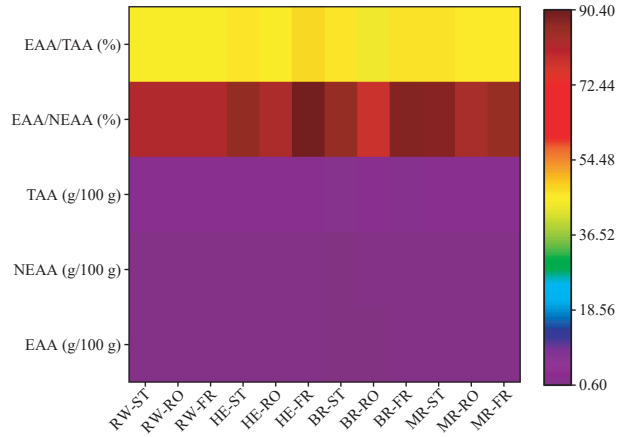


图 1 不同加工与复热组合的鸡胸肉必需氨基酸（EAA）、非必需氨基酸（NEAA）和总氨基酸（TAA）比例的变化

Fig.1 Changes in the ratios of essential amino acids (EAAs), non-essential amino acids (NEAAs) and total amino acids (TAAs) in chicken breast meat with different combinations of processing and reheating

注：RW-ST、RW-RO、RW-FR 都代表原料肉，HE-ST、HE-RO、HE-FR、BR-ST、BR-RO、BR-FR、MR-ST、MR-RO、MR-FR 分别代表热加工阶段的蒸制、热加工阶段的烤制、热加工阶段的炸制、蒸制-水浴复热组合、烤制-水浴复热组合、炸制-水浴复热组合、蒸制-微波复热组合、烤制-微波复热组合、炸制-微波复热组合的鸡胸肉。

2.1.3 脂肪及脂肪酸含量的变化 脂肪酸是细胞内信号传导的关键营养调节剂，而鸡胸肉中含有对人体健康有益的高度不饱和脂肪酸，具有预防心血管疾病、调节代谢和炎症反应、促进中枢神经系统发育等重要的生理功能[29]。从营养学角度看，多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸比值（Polyunsaturated Fatty Acids/Saturated Fatty Acids，PUFA/SFA）、n-6 多不饱和脂肪酸与 n-3 多不饱和脂肪酸比值（n-6/n-3）是判断肉类营养价值和人类食用肉脂肪健康状况的关键指标。不同加工复热方式的鸡胸肉脂肪含量变化见表 2，脂肪酸含量变化见表 4 及图 2。在不同加工方式下，炸制的鸡胸肉脂肪含量显著高于蒸制和烤制（P<0.05），其在 10.35~11.57 g/100 g 范围内。这是因为炸制过程中，油作为传热介质以 180 ℃ 的高温使鸡胸肉内部水分蒸发，形成孔隙，油渗透到肉的孔隙中，增加了脂肪含量[30]；相比之下，蒸制和烤制使用水蒸气和热空气，传热效率较低，且不会像油那样渗透肉质，因此脂肪含量较低。还与炸制鸡胸肉的初始脂肪含量有关。炸制鸡胸肉的 PUFA/SFA 比值最高，是蒸制与烤制的 1.62~2.02 倍；炸制的 n-6/n-3 比值最低，蒸制与烤制是其的 1.26~1.35 倍（P<0.05）。研究结果都表明炸制鸡胸肉的营养价值高，这可能是因为大豆油的富含不饱和脂肪酸在油炸过程中向鸡胸肉中迁移。在不同加工阶段，烤制-微波复热组合（MR-RO）鸡胸肉的 PUFA/SFA 比值显著高于蒸制-水浴复热组合（BR-ST）、而烤制-水浴复热组合（BR-RO）的 n-6/n-3 比值显著低于烤制-微波复热组合（MR-RO）（P<0.05）；炸制-微波组合（MR-FR）鸡胸肉的 PUFA/SFA 比值显著增加，而 n-6/n-3 比值显著减少（P<0.05）。这可能是鸡胸肉在复热过程中其初始脂肪酸含量及组成不同、加工程度的差异而导致脂肪酸释放速率不一致。Albano-Gaglio 等[31] 的结果显示，猪肉的初始脂肪含量不同，PUFA/SFA 比值与 n-6/n-3 比值也有显著差异。不同的氧化程度影响油水界面处颗粒层网络结构和油滴聚集度，会改变油滴与脂肪酶的接触面积，从而影响脂肪的分解和释放率[32]。研究表明，烤制与炸制在与微波复热组合后更有利于人体健康。

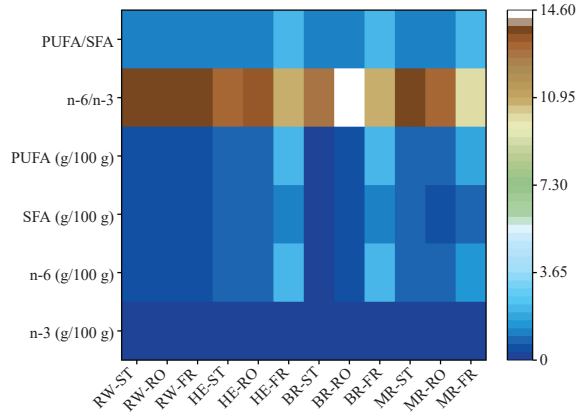


图 2 不同加工与复热组合的鸡胸肉多不饱和脂肪酸 n-3、多不饱和脂肪酸 n-6、多不饱和脂肪酸（PUFA）、饱和脂肪酸（SFA）比例的变化

Fig.2 Changes in the proportions of polyunsaturated fatty acids n-3, polyunsaturated fatty acids n-6, polyunsaturated fatty acids (PUFA) and saturated fatty acids (SFA) in chicken breast with different combinations of processing and reheating

2.1.4 水溶性维生素 B_1、B_6 含量的变化 水分、氧气、光线、温度、pH、时间等加工条件会导致维生素的热降解及损失[33]，而 V_{B1}、V_{B6} 是水溶性维生素，尤其会受到水分的影响。不同加工复热方式的鸡胸肉维生素 B_1、B_6 的含量变化见表 2，原料肉的维生素 B_1、B_6 的含量分别为 28.43 μg/100 g、6.73 mg/kg。

在不同加工方式下，烤制的鸡胸肉维生素 B_1、B_6 含量显著高于蒸制与炸制（P<0.05），其在加热、水浴复热、微波复热后的维生素 B_1 含量分别为 29.09、23.47、28.47 μg/100 g，维生素 B_6 含量分别为 8.82、

表 4　不同加工与复热组合的鸡胸肉脂肪酸含量变化

Table 4　Changes in fatty acid content of chicken breasts with different combinations of processing and reheating

