市售高蛋白质、高能量肉制品品质及其蛋白质消化特性比较分析

侯馨宁，高子武，武瑞赞，何金华，刘凌高，武睿，张德权，王振宇*

（中国农业科学院农产品加工研究所，农业农村部农产品加工重点实验室，农业农村部中式肉类菜肴制品加工技术集成实验室，北京 100193）

摘要：为适应不同特需人群需求，市场上出现了标注高蛋白质含量和高能量的肉制品，但其品质特性和营养消化特性尚不明确。为此，该研究选择市售典型产品，评价其营养组分、总能量水平、风味、质构和蛋白质消化率。结果表明：低脂鸡胸肉肠（D、G）具有优异蛋白质特性（含量 22.15 g/100 g 和 22.07 g/100 g，消化率 76.44%和 73.23%）和质构特性。猪肉午餐肉罐头（I、J、K）则呈现较高能量值（614~1 046 kJ/100 g）和蛋白质消化率（72.22%~74.09%）。顶空气相离子迁移色谱（Headspace Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry，HS-GC-IMS）共鉴定出 32 种特征风味物质，其中市售标称高蛋白质型肉制品主要关键挥发性风味物质为 4-乙烯基愈创木酚，标称高能量型肉制品主要关键挥发性风味物质为(E,E)-2,4-壬二烯醛。多元相关性分析表明，市售肉制品蛋白质消化率与蛋白质含量、碳水化合物含量以及能量呈负相关。综合来看，低脂鸡胸肉肠具有高蛋白和高消化率的优势，猪肉午餐肉罐头则能量高但脂肪含量较高。研究结果可为特需肉制品的研发提供数据支撑和理论参考。

关键词：高蛋白肉制品；高能量肉制品；品质分析；蛋白质消化率

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0795

Quality Characteristics and Protein Digestibility of Commercially Available High-Protein and High-Energy Meat Products

HOU Xinning, GAO Ziwu, WU Ruiyun, HE Jinhua, LIU Linggao, WU Rui, ZHANG Dequan, WANG Zhenyu*

(Laboratory of Processing Technology Integration for Chinese-style Meat and Vegetable Dishes, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: To address the nutritional requirements of diverse special populations, commercially available meat products labeled with high protein and high energy content have emerged; however, their quality characteristics and nutritional digestive properties have not been fully elucidated. In this study, representative commercially available products were selected, and their nutritional composition, total energy levels, flavor profiles, textural properties, and protein digestibility were evaluated. The results indicated that low-fat chicken sausages (D, G) exhibited superior protein characteristics, with protein contents of 22.15 g/100 g and 22.07 g/100 g and digestibility rates of 76.44% and 73.23%, respectively, alongside favorable textural properties. Canned pork luncheon meats (I, J, K) exhibited higher energy values (614~1 046 kJ/100 g) and protein digestibility (72.22%~74.09%). A total of 32 characteristic volatile flavor compounds were identified using Headspace Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry (HS-GC-IMS), with 4-vinylguaiacol being identified as the primary key volatile flavor compound in the commercially available nominal high-protein meat products, and (E,E)-2,4-nonadienal in the nominal high-energy meat products. Multivariate correlation analysis revealed negative correlations between the protein digestibility of commercially available meat products and protein content, carbohydrate content, and energy levels. In conclusion, low-fat chicken sausages possess the advantages of high protein content and high digestibility, while pork luncheon meat cans (inferred from the provided text to represent the high-energy category not detailed with specific results in this abstract) are characterized by higher energy content but also higher fat content. The findings of this study provide data support and theoretical references for the research and development of specialized meat products.

Key words: high-protein meat products; high-energy meat products; quality analysis; protein digestibility

收稿日期：2025-06-09；修回日期：2025-07-29；接受日期：2025-08-01

基金项目：国家重点研发计划重点专项（2023YFD2100804）

作者简介：侯馨宁（2000-），女，硕士研究生，研究方向：营养肉制品加工技术，E-mail：15941661622@163.com

通讯作者：王振宇（1981-），男，博士，研究员，研究方向：肉品加工理论与技术，E-mail：wangzhenyu@caas.cn

随着人民生活水平的持续提高和健康意识的日益增强，不同消费群体对肉制品的需求呈现出个性化和功能化的趋势[1]。例如，运动爱好者通常需要富含蛋白质且易于消化的肉类产品以促进肌肉修复和生长，而军人及应急救灾人员等特殊群体则更侧重于能够快速提供高能量的肉制品以维持体力[2,3]。为满足这些特定需求，市场上涌现出了一系列标榜“高蛋白质”或“高能量”的肉制品，然而，这些产品种类繁多，如高蛋白鸡胸肉肠、高蛋白即食牛肉以及高能量午餐肉罐头等，其配料体系与加工工艺千差万别。消费者在选购时往往仅能依赖标签宣称，而对产品真实的营养价值、质构特性、风味品质乃至生物利用度缺乏系统性的认知和科学的比较依据[4]。

现有研究多聚焦于单一加工技术或特定成分对特需肉制品品质的作用。例如如何有效提高肉制品中蛋白质的消化率[5]，酶法水解被证实能够将大分子蛋白质分解为更易于人体吸收的小分子肽和氨基酸，从而显著提升蛋白质的消化效率[6]。同时，加工技术如高压处理和超声技术能够改变蛋白质的二级和三级结构，增加其与消化酶的接触面积，进而改善其消化性能[7]。在提升肉制品总能量水平方面，传统的策略主要依赖于增加脂肪含量，考虑到高脂肪摄入与多种慢性疾病风险的关联，探索科学且健康的能量提升方法至关重要[8]。一些研究证实中链甘油三酯作为能量来源的可能性，因为其更易被消化吸收和代谢[9]。此外，添加适量合适的碳水化合物如麦芽糊精，也被认为是提高能量且不显著增加脂肪含量的有效途径[10]。然而，已有研究缺少对同类特需肉制品产品间以及不同产品分类下在质构、风味、消化特性等品质指标的共通点或差异性。因此，对我国市场上出现的标称高蛋白质含量和高能量水平的肉制品分别进行营养组分、总能量水平、风味、质构和蛋白质消化率开展研究，必要且可行[11]。

