DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250916006
引用格式: 杨大霞, 刘东东, 尹佳欣, 等. 适度酶解对核桃乳的品质改良作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 12–20.
YANG DX, LIU DD, YIN JX, *et al*. Study on the effect of moderate enzymatic hydrolysis on the quality improvement of walnut milk [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 12–20. (in Chinese with English abstract).

适度酶解对核桃乳的品质改良作用研究

杨大霞[1,2], 刘东东[3,4], 尹佳欣[3,5], 齐 兵[1,2], 赵泽宇[3], 杨志恒[1,6], 王东东[1,6], 夏君霞[1,2], 邓健康[3,4*]

(1. 河北养元智汇饮品股份有限公司, 衡水 053000; 2. 河北省核桃饮品技术创新中心, 衡水 053000; 3. 衡水学院生命科学学院, 衡水 053000; 4. 淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 淮安 223000; 5. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 6. 河北省核桃营养功能与加工技术重点实验室, 衡水 053000)

摘 要: 目的 探讨适度酶解加工工艺对核桃乳品质的影响。**方法** 采用风味蛋白酶和碱性蛋白酶(配比为2:1)在不同的酶解时间下处理核桃乳(不加酶、加酶不酶解、酶解 30 min、酶解 60 min、酶解 120 min), 对核桃乳的营养成分、组织稳定性、香气成分、感官品质等方面进行系统分析。**结果** 不同酶解时间下处理的核桃乳营养成分有所差别, 随酶解时间增加, 样品中低聚肽和游离氨基酸含量增加, 均在酶解 120 min 时含量最高; 酶解 30 min 的核桃乳的稳定性动力学指数最低, 稳定性较好; 酶解改善了核桃乳的香气特征, 增加了挥发物质的种类和浓度; 感官评价表明, 酶解核桃乳香气明显, 口感更加细腻、顺滑, 酶解 30 min 的核桃乳口感最佳。**结论** 酶解 30 min 为核桃乳的最佳酶解时间, 此时核桃乳的营养成分、稳定性、风味、感官质量均有所改善。

关键词: 核桃乳; 酶解; 品质

Study on the effect of moderate enzymatic hydrolysis on the quality improvement of walnut milk

YANG Da-Xia[1,2], LIU Dong-Dong[3,4], YIN Jia-Xin[3,5], QI Bing[1,2], ZHAO Ze-Yu[3], YANG Zhi-Heng[1,6], WANG Dong-Dong[1,6], XIA Jun-Xia[1,2], DENG Jian-Kang[3,4*]

(1. *Hebei Yangyuan Zhihui Beverage Co*., *Ltd*., *Hengshui* 053000, *China*; 2. *Hebei Technology Innovation Center for Walnut Beverage*, *Hengshui* 053000, *China*; 3. *College of Life Sciences*, *Hengshui University*, *Hengshui* 053000, *China*; 4. *College of Life Sciences and Food Engineering*, *Huaiyin Institute of Technology*, *Huai'an* 223000, *China*; 5. *College of Food Science and Technology*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*; 6. *Hebei Provincial Key Laboratory of Walnut Nutrition Function and Processing Technology*, *Hengshui* 053000, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the effect of moderate enzymatic hydrolysis process on the quality of walnut milk. **Methods** Walnut milk was treated with flavor protease and alkaline protease (the ratio was 2:1) under

收稿日期: 2025-09-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(32402160); 中央引导地方科技发展资金项目(246Z2810G); 河北省院士合作重点单位项目(河北养元智汇饮品股份有限公司院士合作重点单位); 衡水学院校级重点项目(2023ZRZ02)
第一作者: 杨大霞(1977—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品工程。E-mail: tongtong040827@163.com
***通信作者:** 邓健康(1989—), 男, 副教授, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: dengjk1989@163.com

different enzymatic hydrolysis times: Blank control (no enzyme), 0 min (enzyme added and immediately inactivated), 30 min, 60 min and 120 min. The nutritional components, physical stability, aroma components and sensory quality of walnut milk were systematically analyzed. **Results** The nutritional components of walnut milk treated under different enzymatic hydrolysis times were different. With the increase of enzymatic hydrolysis time, the content of oligopeptides and free amino acids in the samples increased, reaching the highest levels at 120 min. The stability kinetic index of walnut milk after enzymatic hydrolysis for 30 min was the lowest and the stability was better. Enzymatic hydrolysis improved the aroma characteristics of walnut milk, increasing both the diversity and abundance of volatile compounds. Sensory evaluation showed that enzymatic hydrolysis enhanced the aroma intensity of walnut milk and the mouthfeel became smoother and more delicate, with the 30 min hydrolysate receiving the best overall acceptability. **Conclusion** Enzymatic hydrolysis for 30 min is the optimal time that provides the best overall balance for walnut milk. At this time, the nutritional composition, stability, flavor and sensory quality of walnut milk are improved.

