DOI:10.12441/spyswjs.20251021001 [文章编号] 1673-1689(2026)06-0031-12

促进鸡肉酶解产物消化的复合酶筛选及应用

喻胜江[1] 陈垅泷[2] 张元媛[2] 钱 和[2] 蒋 帅[1] 刘 畅[2*]

(1. 浙江吉宠控股集团有限公司,浙江 绍兴 310018; 2. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:【目的】筛选复合酶配方,优化鸡肉酶解工艺并探究酶解产物的消化特性。**【方法】**以鸡肉浆为原料,分别采用2种复合酶配方(复合酶1:碱性蛋白酶质量分数2%+木瓜蛋白酶质量分数2%;复合酶2:木瓜蛋白酶质量分数2%+风味蛋白酶质量分数2%),在55 ℃条件下酶解1.5 h;通过测定水解度、肽质量分数、游离氨基酸组成及挥发性风味物质质量分数,结合体外模拟消化与小鼠模型试验,综合评价酶解效果及其生理影响。**【结果】**2种复合酶的水解度均超过56%,酶解产物中相对分子质量小于500的小分子肽占比达94%以上。体外消化试验结果显示,复合酶2组的粗蛋白质消化率为87.48%,显著高于复合酶1组(P<0.05);复合酶1组和复合酶2组消化产物中相对分子质量小于500的肽占比分别为92%和90%。动物试验结果表明,复合酶2组小鼠的粗蛋白质表观消化率达到82.64%。**【结论】**2种复合酶均能有效促进鸡肉蛋白质水解,其中复合酶2在提高产物消化率方面表现更优,为鸡肉蛋白质的高值化利用提供可行的工艺方案。

关键词:复合酶;体外模拟消化;消化特性

Screening and Application of Composite Enzymes for Improving the Digestibility of Chicken Protein Hydrolysates

YU Shengjiang[1] *CHEN Longlong*[2] *ZHANG Yuanyuan*[2] *QIAN He*[2]
JIANG Shuai[1] *LIU Chang*[2*]

(1. Zhejiang Jichong Holdings Group Co., Ltd., Shaoxing 310018, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to screen composite enzyme formulations, optimize the enzymatic hydrolysis of chicken protein, and investigate the digestive characteristics of the resulting hydrolysates. [**Method**] Chicken slurry was hydrolyzed using two composite enzyme formulations: composite enzyme formulation 1, consisting of alkaline protease at a mass fraction of 2% and papain at a mass fraction of 2%; and composite enzyme formulation 2, consisting of papain at a mass fraction of 2% and flavourzyme at a mass fraction of 2%. Enzymatic hydrolysis was performed at 55 ℃ for 1.5 h. The degree of hydrolysis, peptide mass fraction, free amino acid composition, and volatile flavour compounds were determined. The hydrolysis efficiency, digestive characteristics, and physiological effects of the hydrolysates were comprehensively evaluated using *in vitro* simulated digestion and a mouse model. [**Result**] The degree of hydrolysis achieved with both composite enzyme formulations exceeded 56%, and peptides with a relative molecular mass below 500 accounted for more than 94% of the hydrolysates. The results of *in vitro* digestion experiments showed that the crude protein digestibility of composite enzyme group 2 was 87.48%, significantly higher than that of composite enzyme group 1 (P<0.05). The proportion of peptides with a relative molecular mass less than 500

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2100101)。

通信作者:刘畅(1995—),男,博士,助理研究员,硕士研究生导师,主要从事慢糖食品配料功能评价、宠物功能食品开发研究。E-mail:liuchang670250789@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2025-10-21 **修回日期:**2025-12-15

in the digestion products of composite enzyme group 1 and composite enzyme group 2 was 92% and 90%, respectively. In the animal experiment, the crude protein apparent digestibility in mice fed the hydrolysate produced using composite enzyme formulation 2 reached 82.64%. [**Conclusion**] Both composite enzyme formulations effectively promoted chicken protein hydrolysis. Composite enzyme formulation 2 performed better in improving product digestibility, providing a feasible processing approach for the value-added utilization of chicken protein.

Keywords: composite enzymes; *in vitro* simulated digestion; digestive characteristic

鸡肉富含蛋白质和多种氨基酸，具有较高的营养价值和加工利用潜力。将鸡肉搅碎并打浆，有利于提高物料的均匀性以及蛋白质与酶的接触面积，为后续酶解处理提供适宜的物料形态。然而，鸡肉蛋白质结构相对复杂，其充分水解和高效利用仍受到一定限制。因此，如何通过复合酶处理促进鸡肉蛋白质水解，提高酶解产物的消化率和利用价值，值得进一步研究。

酶解技术作为一种高效的蛋白质处理方式，可通过蛋白酶切割肽键，将大分子蛋白质降解为较短肽段和游离氨基酸，并释放具有特定生物活性的肽段，从而提升蛋白质资源的应用价值[1]。然而，不同蛋白酶对蛋白质底物具有不同的选择性和酶切位点，采用单一蛋白酶可能难以充分水解成分复杂的鸡肉蛋白质。将具有不同底物选择性的蛋白酶合理组合，可扩大蛋白质的酶切范围，促进不同类型蛋白质的水解，从而提高蛋白质水解效率并改变酶解产物的组成[2]。

现有研究多集中于酶解工艺的单一指标优化或体外消化效果评价，而在产物功能特性及体内消化吸收效率方面的研究仍显不足，这制约了高效、低成本酶解工艺的开发与推广。作者所在课题组前期考察菠萝蛋白酶、亮氨酸转氨酶、角蛋白酶和胰蛋白酶等酶制剂在鸡肉蛋白质水解中的应用，初步评价不同酶制剂及其组合对酶解效率的影响。在此基础上，通过单因素试验和响应面法优化酶解条件，筛选出若干酶解效率较高的复合酶配方，并对部分配方的可行性进行验证[3]。

然而，已有研究多采用单一酶（如碱性蛋白酶）或传统复合酶（如碱性蛋白酶+风味蛋白酶）水解鸡肉蛋白质，其水解效率和风味产物仍有进一步改善空间。在前期单酶与复合酶筛选基础上，作者选用2种成本较低且酶切位点互补的复合酶配方（复合酶1：碱性蛋白酶质量分数2%+木瓜蛋白酶质量分数2%；复合酶2：木瓜蛋白酶质量分数2%+风味蛋白酶质量分数2%），系统比较2种复合酶配方在酶解效率、产物组成、体外消化特性、风味组成及体内消化率等方面的差异，旨在通过多酶协同作用提升鸡肉浆的水解效率与产物品质，为其高效利用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料与试剂

鸡肉原料：由浙江吉宠动物营养科技有限公司提供，品质符合GB/T 19676—2022的要求，遵照GB/T 6432—2018中的方法，测得蛋白质质量分数≥35%；鸡肉浆：鸡肉原料搅碎打浆加水所得，质量浓度为10 g/L。

