冯玉婷, 金松, 汪梦露, 等. 不同日龄、部位及性别的皖西白鹅肉品质和肌原纤维蛋白特性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 292−302. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030272

FENG Yuting, JIN Song, WANG Menglu, et al. Meat Quality and Myofibrillar Protein Characteristics of Wanxi White Geese at Different Ages, Parts and Sexes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 292−302. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030272

· 分析检测 ·

不同日龄、部位及性别的皖西白鹅肉品质和肌原纤维蛋白特性

冯玉婷[1,2], 金　松[3,+], 汪梦露[2], 王　蕊[2], 刘纯杰[4], 梅　林[2,*]

（1.安徽农业大学食品与营养学院创新班, 安徽合肥 230036;
2.安徽农业大学食品与营养学院, 安徽合肥 230036;
3.正大食品（合肥）有限公司, 安徽合肥 231100;
4.肥西老母鸡食品有限公司, 安徽合肥 230031）

摘　要: 本研究以皖西白鹅为对象，针对不同日龄（120 日龄、180 日龄、365 日龄）、不同部位（胸肌、腿肌）及不同性别的样本，系统探究其肉品质、营养成分及肌原纤维蛋白（myofibrillar protein，MP）特性差异。结果显示，随日龄增长，剪切力显著提升（365 日龄腿肌达 46.5 N，P<0.05），肉色亮度（L^*）和红度（a^*）值增加，而嫩度、蛋白质与脂肪含量呈下降趋势；腿肌系水力（最高 76.74%）、pH 显著高于胸肌（P<0.05），公鹅肉色亮度优于母鹅，但系水力较低。营养成分特征显示，120 日龄游离氨基酸总量最高（丙氨酸 235.24 μg/g、谷氨酸 141.62 μg/g），鲜味氨基酸占比突出；脂肪酸组成以单不饱和脂肪酸为主（最高 53.38%），多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸比值（PUFA/SFA）为 0.47~0.53，其中 120 日龄不饱和脂肪酸含量最高，食用价值更优。肌原纤维蛋白功能特性显示，日龄增长显著提升 MP 浓度、表面疏水性（最高 48.65 μg/g）、凝胶保水性（89.03%）及乳化活性（0.067 m^2/mg，P<0.05），而溶解度于 180 日龄达峰值（45.74%）后下降；腿肌 MP 的凝胶硬度（9159.7 N）、乳化稳定性（18.31）等指标显著优于胸肌（P<0.05）；公鹅 MP 表面疏水性较高，但凝胶强度及乳化活性低于母鹅（P<0.05）。研究结果为皖西白鹅肉加工适宜性评估及差异化产品开发提供了理论依据。

关键词: 皖西白鹅, 肉质加工利用, 肌原纤维蛋白, 日龄, 肉质特征

中图分类号: TS251.55　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0292−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030272

本文网刊:

Meat Quality and Myofibrillar Protein Characteristics of Wanxi White Geese at Different Ages, Parts and Sexes

FENG Yuting[1,2], JIN Song[3,+], WANG Menglu[2], WANG Rui[2], LIU Chunjie[4], MEI Lin[2,*]

（1.Innovation Class, School of Food and Nutrition, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2.School of Food and Nutrition, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
3.Chia Tai Food (Hefei) Co., Ltd., Hefei 231100, China;
4.Feixi Old Hen Food Co., Ltd., Hefei 230031, China）

Abstract: This study investigated the differences in meat quality, nutritional composition, and myofibrillar protein (MP) characteristics of Wanxi white geese across different ages (120, 180, and 365 days old), different muscle parts (breast and leg muscles), and different genders. The results showed that with increasing age, shear force significantly increased

收稿日期: 2025−03−20　　+并列第一作者

基金项目: 安徽农业大学校级大学生创新创业训练计划项目（S202510364622）。

作者简介: 冯玉婷（2004−）, 女, 本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 2950177025@qq.com。
金松（1980−）, 男, 硕士, 研究方向: 食品加工与品质控制, E-mail: 39332130@qq.com。

*** 通信作者:** 梅林（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: meilin@ahau.com。

(reaching 46.5 N in 365-day-old leg muscle, $P<0.05$), while meat color lightness (L^*) and redness (a^*) values increased, and tenderness, protein, and fat content showed a decreasing trend. Leg muscles exhibited significantly higher water-holding capacity (up to 76.74%) and pH than breast muscles ($P<0.05$). Meat from male geese showed better lightness but lower water-holding capacity compared to females. Nutritional analysis revealed that the total free amino acid content peaked at 120 days old (alanine: 235.24 μg/g, glutamic acid: 141.62 μg/g), with umami amino acids being prominent. Fatty acid composition was dominated by monounsaturated fatty acids (up to 53.38%), and the polyunsaturated to saturated fatty acid ratio (PUFA/SFA) ranged from 0.47 to 0.53. The 120-day-old geese exhibited the highest unsaturated fatty acid content and superior nutritional value. Regarding MP functional properties, increasing age significantly enhanced MP concentration, surface hydrophobicity (up to 48.65 μg/g), gel water retention (89.03%), and emulsifying activity (0.067 m^2/mg, $P<0.05$). Solubility peaked at 180 days old (45.74%) before declining. Leg muscle MP demonstrated significantly superior gel hardness (9159.7 N) and emulsifying stability (18.31) compared to breast muscle MP ($P<0.05$). MP from male geese had higher surface hydrophobicity but lower gel strength and emulsifying activity than females ($P<0.05$). These findings provide a theoretical basis for assessing the processing suitability of Wanxi White geese meat and developing differentiated products.

Key words: Wanxi white geese; meat processing and utilization; myofibrillar protein; day of age; meat quality characteristics

皖西白鹅属于安徽省优良品种, 其羽绒品质优良, 产绒率高[1], 是重要的生产资源, 具有体型较大、生长发育速度快且经济价值高等特点。近年来, 随着消费者对高蛋白、低脂肪肉制品的需求增长, 鹅肉因其营养均衡、风味独特而备受关注。

目前, 关于鹅肉品质的研究已有丰富进展。Weng 等[2] 研究结果, 研究日龄对鹅肉营养和品质的影响, 章杰等[3]针对鹅肉物理性质及化学组成展开研究。汪彪[4] 研究了乳酸杆菌和芽孢杆菌对浙东白鹅生产性能、血清指标及肠道微生态的影响。刘娜[5] 对鹅肉加工工艺进行研究。袁宇尘等[6] 对生长期皖西白鹅免疫器官结构和血液指标变化规律研究。研究表明, 肉类的加工特性与其理化性质、肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)功能特性密切相关, 肌原纤维蛋白的功能、凝胶对最终产品的品质和营养特性起着重要作用[7], 而日龄、部位及性别等因素显著影响肌肉的持水力、嫩度、乳化性及凝胶性能等关键指标。这些为皖西白鹅的生产、加工与消费提供了理论支持。

然而, 现有针对皖西白鹅的系统性研究较欠缺, 尤其是不同日龄、解剖部位及性别对其肉质加工特性的影响尚未明晰, 缺乏对日龄、性别和部位等因素影响的深入探讨。基于此, 本研究以皖西白鹅为对象, 系统探究不同日龄(120 日龄、180 日龄、365 日龄)、部位(胸肌、腿肌)、性别对其肉质基本理化性状、营养特性、风味特征及 MP 功能特性的影响。通过解析其肉质随日龄的变化规律, 明确关键加工特性与日龄、部位及性别的关联性, 旨在为皖西白鹅进一步加工提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

皖西白鹅　120 日龄、180 日龄、365 日龄的皖西白鹅(同栏), 雌雄各 13 只, 正大饲料企业规模养殖场提供; 无水乙醇(分析纯)、硼酸(分析纯)、甲醇(色谱级)　上海国药集团试剂有限公司; 乙二胺四乙酸(Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid, EDTA)、5,5' - 二硫代双(5,5' - Dithiobis, DTNB)、十二烷基硫磺酸(Dodecyl Sodium Sulfonate, SDS)　分析纯, 广州索莱宝生物科技有限公司; 磺基水杨酸、磷酸钠、氯化钠　分析纯, 上海麦克林生物试剂有限公司; 焦性没食子酸、苯酚、溴酚蓝　分析纯, 合肥尚诚有限公司。

BC/BD-102HT 冰箱　青岛海尔股份有限公司; CP224C 电子天平　上海奥豪斯仪器有限公司; CR-400 色差仪　日本 Monica Minolta 有限公司; C-LM3B 数显式肌肉嫩度仪　北京京晶科技有限公司; 雷磁 PHS-3C pH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司; TA-XT plus 质构仪　英国 SMS 公司; 海能 HD4020 凯氏定氮滴定系统　郑州妙林仪器设备有限公司; PE-Lambda 35 紫外-可见分光光度计　美国 PE 仪器有限公司; Allegra 64R 高速冷冻离心机　美国贝克曼库尔特有限公司; HH-S 系列电热恒温水浴锅　常州万丰仪器制造有限公司; GelDoc EZ 凝胶成像系统　上海瑞丰电子科技有限公司; NMI20-015V-Ⅰ型核磁共振成像分析仪　上海纽迈电子科技有限公司; DISCOVERY HR-Ⅰ型旋转流变仪　美国 TA 仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理与排酸　样品处理: 选取相同饲养条件(环境、日粮、管理方式)的 120 日龄、180 日龄、365 日龄皖西白鹅, 雌雄各 13 只, 颈部宰杀放血后去除内脏。剔除鹅肌肉表面筋膜、脂肪及结缔组织, 分割为 3 cm×2 cm×2 cm 肉块(用于物性测定)及冷藏样品(−4 ℃ 和−18 ℃ 保存)。样品标记为 MT(母鹅腿肌)、GT(公鹅腿肌)、MX(母鹅胸肌)、GX(公鹅胸肌)。