KEY WORDS: walnut milk; enzymatic hydrolysis; quality

0　引　言

核桃(*Juglans regia* L.)又名胡桃、羌桃, 属于胡桃科植物, 富含蛋白质和不饱和脂肪酸[1], 在食品领域应用广泛[2], 其中, 核桃乳作为核桃深加工的代表性产品, 传统制备工艺包括打浆、过滤、均质、杀菌、调配等步骤[3]。然而, 该工艺所制得的核桃乳存在一些局限性: 部分功能肽、氨基酸等未能充分释放, 导致营养价值受限; 香气单一、口感厚重, 影响消费者体验。同时, 因其属于典型的水包油(O/W)型乳浊液, 主要以水为分散介质, 以油脂、蛋白作为分散相, 具有热力学不稳定性, 容易导致油脂上浮和蛋白沉淀, 进而影响外观和口感[4]。因此, 提升核桃乳的综合品质具有重要现实意义。

酶解工艺因其操作简便、反应高效、条件温和及特异性强等优势, 被广泛用于食品品质改良[5−7]。蛋白酶可使蛋白质的肽键或酰胺键被裂解, 形成具备功能特性的较小肽和游离氨基酸, 提升核桃乳营养价值; 同时, 低分子量肽可形成更致密的界面膜, 增强体系的稳定性; 另外, 蛋白被水解还可以降低蛋白对香气成分的掩盖作用, 增加核桃乳的香气强度[8−9]。在酶解工艺中, 单一蛋白酶常因酶切特性所限, 难以兼顾水解效率与产物风味。碱性蛋白酶作为一种内切酶, 具有优异的水解活性和较高的反应速率, 能快速降解大分子蛋白质, 但其水解产物常含有疏水性苦味肽, 影响最终风味。风味蛋白酶则兼具内切与外切活性, 能进一步降解中间肽段和苦味肽为小分子肽和游离氨基酸, 从而显著改善风味并降低苦味。目前, 单一酶解技术因其作用靶点单一、协同效应不足, 在效率、品质、稳定性等方面存在瓶颈, 因此, 当前研究普遍采用复合酶解或酶解结合物理处理等技术来克服这些缺点[10]。

本研究以优质核桃为原料, 对比不同酶解时间下核桃乳的综合品质, 筛选最佳酶解时间, 为实际生产提供可行的技术方案, 为适度酶解技术在植物蛋白饮料中的应用提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

新疆核桃仁: 河北养元智汇饮品股份有限公司。

风味蛋白酶(酶活≥350 LAPU/mL)、碱性蛋白酶(580000 DU/g)(澜翊康生物科技有限公司); 三氯乙酸、无水乙醇(分析纯, 天津市大茂化学试剂有限公司); 邻苯二甲醛(分析纯, 梯希爱化成工业发展有限公司); 甲醇、乙腈(色谱纯, 北京迪科马科技有限公司); 硼砂(纯度 99%, 天津市河东区红岩试剂厂); 十二烷基硫酸钠[纯度≥99.5%, 生工生物工程(上海)股份有限公司]; 1,4-二巯基苏糖醇(纯度≥98.0%, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2　仪器设备

JMS-80A 胶体磨(廊坊市惠友机械有限公司); UV5500 紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司); K1100F 凯氏定氮仪(海能仪器股份有限公司); MPE 系列高通量真空平行浓缩仪(睿科集团股份有限公司); TurbiscanLAB (Formulaction)全方位稳定分析仪(北京朗迪森科技有限公司); GCMS-QP2010 型气质联用仪(日本岛津仪器有限公司); Mastersizer 3000 激光粒径分析仪(英国马尔文仪器有限公司); 安捷伦 1206 液相色谱仪、Proshell•HPH-C_{18} 色谱柱(4.6 mm×100 mm, 2.7 μm)(美国安捷伦公司); XS205DU 电子分析天平(精度 0.1 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　核桃乳的制备

(1)酶的脱味处理

由于选用的风味蛋白酶和碱性蛋白酶具有一定的特殊气味, 为排除酶本体气味对实验的影响, 先对两种酶进

行脱味处理。操作如下: 精确量取 10 mL 的风味蛋白酶和 5 mL 的碱性蛋白酶, 通过真空平行浓缩仪去除异味。设定振荡频率 200 r/min、温度 25 ℃、气压 25 mbar。每 2 h 记录一次气味减轻情况, 重复操作 4 次。完成上述步骤后, 补充超纯水至原始体积, 密封冷藏保存。

