DOI:10.12441/spyswjs.20250611001 [文章编号] 1673-1689(2025)10-0083-11

生姜蛋白酶对牛肉品质及蛋白质降解的作用

陈兴花 刘书宏 郑淮升 黄朝斌 胡 萍*

(贵州大学酿酒与食品工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:【目的】探究生姜蛋白酶对牛肉嫩度的影响。**【方法】**采用硫酸铵沉淀法从老姜中提取生姜蛋白酶,通过测定酶活力、蛋白质的质量分数、最适温度、最适pH、酶的相对分子质量评价生姜蛋白酶的基本性质,并探讨生姜蛋白酶对牛肉理化性质、感官品质、微观结构、蛋白质降解特性的影响。**【结果】**生姜蛋白酶主要由相对分子质量为15 293和34 191的2种蛋白质组成,总蛋白质的质量分数为(574.60±0.25) mg/g,酶活力为(31 787±307) U/g,最适温度为60 ℃,最适pH为6。与对照组相比,30~90 U/mL的生姜蛋白酶显著降低了牛肉的剪切力、硬度、咀嚼性、胶着性,提升了牛肉的亮度值,且不会造成牛肉保水性的变化。酶活力相同时,生姜蛋白酶与木瓜蛋白酶处理的牛肉嫩度无显著差异。感官评定结果表明,生姜蛋白酶提升了牛肉的感官品质。微观结构分析表明,生姜蛋白酶破坏了肌肉结构的完整性。蛋白质的降解分析结果表明,生姜蛋白酶主要通过影响牛肉中的胶原蛋白而改善牛肉的嫩度,而木瓜蛋白酶则通过影响肌原纤维蛋白、肌浆蛋白和胶原蛋白改善牛肉嫩度。**【结论】**生姜蛋白酶可作为一种有效的食品酶制剂用于肉类嫩化。

关键词:生姜蛋白酶;牛肉;嫩化;蛋白质降解

Effects of Ginger Protease on Beef Quality and Protein Degradation

*CHEN Xinghua LIU Shuhong ZHENG Huaisheng HUANG Zhaobin HU Ping**

(School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effects of ginger protease on beef tenderness. [**Method**] Ginger protease was extracted from mature ginger *via* ammonium sulfate precipitation. The fundamental properties of the ginger protease, including enzyme activity, protein mass fraction, optimal temperature and pH, and relative molecular mass, were evaluated. Furthermore, the effects of ginger protease on the physicochemical properties, sensory quality, microstructure, and protein degradation characteristics of beef were examined. [**Result**] Ginger protease was mainly composed of two proteins with relative molecular masses of 15 293 and 34 191, with a total protein mass fraction of (574.60±0.25) mg/g, an enzyme activity of (31 787±307) U/g, an optimum temperature of 60 ℃, and an optimum pH of 6. Compared with the control group, 30 to 90 U/mL ginger protease significantly reduced the shear force, hardness, chewiness, and gumminess, while enhancing the lightness value without altering the water-holding capacity of beef. When enzyme activity is the same, there is no significant difference in the tenderness of beef treated with ginger protease and papain. The sensory evaluation results indicated that the ginger protease improved the sensory quality of beef. Microstructural analysis revealed that ginger protease disrupted the integrity of muscle structure. Protein degradation analysis indicated that ginger protease primarily improved beef tenderness by modifying collagens in beef, whereas papain improved beef tenderness through its effects on myofibrillar proteins, myogens, and collagens. [**Conclusion**] Ginger

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(32460606);贵州省教育厅一般项目(2550117472997095161)。

通信作者:胡萍(1970—),女,博士,教授,博士研究生导师,主要从事益生菌发酵与特色食品开发研究。E-mail:506981771@qq.com

收稿日期:2025-06-11 **修回日期:**2025-07-20

protease can be applied as an effective enzyme for meat tenderisation.
Keywords: ginger protease; beef; tenderisation; protein degradation

牛肉是重要的优质蛋白来源，其嫩度、保水性和质构特性直接影响消费者的食用体验和产品附加值[1]。嫩度是牛肉食用品质的重要评价指标，受到多种因素的影响，包括肌肉中肌原纤维蛋白的水解、结缔组织的数量和溶解度以及肌内脂肪的质量分数等[2]。添加外源酶是一种有效的嫩化方法，动物、植物、微生物产生的蛋白酶能够水解肌肉的肌原纤维蛋白、结缔组织蛋白等，被广泛应用于肉类加工行业。植物来源的蛋白酶因具有天然无污染、来源广泛、水解活性高等特点而被作为主要外源酶用于改善肉的嫩度。研究表明，木瓜蛋白酶、菠萝蛋白酶、无花果蛋白酶和猕猴桃蛋白酶等常见的植物蛋白酶已广泛应用于牛肉、鸡胸肉、猪肉和羊肉的嫩化处理[3]，但此类酶制剂特异性较低，容易引发肌原纤维过度水解，导致肉质软烂。疏水性氨基酸的末端暴露可能引发苦味肽的生成，进而影响肉类风味，这会影响消费者对蛋白酶作为肉类嫩化剂的接受度[4-5]。

生姜蛋白酶是一种从生姜根茎中提取的巯基蛋白酶，Choi 等[6-7]确定了生姜蛋白酶的三维结构，其总体结构类似于木瓜蛋白酶等其他植物巯基蛋白酶，它可以专一地水解在 P_2 位含有脯氨酸的多肽和蛋白质。研究表明，生姜蛋白酶对凝乳[8]、肉类嫩化[9]、酒类澄清[10]有显著效果。Ha 等[11]的研究表明，生姜蛋白酶对胶原蛋白和肌动球蛋白均表现出显著的水解活性，且对胶原蛋白的水解能力优于对肌动球蛋白的水解能力；Cruz 等[12]的研究结果表明，生姜汁中的生姜蛋白酶能够促进肌原纤维碎片化，提高鸡胸肉的嫩度。阿尔祖古丽•阿卜杜外力等[13]发现，添加质量分数为 0.05% 的生姜蛋白酶时，可显著促进羊火腿蛋白质和脂肪降解而提高嫩度，并促进水分流失，从而将羊火腿的成熟周期缩短到 23 d。因此，生姜蛋白酶可作为一种新的肉类嫩化剂。

目前，关于生姜蛋白酶的提取、表征和酶学性质已有一些研究[14]。生姜蛋白酶在肉类加工中的研究多集中于生姜汁或生姜蛋白酶对肉类的嫩化效果[12,15-16]，而生姜蛋白酶作为酶制剂对肉类品质的影响及肉类的嫩化机制有待进一步探究。前期研究发现，不同来源的生姜蛋白酶，其酶活力有差异，但尚不清楚生姜蛋白酶对肉类的嫩化效果和蛋白质的降解特性。因此，本研究对提取自老姜的生姜蛋白酶进行基本性质评价，分析生姜蛋白酶对牛肉嫩度、保水性、色泽、质构的影响，探究生姜蛋白酶对牛肉肌原纤维蛋白、肌浆蛋白和胶原蛋白的降解特性，旨在为生姜蛋白酶在肉类加工中的应用提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