排酸: 分两阶段进行, 第一阶段温度为 5~8 ℃,

湿度为 70%~75%, 时间为 2~3 h; 第二阶段温度为 0~4 ℃, 湿度为 85%~90%, 时间为 13~14 h。

1.2.2 理化指标测定

1.2.2.1 肉色测定 参考牛力[8] 的方法, 并稍加修改。剔除鹅肌肉表面结缔组织膜, 分割为 3 cm×2 cm×2 cm 肉块, 然后在空气中暴露 10 min, 采用便携式色差仪测定胸肉 L^*值(亮度值)、a^*值(红度值)、b^*值(黄度值), 每样品 3 个位点重复 3 次取均值。

1.2.2.2 剪切力测定 参照 NY/T 1180-2006《肉嫩度的测定 剪切力测定法》[9]。

1.2.2.3 pH 测定 参照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》[10]。

1.2.2.4 系水力 参考张伟力[11] 的测定方法, 并稍加修改。将肉样切为 10 g 左右的小块, 精确称取, 放入离心管中进行离心(9000 r/min, 4 ℃), 离心 10 min 后用镊子取出肉样, 并用滤纸吸取肉表面水分后再次称重, 失去的水分为离心前与离心后的肉样重量之差。系水力由以下公式计算:

$$\text{系水力}(\%)=\left(1-\frac{m-M}{m}\right)\times 100$$

式中: m 为肉样离心前重量, g; M 为肉样离心后重量, g。

1.2.2.5 质构测定 参考朱美淋等[12] 的测定方法, 并稍加修改。将鹅肉样品在室温放置 2 h, 分割为 3 cm×2 cm×2 cm 肉块, 切面要求平整。采用质构剖面分析(TPA)法, 探头型号选择 P/36R, 测前速率 2.00 mm/s、测试速率 2.00 mm/s、测后速率 2.00 mm/s, 压缩比设置为 50%, 探头两次测定间隔 5.00 s, 自动循环 2 次, 每组平行测定 3 次。

1.2.2.6 基本成分 水分按照国标 GB 5009.3-2016[13] 测定; 灰分按照国标 GB 5009.4-2016[14] 测定; 蛋白质按照国标 GB 5009.5-2016[15] 测定; 粗脂肪按照国标 GB 5009.6-2016[16] 测定。所有测定实验均重复 3 次。

1.2.2.7 游离氨基酸 参考孙祥祥等[17] 的测定方法, 并稍加修改。称取 3 g 绞碎的肉样置于离心管内, 加入 3 mL 超纯水混合并匀浆(6000 r/min, 20 s, 2 次), 离心(4 ℃、10000 r/min, 10 min)后收集上清液, 定容至 5 mL。向 2 mL 离心管中依次加入 600 mg 上述溶液和 1 mL 6% 磺基水杨酸, 振荡摇匀。超声处理 30 min 后 4 ℃ 静置 12 h 后复超声处理 30 min, 离心(14000 r/min, 30 min), 取上清液用 0.22 μm 水相滤膜过滤得样品, 上机分析。

1.2.2.8 脂肪酸含量 参照 GB 5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》[18] 归一化法测定。

1.2.3 肌原纤维蛋白特性分析

1.2.3.1 肉的预处理 选用屠宰 24~48 h 的新鲜肉, 剔除多余的脂肪以及结缔组织, 将其剪碎放入真空袋中在−20 ℃ 左右冷冻 24 h, 提取肌原纤维蛋白前在 4 ℃ 解冻约 15 h。

1.2.3.2 肌原纤维蛋白提取方法 参考徐德峰等[19] 的测定方法, 并稍加修改。取 2 g 肉样, 加 7.5 倍体积焦磷酸盐饱和缓冲液(PRB)(100 mmol/L KCl, 2 mmol/L $MgCl_2\cdot 6H_2O$, 2 mmol/L EDTA·2Na, 1 mmol/L DTT, 2 mmol/L $Na_4P_2O_7\cdot 10H_2O$, 10 mmol/L Maleate, pH6.8)冰浴匀浆 30 s。离心(2000 r/min, 15 min, 4 ℃), 收集沉淀, 将其分散在 4 倍体积缓冲液中。重复离心 2 次, 期间均冰浴匀浆 30 s。第 2 次离心后, 将沉淀重新分散在 4 倍体积 NaCl 溶液(0.2 mol/L)中, 用纱布过滤。离心(2000 r/min, 15 min, 4 ℃), 收集沉淀, 重复 2 次。将沉淀分散在 4 倍体积的去离子水中洗脱 2 次, 离心后所得沉淀即为提取的肌原纤维蛋白。

1.2.3.3 肌原纤维蛋白质量浓度测定 参考闫海鹏[20] 的方法。以牛血清蛋白(Bovine Serum Albumin, BSA)为基准物质标定双缩脲溶液, 取 5 g左右提取物用磷酸盐缓冲溶液(0.2 mol/L NaCl, 0.01 mol/L Na_2HPO_4/NaH_2PO_4, pH6.5)稀释 5 倍, 在 540 nm 处测定肌原纤维蛋白的含量。

蛋白溶液的制备: 取一定量的肌原纤维蛋白, 用磷酸盐缓冲溶液(0.2 mol/L NaCl, 0.01 mol/L Na_2HPO_4/NaH_2PO_4, pH6.8)配制成不同浓度的蛋白溶液。

1.2.3.4 肌原纤维蛋白溶解度的测定 参考闫海鹏[20] 的方法。取 5 mL 蛋白液(6 mg/mL)离心(1500× g, 10 min), 取上清液 2 mL 加 8 mL 双缩脲试剂, 采用磷酸缓冲溶液作为空白对照。将离心管放在 20~25 ℃ 水浴锅中保温 30 min, 测定 540 nm 处的吸光值。计算公式为:

$$\text{溶解度}(\%)=\frac{\text{离心后上清液的蛋白质量浓度}}{\text{离心前的蛋白质量浓度}}\times 100$$

1.2.3.5 肌原纤维蛋白表面疏水性 参照贾娜等[21] 的测定方法, 采用 Chelh 等[22] 的方法。向 2 mL 蛋白液(5 mg/mL)加入 120 μL 溴酚蓝溶液(1 mg/mL), 用漩涡振荡仪振荡混匀 10 min, 用相应的磷酸缓冲液进行空白对照组实验, 离心 15 min, 在 595 nm 波长处测定其光密度值。计算公式为:

$$\text{表面疏水基含量}(\mu g)=\frac{120\ \mu g\times(OD_1-OD_2)}{OD_1}$$

式中: OD_1 为空白组的光密度值; OD_2 为待测样品的光密度值。

1.2.4 肌原纤维蛋白凝胶特性分析

1.2.4.1 肌原纤维蛋白凝胶的制备 参考栗俊广等[23] 的方法, 并稍加修改。使用预冷好的缓冲液(0.6 mol/L NaCl, pH7.0)溶解 MP 并调节 MP 溶液质量浓度为 30 mg/mL。取 3 mL 上述 MP 溶液置于 7 mL 离心管中, 置于水浴锅中加热, 25 ℃ 开始保温 5 min, 以 1 ℃/min 的速率加热升温至 75 ℃, 保温 10 min, 停止加热, 室温冷却 1 h 后, 4 ℃ 冷藏过

夜备用。

1.2.4.2　凝胶保水性　参考 Kocher 等[24] 的方法。称取 2 g 左右的蛋白凝胶于 5 mL 离心管中，在 4 ℃下离心 10 min（10000×g），去除离心管中的液体，记录离心管的重量及离心前后离心管与凝胶的总重量。计算公式为：

$$WHC(\%) = \frac{(W_2 - W)}{(W_1 - W)} \times 100$$

式中：W 为离心管重，g；W_1、W_2 为离心前后凝胶与离心管总重，g。

1.2.4.3　凝胶质构特性　参考雷娜[25] 的方法。用制得的凝胶进行质构分析。分析时压缩速度为 1 mm/s，触发力 5 g，测试速度 1 mm/s，测后速度 1 mm/s，数据采集率为 200 pps。

1.2.4.4　凝胶动态流变特性　参考雷娜[25] 的方法。乳液热诱导形成凝胶过程中，粘弹性的测定通过流变仪中的平行板振动模式进行了测定，几何尺寸为直径 40 mm。每个样品在平行板之间添加 5 g（间距 1.0 mm），用硅油来覆盖外露边缘防止水分散失，避免影响试验结果。诱导蛋白乳液凝胶化的加热范围是 30~80 ℃，速率为 2 ℃/min，在加热过程中，以正弦应变 2% 振幅测量样品的剪切力，并且振荡频率为 0.1 Hz。测定肌原纤维蛋白乳化液在加热过程中 G'（储能模量）和 G"（损耗模量）随温度的变化情况，对储能模量的变化进行连续观察。