脂肪酸种类	含量(mg/100g)(以干基计)											
	RW-ST	RW-RO	RW-FR	HE-ST	HE-RO	HE-FR	BR-ST	BR-RO	BR-FR	MR-ST	MR-RO	MR-FR
C6:0	1.97±0.09^{Aa}	1.97±0.09^{Aa}	1.97±0.09^{Aa}	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C12:0	0.44±0.01^{Ba}	0.44±0.01^{Ba}	0.44±0.01^{Aa}	0.44±0.03^{Bb}	0.68±0.01^{Ac}	ND	ND	ND	ND	0.82±0.03^{Ac}	ND	ND
C14:0	8.65±0.01^{Ca}	8.65±0.01^{Ca}	8.65±0.01^{Da}	11.8±0.04^{Bc}	16.6±0.04^{Ab}	16.78±0.08^{Aa}	5.17±0.02^{Dc}	7.5±0.18^{Db}	15.13±0.06^{Ba}	15.63±0.03^{Aa}	13.77±0.12^{Bb}	9.15±0.15^{Cc}
C14:1	0.71±0.05^{Ca}	0.71±0.05^{Ca}	0.71±0.05^{Ca}	0.88±0.01^{Bc}	1.5±0.05^{Ab}	2.25±0.01^{Aa}	0.44±0^{Dc}	0.57±0.01^{Db}	0.94±0.02^{Ba}	1.28±0^{Ab}	1.41±0.01^{Ba}	0.42±0^{Dc}
C15:0	1.07±0.05^{Ca}	1.07±0.05^{Da}	1.07±0.05^{Da}	1.85±0.05^{Bb}	2.32±0.03^{Aa}	2.38±0.02^{Aa}	0.72±0.02^{Dc}	1.17±0.01^{Cb}	2.17±0.04^{Ba}	2.3±0^{Aa}	1.85±0^{Bb}	1.19±0.04^{Cc}
C16:0	253.61±0.81^{Ca}	253.61±0.81^{Ca}	253.61±0.81^{Da}	436.83±1.46^{Bc}	521.18±0.88^{Ab}	712.42±7.33^{Ba}	156.11±0.29^{Dc}	247.64±2.48^{Db}	741.92±6.79^{Aa}	541.69±3.18^{Aa}	412.84±1.47^{Bc}	500.16±2.53^{Cb}
C16:1	26.87±0.24^{Ca}	26.87±0.24^{Ca}	26.87±0.24^{Ba}	44.58±0.38^{Bc}	54.4±0.32^{Aa}	52.05±0.45^{Ab}	16.2±0.01^{Dc}	24.58±0.18^{Db}	52.78±0.88^{Aa}	59.56±0.08^{Aa}	46.1±0.19^{Bb}	25.27±0.1^{Cc}
C17:0	2.06±0.09^{Ca}	2.06±0.09^{Ca}	2.06±0.09^{Da}	4.42±0.1^{Bc}	5.59±0.05^{Ab}	7.29±0.06^{Aa}	1.43±0.07^{Dc}	1.89±0.02^{Cb}	6.45±0.03^{Ba}	4.64±0.13^{Aa}	3.53±0.22^{Bc}	4.28±0.02^{Cb}
C18:0	109.29±0.32^{Ca}	109.29±0.32^{Ca}	109.29±0.32^{Da}	207.23±0.77^{Bc}	258.9±0.2^{Ab}	319.88±3.57^{Ba}	68.95±0.12^{Dc}	107.21±1.17^{Db}	327.23±2.81^{Aa}	237.37±1.3^{Aa}	184.1±0.74^{Bc}	229.36±0.57^{Cb}
C18:1n9t	2.13±0.07^{Ca}	2.13±0.07^{Da}	2.13±0.07^{Da}	3.66±0.02^{Bc}	5.56±0.05^{Ab}	5.94±0.02^{Aa}	1.62±0.02^{Dc}	2.26±0.03^{Cb}	4.45±0.05^{Ba}	5.51±0.14^{Aa}	3.85±0.02^{Bb}	2.3±0.05^{Cc}
C18:1n9c	327.33±0.47^{Ca}	327.33±0.47^{Da}	327.33±0.47^{Da}	630.32±2.11^{Bc}	747.95±0.57^{Ab}	1241.98±13.2^{Ba}	207.32±0.82^{Dc}	330.8±3.06^{Cb}	1293.04±11.2^{Aa}	808.39±4.98^{Ab}	603.18±2.24^{Bc}	859.82±4.88^{Ca}
C18:2n6t	0.69±0.18^{Ba}	0.69±0.18^{Ba}	0.69±0.18^{Ca}	2.67±0.24^{Aa}	1.19±0.37^{Ab}	1.69±0.12^{Bb}	ND	ND	ND	0.91±0.3^{Bb}	1.11±0^{Ab}	2.34±0.1^{Aa}
C18:2n6c	343.28±1.56^{Ca}	343.28±1.56^{Ca}	343.28±1.56^{Da}	642.01±2.1^{Bc}	688.82±1.87^{Ab}	1901.15±6.51^{Ba}	211.99±0.32^{Dc}	278.7±3.27^{Db}	1978.1±14.17^{Aa}	764.63±2.79^{Ab}	570.2±3.06^{Bc}	1493.17±4.74^{Ca}
C20:0	1.54±0.01^{Ca}	1.54±0.01^{Ca}	1.54±0.01^{Ca}	3.04±0.03^{Bb}	3.22±0.04^{Ab}	12.84±0.48^{Aa}	1.22±0.03^{Dc}	1.43±0.09^{Db}	12.44±0.11^{Aa}	3.1±0.01^{Ab}	2.78±0.01^{Bc}	10.75±0.2^{Ba}
C18:3n6	2.89±0^{Ca}	2.89±0^{Ca}	2.89±0Da	4.64±0.01^{Bc}	5.27±0.07^{Ab}	7.76±0.08^{Ba}	1.61±0.05^{Dc}	1.9±0.04^{Db}	7.86±0.06^{Aa}	6.03±0.13^{Aa}	4.27±0.03^{Bc}	5.02±0^{Cb}
C20:1	2.23±0.16^{Ca}	2.23±0.16^{Da}	2.23±0.16^{Aa}	4.59±0.12^{Bb}	5.04±0.13^{Aa}	ND	ND	2.56±0.04^{Ca}	ND	7.92±0.53^{Aa}	4.03±0.19^{Bb}	ND