老姜：沃尔玛超市，产地为贵州省修文县；牛肉（里脊）：沃尔玛超市，产地为贵州省，品种为贵州小黄牛；木瓜蛋白酶：食品级，100 000 U/g，南宁庞博生物科技有限公司。

BCA 蛋白质浓度测定试剂盒、羟脯氨酸含量检测试剂盒、12 g/dL 变性蛋白质预制胶、*L*-酪氨酸、乙二胺四乙酸二钠、5×蛋白质上样缓冲液（含二硫苏糖醇）、质量分数为 2.5% 的戊二醛固定液、考马斯亮蓝 R-250 染色液、蛋白质 Marker（相对分子质量为 14 000~250 000）：分析纯，北京索莱宝科技有限公司；三氯乙酸（TCA）、酪蛋白：分析纯，上海易恩化学技术有限公司；磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、磷酸二氢钾、碘化钾、氢氧化钠、无水碳酸钠：分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；*L*-半胱氨酸、福林酚：分析纯，上海源叶生物科技有限公司；乙酸、乙醇：分析纯，天津市富宇精细化工有限公司；氯化钡：分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；硫酸铵、硫酸铜：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；酒石酸钾钠：分析纯，成都金山化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

冷冻干燥机：CTFD-12S 型，青岛永合创信电子科技有限公司；酶标分析仪：ZDM-1101 型，卓的仪器设备（上海）有限公司；pH 计：PHS-3C 型，上海仪电科学仪器股份有限公司；高速均质机：FSH-2A 型，杭州旌斐仪器科技有限公司；台式高速冷冻离心机：H2-16KR 型，湖南可成仪器设备有限公司；水分测定仪：SFY-30 型，深圳冠亚水分仪仪器有限公司；色差仪：WSC-3B 型，上海仪电物理光学仪器有限公

司；紫外-可见分光光度计：T6型，北京普析通用仪器有限责任公司；物性分析仪：TMS-PRO型，美国FTC公司；质构仪：CT3型，美国Brookfield公司；电泳仪：DYY-6C型，北京六一生物科技有限公司；扫描电子显微镜：SU8010型，日本日立公司；恒温摇床：TS-21020型，上海天呈实验仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 生姜蛋白酶的提取

采用硫酸铵沉淀法，按照Liu等[17]的方法并稍加修改，将冷冻老姜与2倍体积的磷酸氢二钠-磷酸二氢钠缓冲液（0.02 mol/L，含0.01 mol/L *L*-半胱氨酸溶液和0.005 mol/L乙二胺四乙酸二钠溶液）打浆榨汁，将混合物低速搅拌30 min，静置2 h后，用4层纱布过滤，取滤液离心（4 ℃、5 000 r/min、5 min）除去淀粉等不溶性杂质，收集上清液，向上清液中缓慢加入硫酸铵至饱和度为60%，静置3 h后离心（4 ℃、10 000 r/min、20 min）收集沉淀。将沉淀用少量缓冲液溶解，装入截留相对分子质量为8 000~14 000的透析袋中，用蒸馏水透析16 h以上，直至用0.025 mol/L氯化钡检验透析液无沉淀产生，冷冻干燥即为生姜蛋白酶，所有提取过程均需要保持4 ℃以下低温以保持酶活力。

1.3.2 蛋白酶中蛋白质质量分数的测定

采用BCA蛋白质浓度测定试剂盒测定蛋白酶中蛋白质的质量分数，将生姜蛋白酶溶解于磷酸缓冲液（0.02 mol/L、pH 6）中，并稀释到相应的浓度，然后与BCA工作液在37 ℃下反应30 min，测定其在562 nm处的吸光度，测定结果以生姜蛋白酶中蛋白质的质量计，单位为mg/g。

1.3.3 酶活力的测定

参照GB/T 23527.1—2023的方法。生姜蛋白酶在40 ℃、pH为6条件下水解酪蛋白生成*L*-酪氨酸，加入0.4 mol/L TCA溶液终止反应，并沉淀未水解的底物，取滤液在275 nm下测定吸光度，根据吸光度与酶活力的比例关系计算其酶活力。生姜蛋白酶在40 ℃、pH为6条件下，1 min水解酪蛋白产生1 μg *L*-酪氨酸所需的蛋白酶量，即为1个酶活力单位，单位为U。酶活力计算方法见式（1）。

$$X=\frac{A\times V\times n\times 4}{1\times m\times 10} \quad (1)$$

式中：

X——样品的酶活力，U/g；

A——标准曲线得出的蛋白酶水解产生的*L*-酪氨酸的质量浓度，μg/mL；

V——溶解样品所使用的容量瓶的体积，mL；

n——稀释倍数；

4——反应试剂的总体积，mL；

1——吸取酶液的体积，mL；

m——样品质量，g；

10——反应时间，min。

1.3.4 生姜蛋白酶相对分子质量的测定

根据Gagaoua等[18]的方法并稍加修改，将蛋白酶调整至适当浓度后，与5×蛋白质上样缓冲液（含二硫苏糖醇）按体积比4∶1混合。混合液在沸水浴中处理10 min，冷却至室温后，于4 ℃以5 000 r/min离心5 min。取10 μL上清液，加入12 g/dL变性蛋白质预制胶的加样孔中，在90 V恒压条件下电泳分离1 h。然后将凝胶浸入1 g/L考马斯亮蓝R-250染色液中，室温染色4 h后，用脱色液（乙醇、乙酸、水的体积比为4∶1∶5）进行脱色，直至蛋白质条带清晰可见。蛋白质Marker的相对分子质量为14 000~250 000，用于测定样品条带的相对分子质量。最后，使用Quantity One 4.6.2软件对电泳条带进行分析，计算目标蛋白质的相对分子质量。

1.3.5 生姜蛋白酶酶活力测定的反应体系

1）最适温度：设定不同的反应温度（30、40、50、60、70、80 ℃），在10 g/L的酪蛋白溶液与0.02 mol/L的磷酸缓冲液（pH 6）组成的反应体系中反应10 min后终止反应，按1.3.3节的方法测定酶活力。

2）最适pH：设定不同的pH（5、6、7、8、9），在10 g/L的酪蛋白溶液与0.02 mol/L的磷酸缓冲液（pH 6）组成的反应体系中，于60 ℃准确反应10 min后终止反应，按1.3.3节的方法测定酶活力。

1.4 生姜蛋白酶对牛肉品质的影响

1.4.1 样品的制备

牛肉（里脊）预先除去表面筋膜和结缔组织，顺着肌原纤维切成4 cm×3 cm×2 cm的肉块，随机分成5组。以磷酸缓冲液（0.02 mol/L、pH 6）配制酶溶液，30 U/mL的食品级木瓜蛋白酶溶液处理的牛肉命名为30-PP，30、60、90 U/mL的生姜蛋白酶溶液处理的牛肉分别命名为30-GP、60-GP、90-GP。为了确保样品处理得均匀，用5.0 mL注