1.2.5　乳化特性分析

1.2.5.1　乳化活性指数（EAI）和乳化稳定性指数（ESI）　参照闫海鹏[20] 的测定方法，向 5 mg/mL 20 mL 蛋白质溶液中加 5 mL 花生油，用匀浆机搅拌（8000 r/min，1 min），迅速从新制的乳状液底部吸去 30 μL，加入 15 mL 0.1% SDS 溶液，然后以 0.1% SDS 作为对照组，测定其在 500 nm 处的吸光值 A_0 及静置 5 min 后的吸光值 A_{500}。计算乳化活性指数，就是每毫克蛋白质能乳化油的表面积。计算公式为：

$$EAI = \frac{2 \times 2.303}{C \times \varphi \times 10^4} \times A_{500} \times 50$$

式中，C 为乳化前的蛋白质质量浓度（mg/mL）；φ 为乳状液中油所占的体积比例。

$$ESI = \frac{A_0 \times 5}{\Delta A}$$

式中，ΔA 表示乳状液初始的吸光值和静置 5 min 后的吸光值差。

1.2.5.2　总巯基和活性巯基含量　参照 YONGSA-WATDIGUL 等[26] 的测定方法。用0.6 mol/L 的 NaCl 溶液配制 4 mg/mL 肌原纤维蛋白溶液 0.1 mL，依次加入 0.9 mL 0.2 mol/L Tris-HCl缓冲液（pH6.8，含 8 mol/L 尿素、2% 十二烷基硫磺酸钠（SDS）、10 mol/L 乙二胺四乙酸（EDTA）、0.1 mL 0.1% 二硝基苯甲酸（DTNB），混合均匀后在 40 ℃下保温 25 min，快速冷却后在 412 nm 处测出溶液吸光度。计算公式为：

$$C_0 = \frac{A}{\varepsilon} \times D \times \rho = 75.35 \times \frac{A}{\rho}$$

式中：C_0 为巯基浓度（μmol/g）；A 为 412 nm 波长处的吸光度；ε 为摩尔消光系数，此处为 13600（mol·cm）/L；D 为稀释倍数；ρ 为蛋白质量浓度（mg/mL）。

1.3　数据处理

以“平均值±标准差”表示结果，利用 Microsoft Office Excel 365 进行数据的整合，用 SPSS 24.0 软件进行显著性分析，$P<0.05$ 为显著，每项指标重复测定 3 次，用 origin 软件进行作图。

2　结果与分析

2.1　皖西白鹅肉质基本特性分析

由表 1 可得，皖西白鹅肉的 L^* 和 a^* 值随日龄增加而呈上升趋势，而 b^* 值下降；公鹅的 L^* 和 a^* 值明显高于母鹅（$P<0.05$），公鹅 b^* 值除了 365 日龄鹅肉胸肌，其余均小于母鹅。与 ALONSO 等[27] 研究中测得在 L^* 值，公鹅高于母鹅的结果一致。其中 L^* 值范围为 44.34~48.60，最大 48.60，为 365 日龄公鹅，不同日龄和性别的鹅肉颜色亮度差异明显。a^* 值最大是 17.15，也为 365 日龄公鹅；b^* 值范围是 7.42~9.28，最高为 120 日龄母鹅。

肉的嫩度由肌肉中蛋白质种类、结构特性等因素决定[28]，剪切力可用于表示嫩度，与嫩度呈反比关系。由表 1 可得，皖西白鹅肌肉剪切力值随日龄增长而升高，胸肌剪切力值显著低于腿肌（$P<0.05$），最小

表 1　皖西白鹅基本特性分析

Table 1　Analysis of basic characteristics of Wanxi white geese

项目	120 d				180 d				365 d			
	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT
L^*	44.34±1.00^{d}	46.71±0.92^{c}	46.98±0.49^{bc}	47.35±0.33^{abc}	44.66±0.69^{d}	47.11±0.60^{bc}	47.93±0.49^{abc}	48.21±0.41^{ab}	45.32±0.73^{d}	47.42±0.76^{abc}	48.12±0.52^{ab}	48.60±0.65^{a}
a^*	13.88±0.19^{e}	14.16±0.19^{de}	15.37±0.16^{c}	15.97±0.74^{bc}	14.19±0.30^{de}	14.93±0.21^{cd}	15.82±0.32^{bc}	16.46±0.97^{ab}	14.97±0.45^{cd}	15.50±0.82^{bc}	15.89±0.55^{bc}	17.15±0.53^{a}
b^*	9.28±0.14^{a}	8.83±0.23^{a}	7.50±0.76^{bcd}	7.42±0.78^{cd}	8.79±0.35^{a}	8.67±0.38^{ab}	6.86±0.12^{d}	6.75±0.09^{d}	8.56±1.69^{abc}	8.65±0.27^{ab}	6.85±0.29^{d}	6.66±0.74^{d}
剪切力（N）	30.1±0.80^{i}	32.0±0.56^{h}	32.6±0.53^{h}	33.52±0.41^{g}	35.7±0.53^{f}	35.8±0.30^{e}	35.5±0.43^{f}	36.6±0.48^{f}	40.3±0.25^{d}	42.4±0.30^{c}	44.6±0.36^{b}	46.5±0.39^{a}
系水力（%）	71.42±1.67^{fg}	70.91±1.28^{g}	75.74±0.71^{ab}	73.32±1.40^{cde}	72.53±0.43^{def}	71.54±0.24^{fg}	75.96±0.24^{ab}	74.68±0.86^{bc}	73.76±0.28^{cd}	72.14±0.47^{efg}	76.74±0.28^{a}	75.28±0.37^{ab}
pH	6.14±0.03^{d}	6.30±0.02^{c}	6.32±0.03^{c}	6.76±0.03^{a}	5.93±0.02^{f}	5.87±0.02^{g}	6.12±0.03^{d}	6.04±0.05^{e}	5.93±0.02^{f}	5.85±0.03^{g}	6.54±0.02^{b}	6.13±0.02^{d}

注：表中同行相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著（$P>0.05$），不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

值为 120 日龄下的母鹅的胸肌 30.1 N。根据李同树等[29] 结果, 180 日龄下五龙鹅剪切力胸肌为 4.9 kg, 腿肌为 3.7 kg, 整体上高于相同日龄下的皖西白鹅, 因此皖西白鹅肉质嫩度更高。

系水力影响肉的多汁性和加工特性, 较高的系水力有利于保持肉品的品质。随日龄增加皖西白鹅系水力增大, 表 1 中 365 日龄的皖西白鹅母鹅腿肌系水力最高, 高达 76.74%, 其加工成品率最高。胸肌系水力由于日龄不同表现显著差异(P<0.05), 且腿肌的系水力大于胸肌, 公鹅系水力小于母鹅。

通过测定 pH 和评价肌肉酸碱度来判断肉类产品品质[30]。皖西白鹅的 pH 为 5.85~6.76, 腿肌 pH 显著高于胸肌(P<0.05)。公鹅 pH 在180 日龄和 365 日龄时低于母鹅, 在 120 日龄的 pH高于母鹅, 与章杰等[3] 结果相反, 章杰等[3] 测得四川白鹅肉 pH 在 5.5~6.4, 在相同日龄下, pH 整体低于皖西白鹅。

2.2 皖西白鹅质构特性分析

由表 2 可得, 皖西白鹅肉硬度随日龄增长呈上升趋势, 120 日龄和 180 日龄雌鹅胸肉硬度显著低于雄性(P<0.05)。其中 120 日龄雌鹅腿肌的硬度最小, 为 3054.1 N, 剪切力较低, 表示肉质较软。皖西白鹅肉粘度值随日龄增长, 呈现先减小后增大的变化趋势, 无显著差异(P>0.05), 腿肌的粘度高于胸肌, 180 日龄和 365 日龄的雌性白鹅粘度高于雄性。不同日龄鹅肉的回复性不存在显著差异(P>0.05)。在弹性和咀嚼性方面, 不同日龄下腿肌和胸肌均存在显著差异(P<0.05), 且整体上腿肌在弹性和硬度上高于胸肌(P<0.05)。从表 2 得出的结果与翁恺麟[2]、李贞子等[31] 研究结果一致且性别之间无规律性的变化趋势。

2.3 皖西白鹅营养成分含量分析

肌肉中的水分被称为肌原纤维水[32], 而实验中肌肉含水量不同, 可能是保持这部分水能力的不同, 肌肉中水分含量不同, 影响了肉制品的加工和口感。由表 3 可知, 随日龄增长, 皖西白鹅的水分含量无明显规律。胸肌水分含量显著低于腿肌(P<0.05), 且母鹅在 180 日龄和 365 日龄的水分含量显著高于公鹅(P<0.05)。

灰分含量表明了皖西鹅肉的胴体特性中肌肉中总矿物质的含量, 矿物质组成能显著影响肉的嫩度、保水性、风味和加工适应性。随日龄增长, 鹅肉中的灰分含量呈现下降趋势。腿肌灰分含量先增加后减少, 胸肌则持续下降, 且性别对灰分没有规律性的影响, 整体上高于潘珂等[33] 测得相同日龄下莲花白鹅、广丰白银鹅、兴国灰鹅、丰城灰鹅的灰分含量。