基于此，本研究不再局限于单一指标的优劣评判，而是旨在构建一个多维度的系统评价框架。因此选择市售标称高蛋白质含量和高能量水平的肉制品，联用顶空气相离子迁移色谱（Headspace Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry，HS-GC-IMS）、质构分析及体外消化模型，系统评价其营养组分（蛋白质、水分、脂肪）、能量水平、风味、质构特性和蛋白质消化率，以期为特需肉制品开发提供基础数据和方法支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究采购了 8 种营养声称为高蛋白质和 4 种产品标签为高能量的肉制品，依据 GB 28050-2011《预包装食品营养标签通则》[12]及市场调研标准，选取蛋白质含量≥15g/100 g 或能量≥600 kJ/100 g 的产品作为研究对象，产品种类包括即食肉制品、肉干、午餐肉、香肠、肉丸、肉饼以及午餐肉罐头（包括猪肉、鸡肉和鸡肉猪肉混合午餐肉罐头），这些产品采购于市场上销售的不同品牌，具体信息见表 1。在实验分析前，所有产品均按照厂商的说明进行储存。

主要试剂：超纯水，乙醇，冰醋酸，氯化钾，盐酸，氢氧化钠，过硫酸铵，质量浓度 2%十二烷基磺酸钠，质量浓度 30%丙烯酰胺，质量浓度 10%过硫酸铵，三羟基甲基氨基甲烷，四甲基乙二胺等，所有试剂均为分析纯。

表 1 市售肉制品产品信息

Table 1 Information on the demand for commercially available meat products

分类	品牌编号	产品名称	配料表	营养标签（/100 g）
高蛋白质型肉制品	A	即食牛肉	牛肉、盐、香辛料	能量：524 kJ、蛋白质：24.0 g、脂肪：1.8 g、碳水化合物：2.9 g
	B	运动牛肉干	牛肉、白砂糖、味精、食用盐、酿造酱油、香辛料、食品添加剂	能量：1575 kJ、蛋白质：32.9 g、脂肪：8.7 g、碳水化合物：40.8 g
	C	即食鸡小胸肉	鸡胸肉、食用香精香料、食用盐、未味精、食品添加剂	能量：541 kJ、蛋白质：27.7 g、脂肪：0.7 g、碳水化合物：2.6 g
	D	低脂鸡胸肉肠	鸡胸肉、水、大豆分离蛋白、谷阮粉、鸡软骨、食用盐、复配水分保持剂、谷氨酸钠、乳酸钠、食用香精、卡拉胶、D异抗坏血酸钠、乳酸链球菌素、复合调味料、胶原蛋白肠衣	能量：481 kJ、蛋白质：22.2 g、脂肪：2.2 g、碳水化合物：1.3 g
	E	鸡肉午餐肉	鸡肉、饮用水、乙酰化二淀粉磷酸酯、大豆蛋白、食用盐、赤藓糖醇、三聚磷酸钠、六偏磷酸钠、	能量：575 kJ、蛋白质：16.1 g、脂肪：4.5 g、碳水化合物：7.9 g

			香辛料、山梨酸钾	
	F	即食鸡胸肉丸	鸡胸肉、饮用水、大豆分离蛋白、木薯淀粉、食用盐等	能量：524 kJ、蛋白质：15.7 g、脂肪：2.7 g、碳水化合物：9.2 g
	G	低脂鸡胸肉肠	鸡胸肉、鸡蛋清、水、鸡胸软骨、胶原蛋白粉、大豆分离蛋白、胶原蛋白肠衣、果葡糖浆、食用盐等	能量：520 kJ、蛋白质：21.6 g、脂肪：1.5 g、碳水化合物：5.7 g
	H	鸡肉蔬菜饼	鸡胸肉、饮用水、蛋白液、淀粉、白砂糖、食用盐、香辛料、三聚磷酸钠、焦磷酸钠、食用香精、酿造食醋	能量：462 kJ、蛋白质：20.0 g、脂肪：1.0 g、碳水化合物：5.0 g
高能量型肉制品	I	午餐肉罐头	猪肉、鸡胸肉、饮用水、玉米淀粉、大豆蛋白、食用盐、白砂糖、味精、香辛料、食品添加剂	能量：1025 kJ、蛋白质：11.0 g、脂肪：20.5 g、碳水化合物：4.7 g
	J	午餐肉罐头	猪肉、饮用水、食用玉米淀粉、大豆蛋白、食用盐、白砂糖、食用香辛料、食用香精、食品添加剂	能量：881 kJ、蛋白质：12.2 g、脂肪：14.3 g、碳水化合物：8.5 g
	K	猪肉午餐肉罐头	猪肉、水、淀粉、大豆分离蛋白、食用盐、香辛料、复配水分保持剂等	能量：868 kJ、蛋白质：16.2 g、脂肪：15.2 g、碳水化合物：1.8 g
	L	鸡肉午餐肉罐头	鸡胸肉、鸡腿肉、水、海藻糖、大豆拉丝蛋白、大豆分离蛋白、磷酸酯双淀粉、乳酸钠、食用盐等	能量：727 kJ、蛋白质：14.2 g、脂肪：5.6 g、碳水化合物：16.4 g

1.2 仪器与设备

FAMO 超纯水机，南京权坤生物科技有限公司；SOX406 脂肪测定仪，海能未来技术集团股份有限公司；K9840 自动凯式定氮仪，海能未来技术集团股份有限公司；DHP-600 电热恒温培养箱，天津市中环实验电炉有限公司；ML204 电子天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；TA-XT Plus 质构仪，英国 Stable Micro Systems 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 基本营养成分的测定