C18:3n3	19.22±0.26^{Ca}	19.22±0.26^{Ca}	19.22±0.26^{Da}	38.49±0.11^{Bb}	39.04±0.25^{Ab}	170.27±1.15^{Ba}	13.39±0.01^{Db}	13.87±0.18^{Db}	174.67±1.31^{Aa}	47.06±1.12^{Ab}	34.56±0.47^{Bc}	140.21±0.69^{Ca}
C20:2	6.68±0.36^{Ca}	6.68±0.36^{Ca}	6.68±0.36^{Da}	13.87±0.04^{Bb}	16.1±0.22^{Aa}	16.14±0.55^{Aa}	4.75±0.06^{Dc}	7.04±0.08^{Cb}	15.09±0.13^{Ba}	15.15±0.17^{Aa}	11.93±0.24^{Bb}	11.49±0.15^{Cc}
C22:0	1.85±0.05^{Ba}	1.85±0.05^{Ba}	1.85±0.05^{Ca}	2.59±0.13^{Ac}	3.61±0.02^{Ab}	14.51±0.08^{Aa}	1.26±0.01^{Cb}	ND	14.61±0.17^{Aa}	ND	ND	11.54±0.05^{Ba}
C20:3n6	11±0.17^{Ca}	11±0.17^{Ca}	11±0.17^{Ca}	11.86±0.1^{Bb}	15.05±0.18^{Aa}	11.65±0.04^{Ab}	4.16±0.07^{Dc}	5.33±0.01^{Db}	11.44±0.15^{Ba}	12.26±0.01^{Aa}	11.36±0.03^{Bb}	8.45±0.01^{Dc}
C20:3n3	1.87±0.13^{Ba}	1.87±0.13^{Ca}	1.87±0.13^{Ca}	3.24±0.17^{Ab}	3.58±0.07^{Aa}	2.77±0.02^{Ac}	1.6±0.37^{Bb}	1.72±0^{Cb}	2.72±0.06^{Aa}	2.94±0.08^{Aa}	2.9±0.13^{Ba}	2.25±0^{Bb}
C20:4n6	82.94±0.64^{Ca}	82.94±0.64^{Ca}	82.94±0.64^{Da}	119.56±0.25^{Ab}	153.78±0.53^{Aa}	114.7±0.49^{Ac}	43.16±0.16^{Dc}	59.14±0.09^{Db}	108.62±0.05^{Ba}	105.07±1.51^{Bb}	110.38±0.73^{Ba}	96.59±0.59^{Cc}
C23:0	ND	ND	ND	0.76±0.01^{Ab}	0.53±0.06^{Ab}	1.65±0.55^{Aa}	ND	ND	1.6±0.67^{Aa}	ND	ND	0.87±0.11^{Aa}
C24:0	2.65±0.05^{Ba}	2.65±0.05^{Ca}	2.65±0.05^{Da}	4.02±0.24^{Ab}	4.57±0.06^{Aa}	3.24±0.12^{Bc}	2.24±0.99^{Bb}	ND	3.43±0.12^{Aa}	4.08±0.03^{Aa}	3.19±0.12^{Bb}	2.87±0.1^{Cc}
C20:5n3	ND	ND	ND	0.56±0.02^{Bc}	0.77±0.03^{Ab}	3.03±0.06^{Ba}	ND	ND	3.21±0.03^{Ba}	0.65±0.01^{Ab}	ND	2.42±0^{Ca}
C22:6n3	10.87±0.16^{Ca}	10.87±0.16^{Ca}	10.87±0.16^{Ca}	17.6±0.13^{Ab}	20.83±0.01^{Aa}	14.29±1.33^{Ac}	5.71±0.01^{Dc}	8.08±0.19^{Db}	14.57±0.02^{Aa}	14.06±0.03^{Bb}	15.38±0.17^{Ba}	12.74±0.06^{Bc}
n-3	31.96±0.02^{Ca}	31.96±0.02^{Ca}	31.96±0.02^{Da}	59.88±0.08^{Bc}	64.22±0.35^{Ab}	190.37±2.44^{Ba}	20.7±0.38^{Dc}	23.67±0.37^{Db}	195.17±1.38^{Aa}	64.71±1.25^{Ab}	52.84±0.76^{Bc}	157.63±0.63^{Ca}
n-6	440.8±0.9^{Ca}	440.8±0.9^{Ca}	440.8±0.9^{Da}	780.74±2.21^{Bc}	864.11±2.87^{Ab}	2036.95±7.23^{Ba}	260.93±0.37^{Dc}	345.07±3.22^{Db}	2106.02±14.32^{Aa}	888.9±0.88^{Ab}	697.32±3.8^{Bc}	1605.56±4.04^{Ca}
n-6/n-3	13.79±0.04^{Aa}	13.79±0.04^{Ba}	13.79±0.04^{Aa}	13.04±0.02^{Bb}	13.45±0.03^{Ca}	10.7±0.1^{Bc}	12.61±0.22^{Cb}	14.58±0.09^{Aa}	10.79±0^{Bc}	13.74±0.28^{Aa}	13.2±0.12^{Db}	10.19±0.01^{Cc}
SFA	383.13±1.38^{Ca}	383.13±1.38^{Ca}	383.13±1.38^{Da}	672.96±2.36^{Bc}	817.2±0.99^{Ab}	1090.99±11.34^{Ba}	237.09±1.38^{Dc}	366.84±3.57^{Db}	1124.98±10.5^{Aa}	809.64±4.31^{Aa}	622.05±2.42^{Bc}	770.16±2.05^{Cb}
PUFA	479.44±0.52^{Ca}	479.44±0.52^{Ca}	479.44±0.52^{Da}	854.49±2.25^{Bc}	944.43±3.44^{Ab}	2243.46±10.22^{Ba}	286.38±0.81^{Dc}	375.78±3.67^{Db}	2316.28±15.83^{Aa}	968.76±0.55^{Ab}	762.09±4.8^{Bc}	1774.68±4.81^{Ca}
PUFA/SFA	1.25±0.00^{Ba}	1.25±0.00^{Aa}	1.25±0.00^{Ca}	1.27±0.00^{Ab}	1.16±0.00^{Cc}	2.06±0.01^{Ba}	1.21±0.00^{Cb}	1.02±0.00^{Dc}	2.06±0.01^{Ba}	1.2±0.01 ^{Dc}	1.23±0.00^{Bb}	2.3±0.00^{Aa}