射器从牛肉的不同方位注射蛋白酶溶液，注射质量为牛肉质量的20%，对照组注射磷酸缓冲液。随后抽真空密封，将牛肉于30 ℃下腌制2 h后用蒸煮袋密封，在恒温（85±1）℃的水浴锅中蒸煮到牛肉的中心温度达到75 ℃，收集牛肉和蒸煮损失液，冷却至常温后进行后续指标的测定。

1.4.2 蒸煮损失率的测定

以蒸煮前后的质量差计算蒸煮损失率[19]，用吸水纸吸干样品表面水分后称质量，将样品放入蒸煮袋并真空密封，在恒温（85±1）℃的水浴锅中蒸煮10 min，冷却至室温后，用吸水纸吸干样品表面水分，称取样品质量并记录，蒸煮损失率的计算方法见式（2）。

$$C=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

C——蒸煮损失率，%；

m_1——样品蒸煮前的质量，g；

m_2——样品蒸煮后的质量，g。

1.4.3 离心损失率的测定

参照焦婷婷等[20]的方法，称取5 g样品并切成肉末，用吸水纸吸干样品表面水分，用双层滤纸包好放入离心管离心（10 min、5 000 g）。离心后再次用吸水纸吸干样品表面水分并称质量，离心损失率计算方法见式（3）。

$$S=\frac{m_3-m_4}{m_3}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

S——离心损失率，%；

m_3——样品离心前的质量，g；

m_4——样品离心后的质量，g。

1.4.4 水分质量分数的测定

将样品切成肉末，取1.000 g肉末，采用水分测定仪测定水分质量分数。

1.4.5 色泽的测定

采用色差仪对样品的亮度值（L^*值）、红绿值（a^*值）、黄蓝值（b^*值）进行测定，每次测定前用比色板校准色差仪。

1.4.6 pH的测定

按照Saengsuk等[21]的方法，取2 g样品与20 mL蒸馏水在离心管中混合，以12 000 r/min均质30 s，静置30 min后，测定pH。

1.4.7 剪切力的测定

参照Zheng等[19]的方法，用配备Warner-Brazler刀片（60°三角形开口）的质构仪测定剪切力。将样品切成1.5 cm×1.5 cm×1.0 cm的肉块，以垂直肌肉纤维的方向进行剪切力测定。参数设定为：触发力0.1 N，测定速度60 mm/min，测定最大剪切力，每组重复6次。

1.4.8 质构的测定

参照吴文燕等[22]的方法，用质构仪在室温下测定质构。将样品切成1.5 cm×1.5 cm×1.0 cm的肉块，探头为圆底柱形探头TA11-1000，参数设定为：测试前速度2 mm/s，测试中速度2 mm/s，测试后速度2 mm/s，形变程度为50%。测定硬度、咀嚼性、弹性、内聚性、胶着性、黏性，每组重复6次。

1.4.9 感官评定

按照吴文燕等[22]的方法并稍加改动。感官评定小组由10名（5男5女）具有食品感官评定经验的食品专业学生组成，对样品的色泽、气味、组织状态、口感、总体可接受度分别打分，标准见表1。

表1 生姜蛋白酶腌制牛肉的感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for the beef marinated with ginger protease

指标	标准	得分/分
色泽	色泽均匀，表面光泽度高	16~20
	色泽较均匀，有光泽，表面稍深或稍浅	11~15
	色泽较深或苍白，分布不均	1~10
气味	肉香味纯正且适宜，无异味	16~20
	肉香味较淡，无异味	11~15
	有酸败味等异味	1~10
组织状态	肉质紧致，软硬适中	16~20
	肉质较硬或较软烂	11~15
	粗糙、过于坚硬或过于软烂	1~10
口感	咀嚼性良好	16~20
	咀嚼性较差	11~15
	咀嚼性很差	1~10
总体可接受度	接受度高	16~20
	可接受	11~15
	不可接受	1~10

1.4.10 微观结构观察

参考汪辰晨等[23]的方法观察样品的微观结构。将样品切成0.5 cm×0.5 cm×1.0 cm的肉片，在质量分数为2.5%的戊二醛溶液中浸泡24 h，用0.1 mol/L的磷酸缓冲液冲洗3次。用体积分数分

别为25%、50%、75%、85%、90%的乙醇溶液进行梯度脱水，每次10 min。在无水乙醇中脱水30 min，冷冻干燥后喷金，最后在扫描电子显微镜下观察肉片的横截面。

1.4.11 TCA可溶性肽的测定

按照Saengsuk等[21]的方法并稍加修改，将3 g样品与27 mL质量分数为5%的TCA溶液混合，以12 000 r/min均质30 s，在4 ℃条件下静置1 h，以5 000 r/min离心5 min。取1 mL上清液，加入5 mL试剂甲（含质量分数为2%的碳酸钠溶液、0.1 mol/L氢氧化钠溶液、0.02 mol/L硫酸铜溶液、质量分数为2%的酒石酸钾钠溶液），混匀后在25 ℃下保温10 min，加入0.5 mL试剂乙（福林酚试剂），立即振荡混匀，在25 ℃下保温30 min，在750 nm下测定吸光度，以牛血清蛋白质为标准品绘制标准曲线。上清液中的蛋白质以每克样品中可溶性肽的质量计，单位为mg/g。

1.4.12 热溶性胶原蛋白与热不溶性胶原蛋白的测定

根据Marino等[2]的方法，按照羟脯氨酸含量检测试剂盒的方法测定蒸煮损失液和样品中羟脯氨酸的质量分数，乘以转化因子7.14计算热溶性胶原蛋白和热不溶性胶原蛋白的质量分数。结果以每克样品中胶原蛋白的质量计，单位为mg/g。

1.4.13 总蛋白质、肌原纤维蛋白及肌浆蛋白的溶解度测定

按Saengsuk等[21]的方法测定总蛋白质、肌原纤维蛋白及肌浆蛋白的溶解度。肌浆蛋白溶解度的测定方法：称取2 g样品并切成肉末，加入20 mL预冷至4 ℃的0.025 mol/L磷酸钾缓冲液（pH为7.2），于4 ℃、120 r/min摇床提取12 h，于4 ℃下以1 500 *g*离心20 min。用BCA蛋白质浓度测定试剂盒测定上清液中蛋白质的质量浓度。总蛋白质溶解度的测定方法：称取2 g样品并切成肉末，加入40 mL含有1.1 mol/L碘化钾溶液的0.1 mol/L磷酸钾缓冲液（预冷至4 ℃，pH为7.2），按上述方法进行蛋白质的提取、离心和质量浓度测定。肌原纤维蛋白的质量为总蛋白质与肌浆蛋白的质量之差，结果以每克样品中蛋白质的质量计，单位为mg/g。

1.5 数据处理

结果以平均值±标准偏差表示。采用Excel 2010处理数据，采用IBM SPSS Statistics 25进行统计分析及单因素方差分析，$P<0.05$表示差异显著。采用Origin 2018及GraphPad Prism 8.0.2绘图。