蛋白质含量（X_1）的测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》[13]；脂肪含量（X_2）的测定参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》[14]；水分含量的测定参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》[15]；碳水化合物含量（X_3）的测定以食品总质量为 100，减去蛋白质、脂肪、水分、灰分的质量，其中灰分含量测定参考 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》[16]。

1.3.2 能量的测定

能量含量采用阿特沃特通用系数计算。

$$E=17X_1+37X_2+17X_3 \quad (1)$$

式中：

E——能量，kJ/100 g;

X_1——蛋白质含量，g/100 g;

X_2——脂肪含量，g/100 g;

X_3——碳水化合物含量，g/100 g。

1.3.3 质构特性

将样品切成 1 cm×1 cm×1 cm 的立方体，用 TA-XT Plus 质构仪测定 12 种市售产品的硬度、弹性、咀嚼性、胶粘性和回复性。测定参数 P/35 柱形探头，测试速度 60 mm min^{-1}，形变量 50%，触发力 0.5 N，每组 6 个平行[17]。

1.3.4 挥发性风味物质测定

顶空气相离子迁移色谱检测参考王瑞花等[18]的方法并稍作修改。取 2.0 g 样品置于顶空中。

顶空进样条件：在 80 ℃条件下，以 500 r min^{-1} 的转速孵育 20 min；进样体积为 500 μL。不分流进样，进样针温度为 85 ℃。

气相色谱仪（Gas Chromatography，GC）条件：色谱柱温度为 60 ℃；载气为高纯氮气（纯度≥99.999%）；程序升压的初始流量 2.0 mL min^{-1} 保持 2 min，在 8 min 内线性增至 10.0 mL min^{-1}，在 10 min 内线性增至 100.0 mL min^{-1}，在 10 min 内线性增至 150.0 mL min^{-1}。色谱运行时间为 25 min；进样口温度为 80 ℃。

离子迁移谱（Ion Mobility Spectrometry，IMS）条件：电离源为氚源（3H）；迁移管长度为 53 mm；电场强度为 500 V cm^{-1}；迁移管温度是 45 ℃；漂移气为高纯氮气（纯度≥99.999%）；流速为 75 mL min^{-1}；正离子模式。

1.3.5 蛋白质消化率测定

参考 Wen 等[19]的方法并略作修改。将样品绞碎后，称取 4 g 置于冰浴中，加入 16 mL 磷酸盐缓冲液后使用匀浆机进行匀浆（9 600 r min^{-1}，30 s，2 次）。用 1 mol L^{-1} 的盐酸将 pH 值调至 3.0，随后加入 8 mL 胃蛋白酶溶液（0.48 g 胃蛋白酶∶15 mL 0.1 M 盐酸）后在 37 ℃恒温摇床反应 2 h。反应结束后用 1 mol L^{-1} 的氢氧化钠将反应液 pH 值调至 7.5，终止胃蛋白酶反应形成。未终止反应的混合液加入 8 mL 胰蛋白酶溶液（0.288 g 胰蛋白酶∶12 mL 0.01 M pH 7.0 磷酸盐缓冲液），用 1 mol L^{-1} 的氢氧化钠将 pH 值调至 7.0，37 ℃恒温摇床反应 2 h 后沸水浴 5 min 终止反应，形成胃蛋白酶酶解液和胰蛋白酶两步酶解液。将胃消化产物以及两步消化所得产物按体积比 1:3 加入无水乙醇，4 ℃下静置 12 h 后离心（5 000 *g*，4 ℃，20 min），离心后去上清，沉淀物在 50 ℃下烘干至恒重。消化率按下式计算：

$$D=\frac{W_0-W_1}{W_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中:

D——蛋白质消化率，%;

W_1——消化后沉淀物质干燥后的质量，g;

W_0——消化前样品的总质量，g。

1.3.6 消化前后十二烷基磺酸钠-聚丙烯酰胺凝胶（Sodium Dodecyl Sulfate Polyacrylamide Gel Electrophoresis，SDS-PAGE）电泳

参照 Li 等[20]的方法并略作修改。未消化样品称取 1.0 g，加入 15 mL 全蛋白提取液（5 g L^{-1} 的十二烷基磺酸钠，10 mmol L^{-1} 的磷酸盐缓冲液），在冰浴中进行匀浆（9 800 r min^{-1} 匀浆 30 s，2 次；然后 13 400 r min^{-1} 匀浆 30 s，2 次），已消化样品取离心后的沉淀 1.0 g，加入 15 mL 全蛋白提取液，80 ℃水浴 20 min。水浴后的样品混合液于 4 ℃、1 500 *g* 离心 20 min，取上清液。采用二喹啉甲酸（Bicinchoninic Acid，BCA）试剂盒测定上清液中蛋白质的浓度，并将不同样品蛋白质浓度调整至 5 mg mL^{-1}。SDS-PAGE 电泳使用质量体积百分比为 5%的浓缩胶和 10%的分离胶，每孔上样量为 10 μL。电泳条件：60 V，20 min；然后 110 V，40 min。考马斯亮蓝 R-250 染色 30 min，用脱色液（体积分数为 45.5%（*V/V*）乙醇，体积分数为 9%（*V/V*）冰乙酸）脱色至背景清晰。最后使用凝胶成像系统采集图像。

1.3.7 数据处理

质构特性测定实验重复 6 次平行，其余各实验均重复 3 次平行。使用 IBM SPSS Statistics 26 软件，对结果进行单因素 ANOVA 分析，$P<0.05$ 表示具有显著性差异，各处理组间的差异显著性分析采用 Duncan's 多重比较。图形绘制采用 GraphPad Prism 8 软件。

2 结果与讨论

2.1 市售特需肉制品的基本营养成分分析

表 2 市售肉制品的水分、粗脂肪、蛋白质及碳水化合物含量

Table 2 Moisture, total fat, protein, and carbohydrate content of commercially available meat products