粗蛋白含量是衡量食品蛋白质营养价值的基础参数, 其数值高低直接反映食品中含氮物质的总量。粗蛋白含量随着日龄的上升呈现递减趋势, 120 日龄时性别无显著影响, 但 180 日龄和 365 日龄时母鹅明显低于公鹅的粗蛋白含量(P<0.05)。

肌内脂肪含量在 120 日龄后随日龄的增长而降低, 与其他日龄有显著差异(P<0.05), 可能因为伴随着动物发育, 其肌肉代谢三酰基甘油能力降低, 因此不能有效储存三酰基甘油[34−35]。腿肌脂肪含量低于胸肌, 且公鹅脂肪含量低于母鹅。

2.4 皖西白鹅游离氨基酸分析

氨基酸含量是衡量肉质优劣的核心营养指标之一, 其含量高不仅直接体现肉类的营养价值, 还通过影响风味物质生成、蛋白结构稳定性等, 改善口感与加工特性。测得结果与翁恺麟[2] 研究结果一致。如表 4 所示, 皖西白鹅各部位均检出 16 种氨基酸, 其中游离氨基酸含量从高到低依次为: 丙氨酸(235.24±86.50 μg/g)、丝氨酸(168.41±64.76 μg/g)、谷氨酸

表 2 皖西白鹅质构特性分析

Table 2 Analysis of texture characteristics of Wanxi white geese

项目	120 d				180 d				365 d			
	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT
硬度(N)	3219.8±304.2^{fg}	3353.5±249.7^{efg}	3054.1±721.6^{g}	3066.6±705.9^{g}	3868.3±174.3^{def}	4785.5±301.9^{c}	4070.3±703.7^{cde}	4320.7±236.3^{cd}	6112.3±308.8^{b}	6067.3±421.3^{b}	9159.7±158.0^{a}	9022.1±315.6^{a}
粘性	−45.52±9.58^{abc}	−39.36±12.6^{ab}	−40.94±9.92^{ab}	−35.67±13.8^{a}	−51.51±3.90^{abc}	−59.92±4.18^{c}	−57.50±5.46^{bc}	−57.93±4.63^{bc}	−41.61±8.19^{abc}	−45.77±2.46^{abc}	−37.23±13.20^{a}	−42.98±15.28^{abc}
弹性	0.813±0.06^{bc}	0.831±0.05^{bc}	0.933±0.02^{ab}	0.883±0.07^{ab}	0.865±0.09^{abc}	0.740±0.08^{cd}	0.829±0.05^{bc}	0.981±0.01^{a}	0.620±0.10^{d}	0.654±0.16^{d}	0.730±0.07^{cd}	0.833±0.08^{bc}
咀嚼性	2007.5±28.4^{fg}	2066.3±31.9^{ef}	2060.9±40.5^{efg}	2152.7±33.5^{de}	2191.3±14.1^{cd}	1962.3±72.2^{fg}	2215.7±93.6^{cd}	2462.8±52.1^{b}	2263.2±23.5^{c}	1956.9±50.6^{g}	2173.2±97.9^{a}	2171.7±73.0^{cd}
回复性	0.193±0.09^{b}	0.296±0.08^{ab}	0.346±0.03^{a}	0.275±0.07^{ab}	0.314±0.04^{a}	0.361±0.08^{a}	0.337±0.06^{a}	0.281±0.08^{ab}	0.306±0.02^{ab}	0.321±0.05^{a}	0.302±0.05^{ab}	0.380±0.03^{a}

注: 表中同行相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著(P>0.05), 不同字母表示差异显著 (P<0.05)。

表 3 皖西白鹅营养成分含量分析

Table 3 Analysis of nutritional content in Wanxi white geese

项目	120 d				180 d				365 d			
	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT
水分(%)	73.77±0.72^{d}	73.43±0.16^{de}	75.40±0.10^{bc}	76.60±0.26^{b}	73.27±0.32^{de}	67.37±0.50^{h}	75.40±0.40^{bc}	78.77±0.80^{a}	71.33±0.36^{f}	68.84±0.35^{g}	74.33±0.34^{cd}	72.04±0.50^{ef}
灰分(%)	2.07±0.06^{ab}	1.78±0.04^{e}	1.89±0.04^{cde}	1.83±0.05^{de}	1.93±0.06^{cd}	1.97±0.06^{bc}	2.16±0.12^{a}	2.08±0.10^{ab}	1.19±0.05^{f}	1.20±0.08^{f}	0.86±0.06^{f}	1.19±0.06^{f}
粗蛋白(%)	23.24±0.37^{abc}	23.31±0.45^{abc}	22.83±0.57^{abcd}	23.62±0.75^{ab}	22.69±0.94^{bcde}	24.01±0.54^{a}	22.07±0.58^{cdef}	23.38±0.94^{ab}	21.05±0.75^{f}	21.52±0.58^{ef}	21.59±0.38^{def}	21.68±0.94^{def}
粗脂肪(%)	2.98±0.04^{a}	2.85±0.07^{b}	2.30±0.06^{e}	2.17±0.09^{fgh}	2.64±0.06^{c}	2.53±0.06^{d}	2.24±0.05^{ef}	2.16±0.05^{fgh}	2.23±0.04^{efg}	2.14±0.03^{gh}	2.18±0.03^{fgh}	2.11±0.02^{h}

注: 表中同行的相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著(P>0.05), 不同字母表示差异显著(P<0.05)。

（141.62±56.31 μg/g）、胱氨酸（0.13±0.23 μg/g）。由于不同性别游离氨基酸和脂肪酸之间的差异前人已有报道，故本研究未重复开展[36]。

表 4　皖西白鹅游离氨基酸分析（μg/g）

Table 4　Analysis of free amino acids in Wanxi white geese (μg/g)

氨基酸	组别			
	120 dX	120 dT	180 dX	180 dT
Asp天冬氨酸	5.20±3.07^{a}	3.02±1.19^{a}	2.16±1.16^{a}	7.36±0.54^{a}
Thr苏氨酸	49.11±20.57^{a}	17.63±0.65^{b}	43.81±3.26^{a}	38.59±0.17^{a}
Ser丝氨酸	168.41±64.76^{a}	107.77±8.75^{a}	120.48±1.80^{a}	104.46±13.83^{a}
Glu谷氨酸	141.62±56.31^{a}	116.27±14.08^{ab}	72.50±14.28^{b}	93.20±14.29^{ab}
Gly甘氨酸	87.17±33.03^{a}	48.77±3.58^{b}	48.08±4.20^{b}	37.92±2.37^{b}
Ala丙氨酸	235.24±86.50^{a}	148.23±12.60^{a}	169.25±8.54^{a}	173.71±12.93^{a}
Met蛋氨酸	21.57±9.35^{a}	6.04±0.19^{b}	9.31±1.88^{b}	9.97±0.05^{b}
Val缬氨酸	50.50±21.57^{a}	14.30±0.67^{b}	22.36±3.62^{b}	22.73±0.93^{b}
Ile异亮氨酸	32.91±14.63^{a}	8.42±0.46^{b}	14.81±2.61^{b}	14.79±0.95^{b}
Leu亮氨酸	70.88±32.18^{a}	16.82±0.86^{b}	32.39±9.04^{b}	33.05±2.96^{b}
Tyr酪氨酸	31.89±13.13^{a}	11.83±0.41^{b}	16.06±1.46^{b}	15.44±0.49^{b}
Phe苯丙氨酸	36.02±16.50^{a}	7.54±0.31^{b}	14.63±3.84^{b}	15.49±1.43^{b}
His组氨酸	21.45±8.82^{a}	10.38±0.21^{b}	12.96±1.02^{b}	11.10±0.31^{b}
Cys胱氨酸	0.23±0.20^{a}	0.53±0.09^{a}	0.13±0.23^{a}	0.14±0.25^{a}
Arg精氨酸	52.87±22.25^{a}	22.05±1.62^{b}	32.95±0.98^{ab}	28.22±1.36^{b}
Pro脯氨酸	54.50±21.32^{a}	24.82±0.78^{b}	50.44±8.75^{a}	49.86±1.58^{a}

注：表中同行中的相同字母指的是皖西白鹅肉在120 dX、120 dT、180 dX、180 dT测定的游离氨基酸含量不具有显著性差异（P>0.05），不相同的字母指的是具有显著性差异（P<0.05）；表中120、180指的是日龄，而T指代皖西白鹅的腿肌，X指代胸肌。

丙氨酸和丝氨酸是谷胱甘肽合成的重要前提物质，在抗氧化过程中起到重要作用[30−35]。而谷氨酸是最主要的鲜味氨基酸，谷氨酸的含量与鹅肉肉质的鲜美程度密切相关，此外，谷氨酸是中枢神经系统中的主要兴奋性神经递质，参与学习、记忆和认知等过程，同时作为氨基酸，谷氨酸是蛋白质的基本组成方式，参与多种蛋白质的合成。分析表 4 可得，120 日龄胸肌的甘氨酸、蛋氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、精氨酸含量显著高于同日龄腿肌及 180 日龄胸肌、腿肌（P<0.05），且 120 日龄胸肌中上述多种游离氨基酸含量均显著高于 180 日龄胸肌（P<0.05）。腿肌的游离氨基酸含量整体显著低于胸肌（P<0.05），但 180 日龄时，胸肌与腿肌间的游离酸含量无显著差异（P>0.05）。