注：ND为未检测到。

2.68、6.33 mg/kg。这是因为油的热导率高于空气，导致炸制时更快的热量传递，加速水分流失；蒸制通过蒸汽冷凝释放潜热，温度稳定但可能导致长时间加热，水分持续流失，这与蒸制与炸制中的水分含量较低相符（表 2）；烤制通过空气对流使表面快速干燥，形成保护层，内部可能保持较高水分，从而使烤制鸡胸肉中的水溶性维生素 B_1、B_6 损失程度较小；蒸炸后的鸡胸肉初始维生素含量很大程度上影响了其复热后的维生素 B_1、B_6 的含量变化。在不同加工阶段，在蒸制、烤制与复热组合后的鸡胸肉维生素 B_1、B_6 含量显著降低，且在加工-微波复热组合高于加工-水浴复热组合（P<0.05）。这可能是因为水分的流失，蒸制与烤制鸡胸肉从加工到复热阶段水分含量的变化趋势与 V_{B1} 及 V_{B6} 的一致印证了这一点。

2.1.5 脂溶性维生素 E 含量的变化 V_E 是脂溶性维生素，不同加工复热方式的鸡胸肉维生素 E 的含量变化见表 2，原料肉的维生素 E 的含量为 0.49 mg α-TE/100 g。在不同加工方式下，鸡胸肉中维生素 E 含量最高的是炸制（1.34~1.86 mg α-TE/100 g）、其次是烤制（0.34~0.66 mg α-TE/100 g）、蒸制（0.16~0.40 mg α-TE/100 g）。此研究结果与 Skoczylas 等[34]发现的沙丁鱼的 V_E 含量变化趋势一致。这与三种加工方式的脂肪含量变化趋势一致（表 2），V_E 含量的变化可能与脂肪含量相关[35]。加热时间较长的烤制和蒸制过程中，氧化作用增强（图 5），可能进一步导致维生素 E 的损失。而炸制的较高温度与油更均匀的热传导，导致鸡胸肉块表面迅速形成保护层，减少内部脂溶性 V_E 的流失；V_E 在炸制过程中与油脂结合，进一步提高了其含量的相对稳定性。在不同加工阶段，不同加工-复热组合后鸡胸肉块的维生素 E 含量显著降低（P<0.05），再次加热使维生素 E 的损失率增加，分别增加了 60.00%（BR-ST）、48.48%（BR-RO）、27.96%（BR-FR），55.00%（MR-ST）、22.73%（MR-RO）、12.90%（MR-FR）。其中蒸制-复热组合后鸡胸肉块的维生素 E 含量无显著变化，而烤、炸制与微波复热后鸡胸肉的 V_E 含量显著高于烤、炸制与水浴复热组合（P<0.05），分别增加了 33.33%、17.28%。这是因为蒸制鸡胸肉经热加工后初始维生素 E 含量低，且在两种复热方式下损失率高，导致没有统计学上的差异。Alibas 等[36]发现类似的结果，中高功率微波处理（时间缩短）的脂溶性维生素含量比自然处理与低功率微波处理得到更好的保护。

2.2 不同加工-复热方式组合对蛋白质与脂肪氧化的影响

2.2.1 羰基及游离巯基含量的变化 蛋白质羰基化是某些氨基酸在氧化阶段的早期表现，羰基含量是衡量蛋白质氧化的指标，羰基的形成会影响蛋白质的功能与稳定性。从图 3A 可以看出，在不同加工方式下，炸制鸡胸肉在热加工阶段（15.18 nmol/mg protein）的羰基含量显著高于蒸制与烤制（P<0.05）。这与 Wang 等[37]的结果一致，在油炸过程中的热空气与肉样之间提供了均匀且高效的热传递，氧气与其接触更充分，更多的活性氧产生，加剧了氧化。游离巯基的减少与蛋白质结构的破坏使细胞内环境恶化，抗氧化酶活性减弱甚至完全失活，还原系统被破坏，导致衰老晚期的活性氧在细胞中大量积累，活性氧含量增加，这使氨基酸侧链更易受到活性氧的攻击，形成更多的羰基化合物[38−39]。在不同加工阶段，蒸制、烤制与复热组合（微波、水浴）的鸡胸肉羰基含量呈现增加趋势，炸制-复热组合（微波、水浴）呈降低趋势。这可能是蒸制与烤制较炸制加工时间更长，自氧化和活性氧攻击蛋白质的主要产物，形成羰基化合物[40]。

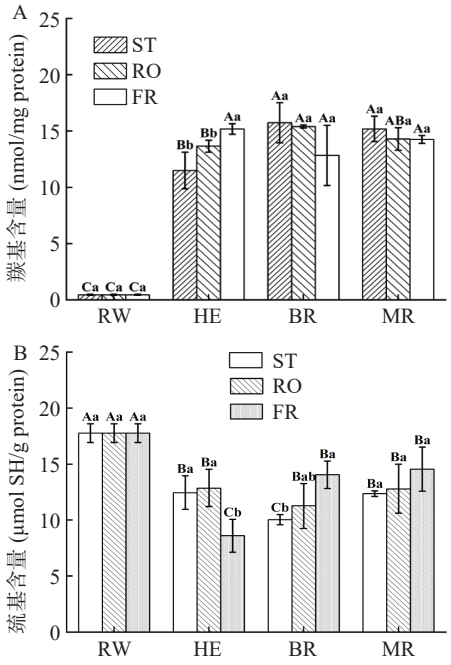


图 3 不同加工与复热组合的鸡胸肉羰基含量（A）和巯基（B）的变化

Fig.3 Changes in carbonyl content (A) and sulfhydryl (B) of chicken breast with different combinations of processing and reheating

注：不同大写字母表示同一加工方法不同加工阶段间差异显著（P<0.05），不同小写字母表示同一加工阶段不同加工方式间差异显著（P<0.05），图 4~图 5 同。

游离巯基含量的降低是表征蛋白氧化程度的标志，游离巯基（-SH）在高温下会被氧化成二硫键或其他含硫氧化物，游离巯基含量减少。从图 3B 可以看出，在不同加工方式下，炸制鸡胸肉在热加工阶段（8.59 μmol SH/g protein）的游离巯基含量显著低于蒸制与烤制（P<0.05）。在不同加工阶段，蒸制、烤制与复热组合的鸡胸肉巯基含量呈现降低趋势，而炸制-复热组合呈增加趋势，与上文蛋白氧化（羰基化）所得的结论一致。

2.2.2 蛋白质二级结构的变化 通过圆二色光谱测定不同加工复热方式鸡胸肉中蛋白质二级结构的变化，包括 α-螺旋、β-折叠、β-转角、无规则卷曲，其中

P<0.05 表示差异显著(图 4)。原料肉的二级结构中的 α-螺旋、β-折叠、β-转角、无规则卷曲的含量分别为 17.89%、26.37%、15.10%、40.59%。与原料肉相比，经过热加工与复热后三种加工方式的 α-螺旋结构的显著减少与 β-折叠结构的显著增加均观察到(P<0.05)。同样，以前的研究报道了由于热加工诱导的蛋白氧化，空气油炸与烘烤后的扇贝随着温度的升高，α-螺旋结构减少与 β-折叠结构增加[37]。在不同加工方式下，与蒸制组、烤制组相比，炸制组的 α-螺旋结构降低、β-折叠结构增加趋势显著。这可能是油炸导致蛋白质分子的展开、解离和重排，破坏了蛋白质的原始有序结构并降低了 α-螺旋的百分比；油炸加速了高分子量蛋白质的聚集，β-折叠的百分比增加[41]。与氧化反应导致蛋白质展开，这可能导致分子内氢键的减少，导致 α-螺旋含量下降和 α-螺旋转化为 β-折叠[42]。在不同加工阶段，蒸制、烤制与复热组合的蛋白质二级结构变化趋势为 α-螺旋结构降低、β-折叠结构增加，而炸制组-复热组合与其相反。蛋白质氧化的变化或许可以对这一现象进行解释。