编号	水分含量/(g/100 g)	脂肪含量/(g/100 g)	蛋白质含量/(g/100 g)	碳水化合物含量/(g/100 g)
A	65.95±0.78^{b}	1.93±0.09^{bc}	27.22±0.56^{b}	1.47±0.06^{i}
B	19.25±0.46^{e}	1.71±0.39^{cde}	38.65±0.56^{a}	32.90±0.17^{a}
C	66.93±0.24^{b}	0.71±0.09^{ef}	25.60±0.06^{c}	2.93±0.06^{h}
D	66.21±0.32^{b}	0.23±0.02^{f}	22.15±0.56^{d}	5.80±0.10^{g}
E	67.62±0.33^{b}	4.26±0.08^{b}	16.52±0.45^{e}	6.00±0.20^{f}
F	71.12±3.69^{a}	0.84±0.04^{ef}	14.95±0.36^{f}	10.97±0.90^{d}
G	66.00±0.47^{b}	0.77±0.05^{ef}	22.07±0.50^{d}	6.30±0.20^{f}

H	67.59±0.14^{b}	2.15±0.09^{c}	11.58±0.36^{c}	12.73±0.64^{c}
I	55.88±0.67^{d}	14.81±1.61^{a}	10.65±0.14^{h}	8.87±0.23^{e}
J	59.00±0.82^{c}	15.13±0.81^{a}	12.30±0.16^{gh}	7.50±0.10^{f}
K	67.21±0.19^{b}	4.24±0.23^{b}	12.97±0.20^{g}	11.43±0.15^{d}
L	66.08±0.12^{b}	0.98±0.02^{def}	14.19±0.22^{f}	14.70±0.44^{b}

注：数据以平均值±标准偏差表示，列中不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

由表 2 所示，标称高能量型肉制品的蛋白质含量显著低于高蛋白质型肉制品（P<0.05），运动牛肉干（B）和即食牛肉（A）的蛋白质含量分别为 38.65 g/100 g 和 27.22 g/100 g，显著高于其他产品（P<0.05），且其与营养标签标示值（B：32.9 g/100 g，A：24.0 g/100 g）对比，偏差分别为+17.5%和+13.4%，符合 GB 28050-2011《预包装食品营养标签通则》允许的标示值误差范围（≤20%）。低脂鸡胸肉肠类产品（D、G）的蛋白质含量虽低于牛肉制品，但其脂肪含量均显著低于其余产品（P<0.05），符合运动爱好者对低脂食品的需求[21]。运动牛肉干（B）因干燥工艺使水分含量显著低于其他产品（P<0.05），而其较高的碳水化合物含量则可能与配方中添加的白砂糖和酱油有关[22]。即食鸡胸肉制品（C、F）和低脂鸡胸肉肠（D、G）的水分含量高于其余产品（66.00 g/100 g~71.12 g/100g）。高能量型肉制品中除鸡肉午餐肉罐头外均含有较高的脂肪含量，可能源于配方中脂肪的添加和保留。

2.2 市售特需肉制品能量值分析

如图 1 所示，标称高蛋白质型肉制品和高能量型肉制品在能量值上存在显著差异（P<0.05）。其中，牛肉干类产品（B）具有高蛋白、高碳水化合物和低水分的特性，表现出最高的能量值，达到 1 280 kJ/100 g，这使其适合于登山、越野等高能量消耗的特殊运动场景[23]。其他高蛋白质型肉制品，如即食牛肉（A）、低脂鸡胸肉肠（D、G）和鸡肉蔬菜饼（H）能量值均较低，与其标签所示相符。午餐肉罐头（I、J）的能量值显著高于除运动牛肉干外的其余肉制品，这主要归因于其较高的脂肪含量，符合其高能量的标签，但长期或大量摄入高脂肪含量的午餐肉可能增加个体的代谢负担[24]。

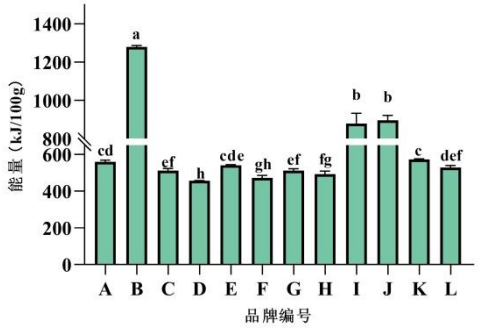

图 1 12 种市售肉制品的能量值

Fig.1 Energy content of 12 commercially available meat products

注：小写字母不同，表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

2.3 市售特需肉制品的质构特性

表 3 市售肉制品的质构特性

Table 3 TPA of commercially available meat products

编号	硬度/g	胶粘性	弹性	黏附性	咀嚼性	回复性
A	8 497.15±1 683.55^{b}	2 951.55±766.29^{d}	0.42±0.03^{f}	0.35±0.02^{d}	1 476.78±586.81^{efg}	0.17±0.02^{de}
B	16 375.47±1 560.40^{a}	14 055.61±1 391.92^{a}	0.93±0.04^{ab}	0.86±0.04^{a}	13 005.00±1 424.35^{a}	0.56±0.10^{a}
C	1 696.42±122.07^{e}	882.31±174.43^{fg}	0.83±0.06^{d}	0.52±0.08^{c}	738.25±192.29^{fg}	0.19±0.03^{d}
D	5 854.31±911.04^{c}	4 472.90±675.19^{c}	0.92±0.02^{abc}	0.77±0.06^{b}	4 112.34±681.29^{c}	0.38±0.04^{b}
E	1 690.01±402.54^{e}	948.24±333.23^{fg}	0.93±0.03^{ab}	0.55±0.08^{c}	874.59±286.96^{fg}	0.24±0.05^{c}
F	2 761.15±364.50^{de}	1 989.43±276.33^{e}	0.89±0.02^{abc}	0.72±0.01^{b}	1 776.58±242.75^{e}	0.37±0.01^{b}