2.5　皖西白鹅脂肪酸分析

根据饱和度，可将脂肪酸分为饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸。经过检测，皖西白鹅肉中含有 4 种单不饱和脂肪酸、5 种饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸，这与关于鹅肉的报道一致[37−38]。如表 5 所示，皖西白鹅肉中饱和脂肪酸含量最高为 32.31%±0.09%，多不饱和脂肪酸最高为 15.11%±0.05%，单不饱和脂肪酸最高为 53.38%±0.07%，单不饱和脂肪酸含量最高，且饱和脂肪酸含量低于不饱和脂肪酸，这与林树茂等[39]研究结果一致。皖西白鹅测得单不饱和脂肪酸占比整体高于 Tor 等[40]和 Khatun 等[41]对鸡肉的测量。

表 5　不同日龄皖西白鹅肉脂肪酸组成与含量（%）

Table 5　Fatty acid composition of muscles of Wanxi white geese of different ages (%)

脂肪酸	组别			
	120 dX	120 dT	180 dX	180 dT
SFA				
豆蔻酸C14:0	0.48±0.01^{a}	0.49±0.02^{a}	0.55±0.10^{a}	0.51±0.01^{a}
十五烷酸C15:0	0.06±0.01^{a}	0.04±0.01^{b}	–	–
棕榈酸C16:0	25.20±0.01^{b}	25.43±0.06^{a}	25.00±0.02^{c}	23.63±0.06^{d}
硬脂酸C18:0	5.53±0.02^{b}	5.57±0.09^{b}	6.25±0.01^{a}	4.82±0.01^{c}
花生酸C20:0	0.09±0.01^{c}	0.08±0.01^{c}	0.51±0.01^{b}	1.82±0.05^{a}
MUFA				
肉豆蔻酸C14:1	0.04±0.01^{b}	0.06±0.01^{a}	–	–
棕榈油酸C16:1	3.67±0.02^{d}	4.04±0.02^{c}	4.46±0.02^{b}	5.98±0.02^{a}
油酸C18:1n9c	49.33±0.06^{a}	49.07±0.06^{b}	47.00±0.10^{c}	45.40±0.10^{d}
花生一烯酸C20:1	0.25±0.01^{b}	0.22±0.02^{c}	0.32±0.01^{a}	0.00^{d}
PUFA				
亚油酸C18:2n6c	13.83±0.06^{c}	13.73±0.06^{c}	14.40±0.10^{b}	15.63±0.12^{a}
亚麻酸甲酯C18:3n6	0.11±0.01^{a}	0.10±0.01^{b}	–	–
亚麻酸C18:3n3	0.88±0.01^{a}	0.89±0.01^{a}	0.66±0.01^{c}	0.82±0.03^{b}
花生二烯酸C20:2	0.13±0.01^{a}	0.06±0.01^{b}	0.00^{c}	0.00^{c}
花生三烯酸C20:3n6	0.16±0.001^{a}	0.15±0.01^{b}	0.00^{c}	0.00^{c}
SFA	31.36±0.02^{c}	31.61±0.14^{b}	32.31±0.09^{a}	30.79±0.08^{d}
MUFA	53.29±0.07^{a}	53.38±0.07^{a}	51.78±0.11^{c}	51.38±0.09^{d}
PUFA	15.11±0.05^{b}	14.93±0.06^{c}	15.06±0.10^{bc}	16.45±0.13^{a}
PUFA/SFA	0.48±0.01^{b}	0.47±0.01^{c}	0.47±0.01^{c}	0.53±0.01^{a}

注：表中同行中的相同字母指的是皖西白鹅肉中120 dX、120 dT、180 dX、180 dT测定的同一种脂肪酸含量差异不显著（P>0.05），不同字母则表示差异显著（P<0.05）；表中120 d、180 d指的是日龄，而T指代皖西白鹅的腿肌，X指代胸肌；SFA为饱和脂肪酸总和，MUFA指代单不饱和脂肪酸总和，PUFA指代多不饱和脂肪酸总和，PUFA/SFA为多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸之比。

饱和脂肪酸（SFA）摄入过多可能增加心血管疾病风险，但不同种类的 SFA 的生理效应存在显著差异：棕榈酸并非始终表现为升高血脂的作用[42−43]，而硬脂酸可以降低血液中的胆固醇含量[43−45]，从而减少心血管疾病的风险。皖西白鹅饱和脂肪酸中棕榈酸含量最高为 25.43%±0.06%，硬脂酸含量最高为 6.25%±0.01%。单不饱和脂肪酸（MUFA）具有降胆固醇、降糖降压等作用，而油酸作为大脑细胞膜的重要组成部分，有助于维持神经细胞的结构和功能，支持认知健康和神经保护。实验测得皖西白鹅不饱和脂肪酸中油酸含量最高（49.33%±0.06%）。多不饱和脂肪酸（PUFA）具有降血脂、降血压等生理功能，皖西白鹅多不饱和脂肪酸中亚油酸含量最高为 15.63%±0.12%。多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸比值（PUFA/SFA）可以评估皖西白鹅的营养价值[46]，实验结果显示 PUFA/SFA 值为 0.47±0.01~0.53±0.01，高于一般膳食要求的 0.4。120 日龄皖西白鹅的单不饱和脂肪酸含量高于 180 日龄，多不饱和脂肪酸含量低于 180 日龄，所以 120 日龄的皖西白鹅肉具有更高的食用价值。

2.6 皖西白鹅肌原纤维蛋白特性分析

2.6.1 肌原纤维蛋白百分比特征 肌肉所含 MP 最多，占蛋白质总量 50%~55%，MP 决定了乳化肉制品的保水性和凝胶性[47]，是影响肉制品加工适应性的核心因素之一。如图 1 所示，皖西白鹅 MP 质量总占比因为日龄、性别、部位的不同而有区别，且有显著性差异（P<0.05）。随着日龄的增长，MP 的百分比整体变化是上升的，腿肌明显高于胸肌（P<0.05）。365 日龄下公鹅腿肌肌原纤维蛋白百分比最高，约为 9.54%，其保水能力最强。

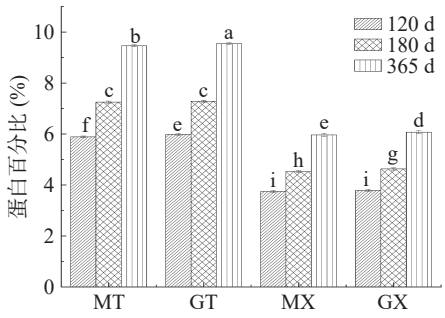


图 1 不同日龄皖西白鹅肌原纤维蛋白百分比

Fig.1 Percentage of myofibrillar proteins in Wanxi white geese of different ages

注：MT、GT、MX、GX 分别代表母鹅腿肌、公鹅腿肌、母鹅胸肌、公鹅胸肌。图中相同字母代表不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著（P>0.05），不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.6.2 肌原纤维蛋白溶解度 在加工肉制品时，要考虑蛋白质的溶解度，蛋白质溶解度的升高可以提高乳化能力[48]。但是通常认为 MP 溶解能力较差[49]。如图 2 所示，不同日龄、性别、部位皖西白鹅 MP 溶解度各不相同。随年龄增长，总体变化趋势为先增长后下降。在所选的 3 个日龄中，MP 溶解度最大的是 180 日龄，其公鹅腿肌 MP 溶解度约为 52.83%±0.10%，乳化能力越高，加工适应性更优。最小的是 365 日龄。根据分析可得，腿肌 MP 明显强于胸肌（P<0.05），性别对 MP 溶解度没有显著影响。

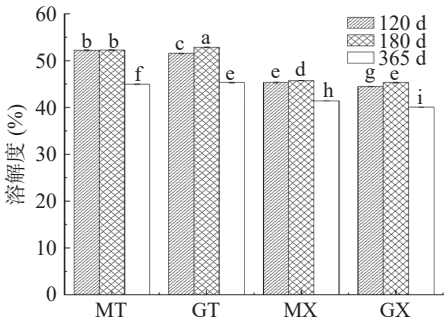


图 2 不同日龄皖西白鹅肌原纤维溶解度

Fig.2 Dissolution of myogenic fibres in Wanxi white geese of different ages

注：MT、GT、MX、GX 分别代表母鹅腿肌、公鹅腿肌、母鹅胸肌、公鹅胸肌。图中相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著（P>0.05），不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.6.3 肌原纤维蛋白表面疏水性 蛋白质表面疏水性氨基酸的相对含量由蛋白表面的疏水性反应所决定[50]，表面疏水性越高，变性程度越大。由图 3 可得，MP 表面疏水性在不同日龄、性别和部位下都有明显的差异性，且表面疏水性随日龄增长整体呈现上升的趋势（P<0.05）。对皖西白鹅不同部位和性别的 MP 表面疏水含量分析可得，365 日龄下，公鹅 MP 表面疏水基含量最高，约为 48 μg，胸肌明显低于腿肌（P<0.05），母鹅低于公鹅。