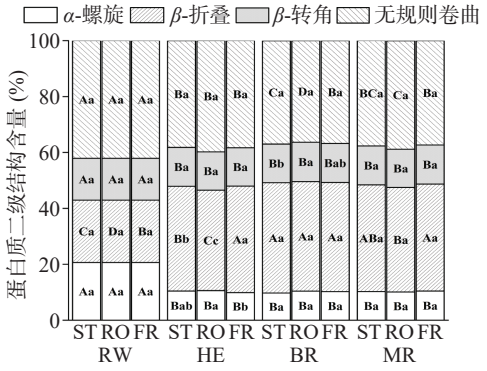


图 4　不同加工与复热组合的鸡胸肉二级结构含量的变化

Fig.4　Changes in the secondary structure content of chicken breast with different combinations of processing and reheating

2.2.3　硫代巴比妥酸含量的变化　脂肪氧化在肉类烹饪过程中至关重要，它会影响其脂肪酸组成及营养质量[43]。TBARS 含量可用于评估鸡胸肉样品的脂肪氧化程度。根据 Kaliniak-Dziura 等[44] 的报道，TBARS 含量在约 3 mg MDA/kg 可以被认为是熟肉样品的可接受性的阈值范围。图 5 显示了不同加工复热方式的鸡胸肉 TBARS 含量变化，本文的研究结果均低于 2 mg MDA/kg，在熟鸡胸肉的可接受阈值范围内，其中原料肉的 TBARS 含量为 0.05 mg MDA/kg，其他烹饪方法处理的鸡胸肉脂肪氧化程度更高。这与 Tenyang 等[45] 报道鱼在热加工后的结果一致。热加工会破坏鸡胸肉的肌肉纤维系统，增强细胞膜的破坏，促进 PUFA 和促氧化剂化合物之间的接触，并诱导蛋白质变性，从而导致抗氧化酶活性的丧失[46]，使脂肪氧化更容易发生。在不同加工方式下，以油为传热介质的油炸鸡胸肉 TBARS 含量在 0.82~1.41 mg MDA/kg 范围内、以水蒸气为传热介质的蒸制鸡胸肉 TBARS 含量在 0.44~1.22 mg MDA/kg 范围内、以热空气为传热介质的烤制鸡胸肉 TBARS 含量在 0.36~0.69 mg MDA/kg 范围内，即鸡胸肉 TBARS 含量的变化趋势为：炸制>蒸制>烤制，这说明炸制鸡胸肉的脂肪氧化程度较高。这与 Ding 等[47] 的研究结果类似，他们发现炸鲫鱼的 TBARS 含量最高。这可能是因为炸制的氧气暴露程度高。在不同加工阶段，加工-复热组合后鸡胸肉的 TBARS 含量显著增加(P<0.05)，且加工-微波复热组合是加工-水浴复热组合的 1~2 倍，说明其在复热后脂肪氧化程度高。Luo 等[14] 对鱼糜的研究也显示了一致的结果，是因为与水浴复热相比，微波复热较强的热传导速度会促进自由基的形成，容易产生更强的氧化反应，加速脂肪的氧化的速率。

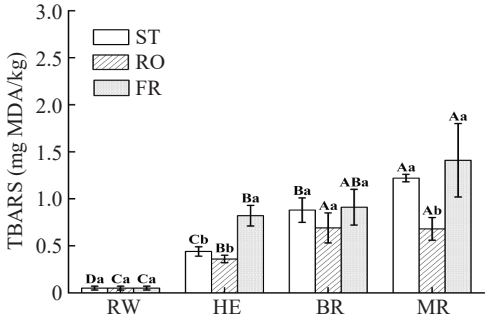


图 5　不同加工与复热组合的鸡胸肉 TBARS 值的变化

Fig.5　Changes in TBARS values of chicken breasts with different processing and reheat combinations

2.3　不同加工-复热组合营养与氧化的相关性分析

2.3.1　不同加工方式的营养与氧化差异　为了确定不同加工方式之间的营养与氧化差异，使用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)模型通过最大化测量数据(X)和响应变量(Y)之间的协方差来区分成对组。图 6 显示了不同加工方式之间的比较结果，包括 OPLS-DA 评分图、排列检验交叉验证和相应的火山图，ST、RO 与 FR 之间存在明显的差异。

图 6A 显示了 ST、RO 两种加工方式之间的结果，OPLS-DA 模型具有良好的预测能力和拟合性能(R^2X=0.753、Q^2=0.937)。火山图显示，与 ST 相比，RO 保留了更多的 V_E。

图 6B 显示了 ST 与 FR 两种加工方式之间的结果，OPLS-DA 模型中 R^2X 与 Q^2 的值分别为 0.568、0.972。火山图中的差异物质包括 FR 中较高水平的脂肪、V_E、C18:1n-9c、C18:2n-6c、C20:0、C18:3n-6、C18:3n-3、C22:0、C23:0、C20:5n-3，ST 中较高水平的 VB_6、C12:0、C20:1。炸制中保留了更多的脂肪酸及脂溶性维生素。

RO 与 FR 的结果如图 6C 所示，OPLS-DA 模型中 R^2X 与 Q^2 的值分别为 0.818、0.99。从火山图来看，FR 中的脂肪、V_E、C18:1n9c、C18:2n-6c、C20:0、C18:3n-6、C18:3n-3、C22:0、C23:0、C20:5n-3 含量高于 RO，而 VB_6、C12:0、C20:1 在 RO 中的含量高于 FR。