(2)酶解处理

核桃乳制备具体流程如下: 600 g 核桃仁磨浆得到 2 kg 核桃浆液, 进行预均质(20 mpa), 加入纯水定量至 3.5 kg。样品在不同酶解时间下处理后, 进行灭酶(90 ℃、10 min)、加入辅料后纯水定容至 5 kg。辅料包括麦芽糖醇、复配乳化增稠剂(单、双甘油脂肪酸酯, 硬脂酰乳酸钠, 黄原胶), 用来调节核桃乳的口感、稳定性、外观等, 不改变酶解时间带来的产物差异。接着经两次均质(38~40 mpa、30 mpa)以及超高温灭菌(138 ℃、10 s)后, 得到核桃乳成品, 室温避光储藏。5 种样品的编号依次为 Y1、Y2、Y3、Y4、Y5, Y1 是未经酶解的核桃乳样品, 其余 4 种样品均加入 1.20 g 的风味蛋白酶和 0.60 g 的碱性蛋白酶, 酶解时间依次是 0、30、60、120 min, 酶解温度均为 54 ℃。其中 Y2 为“加酶不酶解(0 min)”对照, 即在加入经脱味处理的酶制剂后, 立即进行灭酶, 以确保不发生水解反应。

1.3.2 分析方法

(1)品质指标

核桃乳中脂肪、蛋白质、灰分含量测定分别参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》、GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》、GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》。

(2)核桃乳低聚肽和游离氨基酸含量的测定

参考 QB/T 5298—2018《中华人民共和国轻工行业标准 小麦低聚肽粉》测定核桃乳样品中低聚肽的含量。

首先测定样品中的酸溶蛋白含量。取核桃乳 10 mL, 30%三氯乙酸 10 mL, 将样品溶液在 11000 r/min、4 ℃的条件下离心 30 min, 过滤, 定容至 30 mL, 按 GB 5009.5—2016 规定第一法凯氏定氮法测定清液的蛋白质含量, 计算出样品中酸溶蛋白含量。

游离氨基酸含量的测定采用柱前衍生-高效液相色谱法[11]。样品处理如下: 称取样品 0.5 g 于 25 mL 容量瓶中, 加 5%三氯乙酸 10 mL 沉淀 2 h, 于 10000 r/min 离心 15 min, 取上清液上机, 采用外标法进行测定。色谱条件: 色谱柱: 安捷伦 Proshell·HPH-C_{18} (4.6 mm×100 mm, 2.7 μm); 柱温为 40 ℃。流动相: A 液: 10 mmol/L Na_2HPO_4 和 10 mmol/L $Na_2B_4O_7$, 调 pH 至 8.2; B 液: 甲醇:乙腈:水=45:45:10 (V:V:V)。流速为 1.5 mL/min。流动相梯度程序: 0~0.35 min, 98% A; 0.35~13.40 min, 98%~43% A; 13.40~13.50 min, 43~0% A; 13.50~15.70 min, 0% A; 15.70~15.80 min, 0%~98% A; 15.80~18.00 min, 98% A。

(3)核桃乳水解度的测定

参考文献[12–13]的邻苯二甲醛法测水解度。样品处理: 在酶解的核桃乳样品中加入等体积的无水乙醇, 离心(10000 r/min、15 min), 吸取上清液, 用 0.22 μm 有机滤膜过滤, 备用。邻苯二甲醛工作液的配制: 0.16 g 邻苯二甲醛溶解于无水乙醇后, 加入至已溶解了 7.62 g 硼砂和 0.20 g 十二烷基硫酸钠的超纯水中, 再加入 0.176 g 1,4-二巯基苏糖醇, 用超纯水定容至 200 mL。在测定过程中, 取 160 μL 样品处理液和 1.2 mL 邻苯二甲醛工作液混合, 避光静放 2 min 后在 340 nm 下测定吸光度。将丝氨酸标准品稀释至不同浓度(0.25、0.50、0.75、1.00、1.25、2.50、3.75、5.00 mmol/L)按上述步骤测其吸光度, 绘制标准曲线。空白对照用超纯水替代酶解液。

水解度计算如公式(1)~(3):

$$\text{样品中游离氨基浓度}=\frac{\text{样品吸光度}-\text{空白吸光度}}{\text{丝氨酸浓度为1 mmol / L时的吸光度}-\text{空白吸光度}}\times 0.9516\times\frac{V\times N}{X\times P} \tag{1}$$

$$\text{水解键的数量}=\frac{\text{样品中游离氨基浓度}-\beta}{\alpha} \tag{2}$$

$$\text{水解度}=\frac{h}{h_{\text{tot}}}\times 100\% \tag{3}$$

式中: X为样品质量, g; N为水解液稀释倍数; P为样品中蛋白质质量分数, %; V为样品水解液体积, L; α=1, β=0.4(当原材料尚未确定准确的 α、β 值时, α 和 β 分别估计为 1.00 和 0.40); h 为每克蛋白被裂解的肽毫摩尔数, mmol/g; h_{tot} 为蛋白完全水解释放的肽键含量, 经验值取 8 mmol/g。