木瓜蛋白酶（43 000 U/g）、菠萝蛋白酶（40 000 U/g）：山东蔚蓝生物科技有限公司；亮氨酸转氨酶（18 000 U/g）、中性蛋白酶（200 000 U/g）、碱性蛋白酶（360 000 U/g）、风味蛋白酶（200 000 U/g）、米曲霉源蛋白酶系：无锡优普克生物科技有限公司；角蛋白酶（200 000 U/g）：山东丰泰生物科技有限公司；胰蛋白酶（370 000 U/g）：南京全隆生物技术有限公司。所选用蛋白酶的性能信息见表1。

肿瘤坏死因子-α（tumor necrosis factor-α，TNF-α）检测试剂盒、白细胞介素-6（interleukin-6，IL-6）检测试剂盒、白细胞介素-17（interleukin-17，IL-17）检测试剂盒、白细胞介素-10（interleukin-10，IL-10）检测试剂盒、小鼠/兔通用型二抗、二氨基联苯胺（3，3’-diaminobenzidine，DAB）显色试剂盒：南京森贝伽生物科技有限公司；其余试剂：均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

电热鼓风干燥箱：101C-3B型，上海市实验仪器总厂；冷冻型微量台式离心机：Heraeus fresco 21型，赛默飞世尔科技（中国）公司；全自动酶标仪：M5型，

表1　蛋白酶性能信息

Table 1　Protease performance information

蛋白酶类型	蛋白酶	蛋白酶作用部位	来源
内切蛋白酶	碱性蛋白酶	主要催化由疏水性氨基酸的羧基形成的酰胺键，包括Ala、Val、Gly、Leu、Ile、Phe、Trp、Met和Pro	地衣芽孢杆菌
	中性蛋白酶	主要催化含有芳香族氨基酸（如Tyr、Trp和Phe）残基的肽键	解淀粉芽孢杆菌
	木瓜蛋白酶	木瓜蛋白酶具有广泛的特异性，可以裂解碱性氨基酸、Leu或Gly的肽键，还可以水解酯和酰胺	番木瓜
	菠萝蛋白酶	巯基蛋白酶，底物特异性较广，可优先水解Lys和Arg残基中羧基侧的肽键	菠萝
	胰蛋白酶	切割Lys和Arg残基的C末端肽段。如果酸性残基位于切割位点的任意一侧，则该反应的水解速度减慢，如果Pro残基位于切割位点的羧基侧，则水解停止。胰蛋白酶还可以切割氨基酸合成衍生物的酯和酰胺键	猪胰腺
	亮氨酸转氨酶	水解肽链中由Leu和其他氨基酸在N末端形成的肽链，将Leu的α-氨基从肽链的N末端转移到γ-Glu上	枯草芽孢杆菌
细胞外酶，个别为细胞内酶	角蛋白酶	能降解不溶性角蛋白底物，切割非末端肽键	地衣芽孢杆菌
内切蛋白酶和外切蛋白酶的混合物	风味蛋白酶	主要催化短肽末端疏水性氨基酸的水解	米曲霉

美国Molecular Devices公司；组织匀浆机：T-10型，德国IKA公司；双光束紫外-可见分光光度计：TU-1900型，北京普析通用仪器公司；高效液相色谱仪：安捷伦1260型，美国安捷伦科技公司；气相色谱-质谱联用仪：GCMS-QP2010Ultra型，日本岛津公司；超声波清洗机：KQ-600KDB型，昆山超声仪器有限公司；自动氨基酸分析仪：1260 Infinity III Amino Acid Analysis System型，美国安捷伦科技公司。

1.2　方法

1.2.1　鸡肉浆的复合酶酶解处理

将鸡肉原料绞碎、匀浆并加水配制成质量浓度为10 g/L的鸡肉浆。由于鸡肉浆的自然pH处于所选蛋白酶适宜的作用范围内，为避免调节pH引入额外盐离子，酶解过程中不另行调节pH。将鸡肉浆分为未酶解组、复合酶1组和复合酶2组。复合酶1组加入质量分数2%的碱性蛋白酶和质量分数2%的木瓜蛋白酶；复合酶2组加入质量分数2%的木瓜蛋白酶和质量分数2%的风味蛋白酶。酶添加量以鸡肉原料质量为基准计算。各组样品置于55 ℃水浴中酶解1.5 h，酶解时间自样品置入恒温水浴时开始计算。酶解结束后，将样品置于90 ℃水浴中灭酶15 min，随后迅速冷却，于5 000 r/min离心20 min，除去上层脂肪和不溶性残留物，所得酶解液用于后续试验。未酶解组不添加蛋白酶，其余处理条件与酶解组相同。各组试验均独立重复3次。

1.2.2　水解度的测定

食品中氨基酸态氮的测定参考GB 5009.235—2016（酸度计法），水解度定义为水解过程中已断裂肽键的物质的量占底物蛋白质中肽键总物质的量的百分比，按式（1）计算。

$$H=\frac{h}{h_{\mathrm{tot}}}\times 100\% \qquad (1)$$

式中：

H——水解度，%；

h——每克底物蛋白质中已断裂肽键的物质的量，mmol/g；

h_{tot}——每克底物蛋白质所含肽键的总物质的量，mmol/g。

1.2.3　肽质量分数的测定

采用TCA-双缩脲法测定肽质量分数[4]，以GSH为标样，分别配制成0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/mL的溶液。取2 mL GSH溶液与3 mL双缩脲试剂混合均匀，静置30 min，于540 nm处测定标样的吸光度，并绘制标准曲线（所得标准曲线为A=0.037 5C+0.110 5，其中C为质量浓度，单位为mg/L）。取4 mL酶解物，加入等体积的三氯乙酸溶液（质量分数10%），混合均匀后于4 ℃、4 000 r/min离心20 min。取上清液并按需要稀释。取2 mL稀释液与3 mL双缩脲试剂混匀，静置30 min后于540 nm处测定吸光度。每个样品重复测定3次，取平均值。根据标准曲线计算酶解液中的肽质量浓度，按照式（2）计算肽质量分数。

本试验中鸡肉原料质量浓度为0.010 g/mL。

$$\omega=\frac{A-0.110\,5}{0.037\,5}\times n\times\frac{V}{m} \quad (2)$$

式中：

ω——肽质量分数，mg/g；

A——样品在540 nm处的吸光度；

n——总稀释倍数，包括等体积三氯乙酸处理和后续稀释产生的稀释倍数；

V——与鸡肉原料对应的酶解液总体积，mL；

m——鸡肉原料质量，g。

1.2.4 游离氨基酸的测定

称取1.0 g冻干的酶解产物或消化产物，加入15 mL质量浓度为50 g/L的三氯乙酸溶液，均质1 min后定量转移至25 mL容量瓶中，并用质量浓度为50 g/L的三氯乙酸溶液定容，混匀。超声提取20 min后静置2 h以上，经双层滤纸过滤，再通过0.22 μm水系滤膜。取400 μL滤液置于液相色谱进样瓶中，采用1260 Infinity III Amino Acid Analysis System型氨基酸分析系统进行测定。样品经自动化柱前衍生后在反相高效液相色谱仪中分离，其中伯氨基酸采用邻苯二甲醛（OPA）衍生，于338 nm处检测；仲氨基酸采用9-芴甲基氯甲酸酯（FMOC）衍生，于262 nm处检测。参照氨基酸标准品的保留时间进行定性。采用外标法，根据峰面积进行定量。