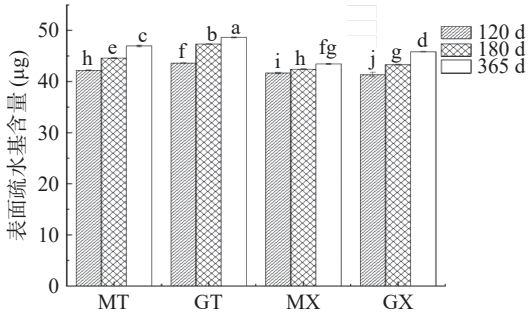


图 3 不同日龄皖西白鹅肌原纤维蛋白表面疏水性

Fig.3 Surface hydrophobicity of myofibrillar fibrillar proteins in Wanxi white geese of different ages

注：MT、GT、MX、GX 分别代表母鹅腿肌、公鹅腿肌、母鹅胸肌、公鹅胸肌。图中相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著（P>0.05），不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.6.4 肌原纤维保水性 在加工肉制品的过程中，通常将保水性作为肉类的重要食用品质特征。保水性强弱影响人们对鹅肉产品的感官评价，从而影响产品经济价值[51]。保水性与肌肉中的肌浆与蛋白质的相互作用力以及静电排斥效应有关[52]。肌肉蛋白的氧化，使蛋白质构象和挥发性化合物吸收能力的改变，以及氨基酸衍生物的形成，进而改变肉制品中水分的分布和状态[53]。由图 4 可得，肌原纤维凝胶保水性随日龄的增长而增加，腿肌的肌原纤维保水性较胸肌大（P<0.05），母鹅在腿肌部位保水性低于公鹅，胸肌部位则反之。

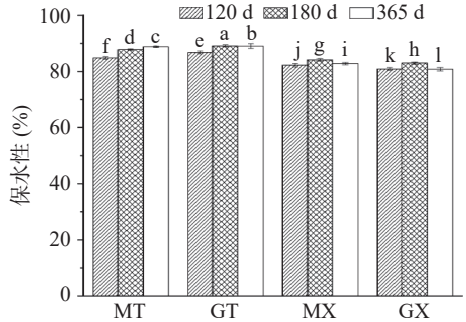


图 4 不同日龄皖西白鹅肌原纤维保水性

Fig.4 Water retention of myogenic fibres in Wanxi white geese of different ages

注：MT、GT、MX、GX 分别代表母鹅腿肌、公鹅腿肌、母鹅胸肌、公鹅胸肌。图中相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著（P>0.05），不同字母表示差异显著（P<0.05）。

表 6　肌原纤维凝胶质构特性

Table 6　Texture characteristics of myofibril gel

项目	120 d				180 d				365 d			
	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT	MX	GX	MT	GT
硬度(N)	51.187±2.56^{e}	44.310±2.27^{f}	67.147±2.28^{bc}	60.553±2.66^{d}	60.617±1.82^{d}	54.290±1.78^{e}	70.487±1.33^{b}	65.156±1.66c	64.467±1.99^{c}	60.747±1.69^{d}	74.707±1.46^{a}	70.450±1.08^{b}
弹性	0.820±0.01^{fg}	0.789±0.02^{h}	0.820±0.01^{fg}	0.899±0.01^{a}	0.832±0.01^{ef}	0.817±0.01^{fg}	0.861±0.01^{cd}	0.890±0.01^{ab}	0.811±0.01^{fg}	0.802±0.01^{gh}	0.872±0.01^{bc}	0.843±0.01^{de}
强度	0.493±0.02^{h}	0.447±0.02^{i}	0.637±0.02^{de}	0.570±0.02^{g}	0.603±0.01^{f}	0.589±0.01^{fg}	0.677±0.02^{bc}	0.626±0.01^{e}	0.685±0.01^{b}	0.658±0.01^{cd}	0.719±0.01^{a}	0.713±0.01^{a}

注：表中同行相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著(P>0.05)，不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.6.5　肌原纤维凝胶质构特性　凝胶的强度、硬度和弹性是影响肉制品口感的主要因素，并且硬度和强度是呈正相关的，凝胶系统的网状结构会随着硬度的增大而变得更密。根据表 6 得出，MP 凝胶硬度和强度随日龄的增长而增长，不同日龄间存在显著性差异(P<0.05)，而腿肌的 MP 凝胶在强度、硬度、弹性方面都高于胸肌(P<0.05)，且无论是硬度还是强度，母鹅都明显高于公鹅。弹性范围为 0.789~0.899，日龄对弹性影响弱于部位。所以通过年龄、部位、性别的精准选择，可定向调控皖西白鹅肉凝胶质构，匹配不同产品。

2.6.6　肌原纤维凝胶动态流变特性　动态流变学通常用于评价 MP 的粘弹性[54]。高 G'凝胶赋予产品强弹性，适度 G'提升多汁性和嫩度，因水分和脂肪被均匀包裹。由图 5 可得，皖西白鹅在 180 日龄下的腿肌和 365 日龄下的胸肌时，G'在不同性别下没有明显性差异。365 日龄的鹅胸肌的 G'随着温度的升高先下降后回升。G'降低与蛋白质变性有关，而当温度达到 60 ℃ 时，G'整体呈现升高趋势，可能与不可逆的蛋白凝胶网结构的形成有关。180 日龄腿肌 G'大于 365 日龄的胸肌，这可能是因为不同日龄、部位鹅肉的肌原纤维蛋白特性差异或者冷藏条件导致的。

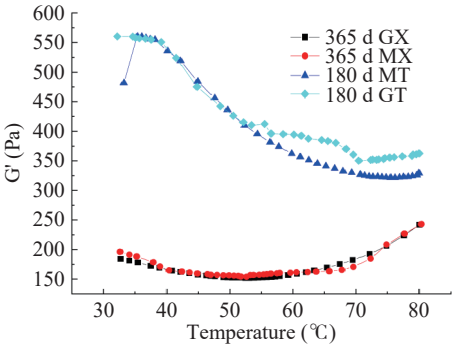


图 5　肌原纤维凝胶动态流变特性

Fig.5　TDynamic rheological properties of myofibril gel

2.6.7　乳化的活性指数和稳定性指数　乳化的活性指数反映 MP 在油-水界面吸附并形成乳化液的能力。图 6 表明，皖西白鹅肉 MP 乳化活性指数随日龄增长呈上升趋势。胸肌的乳化活性指数低于腿肌，且在 180 日龄时存在明显的差异性(P<0.05)。母鹅的乳化活性指数整体高于公鹅。365 日龄的母鹅腿肌 MP 乳化活性指数最高，约为 0.067 m^2/mg，其乳

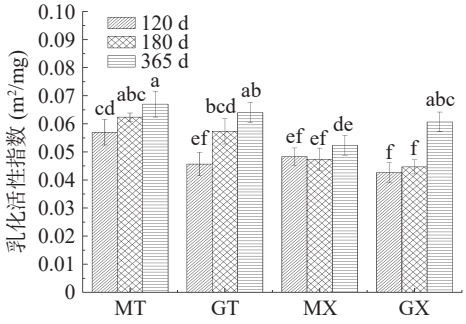


图 6　皖西白鹅肉 MP 的乳化活性指数

Fig.6　Emulsifying activity index of myofibrillar protein in Wanxi white geese meat

注：MT、GT、MX、GX 分别代表母鹅腿肌、公鹅腿肌、母鹅胸肌、公鹅胸肌。图中相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著 (P>0.05)，不同字母表示差异显著 (P<0.05)。

化效率最高，制作香肠时脂肪分布更均匀更均匀，口感更顺滑。

乳化稳定性是指形成乳浊液而不分层的能力。由图 7 可得，MP 乳化稳定性指数随日龄的增长总体呈下降趋势，且存在明显的差异性(P<0.05)。与同日龄的腿肌相比，胸肌的 MP 乳化稳定性较低。MP 是维持乳液状稳定性的重要因素，蛋白质在水油界面阻止脂肪油滴聚集[55]。最高为 120 日龄下的公鹅腿肌，约为 18.31，在加工过程中，使产品咀嚼时更具弹性和汁液感。

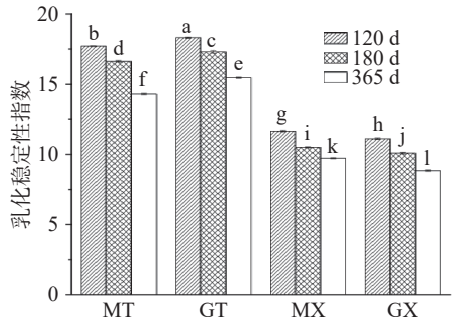


图 7　皖西白鹅肉 MP 的乳化稳定性指数

Fig.7　Emulsification stability index of Myofibrillar Protein in Wanxi white geese meat

注：MT、GT、MX、GX 分别代表母鹅腿肌、公鹅腿肌、母鹅胸肌、公鹅胸肌。图中相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著 (P>0.05)，不同字母表示差异显著 (P<0.05)。

乳化活性指数是乳化稳定性指数的前提，但二

者并非完全正相关。若 MP 的乳化活性指数高，则可快速包裹脂肪颗粒，形成细小均匀的乳滴，为稳定乳化奠定基础，但乳化稳定性指数依赖蛋白界面膜的交联强度，若蛋白仅吸附但未形成致密网络，即使乳化活性指数高，乳化体系仍易因脂肪聚集而破乳。