(4)核桃乳稳定性

参考王雅宁等[14]的方法, 采用全方位稳定性分析仪检验核桃乳的稳定性, 并通过软件 TowerSoft (1.3.1.85)计算核桃乳的稳定性动力学指数, 得到稳定性动力学指数(turbiscan stability index, TSI)曲线。参数设置: 40 μm 扫描一次, 60 min 一次, 25 ℃持续 24 h。

通过 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪对样品粒径进行分析。将样品置于样品槽中后会有一束低功率的激光射向样品槽, 由于粒子对激光的阻挡而产生光散射, 散射光的强度表征颗粒数量的多寡, 借此获取样品的粒度分布情况[15]。

(5)核桃乳中香气物质的检测

采用顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HP-SPME)法提取核桃乳中的香气物质。取 1 mL 样品放在 20 mL 顶空萃取瓶中, 置于加热仪上, 40 ℃加热 20 min, 转速 200 r/min, 使用 SPME 探针萃取吸附 20 min, 插入气相色谱-质谱联用仪(gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS)进样口推动手柄进样, 260 ℃下解吸 3 min[16]。

运用 GC-MS 检测核桃乳中香气物质。参数设置: 载气为超纯氦(99.999%), 流速为 1 mL/min。GC 升温程序: 40 ℃, 保持 5 min; 速率 3 ℃/min 升温至 100 ℃, 保持 4 min; 速率 5 ℃/min 升温至 250 ℃, 保持 5 min。进样口温度

260 ℃, 四极杆温度 150 ℃, 离子源温度 230 ℃, 在 70 eV 的电子能量下获得光谱, 扫描范围 45~550 amu, 扫描间隔 0.2 s[17]。挥发性成分通过 GC-MS 检测后, 采用 NIST 质谱库进行检索与初步鉴定, 结合保留指数与文献对照进行确认。

(6)感官评价

本研究组建了专业的感官评价小组进行感官评价。感官评价标准依据马杰等[18]方法进行了适度调整, 分别从香气、苦味、涩味、脂感、适口度、组织状态 6 个方面按随机顺序对酶解核桃乳进行感官评价。评分标准如表 1 所示。

表 1　酶解核桃乳感官评价指标

Table 1　Sensory evaluation index of enzymatic hydrolysis walnut milk

分值	香气	苦味	涩味	脂感	适口度	组织状态
5	浓郁纯正	无苦味	无涩感	极低脂感	极佳	极佳
3	较为浓郁	轻微苦味	微涩	低脂感	良好	良好
1	稍显清淡	中等苦味	中涩	中脂感	一般	一般
0	缺乏香气	强烈苦味	强涩	高脂感	较差	较差

1.4　数据处理

实验至少重复 3 次测定, 结果采用 R 语言(版本 4.3.2)进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA), 显著性差异水平(P<0.05), 采用 Origin 2024 和 Microsoft Excel 2019 绘图。

2　结果与分析

2.1　酶的脱味处理

碱性蛋白酶在处理 2 h 后, 便无明显异味; 风味蛋白酶随着处理时间的增加, 异味逐渐减轻, 处理 8 h 后异味较小。避免了酶本身的风味对核桃乳风味的影响, 为后续核桃乳香气物质的测定排除干扰。

2.2　营养成分分析

2.2.1　基础指标

如表 2 所示, 样品的脂肪含量集中在 6.69%~6.93%, 蛋白质含量在 1.96%~1.99%, 灰分含量在 0.23%~0.25%, pH 在 7.12~7.34, 各个样品间基础指标差别较小[19]。