G	8 198.74±144.75^{b}	6 203.66±102.83^{b}	0.95±0.02^{a}	0.76±0.01^{b}	5 908.65±158.96^{b}	0.38±0.01^{b}
H	2 339.52±408.55^{e}	1 702.33±400.45^{ef}	0.89±0.03^{abc}	0.72±0.06^{b}	1 514.85±342.92^{ef}	0.33±0.03^{b}
I	1 976.33±106.49^{e}	600.49±109.14^{g}	0.74±0.10^{e}	0.30±0.05^{d}	437.01±72.53^{g}	0.10±0.02^{f}
J	2 162.62±275.02^{e}	779.61±149.49^{g}	0.86±0.03^{cd}	0.36±0.04^{d}	740.85±188.50^{g}	0.12±0.01^{ef}
K	3 608.18±855.48^{d}	1 201.20±468.44^{efg}	0.87±0.03^{bcd}	0.32±0.05^{d}	1 038.47±390.00^{efg}	0.11±0.02^{f}
L	6 489.40±729.63^{c}	3 730.59±633.26^{c}	0.86±0.03^{cd}	0.57±0.04^{c}	3 523.79±857.91^{d}	0.27±0.01^{c}

注：数据以平均值±标准偏差表示，列中不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

质构是评价肉制品品质的重要指标，直接影响消费者的感官体验和接受程度[17,25]。表 3 列出了不同市售肉制品的质构特性。结果显示，牛肉干类产品（B）的硬度、胶粘性、弹性、粘附性、咀嚼性以及回复性均显著高于其他样品（P<0.05），这主要归因于其在干燥过程中水分的大量损失，导致牛肉蛋白质结构更加致密，从而提升其硬度和胶粘性等指标[26]。香肠类中低脂鸡胸肉肠（G）的弹性系数为 0.95，显著高于其他肉制品（P<0.05），这可能与较高的鸡胸肉蛋白质含量有关，蛋白质在加工过程中形成稳定且富有弹性的凝胶网络结构，因此低脂鸡胸肉肠具有较高的弹性[27]。标称高能量型肉制品中猪肉午餐肉罐头类（I、J、K）具有较低的胶粘性和咀嚼性，这与其较高的脂肪含量有关。

2.4 市售特需肉制品的挥发性风味物质分析

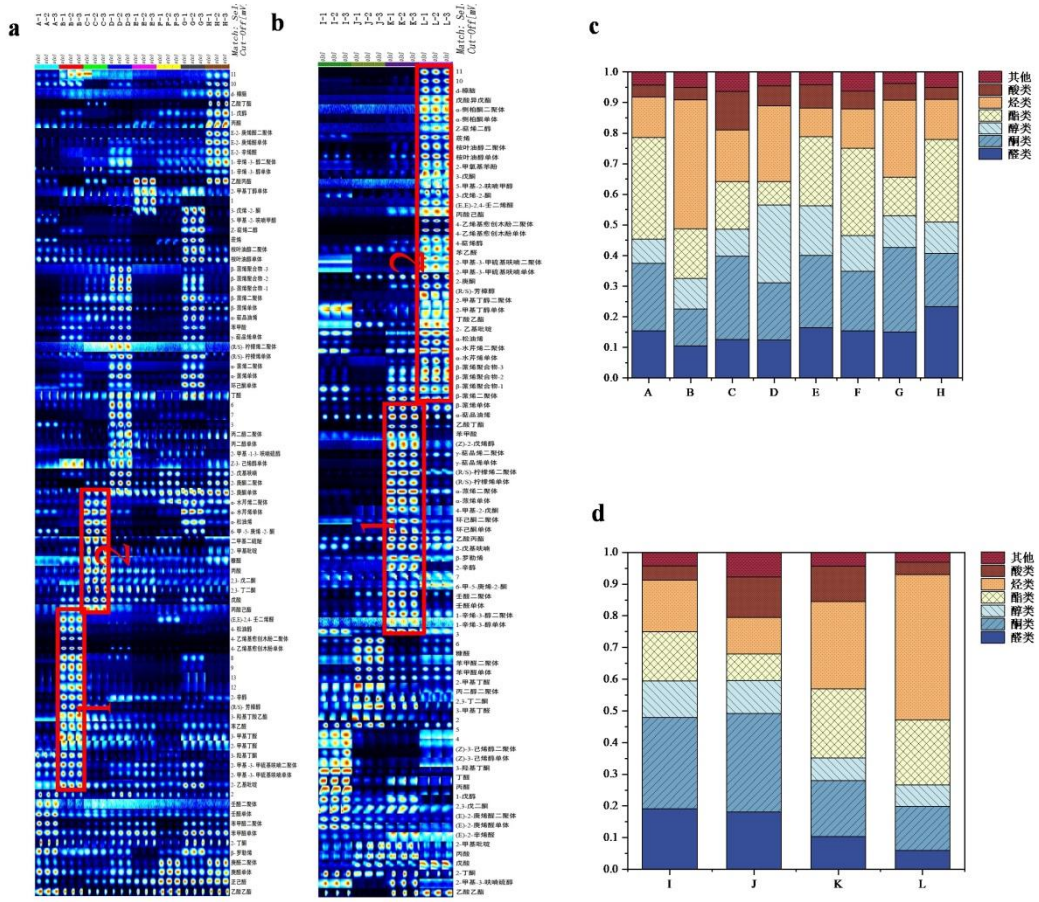

图 2 （a）高蛋白质型肉制品挥发性成分指纹图谱、（c）相对含量柱状堆叠图，（b）高能量型肉制品挥发性成分、（d）相对含量柱状堆叠图

Fig.2 (a) Fingerprint of volatile components of high-protein meat products, (c) bar stacked chart of relative content, (b) volatile components of high-energy meat products, (d) bar stacked chart of relative content

本研究采用挥发性化合物指纹图谱（图 2a、2b）以及相对含量柱状堆叠图（图 2c、2d）对标称高蛋白质型与高能量型肉制品的挥发性风味成分进行了分析。整体而言，高蛋白质型肉制品以醇类、醛类为主要挥发性成分，呈现较为清爽、肉香突出的风味；而高能量型肉制品中，烃类及酮类含量较高，风味表现为脂香及复杂醇厚的气