1.2.5 肽相对分子质量分布的测定

采用配备2487型紫外检测器和Empower GPC软件的高效液相色谱仪测定肽的相对分子质量分布。样品制备：将100 mg冻干的酶解鸡肉浆粉末用水溶解于10 mL容量瓶内，超声5 min后以10 000 r/min离心5 min，进样前经0.22 μm滤膜过滤处理。色谱条件：TSKgel2000SWXL色谱柱（300 mm×7.8 mm×5 μm），流动相由乙腈-水-三氟乙酸（体积比40∶60∶0.1）组成，流量0.5 mL/min，柱温30 ℃，进样量10 μL。

1.2.6 挥发性风味物质的测定

采用顶空-固相微萃取法（HS-SPME）提取样品中的挥发性组分。样品充分均质后，准确称取4 g酶解鸡肉浆冻干粉，置于含有5 mL饱和食盐水的20 mL萃取瓶中，加入10 μL质量浓度为0.8 mg/mL的2-甲基-3-庚酮，旋紧瓶盖，涡旋振荡混匀，于40 ℃平衡15 min，再插入复合涂层的固相微萃取纤维（DVB-CAR-PDMS），于40 ℃恒温水浴中萃取30 min，拔出后立即插入气相色谱（GC）进样口，260 ℃解吸2 min。在进样前，将纤维置于270 ℃进样口中，在氦气流条件下老化1 h。

采用气相色谱-质谱联用仪分析挥发性风味成分。参照刘同等[5]的方法并结合仪器条件进行调整。采用HP-5MS毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为氦气，流量1.5 mL/min，不分流进样模式，进样口温度250 ℃。升温程序：初始温度35 ℃，保持3 min；以3 ℃/min升至70 ℃，再以10 ℃/min升至200 ℃，最后以20 ℃/min升至260 ℃，保持5 min。质谱条件：采用电子轰击离子源（EI），电子能量70 eV，离子源温度230 ℃，接口温度250 ℃，质荷比扫描范围为30~400。

1.2.7 模拟胃消化

模拟胃液的配制方法如下：将500 g去离子水与1.55 g NaCl、0.55 g KCl、0.075 g $CaCl_2\cdot2H_2O$、0.3 g $NaHCO_3$混合，使用0.1 mol/L HCl调节pH至2.5。随后加入120 mg胃蛋白酶、120 mg胃脂肪酶及1 mL浓度为1 mol/L的CH_3COONa溶液（pH 5.0），再次用0.1 mol/L HCl将pH调整至2.5。将100 mL酶解鸡肉浆溶液与100 mL模拟胃液混合。以等体积蒸馏水代替模拟胃液，其余操作相同，作为空白对照组。所有样品在37 ℃水浴中孵育2 h，轻微搅拌以确保反应均匀。在消化过程中，持续监测并保持反应溶液的pH为2.5。

1.2.8 模拟小肠消化

模拟小肠液的配制方法如下：将500 g去离子水与2.7 g NaCl、0.33 g KCl、0.17 g $CaCl_2\cdot2H_2O$混合，使用0.1 mol/L的NaOH溶液将pH调整至6.8。随后加入2 g胆盐和0.172 6 g胰蛋白酶，并再次用0.1 mol/L的NaOH调节pH至6.8。将45 mL模拟小肠液与150 mL经1.2.7中模拟胃消化后的消化液混合。以等体积蒸馏水代替模拟小肠液，其余操作相同，作为空白对照组。所有样品在37 ℃水浴中孵育2 h，轻微搅拌以确保反应均匀。在消化过程中，保持反应溶液的pH为6.8。消化结束后，将样品立即置于沸水浴中灭酶10 min。

1.2.9 粗蛋白质消化率的测定

向灭酶后的消化液中加入10 mL质量分数为10%的TCA溶液，以4 500 r/min离心20 min，取上清液测定蛋白质质量分数。粗蛋白质的检测参照

GB/T 6432—2018中的凯氏定氮法。粗蛋白质消化率的计算见式(3)。

$$P=\frac{m_1}{m_2}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

P——粗蛋白质消化率，%；

m_1——消化液中粗蛋白质质量分数，g/100 g；

m_2——消化前样品中粗蛋白质质量分数，g/100 g。

1.2.10　动物试验设计

动物试验设计参照Aloysius等[6]的方法，并结合本试验目的进行调整。40只8~9周龄雄性C57BL/6J小鼠购自北京维通利华实验动物科技有限公司，饲养于江南大学实验动物中心特定无病原体(specific pathogen free，SPF)环境中。动物试验方案经江南大学实验动物伦理委员会审查批准，伦理批准编号为JN.No20240330c0560610。小鼠适应性饲养7 d后，采用随机分组方法分为正常饲料组、高蛋白饲料组、未酶解组、复合酶1组和复合酶2组，每组8只。试验期间，小鼠自由摄食和饮水，每日记录饲料供给量、剩余量及洒落量，并定期记录小鼠体质量。

1.2.11　定制饲料制备

正常饲料组以酪蛋白、*L*-Tyr、玉米淀粉、麦芽糊精、蔗糖、纤维素、大豆油、混合矿物质S10022M、混合维生素V10037、酒石酸氢胆碱为基础，粉碎混合后高温灭菌，冷却后进行辐照灭菌；高蛋白饲料组通过降低碳水化合物组分，使饲料中粗蛋白质质量分数提高至30%；其他组分别用绞碎均质后的鸡肉浆、复合酶解后的鸡肉浆替换正常组饲料中的酪蛋白和*L*-Tyr(各饲料中粗蛋白质总量一致)，各组饲料的主要营养成分见表2。

表2　各组饲料的主要营养成分

Table 2　Main nutritional components of each group of feed

组别	质量分数/%			
	粗蛋白质	粗脂肪	粗纤维	短肽
正常饲料组	14.2	4.0	0.5	—
高蛋白饲料组	30.0	4.0	0.5	—
未酶解组	14.2	5.6	1.1	1.1
复合酶1组	14.2	5.6	1.1	2.9
复合酶2组	14.2	5.6	1.1	2.9

注："—"表示该组无此组分。

1.2.12　组织样本采集及储存

试验结束后处死小鼠并进行解剖，迅速取出肾脏组织。用于组织病理学及免疫组化检测的肾脏组织置于体积分数4%的多聚甲醛固定液中固定，随后进行石蜡包埋和切片。

1.2.13　粗蛋白质表观消化率的测定

试验期间准确记录各组小鼠的饲料供给量和剩余量，并扣除洒落量，计算实际采食量。采用全收粪法收集相应时间段内排出的全部粪便，收集的粪便去除毛发和饲料残渣后称质量，冻干并粉碎，备用。采用凯氏定氮法测定饲料和粪便中的氮质量分数，以氮质量分数乘以6.25计算粗蛋白质质量分数。粗蛋白质表观消化率按式(4)计算。

$$D_{CP}=\frac{m_{feed}\times w_{feed,CP}-m_{feces,DM}\times w_{feces,CP}}{m_{feed}\times w_{feed,CP}}\times 100\% \quad (4)$$