2.2.2　氨基酸含量

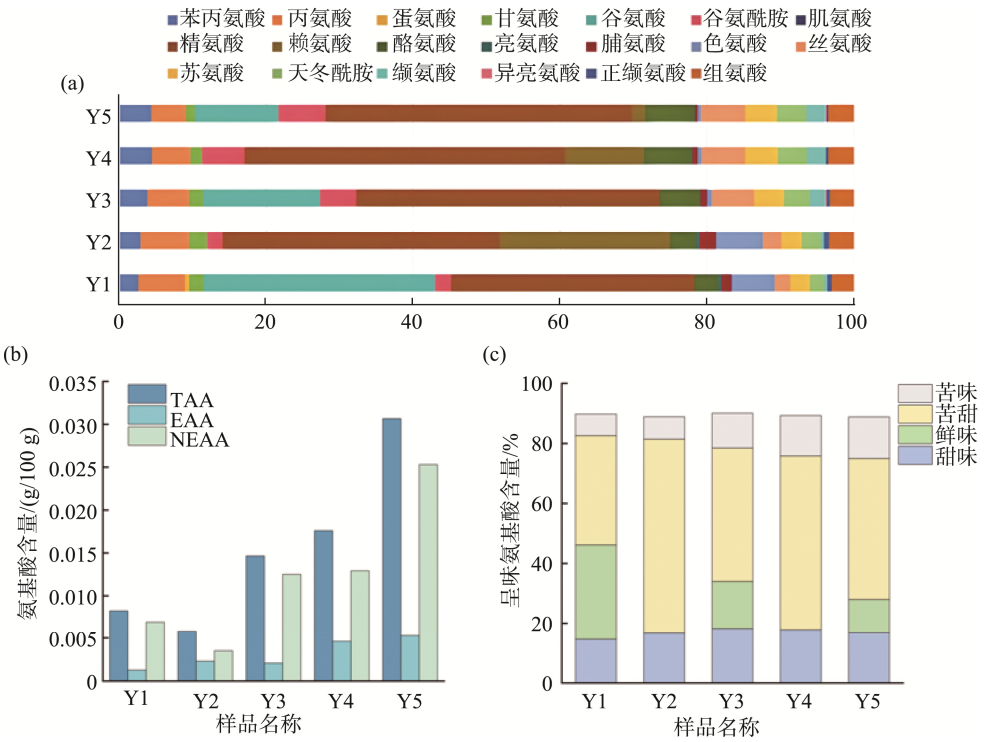
由图 1(a)可以看出, 5 种不同酶解核桃乳中共检出 20 种游离氨基酸, 其中必需氨基酸(essential amino-acid, EAA) 9 种: 赖氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸和组氨酸; 非必需氨基酸(non-essential amino acid, NEAA) 9 种, 包括丙氨酸、精氨酸、天冬酰胺、谷氨酰胺、谷氨酸、甘氨酸、丝氨酸、酪氨酸、脯氨酸[20]。由图 1(b)可知, 游离氨基酸总量(total amount of free amino acids, TAA)、EAA 和 NEAA 均随酶解时间呈上升趋势。Y5 的 TAA (0.031 g/100 g)、EAA (0.005 g/100 g)和 NEAA (0.025 g/100 g)含量均最高, 表明随着酶解时间的增加, 蛋白质会被进一步分解为小分子氨基酸。相较之下, Y2(加酶不酶解, 0 min)与 Y1(未加酶)在 TAA、EAA 与 NEAA 上的差异均不明显, 与两者“未发生实质性水解”的工艺设定一致; 这也说明经脱味处理的酶制剂单独加入并不会改变游离氨基酸的总体水平。Y3 (30 min)与 Y4 (60 min)介于 Y1/Y2 与 Y5 之间, 显示适度酶解即可明显提升氨基酸释放, 但提升幅度在 60~120 min 阶段更为明显。在核桃乳中, 丰富的呈味氨基酸提供多样的感官呈现。呈味氨基酸可分为甜味、鲜味、苦甜、苦味等不同口感, 甜味氨基酸包括苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸, 鲜味氨基酸包括天冬氨酸、谷氨酸, 苦甜氨基酸包括赖氨酸、组氨酸、精氨酸, 苦味氨基酸包括甲硫氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸。由图 1(c)可知不同酶解工艺核桃乳呈味氨基酸含量不同, 总呈味氨基酸含量相差不大。风味蛋白酶与碱性蛋白酶的协同可先行裂解大分子核桃蛋白, 释放中短肽并进一步外切生成游离氨基酸; 其中酸性氨基酸与部分小分子甜味氨基酸在早期阶段(酶解 30 min)即明显释放, 有利于提升鲜/甜感与掩蔽涩感。随着水解继续推进, 支链与芳香族氨基酸释放增加, 有助于提供风味复杂性, 但苦味可能增加。各酶解样品中, Y3 的甜味、鲜味氨基酸含量较高, 苦甜、苦味氨基酸含量适中, 可以较好的改善核桃乳的风味, 提升感官品质[21]。

表 2　不同酶解核桃乳的基础指标

Table 2　Basic index of different enzymatic hydrolysis walnut milk

样品	脂肪/%	蛋白质/%	灰分/%	pH
Y1	6.800±0.035^{ab}	1.960±0.005^{c}	0.230±0.004^{cd}	7.120±0.007^{d}
Y2	6.860±0.151^{ab}	1.990±0.011^{a}	0.240±0.002^{c}	7.340±0.007^{a}
Y3	6.690±0.172^{b}	1.990±0.001^{a}	0.230±0.008^{d}	7.310±0.007^{b}
Y4	6.810±0.143^{ab}	1.990±0.002^{a}	0.250±0.005^{a}	7.310±0.000^{b}
Y5	6.930±0.154^{a}	1.970±0.005^{b}	0.250±0.004^{b}	7.270±0.007^{c}