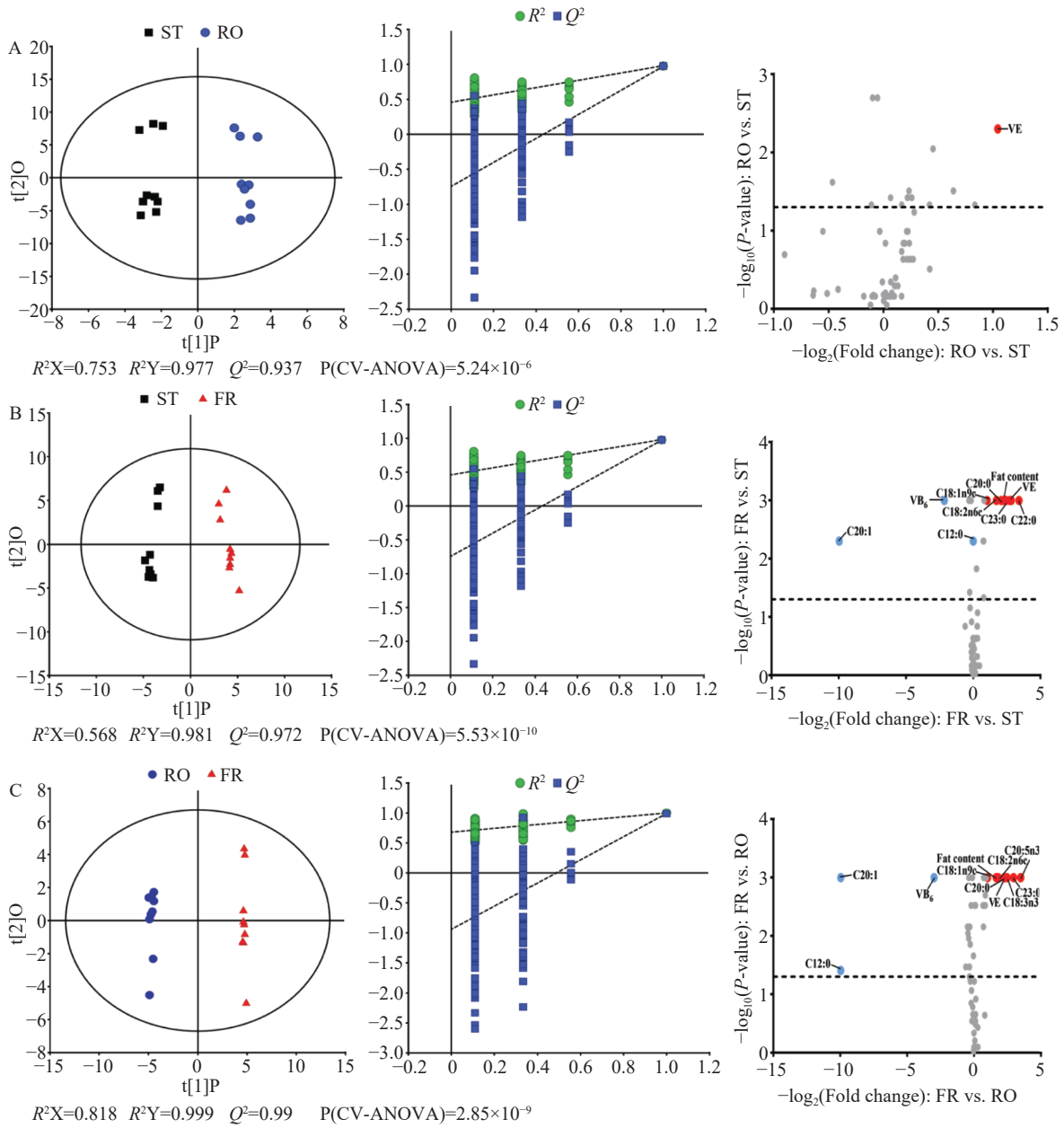


图 6　不同烹饪方法下鸡胸肉营养和氧化的 OPLS-DA 评分图、通过排列检验进行的交叉验证和相应的火山图

Fig.6　OPLS-DA scores plots, cross validation by permutation test and corresponding volcano plots derived from the nutritional and oxidation data of chicken breast after different cooking methods between the pair-wise groups

注: 火山图中标记的差异成分是通过组合两个维度的限制来确定的: P<0.05 和 VIP>1; 较大的红点表示显著上调物质, 较大的蓝点表示显著下调成分, 较小的灰点表示无显著差异成分, 图 7 同。

2.3.2　不同加工阶段的营养与氧化差异　为了了解不同加工阶段上营养与氧化的变化, 对成对组的数据进行了 OPLS-DA。HE、BR、MR 之间存在明显的差异。

HE 与 BR 的结果见图 7A, OPLS-DA 模型中 R^2X 与 Q^2 的值分别为 0.903、0.97, 具有令人满意的预测能力与拟合能力。火山图结果如下, HE 比 BR 保留了更多的脂肪酸, 包括 C12:0、C14:1、C18:2n-6t、C20:1、C24:0 与 VB_6。

HE 与 MR 的结果见图 7B, OPLS-DA 模型中 R^2X 的值为 0.784、Q^2 的值为 0.92。MR 的 TBARS 含量高于 HE, 而 HE 的 C23:0 含量高于 MR。

图 7C 显示了 BR 与 MR 的结果, OPLS-DA 模型中 R^2X 的值为 0.914、Q^2 的值为 0.924。火山图显示的差异物质为 MR 中较高水平的 C18:2n-6t。

总之, 炸制保留了更多的脂肪酸及脂溶性维生素, 而蒸制与烤制保留了更多的水溶性维生素、稳定的饱和脂肪酸与相对稳定的单不饱和脂肪酸。热加工比加工-复热组合后(微波、水浴)保留了更多的脂肪酸, 而水浴复热与微波复热同时伴随着更高水平的脂肪氧化。与原料肉相比, 熟制样品以及加工、复热阶段的部分营养物质, 如 VB_1、VB_6、天门冬氨酸、组氨酸、甘氨酸、己酸等都减少, 脂肪氧化及蛋白氧化程度增加。这似乎表明热处理或加工-复热组合处理会降低一些营养物质, 并伴随着氧化程度的增加。