2 结果与讨论

2.1 生姜蛋白酶的性质

以牛血清蛋白质为标准品，所得的蛋白质标准曲线为$y=0.724\ 8x+0.093\ 1$，$R^2=0.994$。提取得到的生姜蛋白酶，其质量分数为（574.60±0.25）mg/g，酶活力达（31 787±307）U/g。由图1（a）可知，以酪蛋白为底物时，最适温度为60 ℃。最适温度下酶活力为（53 013±1 186）U/g，在40~70 ℃可保持最适温度下酶活力的50%以上。此结果与Nafi'等[24-25]的研究结果一致，该研究发现60 ℃为生姜蛋白酶的最适温度，且超过70 ℃时，生姜蛋白酶的酶活力显著下降，这可能与蛋白质的热变性有关。

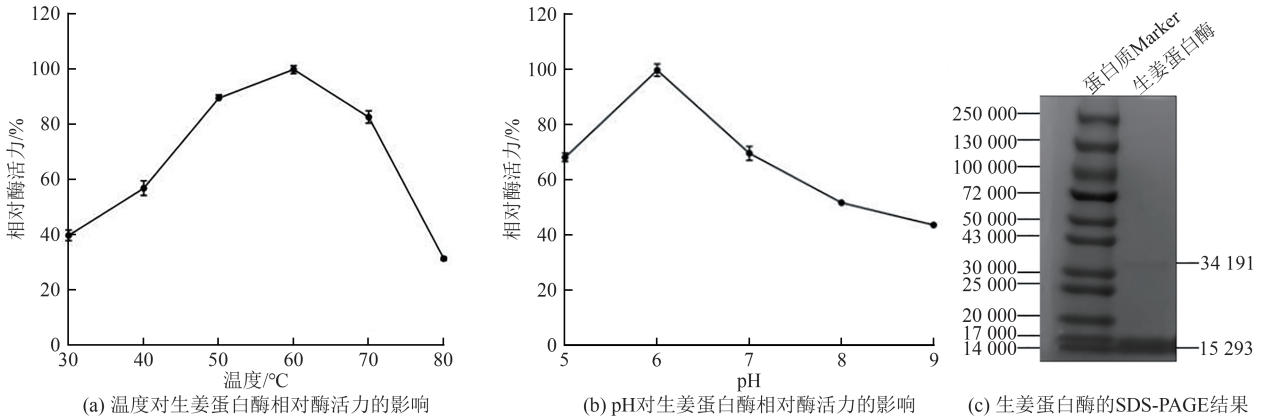
由图1（b）可知，生姜蛋白酶的最适pH为6，在pH为5~8时可保持最适pH下酶活力的50%以上。有研究表明生姜蛋白酶的最适pH为5.0~9.0[12,18]，可能是生姜的产地、提取纯化方法以及酶活力测定方法等因素导致最适pH存在差异。

由图1（c）可知，生姜蛋白酶在凝胶上呈现出2条明显的蛋白质条带。通过Quantity One 4.6.2软件分析条带，计算得出其相对分子质量分别为15 293和34 191。该结果与多数研究的结论一致，即生姜蛋白酶由双组分构成[26]。例如刘伟[27]采用葡聚糖凝胶纯化超滤后的生姜蛋白酶，得到相对分子质量分别为14 000和24 000的组分。Huang等[28]采用离子交换色谱纯化生姜蛋白酶，测得其相对分子质量约为31 000。

2.2 生姜蛋白酶对牛肉品质的影响

2.2.1 生姜蛋白酶对牛肉保水性的影响

保水性是衡量蛋白质结合或保留水分能力的重要指标。由表2可知，生姜蛋白酶和木瓜蛋白酶处理后的牛肉，其蒸煮损失率和离心损失率均无显著变化（$P>0.05$）。此结果可能与生姜蛋白酶及木瓜蛋白酶的性质有关：生姜蛋白酶和木瓜蛋白酶主要水解特定肽键，尽管这种专一性作用不足以显著影响牛肉的整体保水性，但足以改变牛肉的质地和嫩度。Naveena等[29]的研究结果表明，生



(a) 温度对生姜蛋白酶相对酶活力的影响　(b) pH对生姜蛋白酶相对酶活力的影响　(c) 生姜蛋白酶的SDS-PAGE结果

图 1　生姜蛋白酶的性质

Fig. 1　Properties of ginger protease

姜提取物对牛肉的保水性和蒸煮损失率无显著影响。另有研究表明，植物蛋白酶通过降解肉类中的蛋白质，使蛋白质更容易失水，导致保水性下降[30]。本研究中，生姜蛋白酶未对牛肉的保水性产生负面影响，且在改善牛肉嫩度的同时维持了其原有的保水性。因此，使用生姜蛋白酶可能是一种有效的嫩化策略，能够在不牺牲保水性的前提下提升牛肉的食用品质。

表 2　生姜蛋白酶对牛肉保水性的影响

Table 2　Effects of ginger protease on the water-holding capacity of beef　单位：%

组别	蒸煮损失率	离心损失率	水分质量分数
对照组	38.09±1.53^{a}	14.52±1.65^{a}	60.89±1.06^{ab}
30-PP	37.55±0.59^{a}	13.64±2.36^{a}	62.27±1.43^{a}
30-GP	39.55±1.74^{a}	12.42±0.65^{a}	59.72±0.46^{b}
60-GP	39.37±1.11^{a}	12.66±1.32^{a}	60.79±1.19^{ab}
90-GP	38.30±0.68^{a}	12.82±1.36^{a}	61.99±0.32^{a}

注：同一列不同小写字母表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

2.2.2　生姜蛋白酶对牛肉色泽和 pH 的影响

由表 3 可知，与对照组和 30-PP 相比，30-GP、60-GP、90-GP 的 L^{*} 值显著升高（P<0.05），a^{*} 值显著降低（P<0.05）。这可能由于蛋白酶处理导致牛肉的红细胞破损，使牛肉的 L^{*} 值提升而 a^{*} 值降低[31]。此外，肌纤维在酶的作用下变得相对松散，水分流失到牛肉的表面从而导致光的折射路线发生变化[32]。Abdel-Naeem 等[33]发现，用生姜提取物腌制能够显著提高骆驼肉的 L^{*} 值。Erdem 等[34]的研究表明，生姜提取物结合真空低温蒸煮能够显著提高牛肉、鹅肉和兔肉的 L^{*} 值。

表 3　生姜蛋白酶对牛肉色泽和 pH 的影响

Table 3　Effects of ginger protease on the color and pH of beef

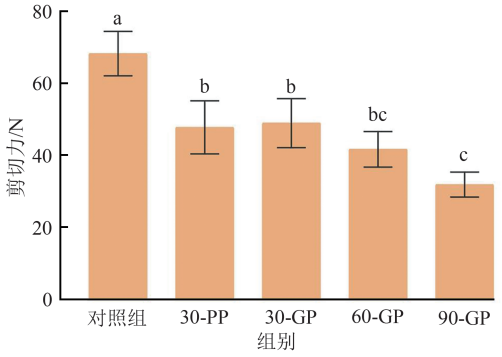
组别	L^{*} 值	a^{*} 值	b^{*} 值	pH
对照组	42.80±1.07^{b}	13.07±0.29^{a}	20.74±0.14^{a}	5.85±0.04^{a}
30-PP	42.56±1.59^{b}	12.21±0.79^{ab}	19.81±0.73^{ab}	5.79±0.02^{b}
30-GP	48.23±0.98^{a}	10.17±0.62^{cd}	18.38±1.07^{bc}	5.81±0.01^{ab}
60-GP	48.38±1.02^{a}	9.46±0.91^{cd}	17.88±1.14^{c}	5.78±0.01^{b}
90-GP	49.53±1.10^{a}	11.15±0.28^{bc}	18.24±0.64^{bc}	5.73±0.02^{c}