式中：

D_{CP}——粗蛋白质表观消化率，%；

m_{feed}——试验期内实际饲料摄入量，g；

$w_{feed,CP}$——饲料中粗蛋白质质量分数，%；

$m_{feces,DM}$——试验期内粪便干物质排出量，g；

$w_{feces,CP}$——粪便干物质中粗蛋白质质量分数，%。

1.2.14　小鼠体质量增加率的测定

根据记录的小鼠体质量，按照式(5)计算小鼠体质量增加率。

$$P_1=\frac{M-M_1}{M_1}\times 100\% \quad (5)$$

式中：

P_1——体质量增加率，%；

M——最终体质量，g；

M_1——初始体质量，g。

1.2.15　组织病理学检测

取肾脏组织置于体积分数4%的多聚甲醛溶液中，于4 ℃固定24 h后进行石蜡包埋。将石蜡块切成5 μm厚的薄片，置于载玻片上。用二甲苯脱蜡后，通过分级乙醇系列再水化，进行苏木精-伊红染色，倒置显微镜下观察组织病理变化。

1.2.16　肾脏炎症因子的免疫组化检测

肾脏组织石蜡切片经脱蜡和水化后，采用柠檬酸钠缓冲液进行抗原修复。切片置于体积分数3%的过氧化氢溶液中避光孵育25 min，以阻断内源性过氧化物酶活性；随后采用质量浓度为30 g/L

的牛血清白蛋白封闭液于室温下封闭 30 min。分别加入 TNF-α、IL-6、IL-17 和 IL-10 作为一抗，于 4 ℃孵育过夜；洗涤后加入相应二抗，于 37 ℃孵育 50 min。采用 DAB 显色并以苏木精复染，随后经梯度乙醇脱水、二甲苯透明和中性树胶封片。显微镜下采集图像，并使用 ImageJ 软件测定阳性染色区域的平均光密度。

1.3 数据统计分析

体外试验均进行 3 次独立重复，结果以平均值±标准差表示。动物试验以单只小鼠作为生物学重复，每组 8 只。采用 GraphPad Prism 9.0 软件进行统计分析和绘图，采用 Origin 2019 软件处理肽相对分子质量分布等数据并进行绘图。多组间比较采用单因素方差分析，当总体差异具有统计学意义时，采用 Tukey 法进行多重比较。

2 结果与讨论

2.1 酶解产物的生物活性评价及风味分析

2.1.1 水解度与肽质量分数分析结果

如图 1 所示，在 2 种复合酶作用下，鸡肉浆均发生明显水解。其中，复合酶 1 组的水解度为 56.43%，肽质量分数为 214.67 mg/g；复合酶 2 组的水解度为 56.88%，肽质量分数为 255.56 mg/g；未酶解组的水解度和肽质量分数分别为 15.83% 和 15.71 mg/g。已有研究表明，蛋白酶种类及其组合方式会显著影响鸡肉蛋白质水解效果，采用碱性蛋白酶+木瓜蛋白酶进行顺序酶解，可提高水解度，并促进肽类物质的生成[7]。李自会等[8]也发现，复合蛋白酶处理能够促进鸡肉复合底物中游离氨基酸和低相对分子质量肽的生成。本研究中 2 种复合酶处理后鸡肉蛋白质的水解度均超过 56%，酶解产物中相对分子质量小于 500 的肽组分占比均超过 94%，表明 2 种复合酶均能有效促进鸡肉蛋白质水解，并获得以低相对分子质量肽为主的酶解产物。

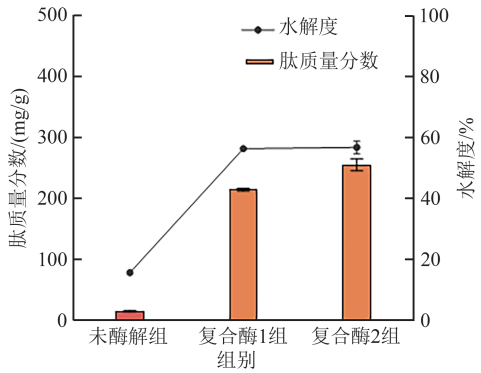
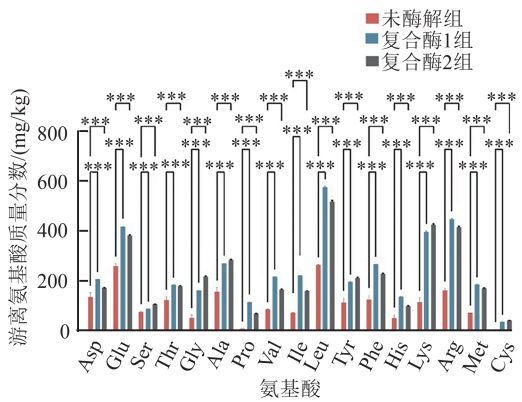


图 1 各组酶解产物的水解度与肽质量分数

Fig. 1 Hydrolysis degrees and peptide mass fraction of enzymatic hydrolysis products from different groups

2.1.2 游离氨基酸组成分析结果

蛋白质在降解过程中逐步分解为小分子肽、游离氨基酸及其他有机物。游离氨基酸是肉类滋味形成的重要物质基础，不同氨基酸具有不同的呈味特性。如图 2 所示，3 组样品中共检出 17 种游离氨基酸，按味感可分为鲜味、甜味、苦味及无味氨基酸[9]。由表 3 可知，未酶解鸡肉浆的游离氨基酸总量约为酶解组的一半。2 种复合酶组的游离氨基酸总量均高于未酶解组，且甜味氨基酸质量分数较高，提示复合酶处理可改变酶解产物中呈味氨基酸的组成[10]。



***—差异极显著(P<0.001)。

图 2 酶解鸡肉浆中游离氨基酸质量分数

Fig. 2 Mass fractions of free amino acids in enzymatically hydrolyzed chicken meat slurry

游离氨基酸既可直接参与酶解产物滋味的形成，又可作为后续热反应的重要风味前体。陈怡颖等[11]研究发现，鸡肉酶解液中的游离氨基酸总量显著高于鸡汤，表明酶解能够促进鸡肉蛋白质中游离氨基酸的释放。由表 3 可知，复合酶处理后鸡肉浆中各类游离氨基酸的质量分数总体升高。其中，复合酶 1 组和复合酶 2 组的甜味氨基酸总量分别为（1 167.91±2.83）mg/kg 和（1 351.00±2.01）mg/kg，均高于未酶解组的（414.04±35.98）mg/kg；同时，2 个复合酶组的苦味氨基酸总量也明显增加。结果表明，复合酶处理可促进鸡肉蛋白质中多种游离氨基酸的释放，改变酶解产物中呈味氨基酸的组成，与上述研究结果一致。