味。高蛋白质型肉制品中运动牛肉干（B）的挥发性物质组成与其他样品差异最为显著，其烃类化合物的含量显著高于其他样品，主要的特征性化合物包括 *β*-蒎烯和 4-乙烯基愈创木酚。低脂鸡胸肉肠类产品（D、G）具有风味共性，其挥发性物质组成较为接近，醇类化合物的含量显著高于其他高蛋白质型肉制品，主要的成分包括 1-辛烯-3-醇和丙二醇。高能量型肉制品中，(E,E)-2,4-壬二烯醛、苯甲酸、2-戊烯醇、*a*-松油烯、4-甲基-2-戊酮、2-戊基呋喃等在鸡肉午餐肉罐头（L）相对含量最高。鸡肉午餐肉罐头（L）的烃类化合物含量显著高于猪肉午餐肉罐头（K），主要的特征性化合物包括 *β*-蒎烯和 *a*-水芹烯等，而其醛类化合物的含量则显著低于其他样品。

2.5 市售特需肉制品的消化特性分析

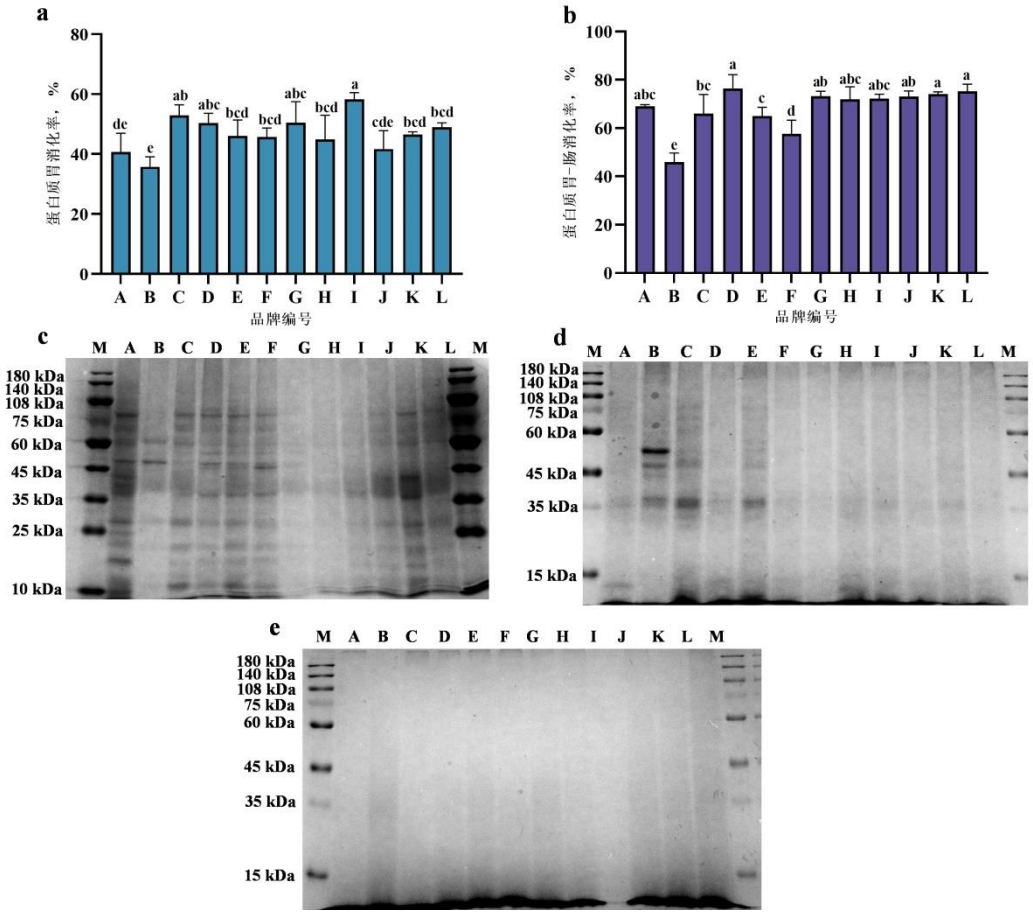

图 3 市售肉制品蛋白质消化率及 SDS-PAGE 分析

Fig.3 Protein digestibility and SDS-PAGE analysis of commercially available meat products

注:（a）蛋白质胃消化率;（b）蛋白质胃-肠消化率;（c）消化前样品;（d）胃消化样品;（e）胃-肠消化样品 SDS-PAGE 分析。小写字母不同，表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

蛋白质的消化率是评估肉制品营养价值的关键指标，反映了人体对蛋白质的利用程度[28]。如图 3a 所示，在高蛋白质型肉制品中，低脂鸡胸肉肠（D、G）的蛋白质消化率显著高于其他样品（P<0.05），高达 76.42%，这可能与其加工过程中形成的乳化体系有关，该体系有助于将脂肪滴包裹在肌肉纤维周围，从而减少蛋白质的氧化和聚集，进而提高了蛋白质的消化率[29]。Li 等[20]的研究表明，乳化型香肠的消化率最高，粒径最小（P<0.05），而炖煮猪肉的结果则相反（P<0.05），本研究结果与其一致。相对而言，运动牛肉干（B）的蛋白质消化率为 45.94%，显著低于其他样品（P<0.05），这可能与其加工工艺中的风干过程有关，风干过程可能加剧了蛋白质的交联和聚集，导致其消化难度增加。此外，即食鸡胸肉丸（F）的蛋白质消化率也显著低于其他肉制品，这可能是在加工过程中添加了淀粉降低了消化物的可及性，从而影响了蛋白质的消化[24]。值得注意的是，市售标称高能量型肉制品的蛋白质消化率普遍较高，这是由于午餐肉罐头的高温杀菌工艺破坏蛋白质结构，从而暴露出更多的水解位点，消化酶与之充分结合[30]。