注：同一列不同小写字母表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

由表 3 可知，对照组的 pH 最高，可能是由于木瓜蛋白酶与生姜蛋白酶对牛肉蛋白质中疏水性和非极性氨基酸残基肽键的切割作用，产生了小分子肽段和游离氨基酸（如天冬氨酸和谷氨酸），从而降低了牛肉的 pH[21]。

2.2.3　生姜蛋白酶对牛肉剪切力的影响

肉的嫩度可通过剪切力直接体现，剪切力越小代表肉的嫩度越好。由图 2 可知，对照组的剪切力最大，为（68.25±6.16）N，其次是 30-GP、30-PP、



不同小写字母表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

图 2　生姜蛋白酶对牛肉剪切力的影响

Fig. 2　Effects of ginger protease on the shear force of beef

60-GP，剪切力分别为（48.99±6.79）、（47.79±7.35）、（41.70±4.94）N，90-GP 的剪切力小于其余组，为（31.89±3.46）N。木瓜蛋白酶与生姜蛋白酶均可显著降低牛肉的剪切力（$P<0.05$），且同等酶活力下，木瓜蛋白酶与生姜蛋白酶的剪切力无显著差异。说明在该条件下，生姜蛋白酶对牛肉嫩度的改善效果显著，且与木瓜蛋白酶相当。

2.2.4　生姜蛋白酶对质构的影响

由表 4 可知，对照组的硬度、咀嚼性、内聚性、胶着性最高，经生姜蛋白酶和木瓜蛋白酶分别处理后，牛肉的硬度、咀嚼性、内聚性、胶着性均显著降低（$P<0.05$），并随着生姜蛋白酶的酶活力增加呈下降趋势。30-GP 的硬度、弹性、胶着性、咀嚼性略高于 30-PP，表明生姜蛋白酶在改善牛肉食用品质的同时，能够更好地维持肉类的质构特性。生姜蛋白酶是一种植物巯基蛋白酶，可以将肌原纤维蛋白和胶原蛋白分解为小分子肽或低相对分子质量的蛋白质，导致肌原纤维结构断裂和肌肉组织疏松，从而改变牛肉的硬度和咀嚼性[2]。

表 4　生姜蛋白酶对牛肉质构的影响

Table 4　Effects of ginger protease on the texture of beef

组别	硬度/g	咀嚼性/mJ	弹性/mm	内聚性	胶着性/g	黏性/mJ
对照组	4 975.00±555.50^{a}	74.10±19.59^{a}	2.71±0.28^{a}	0.56±0.09^{a}	2 763.83±533.22^{a}	0.10±0.09^{bc}
30-PP	2 337.00±454.90^{b}	24.60±7.48^{bc}	2.44±0.50^{a}	0.45±0.07^{b}	1 053.33±319.77^{b}	0.25±0.08^{a}
30-GP	2 691.17±337.54^{b}	29.44±6.50^{b}	2.54±0.28^{a}	0.42±0.04^{bc}	1 168.57±174.26^{b}	0.04±0.08^{c}
60-GP	2 422.83±426.31^{b}	28.15±9.54^{b}	3.00±1.44^{a}	0.41±0.04^{bc}	1 008.83±252.19^{b}	0.15±0.08^{ab}
90-GP	1 503.50±490.69^{c}	11.33±4.40^{c}	2.15±0.44^{a}	0.36±0.04^{c}	536.17±180.96^{c}	0.18±0.08^{ab}

注：同一列不同小写字母表示不同处理组间差异显著（$P<0.05$）。

2.2.5　生姜蛋白酶对牛肉感官品质的影响

由图 3 可知，对照组的气味和口感评分总体低于其余组，且对照组的感官评定总分最低，为（71.80±4.59）分，60-GP 的感官评定总分最高，为（78.00±4.90）分，说明蛋白酶处理提高了牛肉的感官品质。可能是由于蛋白酶水解牛肉蛋白质，提高了牛肉的嫩度，质构和剪切力的结果也印证了此推论。此外，蛋白酶水解可能导致牛肉释放更多的风味物质，使得牛肉的气味更佳。