注: 不同字母表示在不同酶解时间下同一指标在 P<0.05 水平下有显著统计学差异。



注: (a)游离氨基酸的相对组成; (b) TAA/EAA/NEAA 含量变化; (c)呈味氨基酸构成比例。

图 1 不同酶解时间核桃乳的游离氨基酸特征

Fig.1 Free amino acid features of walnut milk with different hydrolysis times

2.2.3 核桃乳低聚肽含量和水解度分析

低聚肽分子量小于 5000 Da, 核桃低聚肽具有改善睡眠、润肠通便的功能[22], 通常用水解度(断裂的肽键在蛋白肽键总量中所占的百分比)来判断蛋白质被裂解为低聚肽的程度[23]。根据图 2 可知, 随着酶解时长的增加, 低聚肽含量和水解度呈现持续上升的趋势, 在酶解 0~30 min 时, 曲线较陡, 表明在最初阶段蛋白质水解迅速; 酶解 30 min 后, 曲线趋于平缓, 表明蛋白质依旧在被水解, 但水解速度下降[24–25]。

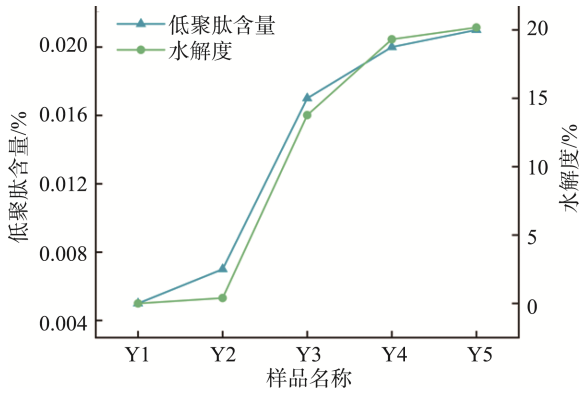


图 2 低聚肽含量与水解度

Fig.2 Oligopeptide content and degree hydrolysis

2.3 核桃乳稳定性分析

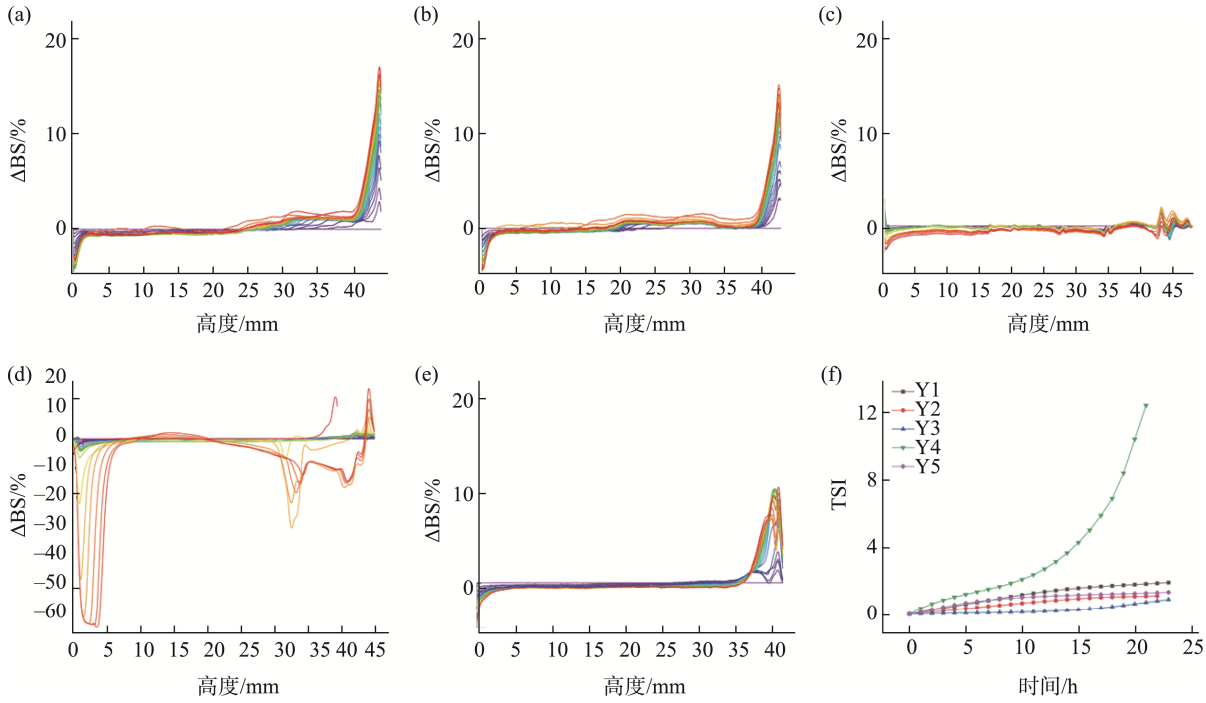
2.3.1 静态分析

背散射光谱反映了扫描时间与样品稳定性之间的关系。背散射变化率(ΔBS)值越小, 样品越稳定, 反之, 越不稳定。蓝线和红线分别代表 0 min 和 24 h 的检测结果。5 个样品的背散射光谱图见图 3。Y1 和 Y2 的图谱相似, 样品底部出现凹峰, 顶部出现高峰, 说明底部出现析水层, 顶部出现浮油层。Y3 的 ΔBS 变化幅度较小, 说明 Y3 相较于其他样品更稳定。Y4 底部下降深度和宽度最为明显, 出现明显析水层。Y5 同样存在析水层和浮油层, 顶部的峰变宽, 说明顶部脂肪浓度降低, 厚度增加。由此可知, Y3 样品最为稳定[4]。

由图 3(f)中可知, 在相同扫描时间点, Y4 的稳定性动力学指数最高, 且 Y4 在扫描 18 h 时出现明显拐点, 这意味着 18 h 之后 Y4 的浓度变化幅度较大。Y3 的 TSI 值最低, 表明相比于其他 4 个样品 Y3 整体稳定性较好。

2.3.2 粒径分析

图 4 为核桃乳的粒径分布曲线。Y1 和 Y2 呈现双峰分布, 集中在 0.01~1.00 μm 和 10.00~100.00 μm; Y3、Y4、Y5 主要集中在 1.00~100.00 μm。随着酶解时间的增加, 在 1.00~100.00 μm 范围内的粒径分布曲线向低粒径区域移动, 说明核桃粒径逐渐减小[26]。粒子的平均直径越小, 其沉降速度越慢, 体系越稳定。Y5 的峰左移范围最广, 表明 Y5 的粒径最小, 体系较稳定。