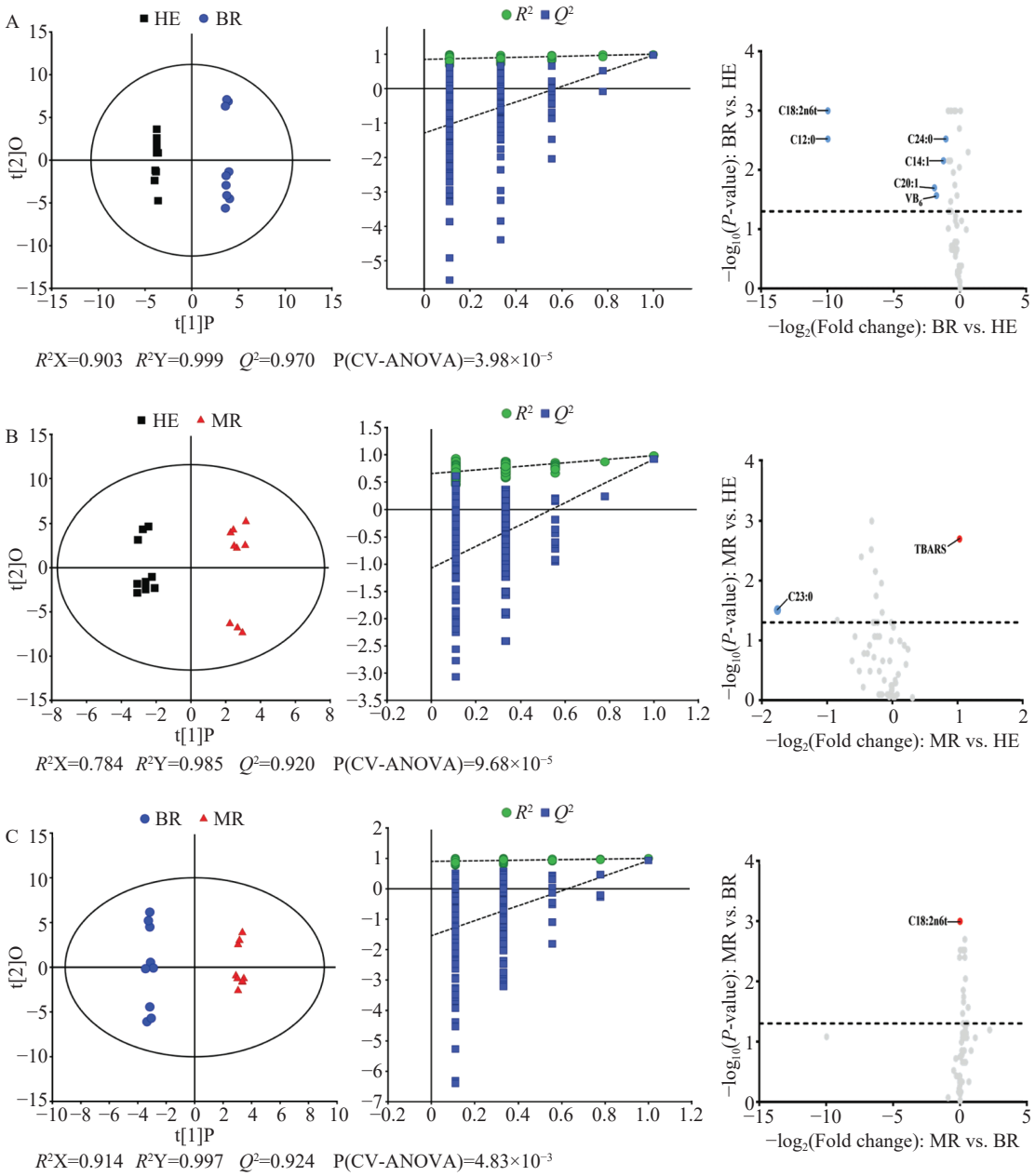


图 7　不同加工阶段鸡胸肉营养和氧化 OPLS-DA 评分图、排列检验交叉验证和相应的火山图来自成对组之间

Fig.7　OPLS-DA scores plots, cross validation by permutation test and corresponding volcano plots derived from the nutritional and oxidation data of chicken breast after different processing stages between the pair-wise groups

3　结论

本研究评估了加工(蒸、烤、炸)-复热(微波、水浴)组合过程中鸡胸肉营养及氧化变化规律。通过多元统计分析，分析多元加工方式对蛋白质、维生素等营养成分的保持及氧化特性的研究。结果表明，在热加工阶段，炸制有利于保留更多的脂肪酸及脂溶性维生素，蒸制与烤制保留了更多的蛋白质、水溶性维生素、稳定的饱和脂肪酸与相对稳定的单不饱和脂肪酸。而在复热阶段，微波复热更适合蒸制与烤制鸡胸肉，炸制鸡胸肉则适合用水浴的方式复热。本研究结果有助于加深对鸡胸肉加工-复热组合过程中营养成分及氧化变化和损失的理解，为指导优化鸡胸肉加工-复热组合方式提供理论依据。在未来的研究里，探索如何将营养物质保存在煮熟的鸡胸肉中并降低鸡胸肉加工过程中的氧化程度从而利于人体消化吸收，将是一个有价值的目标。

© The Author(s) 2026. 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] HAUNSHI S, DEVATKAL S, PRINCE L L L, et al. Carcass characteristics, meat quality and nutritional composition of kadaknath, a native chicken breed of India[J]. Foods, 2022, 11(22): 3603.

[2] CONNOLLY G, CAMPBELL W W. Poultry consumption and human cardiometabolic health-related outcomes: A narrative review[J]. Nutrients, 2023, 15(16): 3550.

[3] WANG Yongrui, ZHANG Heyu, LI Kenken, et al. Dynamic changes in the water distribution and key aroma compounds of roast-