表3　不同类型氨基酸质量分数

Table 3　Mass fractions of different types of amino acids

组别	游离氨基酸质量分数/(mg/kg)				
	风味氨基酸	鲜味氨基酸	甜味氨基酸	苦味氨基酸	游离氨基酸总量
未酶解组	1 793.80±87.47^{a}	393.59±22.12^{a}	414.04±35.98^{a}	986.17±41.37^{a}	1 870.00±86.81^{a}
复合酶1组	5 139.42±8.80^{b}	851.34±3.09^{b}	1 167.91±2.83^{b}	3 156.18±9.09^{b}	5 218.54±8.71^{b}
复合酶2组	5 074.71±11.39^{b}	792.09±1.54^{b}	1 351.00±2.01^{c}	3 069.00±6.19^{b}	5 041.91±12.72^{b}

注：同列不同小写字母表示组间差异显著（P<0.05）。

2.1.3　肽相对分子质量分布

将相对分子质量小于500的肽类组分定义为小分子肽。小分子肽营养价值高，容易被消化道吸收。酶解物的营养和风味特性与其中所含的小分子肽密切相关。低相对分子质量肽（<1 000）可作为美拉德反应中的风味前体，并有可能在加热时形成关键的挥发性化合物[12]。与未酶解组相比，2种复合酶处理后相对分子质量为1 000~<3 000的组分占比均有所增加。相关研究表明，鸡肉蛋白酶解物中相对分子质量为1 000~1 500的部分肽类物质具有增强鲜味、肉味或厚味的作用[13]。

由图3可知，在相同的酶解条件下，经复合酶1和复合酶2酶解后，产物中相对分子质量小于500的小分子肽占比分别为94%和95%，分别比未酶解组增加16.7%和17.5%。这表明复合酶处理能够促进鸡肉蛋白质水解，有助于增加小分子肽含量并改善鸡肉浆的品质。膳食蛋白质在小肠中可进一步水解为小肽，并经肠道刷状缘肽酶转化为二肽、三肽和游离氨基酸，随后通过相应的转运系统参与肠道吸收[14]。这些都表明复合酶对于提高鸡肉蛋白质消化率和营养价值具有一定潜力。

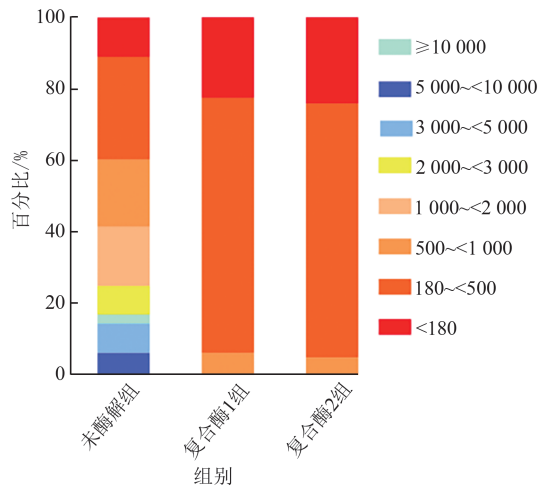


图3　各组酶解后的肽相对分子质量分布

Fig. 3　Relative molecular mass distribution of peptides after enzymatic hydrolysis in different groups

2.1.4　挥发性风味物质分析结果

挥发性风味物质显著影响食欲及食物摄入与消化过程。鸡肉中的风味物质主要包括小分子水溶性成分、脂类，以及醛、酮、醇、酸、酯、呋喃、含氮/硫化合物等挥发性成分[15]。

风味成分的主要合成途径包括美拉德反应、Strecker降解、脂质氧化、脂质与美拉德反应的相互作用以及硫胺素降解。采用顶空固相微萃取气相色谱-质谱法（HS-SPME-GC-MS）测定酶解鸡肉浆和未酶解鸡肉浆中挥发性风味物质的种类和质量分数，结果见表4。不同处理组中均检出醛、酮、酸、烷烃、含氮及杂环化合物等挥发性成分，包括6种烷烃类化合物、10种羧酸类化合物、3种其他含氮及杂环化合物和15种醛、酮及醇类化合物。结果表明，不同处理组中挥发性风味物质的种类基本一致，但多数挥发性物质的质量分数在复合酶处理后呈升高趋势。

醛类物质是肉类风味的重要组成部分，主要通过脂肪氧化生成。如表4所示，检测到的醛类主要包括反式-2-辛烯醛、苯甲醛、己醛和壬醛，呈现出油脂、青草和柑橘等香气。醇类物质则来源于不饱和脂肪酸，带有蘑菇气味。所有样品组中酸的质量分数都相对较低。

具有大豆风味的杂环化合物主要通过美拉德反应和氨基酸降解形成，质量分数虽低但对风味贡献显著，可赋予产物花香和果香。因烷烃检测阈值较高，对整体风味影响较小[16]。结果表明，经过复合酶水解后，挥发性化合物质量分数明显增加，从而增强了最终产品的肉类风味。

表 4 酶解鸡肉浆水解物中主要挥发性风味物质的组成

Table 4 Major volatile flavor compounds in chicken meat slurry hydrolysates

分类	挥发性风味物质	保留时间/min	保留指数	质量分数/(μg/g)		
				未酶解组	复合酶 1 组	复合酶 2 组
醛、酮及醇类化合物	反式-2-辛烯醛	10.93	1 404.0	4.08	41.19	39.53
	(*E*,*E*)-3,5-辛二烯-2-酮	12.50	1 522.0	0.70	2.38	3.01
	3-辛酮	8.72	1 255.3	0.02	0.18	0.13
	(*E*)-3-辛烯-2-酮	10.99	1 408.5	0.62	4.57	4.96
	苯甲醛	12.61	1 530.5	0.89	27.63	25.42
	4-乙基苯甲醛	14.47	1 683.1	0.07	1.53	1.14
	苯乙醛	14.08	1 649.6	0.10	4.60	3.86
	顺式-4-癸烯醛	18.77	2 087.0	0.17	2.35	2.16
	庚醛	7.60	1 185.6	1.35	13.87	12.51
	己醛	5.79	1 080.5	40.11	211.37	225.53
	壬醛	10.78	1 393.7	3.60	31.83	28.15
	辛醛	9.25	1 289.4	1.33	15.79	19.13
	戊醛	4.06	975.4	2.07	11.46	14.69
	反式-2-壬烯醛	12.71	1 538.2	1.01	12.64	21.45
	顺式-4,5-环氧-(*E*)-2-癸烯醛	16.91	1 903.3	0.06	5.91	8.31
烷烃类化合物	5,5-二甲基-1,3-庚二烯	11.14	1 419.8	0.45	3.46	6.03
	1,3-二甲基苯	7.58	1 141.0	0.06	12.85	18.36
	D-柠檬烯	7.76	1 195.1	0.12	0.98	0.62
	萘	15.27	1 753.2	0.06	0.29	0.41
	辛烷	2.12	837.3	0.48	6.56	7.81
	3-甲基十三烷	10.27	1 358.2	0.05	0.18	0.56
羧酸类化合物	2-庚烯酸	18.63	2 073.0	0.01	0.13	0.05
	乙酸	11.58	1 452.2	0.10	2.71	3.24
	苯甲酸	21.92	2 438.3	0.01	0.19	0.41
	庚酸	17.36	1 946.5	0.05	1.22	2.76
	己酸	16.24	1 840.5	1.66	16.63	21.37
	棕榈酸	27.85	3 055.6	0.03	0.33	1.75
	壬酸	19.45	2 159.2	0.05	0.54	0.21
	辛酸	18.43	2 052.6	0.12	1.88	0.72
	戊酸	15.05	1 734.1	0.03	0.60	0.83
	十四烷酸	24.45	2 706.3	0.02	0.29	1.10
其他含氮及杂环化合物	苄腈	17.27	1 937.8	0.04	52.34	46.28
	2-(2-丙烯基)-呋喃	13.78	1 624.7	0.04	0.37	0.92
	2-戊基呋喃	8.33	1 231.2	0.39	18.17	15.87