注: (a)~(e)分别为 Y1、Y2、Y3、Y4、Y5 的背散射光谱。

图 3　背散射光谱及 TSI 变化曲线

Fig.3　Backscattering spectrum and TSI variation curve

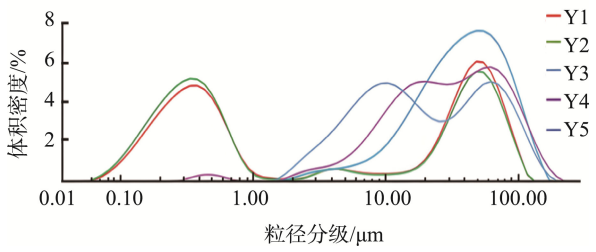


图 4　粒径分布曲线

Fig.4　Particle size distribution curve

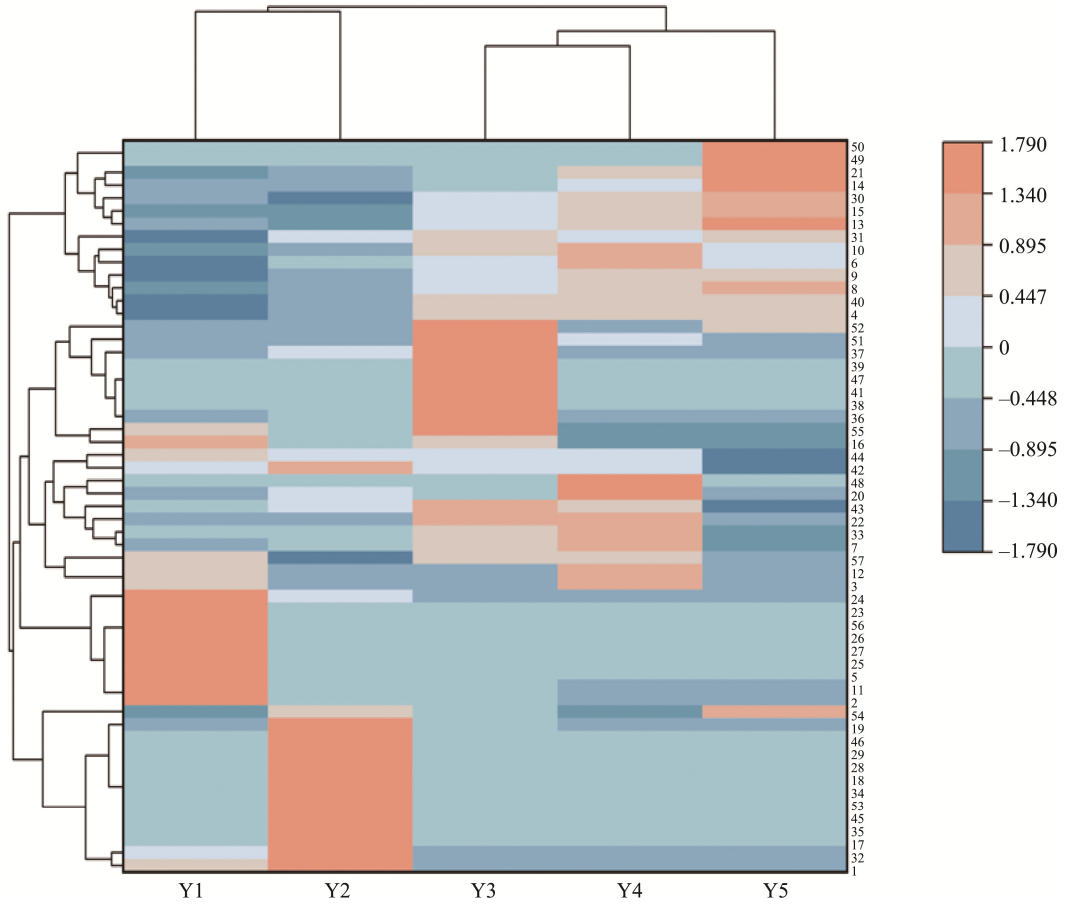
2.4　香气物质分析

通过 HP-SPME/GC-MS 对核桃乳的挥发性物质进行分析，由图 5 香气物质聚类热图可知，共检测出 57 种匹配度大于 80%的物质，其中，醛类 22 种、酯类 7 种、醇类 12 种、酮类 8 种、酸类 2 种，其他类 6 种[27−28]。Y2、Y3 检测出的香气物质较多，分别为 39 种、36 种。

核桃乳独特的味道主要来自醛，取决于加工过程中美拉德反应、Strecker 氧化降解、亚油酸和亚麻酸的氧化降解[29]。醛类物质常常有甜香、坚果香、脂肪香和果香等特征[30]。经酶解后的样品中出现了青叶醛、(*E*)-壬烯醛、癸醛等有果香和青草香气的醛类物质。酮类化合物大多数是氨基酸分解、美拉德反应和多不饱和脂肪酸热氧化降解产生[31]，经酶解后部分酮(2-庚酮、3-辛烯-2-酮)的占比增加。酯类是由羧酸衍生物与醇发生酯化反应而生成，主要源自脂质前体的氧化过程，具备典型的果香味，未酶解样品酯类物质多于酶解样品。