图 3c、3d 和 3e 展示了标称高蛋白质型肉制品和高能量型肉制品在消化前、胃消化以及肠消化后的全蛋白 SDS-PAGE 图谱。消化前的肉制品在 75 kDa 和 45 kDa 附近呈现出清晰的蛋白质条带，表明这些样品含有较高的完整蛋白质。经模拟胃消化后，所有样品的蛋白质条带均显著减少，尤其是在高蛋白质型肉制品中，如即食牛肉（A）、低脂鸡胸肉肠（D、G）和鸡肉蔬菜饼（H），蛋白质的降解更为彻底。在随后的模拟肠消化阶段，所有样品的蛋白质条带几乎完全消失，表明蛋白质已被胰蛋白酶等消化酶进一步水解为小分子肽或氨基酸，这与已有研究结果相一致[31]。

2.6 营养组分、品质特性和蛋白质消化率相关性分析

基于能量值的聚类分析结果（图 4a）显示，标称高蛋白质型肉制品中运动牛肉干（B）因其独特的能量特征而单独聚为一簇，属于高能量组；高能量型肉制品中两款午餐肉罐头（I 和 J）归为一簇，表现出较高的能量值。其余肉制品则聚为一簇，其特点是其能量值较低，但蛋白质含量较高且脂肪含量较低，更适合运动后快速补充蛋白质并控制能量摄入。蛋白质含量的聚类分析结果（图 4b）表明，运动牛肉干（B）再次单独成簇，其蛋白质含量显著高于其他产品。即食肉类和香肠类肉制品聚为一簇，其蛋白质含量处于中等水平。蛋白质消化率的聚类分析结果（图 4c）显示，运动牛肉干（B）仍然单独成簇，其蛋白质消化率显著低于其他样品。午餐肉罐头与香肠类产品聚为一簇，呈现较高的蛋白质消化率。其他标签为高蛋白质含量的肉制品则聚为另一簇。

对市售标称高蛋白质型肉制品和高能量型肉制品的基本营养成分、质构特性和挥发性风味物质进行相关性分析。结果（图 4d）表明，蛋白质消化率与蛋白质含量、碳水化合物含量以及能量均呈负相关，而与水分含量呈正相关，这可能与高脂肪包裹蛋白质阻碍消化酶解有关[32]。这提示通过调控食品中不同营养成分的比例，可以有效影响蛋白质的消化率和能量水平。同时，相关性分析还揭示了质构、风味和营养品质之间存在密切的关联性。蛋白质含量与咀嚼性、胶粘性和硬度呈现极显著的正相关关系（P<0.01）。酮类挥发性化合物与水分含量、碳水化合物含量、硬度和咀嚼性之间呈显著正相关（P<0.05），与碳水化合物的正相关性达到极显著水平（P<0.01）。烃类挥发性化合物也与碳水化合物含量、硬度、胶粘性和咀嚼性之间呈显著正相关（P<0.05）。相反，醇类挥发性化合物与营养及质构指标之间呈现负相关关系，这可能与加工过程中高温导致醇类物质的挥发损失有关。

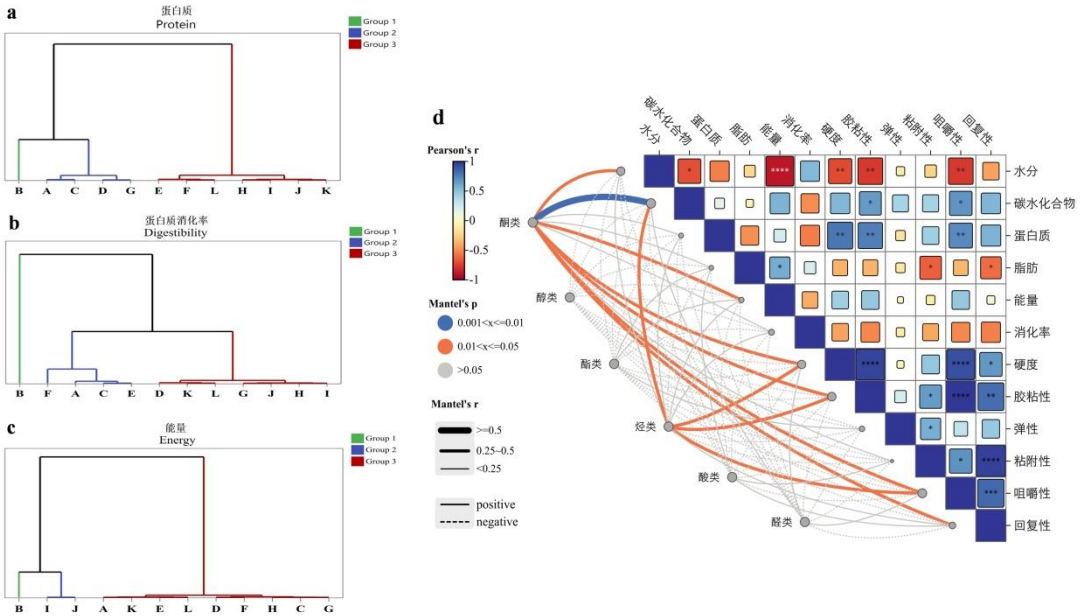

图 4 市售肉制品的蛋白质聚类分析（a）、蛋白质消化率聚类分析（b）、能量聚类分析（c）和品质交互式相关性热图（d）

Fig.4 Cluster analysis of protein(a), cluster analysis of protein digestibility(b), cluster analysis of energy(c) and interactive correlation heatmap of quality characteristics(d) for commercially available meat products.