2.6.8 总巯基和活性巯基含量 根据图 8，图 9 对巯基分析可得，不同日龄下，皖西白鹅的总巯基含量没有规律性变化，同一日龄腿肌总巯基含量显著高于胸肌（P<0.05）。整体上活性巯基含量随日龄增长呈上升趋势，且差异性明显（P<0.05）；而且在部位上，腿肌高于胸肌（P<0.05）；在不同性别中，没有明显的差异性。总巯基含量在 365 日龄母鹅腿肌中达到最高，约为 3.45×10^{-4} μmol/mg，较高的巯基水平有助于提升肌肉蛋白的加工稳定性与成功率。活性巯基易被氧化，分子内部的疏水基团被暴露，表面疏水性增加；过度疏水暴露促进氧化。当蛋白质严重变性，疏水区域暴露后，巯基更易被自由基攻击，活性巯基含量下降。当蛋白质结构变化时，巯基被暴露，这些自由巯基就会发生氧化反应形成二硫键，提高了蛋白质稳定脂肪的能力，从而提高了蛋白的乳化性。总巯基和活性巯基含量越高，蛋白质的功能性（凝胶性、乳化性、保水性等）越强，从而提升肉制品的质地、口感和保质期。

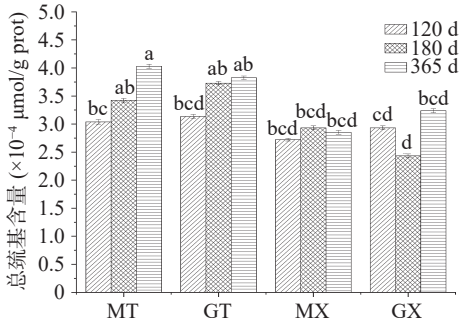


图 8 皖西白鹅肉 MP 总巯基含量

Fig.8 Total thiol content of myofibrillar protein in Wanxi white geese meat

注：MT、GT、MX、GX 分别代表母鹅腿肌、公鹅腿肌、母鹅胸肌、公鹅胸肌。图中相同字母表示不同日龄、性别、部位所组成的不同组别间同一指标差异不显著（P>0.05），不同字母表示差异显著（P<0.05）；图 9 同。

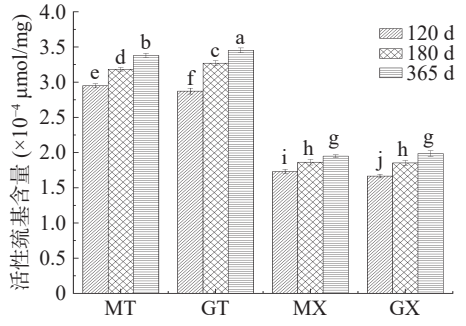


图 9 皖西白鹅肉 MP 的活性巯基含量

Fig.9 Active thiol content of myofibrillar protein in Wanxi white geese meat

3 结论

经过上述研究，发现日龄和部位对皖西白鹅肉品质影响较大。皖西白鹅鹅肉剪切力值、L^*和 a^*随日龄增长而增长（P<0.05），而 b^*、pH 则随日龄增长呈现相反趋势；120 日龄白鹅中总游离氨基酸含量、鲜味氨基酸总量比 180 日龄更高，且相较于 180 日龄，120 日龄白鹅谷氨酸含量更高（P<0.05）；120 日龄不饱和脂肪酸含量比 180 日龄的更高（P<0.05），且 120 日龄和 180 日龄皖西白鹅 PUFA/SFA 值均高于一般膳食要求 0.4。结果发现 120 日龄鹅肉剪切力较低，肌肉纤维较细，口感更嫩；180 日龄鹅肉适合制作香肠等肉制品，但直接食用口感不佳，365 日龄鹅肉品质会下降。

在对皖西白鹅肉的研究中，发现 MP 质量浓度、表面疏水性、凝胶保水性、乳化活性指数、凝胶硬度与强度、活性巯基含量随日龄增长而增长，而乳化稳定性指数呈相反趋势；鹅肌原纤维蛋白总巯基含量基本与日龄无关；关于肌原纤维蛋白，180 日龄皖西白鹅溶解度最大，365 日龄皖西白鹅溶解度最小；在所研究的蛋白百分比、MP 溶解度、乳化活性指数、MP 表面疏水性、保水性、凝胶硬度、弹性、强度方面，腿肌明显高于胸肌，与性别无关。

© 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] 万长兵. 皖西白鹅产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技, 2023, 52 (17): 182-183. [WAN C B. Current situation and countermeasures of west Anhui white goose industry development[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023, 52 (17): 182-183.]

[2] WENG K Q, HUO W R, GU T T, et al. Effects of marketable ages on meat quality through fiber characteristics in the goose[J]. Poultry Science, 2020, 100(2): 728−737.

[3] 章杰, 何航, 揭晓蝶, 等. 四川白鹅肉物理性质及化学组成分析[J]. 食品与发酵工业, 2018(8): 277−283. [[ZHANG J, HE H, JIE X Y, et al. Analysis on physical properties and chemical composition Sichun White goose meat[J]. Food and Fermentation Industry, 2018(8): 277−283.]

[4] 汪彪. 乳酸杆菌和芽孢杆菌对浙东白鹅生产性能、血清指标及肠道微生态的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2024. [WANG B. The effects of *lactobacillus* and *bacillus* on the production performance, serum indicators and intestinal microecology of Dongzhuang white geese[J]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.]

[5] 刘娜. 浅析我国鹅肉制品的加工工艺[J]. 现代食品, 2023, 9(16): 2−3. [LIU N. A brief analysis of processing techniques for goose meat products in China[J]. Modern food, 2023, 9(16): 2−3.]

[6] 袁宇尘, 徐廉竹, 丁元翠, 等. 生长期皖西白鹅免疫器官结构和血液指标变化规律研究[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(10): 2−4. [YUAN Y C, XV L Z, DING Y C, et al. Study on the structure of immune organs and blood index of west Anhui white goose during

the growing period[J]. Chinese Livestock Journal, 2023, 59(10): 2−4.]
[7] XU Y J, XU X L. Modification of myofibrillar protein functional properties prepared by various strategies: a comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(1): 458−500.
[8] 牛力. 冻结和冻藏对鸡胸肉食用品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [NIU L. Effects of freezing and storage on meat guality of chicken breast[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
[9] 中华人民共和国农业部. NY/T 1180-2006 肉嫩度的测定剪切力测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1180-2006 Determination of meat tenderness-Determination of shear force[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.]
[10] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.237-2016 食品 pH 的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commision. GB 5009.237-2016 Determination of pH in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[11] 张伟力. 猪肉系水力测定方法[J]. 养猪, 2002, 3 (3): 25. [ZHANG W L, Method for hydraulic determination of pork lines[J]. Swine, 2002, 3 (3): 25.]
[12] 朱美淋, 张贞炜, 余杰. 基于质构仪 TPA 模式构建蛋白肠感官评分预测模型及应用[J]. 中国调味品, 2024, 49(4): 3−5. [ZHU M L, ZHANG Z W, YU J. Construction and application of sensory score prediction model for protein intestine based on Texture Profile Analysis (TPA) mode[J]. Chinese condiments, 2024, 49(4): 3−5.]
[13] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National health and family planning commission. GB 5009.3-2016 Determination of moisture in food[S]. Beiiing: Standards Press of China, 2016.]
[14] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4-2016 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National health and family plannine commission. GB 5009.4-2016 Determination of ash in food[S]. Beiing: Standards Press of China, 2016.]
[15] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National health and family planning commission. GB5009.5-2016 Determination of protein in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[16] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.6-2016 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National health and family planning commission. GB 5009.6-2016 Determination of Fat in Food[S]. Beiing: Standards Press of China, 2016.]
[17] 孙祥祥, 喻余梅, 杨欣宇, 等. 基于多元统计学解析我国四大烧鸡菜肴制品滋味物质图谱[J]. 肉类研究, 2023, 33(1): 3. [SUN X X, YU Y M, YANG Y X, et al. Based on multivariate statistical analysis, the flavor substance profiles of the four major Chinese roasted chicken dishes were obtained[J]. Meat research, 2023, 33(1): 3.]
[18] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.168-2016 食品中脂肪酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National health and family planning commission. GB 5009.168-2016 Determination of fatty acids in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[19] 徐德峰, 廖威龙, 叶胜权, 等. 4 种提取方法对对虾肌原纤维蛋白提取率、空间结构和热稳定性的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 50(2): 3−5. [XV D F, LIAO W L, YE S Q, et al. The effects of four extraction methods on the extraction rate, spatial structure and thermal stability of myofibrillar proteins from prawns[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 50(2): 3−5.]
[20] 闫海鹏. 不同种类肉肌原纤维蛋白功能特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [YAN H P. Research on the functional characteristics of different kinds of myofibrillar proteins[D]. Nanjing Agricultural University, 2013.]
[21] 贾娜, 林世文, 王乐田, 等. 没食子酸诱导肌原纤维蛋白巯基含量和表面疏水性变化对蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 2−5. [JIA N, LIN S W, WANG L T, et al. The influence of changes in the content of sulfhydryl groups and surface hydrophobicity of myofibrillar proteins induced by gallic acid on the properties of protein gels[J]. Food Science, 2020, 41(22): 2−5.]
[22] CHELH I, GATELLIER P, SANTE-LHOUTELLIER V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. Meat Science, 2006, 74(4): 68−683.
[23] 贾俊广, 柳红莉, 何菲, 等. 冰温和冷鲜贮藏对鸡肉肌原纤维蛋白凝胶性能和水分状态的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 2. [JIA J G, LIU H L, HE F, et al. The effects of chilling and cold storage on the gel properties and water state of chicken myofibrillar protein[J]. Food Science, 2016, 37(22): 2.]
[24] KOCHER P N, FOEGEDING E A. Microcentrifuge-Based methodfor measuring water-holding of protein Gels[J]. Journal of Food Science, 1993, 58(5): 1040−1046.
[25] 雷娜. EGCG 修饰巯基对肌原纤维蛋白乳化凝胶特性的影响及机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017. [LEI N. Study on the effects and mechanisms of EGCG-Modified Sulfhydryl groups on the properties of myofibrillar protein emulsifying gels [D]. Xianyang: Northwest A&F University of Agriculture and Forestry, 2017.]
[26] YONGSAWATDIGUL J, PARK J W. Thermal denaturation and aggre-gation of threadfin bream actomyosin[J]. Food Chemistry, 2003, 83(3): 409−416.
[27] ALONSO V, CAMPO M d M, ESPANOL S, et al. Effect of crossbreeding and gender on meat quality and fatty acid composition in pork[J]. Meat Science, 2009, 81(1): 209−217.
[28] 付朗朗, 罗彤怡, 朱帆, 等. 浅析影响猪肉嫩度的因素[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2024, 43(5): 7-11. [FU L L, LUO T Y, ZHU F, et al. Analysis on the factors affecting pork tenderness[J]. Jiangxi Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2024, 43(5): 7-11.]
[29] 李同树, 曾勇庆, 唐辉, 等. 五龙鹅产肉性能与肉质特性的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2000, 48(7): 2−3. [LI T S, ZENG T Y, ZHU F, et al. Research on the meat production performance and meat quality characteristics of Wulong geese[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry, 2000, 48(7): 2−3.]
[30] 孔潇, 刘琦, 罗欣, 等. 宰后初期 pH-温度窗口对牛肉品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(10): 3−4. [KONG X, LIU Q, LUO X, et al. Effect of PH-temperature window on beef quality in early postmortem period[J]. Food Research and Development, 2022, 43(10): 3−4.]
[31] 李贞子, 杨具田, 宋巧, 等. 不同性别和部位的兰州大尾羊肉食用品质[J]. 食品工业科技, 2014, 35(17): 354−357,361. [LI Z Z, YANG J T, SONG Q, et al. Edible quality of Lanzhou large-tail mutton with different sex and parts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(17): 354−357,361.]
[32] BERTRAM H C and ANDERSEN R H, HENRIK J. Development in myofibrillar water distribution of two pork qualities during 10-month freezer storage[J]. Meat Science, 2007, 75(1): 128−133.
[33] 潘珂, 孙汉, 欧阳建华. 几种江西地方品种鹅肌肉品质测定