ed chicken during roasting[J]. Food Research International, 2023, 172: 113146.
[4] CHENG Lujie, LI Xin, TIAN Yuting, et al. Mechanisms of cooking methods on flavor formation of Tibetan pork[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100873.
[5] LI Jianying, HAN Dong, HUANG Feng, et al. Effect of reheating methods on eating quality, oxidation and flavor characteristics of Braised beef with potatoes dish[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 31: 100659.
[6] LIU Wangxin, LUO Xianliang, HUANG Ying, et al. Influence of cooking techniques on food quality, digestibility, and health risks regarding lipid oxidation[J]. Food Research International, 2023, 167: 112685.
[7] SRUTHI N U, PREMJIT Y, PANDISELVAM R, et al. An overview of conventional and emerging techniques of roasting: Effect on food bioactive signatures[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129088.
[8] LI Ying, SUN Fangda, XIA Xiufang, et al. Excessive oil absorption and Maillard reaction products in fried muscle foods: Formation mechanisms, potential health risks and mitigation strategies[J]. Food Chemistry, 2025, 468: 142456.
[9] DONG Meng, LIANG Feng, CUI Shuang, et al. Insights into the effects of steaming on organoleptic quality of salmon (*Salmo salar*) integrating multi-omics analysis and electronic sensory system[J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137372.
[10] LI Kaixuan, WANG Xuan, LIU Yang, et al. Influence of different cooking methods on quality characteristics, nutritional value, and volatile compounds of roasted lamb chops[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 139: 107084.
[11] SUN Yunxiang, DU Feng, HUANG Yiqun, et al. Effects of heat treatments, storage and reheating on volatile compounds in pork and screening for characteristic volatile compounds[J]. Meat Science, 2025, 222: 109740.
[12] MEI Hebao, GONG Zhihao, DING Honglie, et al. Microwave synergistic steam reheating: A promising method for maintaining flavor and reducing advanced glycation end products in braised pork[J]. LWT, 2025, 222: 117633.
[13] YANG Tianyi, YANG Yamin, ZHANG Peng, et al. Quantitative proteomics analysis on the meat quality of processed pale, soft, and exudative (PSE)-like broiler pectoralis major by different heating methods[J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136602.
[14] LUO Xiaoying, XIAO Shuting, RUAN Qiufeng, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131260.
[15] INTERNATIONAL A, AOAC international official methods of analysis of AOAC international (19th ed.). 2012: Gaitherburg, MD: Association of Official Analytical Chemists.
[16] GAO Peng, ZHANG Wenyuan, ZHAO Xiaoxuan, et al. The effect of Maillard reaction on flavour development of protein hydrolysates from cheese[J]. Food Chemistry, 2024, 437: 137569.
[17] BLIGH E G, DYER W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959, 37(8): 911−917.
[18] TAN Chunming, LI Xiaofeng, YU Yaqin, et al. Effects of five thermal processing methods on the physicochemical properties and flavor characteristics of grass carp meat[J]. LWT, 2024, 206: 116599.
[19] YOSHIDA M, HISHIYAMA T, OGAWARA M, et al. A novel method for determining vitamin B_1 in a wide variety of foodstuffs with or without polyphenols[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2387−2392.
[20] BERGAENTZLÉ M, ARELLA F, BOURGUIGNON J B, et al. Determination of vitamin B6 in foods by HPLC: A collaborative study[J]. Food Chemistry, 1995, 52(1): 81−86.
[21] WOOLLARD D C, BENSCH A, INDYK H, et al. Determination of vitamin A and vitamin E esters in infant formulae and fortified milk powders by HPLC: Use of internal standardisation[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 457−465.
[22] WANG Yang, TIAN Xiaojing, LIU Xinzhu, et al. Effects of different cooking methods on physicochemical, textural properties of yak meat and its changes with intramuscular connective tissue during *in vitro* digestion[J]. Food Chemistry, 2023, 422: 136188.
[23] LIU Hao, LIANG Ying, ZHANG Shengyang, et al. Physicochemical properties and conformational structures of pre-cooked wheat gluten during freeze-thaw cycles affected by curdlan[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109381.
[24] YUAN Dongxue, ZHANG Jingming, ZHAO Zihan, et al. Tracking protein aggregation behavior and molecular interactions induced by conformational alterations in the formation of myofibrillar protein-*Abelmoschus manihot* gum mixed gels during heating process[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110481.
[25] MANZOOR A, AHMAD S. Flaxseed gum based biocomposite film modified with betel leaf extract: A novel packaging material for oxidative stability of meat patties[J]. Meat Science, 2024, 209: 109401.
[26] SIVARANJANI S, JAYASREE J T, SHAGOLSHEM M S, et al. A comprehensive review of the mechanism, changes, and effect of deep fat frying on the characteristics of restructured foods[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139393.
[27] TONFACK D F, MOUTO N C M, NGANGOUM E S, et al. Effect of different processing methods on the proximate composition, mineral content and functional properties of snail (*Archachatina marginata*) meat[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 8: 100298.
[28] LI Xuejiao, YU Linman, XIE Yushan, et al. Effect of different cooking methods on the nutrient, and subsequent bioaccessibility and biological activities in *Boletus auripes*[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134358.
[29] CAO Lizhen, YIN Mingxue, SHI Tianqiong, et al. Engineering *Yarrowia lipolytica* to produce nutritional fatty acids: Current status and future perspectives[J]. Synthetic and Systems Biotechnology, 2022, 7(4): 1024−1033.
[30] DEHGHANNYA J, NGADI M. Recent advances in microstructure characterization of fried foods: Different frying techniques and process modeling[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 786−801.
[31] ALBANO-GAGLIO M, ESQUERRE C A, O'DONNELL C P, et al. Calibration of visible and near-infrared spectral imaging technology to predict the quality evolution of retail fresh pork bellies with different fat content[J]. Food Research International, 2025, 199: 115350.
[32] ZHAO Mengmeng, WU Xiaojuan, TAN Haitong, et al. Protein oxidation affected the encapsulation properties of rice bran protein fibril-high internal phase Pickering emulsions: Enhanced stability and bioaccessibility of *β*-carotene[J]. Food Research International, 2024, 192: 114779.
[33] HRUBŠA M, SIATKA T, NEJMANOVÁ I, et al. Biological

properties of vitamins of the B-complex, part 1: Vitamins B(1), B(2), B(3), and B(5)[J]. Nutrients, 2022, 14(3): 484.
[34] SKOCZYLAS J, PIĄTKOWSKA E, LAMPOVÁ B, et al. Different thermal treatments affect the nutritional value and antioxidant activity of sardines and sprats[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 134: 106519.
[35] FADILOGLU E E, YILDIZ T G, CELEBIOGLU C, et al. Influence of different cooking methods on quality characteristics and nutritional value of gluten-free beef burger patties formulated with walnut oil, safflower oil and buckwheat[J]. Meat Science, 2023, 204: 109251.
[36] ALIBAS I, YILMAZ A, ASIK B B, et al. Influence of drying methods on the nutrients, protein content and vitamin profile of basil leaves[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103758.
[37] WANG Ziye, WU Zixuan, ZHAO Guanhua, et al. Effect of air frying and baking on physicochemical properties and digestive properties of scallop (*Patinopecten yessoensis*) adductor muscle[J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102460.
[38] WANG Shuo, LIN Songyi, LI Shuang, et al. Effects of different thermal sterilization conditions on the quality of ready-to-eat shrimp based on specific sterilization intensity[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139359.
[39] YANG Xue, BU Xinrong, LI Yiheng, et al. Differential regulation of physicochemical properties and myofibrillar protein degradation of yak meat by interactions between reactive oxygen species and reactive nitrogen species during postmortem aging[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(2): 954−966.
[40] HAN Xiaoyu, LI Yang, WANG Ying, et al. Exploration on antifreeze potential of thawed drip enzymatic hydrolysates on myofibrillar proteins in pork patties during freeze-thaw cycles[J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142248.
[41] ZHANG Jingwei, YANG Shenglong, LIU He, et al. Starch hydration properties in relation to kinetic modelling of mass transfer and properties of deep-frying batter[J]. Food Research International, 2024, 196: 115015.
[42] CHEN Y H, McCLEMENTS D J, HE K, et al. Effect of transglutaminase on the structure, properties and oil absorption of wheat flour[J]. Food Chemistry, 2025, 463(Pt 1): 141117.
[43] SUN Mingzhu, CAO Yaqi, LIU Hongxia, et al. Effect of four different cooking methods on the fat digestion characteristics of yellow-feathered chicken[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100465.
[44] KALINIAK-DZIURA A, DOMARADZKI P, KOWALCZYK M, et al. Effect of heat treatments on the physicochemical and sensory properties of the *longissimus thoracis* muscle in unweaned Limousin calves[J]. Meat Science, 2022, 192: 108881.
[45] TENYANG N, MAWAMBA L A, PONKA R, et al. Effect of cooking and smoking methods on proximate composition, lipid oxidation and mineral contents of *Polypterus bichir bichir* fish from far-north region of Cameroon[J]. Heliyon, 2022, 8(10): e10921.
[46] de OLIVEIRA V S, VIANA D S B, KELLER L M, et al. Impact of air frying on food lipids: Oxidative evidence, current research, and insights into domestic mitigation by natural antioxidants[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 147: 104465.
[47] DING Jing, CHEN Yu, ZHENG Yuhui, et al. Evaluation of physicochemical and flavor characteristics and primary on lipid oxidation of crucian carp under different cooking methods[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 136: 106775.