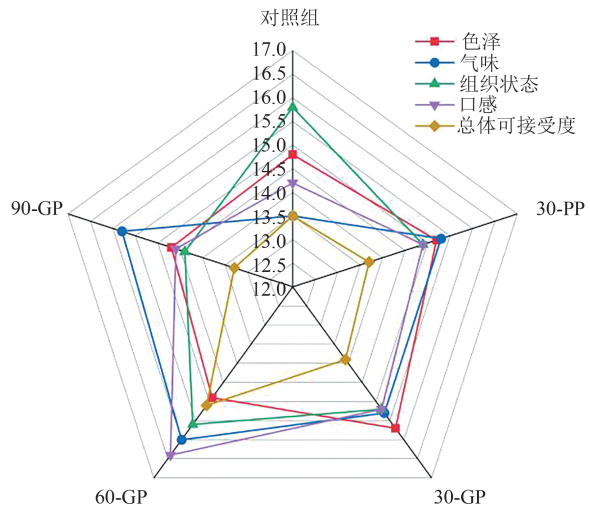


图 3　生姜蛋白酶腌制牛肉的感官评定结果

Fig. 3　Sensory evaluation results of beef marinated with ginger protease

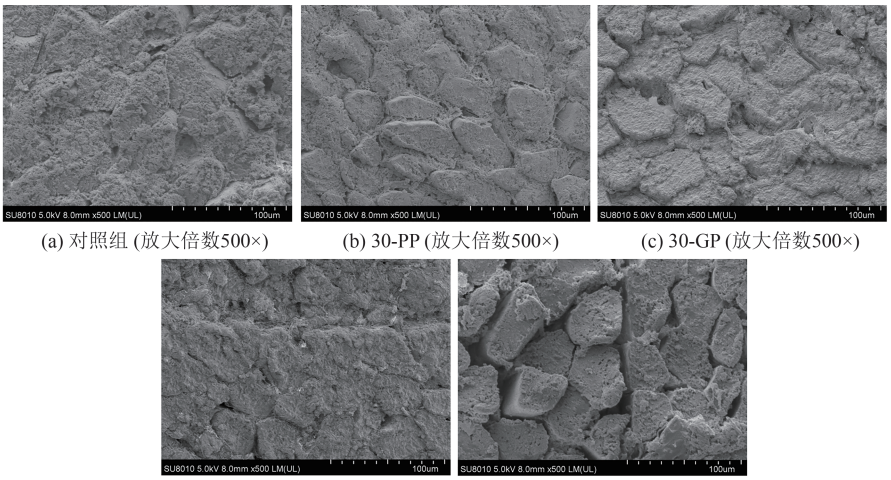
2.2.6　生姜蛋白酶对牛肉微观结构的影响

肌肉由多层结缔组织（肌内膜、肌束膜、肌外膜）包裹的肌纤维构成，形成精密的三维支撑网络，以维持其结构稳定性。由图 4 可知，对照组肌肉横截面的肌纤维排列紧密，木瓜蛋白酶或生姜蛋白酶作用于牛肉均会导致牛肉肌束膜破裂，肌纤维之间的间隙增加，肌肉结构变得疏松并出现断裂，其结构完整性遭到破坏。由图 4（e）可知，生姜蛋白酶的酶活力最大时，肌纤维之间的间隙最大。此外，图 4（c）中肌纤维之间的间隙比图 4（b）更大，这可能是由生姜蛋白酶对牛肉结缔组织的降解造成的，生姜蛋白酶通过降解结缔组织导致肌纤维的连接断裂，产生碎片化结构从而降低牛肉的嫩度[35]。孙树远等[36]发现，木瓜蛋白酶增大了驼肉肌纤维的细胞间隙，细胞膜出现破裂，细胞空间结构变大，肌肉组织变得更松弛。

2.3　生姜蛋白酶对牛肉蛋白质的降解特性

2.3.1　TCA 可溶性肽

TCA 可溶性肽可评价肌肉蛋白质的水解程度，其测定过程中，长链肽和蛋白质被沉淀，TCA 可



(a) 对照组 (放大倍数500×) (b) 30-PP (放大倍数500×) (c) 30-GP (放大倍数500×)

(d) 60-GP (放大倍数500×) (e) 90-GP (放大倍数500×)

图 4 生姜蛋白酶处理后牛肉的扫描电子显微镜图

Fig. 4 Scanning electron microscopy images of beef treated with ginger protease

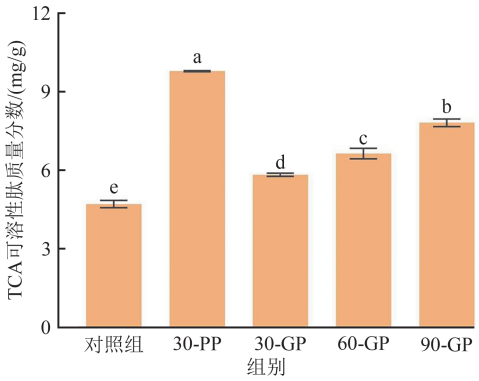
溶性部分包含小分子肽(相对分子质量<10 000)、游离氨基酸和其他非蛋白质含氮物(如游离碱基和核酸等)。因此,高水平的TCA可溶性肽表明蛋白酶对肌肉蛋白质的降解程度更高[21]。

由图5可知,对照组中TCA可溶性肽的质量分数最低,为(4.71±0.14)mg/g,30-PP、30-GP、60-GP、90-GP的TCA可溶性肽质量分数均显著高于对照组(P<0.05),Saengsuk等[21]在研究菠萝蛋白酶对重组牛排的作用时也观察到类似现象。30-PP的TCA可溶性肽质量分数最高,为(9.79±0.02) mg/g,显著高于30-GP(P<0.05)。肌肉蛋白质包括肌原纤维蛋白、肌浆蛋白和结缔组织蛋白,其中肌原纤维蛋白是肌肉中质量分数最高的蛋白质[37]。木瓜蛋白酶和生姜蛋白酶处理导致的TCA可溶性肽质量分数差异可能与蛋白酶的底物特异性有关,木瓜蛋白酶对肌原纤维蛋白和结缔组织蛋白具有广泛的非选择性水解作用,而生姜蛋白酶则对结缔组织表现出更高的特异性[11]。

2.3.2 热溶性胶原蛋白与热不溶性胶原蛋白

胶原蛋白是结缔组织的主要组成部分,对肉的韧性和质地起关键作用,热不溶性胶原蛋白的含量与肉的嫩度呈负相关,而热溶性胶原蛋白的含量与肉的嫩度呈正相关[38]。由图6可知,生姜蛋白酶处理可显著改变牛肉中胶原蛋白的质量分数(P<0.05),90-GP的热溶性胶原蛋白质量分数最高,热不溶性胶原蛋白的质量分数最低,分别为(1.79±0.09)、(1.22±0.11) mg/g。30-GP的热溶性胶原蛋白质量分数显著高于30-PP(P<0.05),而热不溶性胶原蛋白的质量分数反之(P<0.05)。

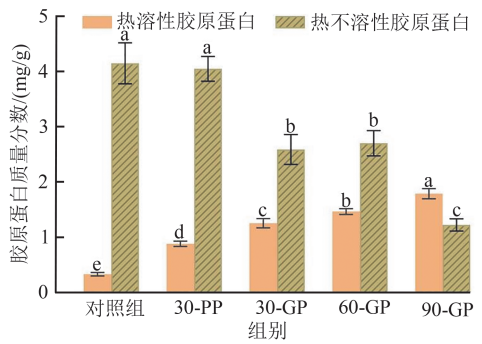
综上所述,生姜蛋白酶和木瓜蛋白酶都能有效



不同小写字母表示不同处理组间差异显著(P<0.05)。

图 5 生姜蛋白酶处理对牛肉中TCA可溶性肽质量分数的影响

Fig. 5 Effects of ginger protease treatment on the mass fraction of TCA-soluble peptides in beef



不同小写字母表示不同处理组间差异显著(P<0.05)。

图 6 生姜蛋白酶处理对牛肉中胶原蛋白质量分数的影响

Fig. 6 Effects of ginger protease treatment on the mass fraction of collagens in beef

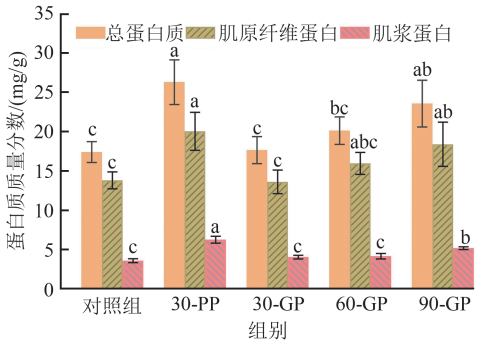
水解牛肉中的结缔组织，但生姜蛋白酶在提高胶原蛋白溶解性方面有明显优势。此差异可能源于酶的底物特异性。木瓜蛋白酶是半胱氨酸蛋白酶，其主要通过破坏半胱氨酸残基来水解结缔组织中的蛋白质[2]，而生姜蛋白酶的专一性更高，能特异性识别P_2位为脯氨酸和羟脯氨酸的多肽和蛋白质[7]，由于脯氨酸和羟脯氨酸是组成胶原蛋白的关键氨基酸，参与胶原纤维的形成并维持其结构稳定，因此生姜蛋白酶水解胶原蛋白的效率更高。