3 结论

高蛋白质型肉制品中牛肉干类产品以其显著的高蛋白质和高能量含量以及丰富的挥发性成分为主要特征，尽管其质构较为坚硬，但能够有效的满足特定场景下对快速能量和蛋白质补充的需求。低脂鸡胸肉肠类产品则表现

出优异的蛋白质消化特性，更符合对优质蛋白质有特殊需求的消费群体。高能量型肉制品中猪肉午餐肉罐头类产品则具有较高的能量值和可观的蛋白质消化率，然而其较高的脂肪含量应引起关注。通过 HS-GC-IMS 分析，本研究鉴定了多种特征性挥发性风味物质，并确定了关键的挥发性风味物质。此外，多元相关性分析结果表明，市售标称高蛋白质型以及高能量型肉制品的质构特性、挥发性风味物质组成和营养品质之间具有显著的相关性。研究结果为消费者提供了科学的选购指南，也为肉制品企业在产品定位、配方优化等方面提供了数据支持和方法参考。未来研究可进一步聚焦于解析同类产品共性形成的工艺机制，开发精准营养设计模型，以满足日益多元化的市场需求。

参考文献

[1] RODRIGUES S S Q, VASCONCELOS L, LEITE A, et al. Novel approaches to improve meat products' healthy characteristics: a review on lipids, salts, and nitrites [J]. Foods, 2023, 12(15): 2962.

[2] BERRYMAN C, BUKHARI A, HENNIGAR S, et al. The military health and nutrition examination study project overview: assessment of the health and nutritional status of the active-duty US army [J]. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 2024, 124(10, Supplement): A79.

[3] PHILLIPS S M. Dietary protein requirements and adaptive advantages in athletes [J]. British Journal of Nutrition, 2012, 108(S2): S158-S167.

[4] CUI P, LI M, YU M, et al. Advances in sports food: Sports nutrition, food manufacture, opportunities and challenges [J]. Food Research International, 2022, 157: 111258.

[5] LEE S, JO K, JEONG S K C, et al. Recent strategies for improving the quality of meat products [J]. Journal of Animal Science and Technology, 2023, 65(5): 895-911.

[6] ZHANG Z, WU Y, ZHANG C, et al. Exploring how papaya juice improves meat tenderness and digestive characteristics in Wenchang chickens [J]. Poultry Science, 2025, 104(1): 104621.

[7] LEE S, JO K, JEONG S-K-C, et al. High-pressure processing of beef increased the *in vitro* protein digestibility in an infant digestion model [J]. Meat Science, 2023, 205: 109318.

[8] 李明华,高艳蕾,宋艳艳,等.凝胶油替代脂肪制备牛肉饼的配方优化[J].现代食品科技,2020,36(5):252-260.

[9] 徐文轩.补充中链甘油三酯对小鼠体成分及运动表现的影响[D].吉林:吉林体育学院,2024.

[10] DAHL W J, STEWART M L. Position of the academy of nutrition and dietetics: health implications of dietary fiber [J]. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 2015, 115(11): 1861-1870.

[11] 卢慧,闫庆国,李玲,等.肉制品食用品质客观评价技术研究进展[J].肉类研究,2024,38(6):76-84.

[12] GB 28050-2011 食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则[S].

[13] GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S].

[14] GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S].

[15] GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].

[16] GB 5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S].

[17] DOLORES ROMERO DE ÁVILA M, ISABEL CAMBERO M, ORDÓÑEZ J A, et al. Rheological behaviour of commercial cooked meat products evaluated by tensile test and texture profile analysis (TPA) [J]. Meat Science, 2014, 98(2): 310-315.

[18] 王瑞花,姜万舟,汪倩,等.红烧猪肉工艺优化及其挥发性风味成分的分离与鉴定[J].中国食品学报,2017,17(5):208-216.

[19] WEN S, ZHOU G, SONG S, et al. Discrimination of in vitro and in vivo digestion products of meat proteins from pork, beef, chicken, and fish [J]. Proteomics, 2015, 15(21): 3688-3698.

[20] LI L, LIU Y, ZOU X, et al. In vitro protein digestibility of pork products is affected by the method of processing [J]. Food Research International, 2017, 92: 88-94.

[21] PETIBOIS C, CAZORLA G, POORTMANS J R, et al. Biochemical aspects of overtraining in endurance sports: a review [J]. Sports Med, 2002, 32(13): 867-878.

[22] CHOI J H, JEONG J Y, HAN D J, et al. Effects of pork/beef levels and various casings on quality properties of semi-dried jerky [J]. Meat Sci, 2008, 80(2): 278-286.

[23] MEDIANI A, HAMEZAH H S, JAM F A, et al. A comprehensive review of drying meat products and the associated effects and changes [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1057366.

[24] TANG Q, SUN Y, YAO Z, et al. Starch in emulsion-type sausage reduced the gastric digestibility of meat protein by reducing the stability and increasing the viscoelasticity of gastric digests [J]. J Agric Food Chem, 2024, 72(40): 22279-22289.

[25] MABROUKI S, ABID K, KAIHARA H, et al. Assessing texture profile analysis in natural state versus texture profile analysis with back extrusion post-homogenization of cooked pea protein-based and meat patties: A comparative study [J]. Future Foods, 2024, 9: 100345.

[26] SHANG F, KRYZHSKA T, DUAN Z. Effects of adding different contenes of pig rind on physical and chemical properties and sensory qualities of wheat bran chicken sausage [J]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, 4(11-118): 6-14.

[27] 熊可心,熊哲民,王子凌,等.3 种植物蛋白及不同添加量对乳化香肠品质特性的影响[J].食品科技,2023,48(3):132-139.

[28] LEE S, JO K, CHOI Y-S, et al. Tracking bioactive peptides and their origin proteins during the *in vitro* digestion of meat and meat products [J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139845.

[29] YOUSSEF M K, BARBUT S, SMITH A. Effects of pre-emulsifying fat/oil on meat batter stability, texture and microstructure [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2011, 46(6): 1216-1224.

[30] CHAO Y-C, SUN L-X, NIU M-Y, et al. Comparative study on the edible quality and protein digestibility of diced chicken with mushroom from prefabricated product and traditional cooked [J]. Food Science and Technology (Campinas), 2023, 43: e106722.

[31] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. *INFOGEST* static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.

[32] KARIM A, MOHAMMADI L, OSSE E F, et al. Effect of polysaccharide-induced viscosity on the digestion of proteins, fats, and carbohydrates in food: A comprehensive review and future perspectives [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153: 104757.