分析[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(3): 2−3. [PAN K, SUN H, OUYANG J H. Analysis and determination of muscle quality in several local goose breeds from Jiangxi[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2005, 27(3): 2−3.]
[34] BERGERON K, JULIEN P, DAVIS T A, et al. Long-chain n-3 fatty acids enhance neonatal insulin-regulated protein metabolism in piglets by differentially altering muscle lipid composition[J]. Journal of Lipid Research, 2007, 48(11): 2396−2410.
[35] HE L, ZHANG H and ZHOU X. Weanling offspring of dams maintained on serine-deficient diet are vulnerable to oxidative stress[J]. Oxidative Medicine & Cellular Longevity, 2018, 2018: 2−8.
[36] 陈兴勇, 赵宁, 张燕, 等. 皖西白鹅育肥期肌肉脂肪酸组成及肝 PPARα、FADS2 和 ME1 基因表达规律的研究[J]. 畜牧兽医学报, 2017, 48(10): 1912−1919. [CHEN X Y, ZHAO N, ZHANG Y, et al. The fatty acid profile in muscles and expression of PPARα, FADS2 and ME1 genes in liver of Chinese Wanxi White geese in fattening period[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2017, 48(10): 1912−1919.]
[37] 李蕾蕾, 朱正娇, 丁元翠, 等. 不同能量和蛋白质水平饲粮对皖西白鹅肉品质的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2023, 67(3): 3−4. [LI L L, ZHU Z J, DING Y C, et al. Effects of different energy and protein levels on meat quality of Wanxi White geese[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 67(3): 3−4.]
[38] 韩飞, 汪峰, 李平, 等. 多品种鹅鲜肉成分及品质特性差异分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 3−5. [HAN F, WANG F, LI P, et al. Analysis on the composition and quality characteristics of fresh meat of multi-breed geese[J]. Food research and development, 2023, 44(24): 3−5.]
[39] 林树茂, 李海华, 钟赛意. 不同禽类肌肉脂肪酸组成的比较研究[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2005(3): 18. [LIN S M, ll H H and ZHONG S Y. Comparative study on fatty acid composition of different poultry muscles[J]. Chinese Journal of Animal and Veterinary Abstracts, 2005(3): 18.]
[40] TOR M, ESTANY J, FRANCESCH A, et al. Comparison of fatty acid profiles of edible meat, adipose tissues and muscles between cocks and capons[J]. Animal Research, 2005, 54 (5).
[41] KHATUN J, LOH T C, AKIT H, et al. Fatty acid composition, fat deposition, lipogenic gene expression and performance of broiler fed diet supplemented with different sources of oil[J]. Animal Science Journal, 2017, 88 (9).
[42] 韩园园. 浅析脂肪酸对肉类品质的影响[J]. 食品安全导刊, 2021, 15(26): 1−2. [HAN Y Y. Analysis on the influence of fatty acids on meat quality[J]. Food Safety guide, 2021, 15(26): 1−2.]
[43] 杨春雪, 孔凡华, 欧阳俊, 等. 鳄鱼肉与其他肉类营养成分的比较分析[J]. 肉类研究, 2022, 32(3): 5−6. [YANG C X, KONG F H, OUYANG J, et al. Comparative analysis of nutritional components of crocodile meat and other meat[J]. Meat Research, 2022, 32 (3): 5−6.]
[44] 陈安琪, 杨春彦, 董丙强, 等. 家禽肉品质评价指标及其影响因素研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2024, 68(6): 4. [CHEN A Q, YANG C Y, DONG B Q, et al. Research progress of poultry meat quality evaluation indexes and influencing factors[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 68(6): 4.]
[45] 刘卜玮, 李祥, 杨盛婷, 等. 不同性别南充黑山羊肉品质和营养成分分析[J]. 饲料研究, 2025, 48(2): 4−5. [LIU B W, LI X, YANG S T, et al. Analysis of quality and nutritional composition of Nanchong Black mutton of different genders[J]. Feed Study, 2025, 48(2): 4−5.]
[46] TEYE G A, SHEARD P R, WHITTINGTON F M, et al. Influence of dietary oils and protein level on pork quality. Effects on muscle fatty acid composition, carcass, meat and eating quality[J]. Meat Science, 2006, 73(1): 157−165.
[47] Li K, Fu L, Zhao Y Y, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and 45stability of the emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98(7): 2137−2148.
[48] 杨玲, 王兆丰, 王静, 等. 体外氧化对牦牛肉肌原纤维蛋白凝胶保水性的影响[J]. 食品科技, 2021, 47(12): 4−5. [YANG L, WANG Z F, WANG J, et al. Effect of *in vitro* oxidation on water retention of yak myofibrillar protein gel[J]. Food Science, 2021, 47(12): 4−5.]
[49] TENG Z N, HE X Y, WANG L Q, et al. Effect of liquid nitrogen freezing on maintaining the quality of crayfish during freeze–thaw cycles: Muscle structure and myofibrillar proteins properties [J]. Foods, 2025, 13(1): 23−25.
[50] 徐晶磊. 蛋白质表面活性与表面疏水性的关系研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023. [XV J L. Study on the relationship between protein surface activity and surface hydrophobicity[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.]
[51] 张建华. HL-低钠盐对肌原纤维蛋白抗氧化及凝胶特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020. [ZHANG J H. Effect of HL-low sodium on antioxidant and gel properties of myofibrillar protein[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.]
[52] 张建华, 夏杨毅. 氧化条件下 HL-低钠盐对鹅肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 51(5): 4−5. [ZHANG J H, XIA Y Y. Effect of HL-low sodium salt on the gel properties of goose myofibrillar protein under oxidation condition [J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 51(5): 4−5.]
[53] ZHANG D, LI H, EMARA A M, et al. Effect of in vitro oxidation on the water retention mechanism of myofibrillar proteins gel from pork muscles[J]. Food Chemistry, 2020, 45(11): 315.
[54] LI D Y, TAN Z F, LIU Z Q, et al. Effect of hydroxyl radical induced oxidation on the physicochemical and gelling properties of shrimp myofibrillar protein and its mechanism[J]. Food Chemistry, 2021, 351(6): 1293−1301.
[55] HUANG Z Y, WU Y Y, CHEN L, et al. Effect of hazelnut protein oxidation on O/W emulsion stability, interfacial properties and lipid oxidation based on hazelnut protein oxidation[J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 61(1): 10−12.