2.3.3　总蛋白质、肌原纤维蛋白及肌浆蛋白

蛋白质的溶解度是衡量其功能性质的重要指标，可在一定程度上反映蛋白质的变性程度[39]。木瓜蛋白酶和不同质量分数的生姜蛋白酶处理对牛肉蛋白质溶解度的影响见图7。30-PP、90-GP中肌原纤维蛋白及肌浆蛋白的质量分数显著高于对照组（P<0.05），而30-GP、60-GP中肌原纤维蛋白及肌浆蛋白的质量分数与对照组的差异不显著（P>0.05）。可溶性蛋白质增加表明肌原纤维蛋白水解，30-PP中肌原纤维蛋白和肌浆蛋白的质量分数均高于30-GP、60-GP、90-GP，说明木瓜蛋白酶对肌原纤维蛋白和肌浆蛋白的水解效果优于生姜蛋白酶。

蛋白质的溶解度主要取决于其疏水相互作用和亲水相互作用的平衡。蛋白质分子之间的疏水相互作用会限制水分子与蛋白质的结合，从而降低其溶解度；而蛋白质分子表面的离子相互作用（如静电相互作用）则会促进水分子与蛋白质的结合，从而提高其溶解度[40]。蛋白酶的强烈水解作用降低了蛋白质的相对分子质量，并释放可电离基团，这些基团增加了蛋白质表面的电荷密度，从而增强了蛋白质与水分子之间的静电相互作用，促进了蛋白质的溶解[21]。由图7可知，30-PP中总蛋白质的质量分数高于30-GP、60-GP、90-GP，表明木瓜蛋白酶对蛋白质的水解程度高于生姜蛋白酶，这与TCA可溶性肽的结果一致。

综上所述，木瓜蛋白酶对牛肉蛋白质的水解作用缺乏特异性，能够非选择性地作用于肌原纤维蛋白和结缔组织蛋白。这种广泛的水解作用虽然有助于嫩化牛肉，但也可能导致牛肉过度碎化，并产生不良的感官属性，如颗粒状质地和苦味。相比之下，生姜蛋白酶则表现出更高的选择性，其主要水解牛肉中的胶原蛋白。这种特异性作用可能在有效嫩化牛肉的同时，避免了牛肉过度水解而引发的质地和风味劣变，从而在一定程度上弥补了木瓜蛋白酶的不足。



不同小写字母表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

图7　生姜蛋白酶处理对牛肉中蛋白质溶解度的影响

Fig. 7　Effects of ginger protease treatment on solubility of proteins in beef

3　结论

本研究采用硫酸铵沉淀法从老姜中提取生姜蛋白酶，该生姜蛋白酶的酶活力达（31 787±307）U/g，最适温度为60 ℃，最适pH为6，且在40~70 ℃和pH 5~8条件下可保持50%以上的酪蛋白水解活性。30~90 U/mL的生姜蛋白酶可显著降低牛肉的剪切力、硬度、咀嚼性、胶着性，提升牛肉的亮度值，且不会造成牛肉保水性的变化。酶活力相同时，生姜蛋白酶与木瓜蛋白酶处理的牛肉剪切力无显著差异，说明牛肉嫩度无显著差异。感官评定结果表明，生姜蛋白酶处理提高了牛肉的整体感官品质。微观结构分析显示，生姜蛋白酶处理使牛肉的肌束膜发生破裂，肌肉组织变得疏松并出现断裂现象。此外，牛肉胶原蛋白、肌原纤维蛋白、肌浆蛋白的降解结果表明，生姜蛋白酶主要通过影响牛肉中的胶原蛋白改善牛肉的嫩度，而木瓜蛋白酶则通过影响肌原纤维蛋白、肌浆蛋白和胶原蛋白改善牛肉的嫩度。

综上所述，该生姜蛋白酶具有良好的酶学性质，对牛肉的嫩化效果与木瓜蛋白酶一致，且对牛肉胶原蛋白有特异性降解作用，可在嫩化过程中避免对肉类蛋白质的过度水解，能更好地保持肉类的理化特性。因此，生姜蛋白酶可作为一种有效的食品酶制剂，但在实际应用中还需要结合产品的加工特性进行优化。

参考文献

[1] 李冬梅，任响，林峻鑫，等. 碱性氨基酸影响肉品品质及机理的研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(8)：35-42.
LI D M，REN X，LIN J X，et al. Research progress on basic amino acids affecting meat quality and its mechanism [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(8)：35-42.(in Chinese)

[2] MARINO R，MALVA A D，CAROPRESE M，et al. Proteomics in bovine *semitendinosus* muscle to assess emerging strategies based on papain injection and ultrasounds on meat tenderization process [J]. Meat Science，2023，200：109147.

[3] XU J H，CAO H J，ZHANG B，et al. The mechanistic effect of bromelain and papain on tenderization in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) muscle [J]. Food Research International，2020，131：108991.

[4] 李梦卓，段雪妍，王俊娟，等. 蛋白质水解物的苦味形成机制及其酶解脱苦和风味改善的研究进展[J]. 食品工业科技，2025，46(6)：417-426.
LI M Z，DUAN X Y，WANG J J，et al. Research progress on the bitter taste formation mechanism in protein hydrolysates and their enzymatic debittering and flavor improvement [J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(6)：417-426.(in Chinese)

[5] MADHUSANKHA G D M P，THILAKARATHNA R C N. Meat tenderization mechanism and the impact of plant exogenous proteases：a review [J]. Arabian Journal of Chemistry，2021，14(2)：102967.

[6] CHOI K H，LAURSEN R A. Amino-acid sequence and glycan structures of cysteine proteases with proline specificity from ginger rhizome *Zingiber officinale* [J]. European Journal of Biochemistry，2000，267(5)：1516-1526.

[7] CHOI K H，LAURSEN R A，ALLEN K N. The 2.1 Å structure of a cysteine protease with proline specificity from ginger rhizome，*Zingiber officinale*[J]. Biochemistry，1999，38(36)：11624-11633.

[8] 范金波，侯宇，黄训文，等. 生姜蛋白酶的凝乳作用及相关机理探讨[J]. 食品与发酵工业，2014，40(2)：60-65.
FAN J B，HOU Y，HUANG X W，et al. The curd process and related mechanism of ginger protease[J]. Food and Fermentation Industries，2014，40(2)：60-65.(in Chinese)

[9] 孙国梁. 生姜蛋白酶的提取及其在牛肉嫩化中的应用研究[D]. 泰安：山东农业大学，2008.

[10] 柴丽娟，陈述云，袁继鑫，等. 生姜蛋白酶对红葡萄酒澄清效果的研究[J]. 酿酒，2009，36(6)：59-62.
CHAI L J，CHEN S Y，YUAN J X，et al. Investigation on the effect of zingibain on red wine clarification[J]. Liquor Making，2009，36(6)：59-62.(in Chinese)

[11] HA M，BEKHIT A E A，CARNE A，et al. Characterisation of commercial papain，bromelain，actinidin and zingibain protease preparations and their activities toward meat proteins[J]. Food Chemistry，2012，134(1)：95-105.

[12] CRUZ P L，PANNO P H C，GIANNOTTI J D G，et al. Effect of proteases from ginger rhizome on the fragmentation of myofibrils and tenderness of chicken breast[J]. LWT-Food Science and Technology，2020，120：108921.