注:挥发性风味物质质量分数以各组样品湿质量计。

2.2 复合酶解产物在体外模拟胃肠系统中的消化特性

2.2.1 体外粗蛋白质消化率

体外模拟消化通过在受控条件下模拟胃肠道的理化环境及消化酶作用,可用于评价食物成分在胃肠道中的消化行为。体外粗蛋白质消化率能够反映蛋白质在模拟胃肠消化系统中的水解程度,可为评价食物蛋白质的消化特性及潜在营养利用价值提供参考[17]。较高的体外粗蛋白质消化率通常提示蛋白质在该模型中具有较高的可消化程度,但不能单独等同于整体营养价值。由表 5 可知,未酶解组、复合酶 1 组和复合酶 2 组的体外粗蛋白质消化率分别为(47.30±3.04)%、(50.79±0.80)%和(87.48±0.27)%。其中,复合酶 2 组的体外粗蛋白质消化率最高,且显著高于未酶解组和复合酶 1 组(P<0.05),表明复合酶预处理能够明显提高鸡肉蛋白质在体外模拟胃肠消化系统中的消化程度。这可能是由于复合酶预处理使部分完整蛋白质预先水解为较短肽段,从而有利于后续消化酶进一步作用。已有研究发现,部分预水解蛋白质在体外胃消化阶段表现出较高的水解度和小分子

表5　体外粗蛋白质消化率

Table 5　*In vitro* crude protein digestibility

组别	粗蛋白质消化率/%
未酶解组	47.30±3.04[a]
复合酶1组	50.79±0.80[b]
复合酶2组	87.48±0.27[c]

注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

肽占比[18]。这也提示所用复合酶有利于蛋白质在胃肠道中的进一步消化，其吸收效果仍需结合体内试验评价。

2.2.2　消化液中肽相对分子质量的分布

蛋白质经胃肠消化后可形成游离氨基酸及二肽、三肽等产物，其中部分可被小肠上皮吸收。吸收后的氨基酸进入门静脉循环，随后被肝脏及其他组织利用[19]。

如图4所示，未酶解消化组中含有74%的小分子肽（相对分子质量<500），而复合酶1消化组和复合酶2消化组中分别有92%和90%的小分子肽。复合酶1和复合酶2的酶解作用使蛋白质分解更为彻底，产生比未酶解组更多的低相对分子质量组分。该结果说明，复合酶预处理提高了消化产物中低相对分子质量组分的占比。

2.2.3　消化液中游离氨基酸质量浓度的变化

蛋白质在体外模拟胃肠消化过程中经消化酶逐步水解，伴随着肽键断裂以及肽和游离氨基酸的释放。因此，消化液中游离氨基酸的组成和质量浓度可用于表征蛋白质体外消化产物的释放特征[20]。

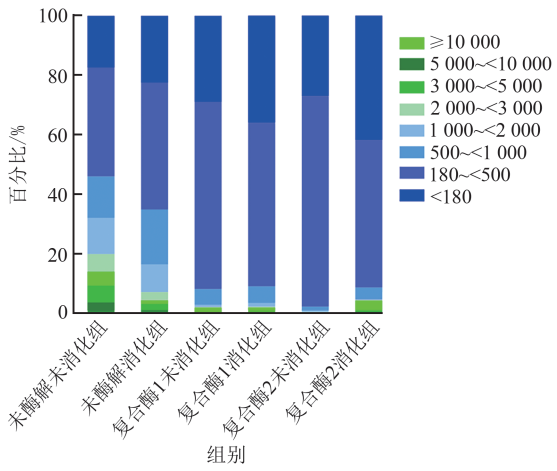


图4　消化液中肽相对分子质量分布

Fig. 4　Relative molecular mass distribution of peptides in digestive juice

由表6可知，3组鸡肉浆经体外模拟消化后，消化液中均检出多种游离氨基酸。与未酶解组相比，2种复合酶组的游离氨基酸总量均有所提高，其变化趋势与肽质量分数和体外粗蛋白质消化率的测定结果基本一致，表明复合酶预处理可能改变了鸡肉蛋白质结构，暴露出更多消化酶作用位点，促进了蛋白质在体外模拟胃肠消化过程中的进一步水解。

表6　消化液中游离氨基酸变化

Table 6　Changes in free amino acid concentrations in digestive fluids

组别	游离氨基酸质量浓度/（mg/L）								
	Phe	Ala	Gly	Glu	Arg	Lys	Tyr	Leu	Pro
未酶解组	200.16±28.23[a]	158.37±4.72[a]	89.48±4.60[a]	323.08±10.50[a]	273.03±21.45[a]	212.39±27.22[a]	223.55±19.01[a]	312.07±48.13[a]	98.92±9.29[a]
复合酶1组	398.28±26.35[b]	373.03±36.47[b]	291.27±21.13[b]	624.74±18.45[b]	461.80±27.22[b]	573.39±39.01[b]	194.09±9.29[a]	789.87±38.23[b]	145.01±4.70[a]
复合酶2组	470.10±19.33[c]	629.85±40.61[c]	655.97±12.39[c]	766.06±6.71[b]	532.96±31.78[b]	986.97±60.92[c]	133.85±15.33[a]	1 170.19±73.49[b]	368.92±14.65[b]
组别	游离氨基酸质量浓度/（mg/L）								
	Ser	Thr	Asp	Val	Ile	His	Met	Cys	Trp
未酶解组	34.60±3.23[a]	113.86±4.72[a]	145.44±14.60[a]	106.79±10.51[a]	67.87±9.29[a]	37.64±6.47[a]	127.91±18.03[a]	31.52±2.70[a]	95.33±5.02[a]
复合酶1组	94.34±14.60[a]	262.28±10.51[a]	247.65±26.47[b]	205.13±28.13[a]	197.86±21.45[a]	115.67±17.22[b]	304.49±25.17[b]	44.82±1.39[a]	53.18±3.09[a]
复合酶2组	144.29±18.17[b]	267.39±22.51[a]	244.41±18.12[b]	351.56±23.19[b]	339.25±17.47[b]	132.18±5.38[b]	403.04±31.26[b]	389.61±34.03[b]	110.37±7.19[a]

注：同列不同小写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

图5展示了不同处理组消化液中游离氨基酸质量浓度的差异。与未酶解组相比，2种复合酶组中Glu、Arg、Lys、Ala和Leu等氨基酸的质量浓度总体较高，表明复合酶预处理有利于这些游离氨基酸在体外模拟消化过程中的释放。