[13] 阿尔祖古丽•阿卜杜外力，玉素甫•苏来曼，巴吐尔•阿不力克木. 生姜蛋白酶对干腌羊火腿品质特性的影响[J]. 食品科学，2019，40(8)：15-21.
ABUDUWAILI A，SULAIMAN Y，ABULIKEM B. Effect of zingibain on the quality characteristics of dry-cured mutton ham[J]. Food Science，2019，40(8)：15-21.(in Chinese)

[14] 唐泽群，余德顺，朱艺佳，等. 生姜蛋白酶提取、性质及应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(1)：224-230.
TANG Z Q，YU D S，ZHU Y J，et al. Research progress on extraction，properties and application of ginger protease [J]. Journal of Food Safety & Quality，2021，12(1)：224-230.(in Chinese)

[15] LEE Y B，SEHNERT D J，ASHMORE C R. Tenderization of meat with ginger rhizome protease[J]. Journal of Food Science，1986，51(6)：1558-1559.

[16] NAQVI Z B，CAMPBELL M A，LATIF S，et al. Improving tenderness and quality of *M. biceps femoris* from older cows through concentrate feeding，zingibain protease and sous vide cooking[J]. Meat Science，2021，180：108563.

[17] LIU W，YANG W N，LI X Y，et al. Evaluating the properties of ginger protease-degraded collagen hydrolysate and identifying the cleavage site of ginger protease by using an integrated strategy and LC-MS technology [J]. Molecules，2022，27(15)：5001.

[18] GAGAOUA M，HOGGAS N，HAFID K. Three phase partitioning of zingibain，a milk-clotting enzyme from *Zingiber officinale* Roscoe rhizomes [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2015，73：245-252.

[19] ZHENG H S，LI L L，HUANG C B，et al. Evaluation of ultrasound-assisted tomato sour soup marination on beef：insights into physicochemical，sensory，microstructural，and flavour characteristics[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2024，110：107028.

[20] 焦婷婷，姜启兴，常诗洁，等. 熟化工艺对脊尾白虾品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(8)：119-127.
JIAO T T，JIANG Q X，CHANG S J，et al. Effect of different thermal process on the quality of *Exopalaemon carinicauda*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，

2024，43(8)：119-127.(in Chinese)

[21] SAENGSUK N，LAOHAKUNJIT N，SANPORKHA P，et al. Physicochemical characteristics and textural parameters of restructured pork steaks hydrolysed with bromelain[J]. Food Chemistry，2021，361：130079.

[22] 吴文燕，胡萍，李娟，等. 酸汤对酸汤牛肉特征风味及品质的影响[J]. 食品科学，2022，43(12)：10-17.
WU W Y，HU P，LI J，et al. Effect of sour soup on characteristic flavor and quality of beef in sour soup[J]. Food Science，2022，43(12)：10-17.(in Chinese)

[23] 汪辰晨，赵建伟，陈龙，等. 温度波动对冷鲜鸡贮藏品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(9)：10-20.
WANG C C，ZHAO J W，CHEN L，et al. Effects of temperature fluctuation on storage quality of chilled chicken[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(9)：10-20.(in Chinese)

[24] NAFI' A，FOO H L，BAKAR J，et al. Partial characterization of an enzymatic extract from Bentong ginger (*Zingiber officinale* var. Bentong)[J]. Molecules，2014，19(8)：12336-12348.

[25] NAFI' A，FOO H L，BAKAR J，et al. Properties of proteolytic enzyme from ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)[J]. International Food Research Journal，2013，20：363-368.

[26] 刘治年. 姜蛋白酶提取纯化及脱除刺梨单宁效应研究[D]. 贵阳：贵州大学，2023.

[27] 刘伟. 生姜蛋白酶水解制备胶原肽、多肽结构表征及其初步活性筛选研究[D]. 北京：北京中医药大学，2023.

[28] HUANG X W，CHEN L J，LUO Y B，et al. Purification，characterization，and milk coagulating properties of ginger proteases[J]. Journal of Dairy Science，2011，94(5)：2259-2269.

[29] NAVEENA B M，MENDIRATTA S K，ANJANEYULU A S R. Tenderization of buffalo meat using plant proteases from *Cucumis trigonus* Roxb (kachri) and *Zingiber officinale* Roscoe (ginger rhizome)[J]. Meat Science，2004，68(3)：363-369.

[30] WANG Y，CHEN X，ZHOU P，et al. Beef tenderization without exacerbating the cooking loss：the way of enzymatic deamidation[J]. Food Bioscience，2024，58：103806.

[31] MA Y，YUAN Y P，BI X F，et al. Tenderization of yak meat by the combination of papain and high-pressure processing treatments[J]. Food and Bioprocess Technology，2019，12(4)：681-693.

[32] 曲瑞鹏，林奕云，张惠朋，等. 超高压辅助酶法嫩化对鹅肉贮藏期品质的影响[J]. 现代食品科技，2025，41(2)：167-174.
QU R P，LIN Y Y，ZHANG H P，et al. Effects of high hydrostatic pressure-assisted enzymatic tenderization on the quality of goose meat during storage[J]. Modern Food Science and Technology，2025，41(2)：167-174.(in Chinese)

[33] ABDEL-NAEEM H H S，MOHAMED H M H. Improving the physico-chemical and sensory characteristics of camel meat burger patties using ginger extract and papain[J]. Meat Science，2016，118：52-60.

[34] ERDEM N，GÖKMEN S. The impact of plant proteases and sous vide technology on quality characteristics of meat[J]. Journal of Food Science and Technology，2025，62(4)：773-786.

[35] ABDEL-NAEEM H H S，TALAAT M M，IMRE K，et al. Structural changes，electrophoretic pattern，and quality attributes of camel meat treated with fresh ginger extract and papain powder[J]. Foods，2022，11(13)：1876.

[36] 孙树远，陈琪，何静，等. 木瓜蛋白酶与超高压技术嫩化驼肉的研究[J]. 中国食品学报，2023，23(4)：239-250.
SUN S Y，CHEN Q，HE J，et al. Tenderization and comparison of camel meat by papain and ultra-high pressure technology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2023，23(4)：239-250.(in Chinese)

[37] 周光宏. 肉品加工学[M]. 北京：中国农业出版社，2008：29-36.

[38] 常海军，王强，徐幸莲，等. 肌内胶原蛋白与肉品质关系研究进展[J]. 食品科学，2011，32(1)：286-290.
CHANG H J，WANG Q，XU X L，et al. Research progress of relationship between intramuscular collagen and meat quality[J]. Food Science，2011，32(1)：286-290.(in Chinese)

[39] GE Q F，GUO S Y，CHEN S，et al. A comparative study of vacuum tumbling and immersion marination on quality，microstructure，and protein changes of Xueshan chicken[J]. Frontiers in Nutrition，2022，9：1064521.

[40] WOUTERS A G B，ROMBOUTS I，FIERENS E，et al. Relevance of the functional properties of enzymatic plant protein hydrolysates in food systems[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2016，15(4)：786-800.

（责任编辑：金文苑）