2.3　复合酶解产物对小鼠的影响

2.3.1　酶解鸡肉浆对小鼠生长性能的影响

小鼠体质量变化见图6。试验开始时，各组小鼠体质量基本一致。饲养4周后，高蛋白饲料组小鼠体质量增长率最高。复合酶1组和复合酶2组小

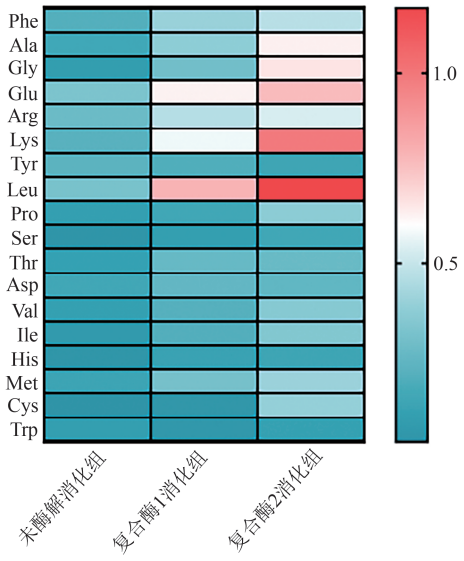
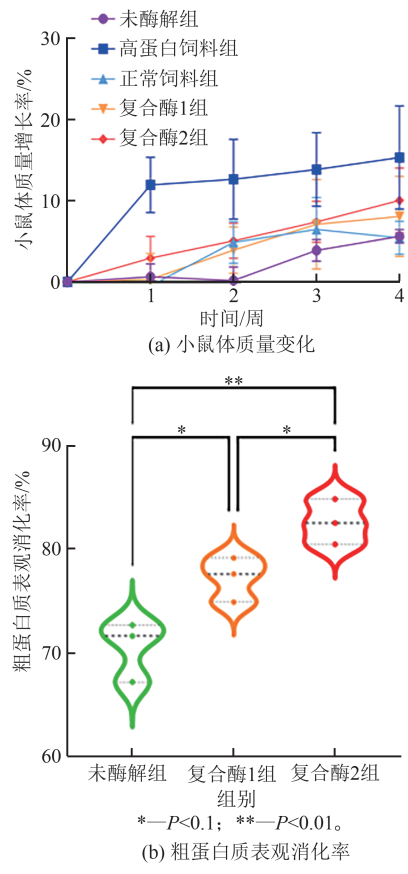


图 5 体外模拟消化中游离氨基酸的热图

Fig. 5 Heatmap of free amino acids in *in vitro* simulated digestion



(a) 小鼠体质量变化

(b) 粗蛋白质表观消化率

图 6 小鼠体质量增长和粗蛋白质表观消化率

Fig. 6 Mouse body weight gain and apparent digestibility of crude protein

鼠的体质量变化趋势与正常饲料组接近。2 个复合酶组体质量增长率均高于未酶解组，其中复合酶 2 组高于复合酶 1 组。该结果提示，酶解处理有利于鸡肉蛋白质的消化利用，但体质量变化还可能受到采食量和能量摄入等因素的影响。表 7 数据显示，复合酶 1 组和复合酶 2 组的粗蛋白质表观消化率分别较未酶解组高 6.72% 和 12.11%，说明酶解后蛋白质得到有效利用。结合蛋白质表观消化率结果，复合酶处理有利于蛋白质的消化利用，其中复合酶 2 组的数值最高。2 种复合酶组之间是否存在显著差异，应以组间统计检验结果为准。

表 7 粗蛋白质表观消化率

Table 7 Apparent digestibility of crude protein

组别	粗蛋白质表观消化率/%
未酶解组	70.53±1.13[a]
复合酶 1 组	77.25±2.31[b]
复合酶 2 组	82.64±0.38[c]

注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

2.3.2 酶解鸡肉浆对小鼠肾脏炎症因子的影响

细胞因子参与炎症反应及相关疾病的发展，可作为反映炎症状态和疾病进展的潜在生物标志物，也是炎症性疾病治疗的重要候选靶点[21]。其中，IL-6、IL-10、IL-17 和 TNF-α 为促炎细胞因子，其过度表达与炎症反应密切相关[22]。采用免疫组化染色评估肾组织中炎症因子的表达水平。结果如图 7 所示，未酶解组小鼠肾组织中 IL-6、IL-10、IL-17 和 TNF-α 的平均光密度均较高；复合酶 1 组和复合酶 2 组上述指标与正常饲料组及高蛋白饲料组相比均无显著差异（$P>0.05$）。在本试验条件下，摄入 2 种复合酶解产物未引起小鼠肾组织中 IL-6、IL-10、IL-17 和 TNF-α 表达水平的显著升高。从安全性角度来看，复合酶 1 和复合酶 2 具有良好的生理适应性，不会对小鼠的正常消化吸收乃至个体健康产生负面影响。

2.3.3 酶解鸡肉浆对肾脏结构的影响

图 8 显示，复合酶 1 组和复合酶 2 组小鼠肾脏结构完整，肾小管排列紧密，肾小球轮廓清晰，未见明显炎症或组织损伤，其组织形态与正常饲料组相近，未观察到明显结构异常。这说明酶解未对肾脏健康产生负面影响。相比之下，高蛋白饲料组出现肾小管轻度扩张和肾小球结构紊乱，提示高蛋白饮食可能增加肾脏代谢负担。上述结果进一步表明，复合酶 1 和复合酶 2 未对小鼠肾脏造成明显的结构性损害，未加重肾脏负担，安全性良好。

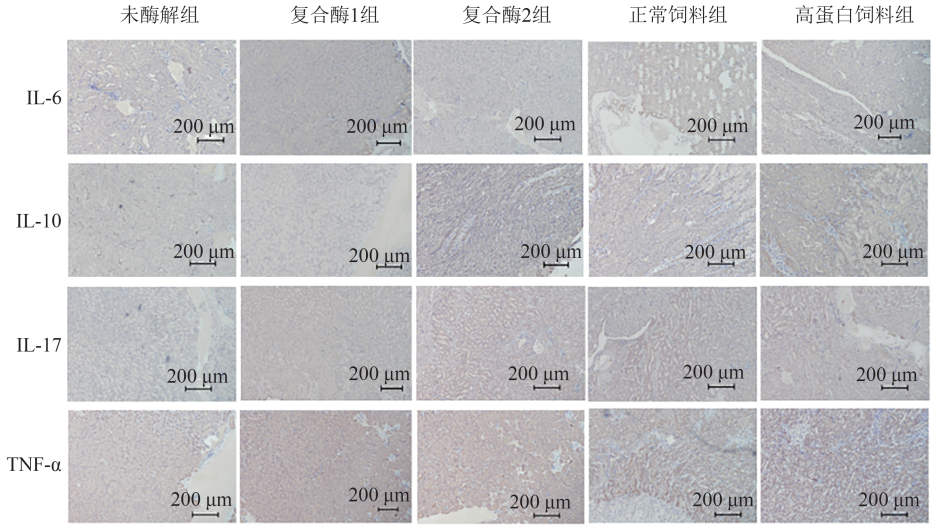
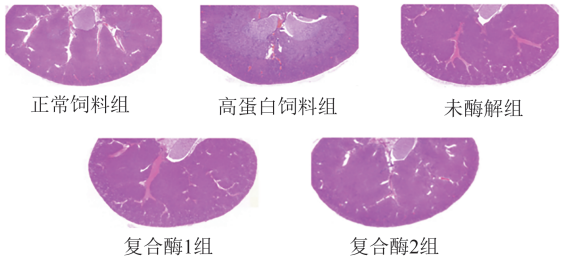


图 7　不同饲料处理对小鼠肾组织炎症因子表达的影响

Fig. 7　Effects of different dietary treatments on the expression of inflammatory factors in mouse kidney tissue



放大倍数200×。

图 8　不同饲料处理组小鼠的肾组织形态

Fig. 8　Renal histomorphology of mice in different dietary treatment groups

3　结论

作者评价了2种复合酶配方（复合酶1：碱性蛋白酶与木瓜蛋白酶；复合酶2：木瓜蛋白酶与风味蛋白酶）对鸡肉浆的酶解效果及产物特性。与未酶解组相比，所用复合酶配方可在较短时间内获得较高的水解度和小分子肽占比，整体效果较优。结果表明，在55 ℃、1.5 h的优化条件下，2种复合酶均能显著提升鸡肉浆的水解度，高效生成相对分子质量<500的小分子肽，并增加鲜味与甜味氨基酸质量分数，改变产物中游离氨基酸和挥发性物质的组成。

酶解预处理后进行体外消化可提高粗蛋白质的体外消化率（复合酶2组达87.48%），低相对分子质量肽在消化产物中占比较高，提示其可能具有较好的吸收潜力。本研究为鸡肉蛋白质的高效酶解提供一种复合酶处理工艺，具备较好的产业化应用前景。不足之处在于尚未深入解析酶解肽段的具体活性机制，后续可聚焦于酶解肽段的构效关系及其在复杂食品基质中的功能表现。

参考文献

[1] Sun J，Zhou C Y，Cao J X，et al. Purification and characterization of novel antioxidative peptides from duck liver protein hydrolysate as well as their cytoprotection against oxidative stress in HepG2 cells[J]. Frontiers in Nutrition，2022，9：848289.

[2] Lindberg D，Kristoffersen K A，Wubshet S G，et al. Exploring effects of protease choice and protease combinations in enzymatic protein hydrolysis of poultry by-products[J]. Molecules，2021，26(17)：5280.

[3] Zhang Y Y，Yu S J，Liu C，et al. Optimizing enzymatic processes for enhanced nutritional and organoleptic properties of chicken bones[J]. Foods，2025，14(7)：1217.

[4] 万婕，张憨，刘亚萍. 超声波对鸡骨蛋白酶解产物的影响及机理研究[J]. 食品与生物技术学报，2020，39(1)：46-53.
Wan J，Zhang M，Liu Y P. Effect of ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis on hydrolysate from chicken bone and study on its mechanism[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2020，39(1)：46-53.（in Chinese）

[5] 刘同，杨悠悠，刘大鹏，等. 肉鸭胸肌特异挥发性风味物质的鉴定[J]. 畜牧兽医学报，2022，53(2)：402-413.
Liu T，Yang Y Y，Liu D P，et al. Identification of specific volatile flavor compounds in breast muscle of meat duck[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica，2022，53(2)：402-413.（in Chinese）

[6] Aloysius T A, Carvajal A K, Slizyte R, et al. Chicken protein hydrolysates have anti-inflammatory effects on high-fat diet induced obesity in mice[J]. Medicines, 2018, 6(1): 5.

[7] Setthaya P, Jaturasitha S, Ketnawa S, et al. Influence of commercial protease and drying process on antioxidant and physicochemical properties of chicken breast protein hydrolysates[J]. Foods, 2021, 10(12): 2994.

[8] 李自会, 段晓杰, 刘昆仑, 等. 鸡骨架和鸡胸肉复合底物酶解工艺优化及产物呈味特性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(15): 184-192.
Li Z H, Duan X J, Liu K L, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of chicken skeleton and chicken breast composite substrate and flavor properties of hydrolysates [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 184-192.(in Chinese)

[9] 田霄艳, 郑斐庭, 冯涛, 等. 大豆蛋白水解物苦味评价方法[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 25-32.
Tian X Y, Zheng F T, Feng T, et al. Comparative analysis of bitter evaluation methods for soybean protein hydrolysate [J]. Food Science, 2022, 43(3): 25-32.(in Chinese)

[10] Harada-Padermo S D S, Dias-Faceto L S, Selani M M, et al. Umami ingredient: flavor enhancer from shiitake (*Lentinula edodes*) byproducts [J]. Food Research International, 2020, 137: 109540.

[11] 陈怡颖, 丁奇, 赵静, 等. 鸡汤及鸡肉酶解液中游离氨基酸及呈味特性的对比分析[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 107-111.
Chen Y Y, Ding Q, Zhao J, et al. Comparison of free amino acids and taste characteristics in chicken soup and chicken enzymatic hydrolysate[J]. Food Science, 2015, 36(16): 107-111.(in Chinese)

[12] Zhou R Y, Grant J, Goldberg E M, et al. Investigation of low molecular weight peptides in chicken meat and their contribution to meat flavor formation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(4): 1728-1739.

[13] Zhang Y S, Ma Y, Ahmed Z, et al. Purification and identification of kokumi-enhancing peptides from chicken protein hydrolysate [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(6): 2151-2158.

[14] Fairweather S J, Bröer A, O'Mara M L, et al. Intestinal peptidases form functional complexes with the neutral amino acid transporter B(0)AT1[J]. The Biochemical Journal, 2012, 446(1): 135-148.

[15] Zhang Z H, Wu Y C, Liu Q W, et al. Comparative flavor precursors and volatile compounds of Wenchang chickens fed with copra meal based on GC-O-MS [J]. Food Research International, 2023, 174: 113646.

[16] Ali S, Liao Z G, Cheng Y, et al. Lipidomics in chicken meat flavor chemistry: current understanding, integrated omics approaches, and future perspectives[J]. Poultry Science, 2025, 104(11): 105700.

[17] 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.

[18] Corrigan B, Brodkorb A. The effect of pre-treatment of protein ingredients for infant formula on their *in vitro* gastro-intestinal behaviour [J] . International Dairy Journal, 2020, 110: 104810.

[19] Webb K E J. Intestinal absorption of protein hydrolysis products: a review[J]. Journal of Animal Science, 1990, 68(9): 3011-3022.

[20] Trithavisup T, Sanpinit P, Sakulwech S, et al. *In vitro* protein digestion of cooked spent commercial laying hen and commercial broilers breast meat[J]. Foods, 2022, 11(13): 1853.

[21] Kany S, Vollrath J T, Relja B. Cytokines in inflammatory disease[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(23): 6008.

[22] Venkatesha S H, Dudics S, Acharya B, et al. Cytokine-modulating strategies and newer cytokine targets for arthritis therapy[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 16(1): 887-906.