醇类的香气特征主要来自脂肪酸分解[32]，1-戊醇、己醇均赋予核桃乳甜香风味，是占比较大的醇类物质之一，酶解之后占比增加。检测出来的酸类物质较少，苯甲酸在 Y1、Y2、Y3 中存在，壬酸在 Y1 中存在。2-戊基呋喃在 Y3 样品中占比最高，赋予核桃乳独特的果香、青草香。综上可知，酶解可改善核桃乳的风味特征，且在酶解样品中 Y3 的香气物质表现最为丰富。

2.5　感官评价

感官评价结果如图 6 所示。组织状态表示核桃乳的质地均匀程度，香气分值越高表示其香气越浓郁，苦味和涩味分别表示核桃乳的苦、涩程度，脂感的分值越高表示其口感越厚重，适口度表示感官评价人员对五种核桃乳的综合喜爱程度。结果表明，Y1 与 Y2 在多个评分上表现相近，说明仅“加酶不酶解”对感官特征影响甚微；Y3 (30 min)在香气、组织状态与适口度上明显优于其他组，同时苦味、涩味与脂感较低，表明适度酶解可以增强香气和控制负面口感；随着酶解时间继续延长(Y4、Y5)，香气与组织状态部分改善，但苦味/涩味分值显著增加、综合适口度不再提升。Y1、Y2、Y3 的组织状态最佳，Y3 的香气最浓郁，Y1、Y2 的苦味程度较高，Y2、Y3 的涩味程度较高，Y1、Y2 的脂感较高。综合而言，Y3 的香气品质最优，组织状态最佳，苦味和脂感适中，适口度最佳[33]。



注: 1. 戊醛; 2. 顺芷醛; 3. 反式-2-戊烯醛; 4. 己醛; 5. 2-乙基丁烯醛; 6. 庚醛; 7. 苯甲醛; 8. 2-庚烯醛; 9. 辛醛; 10. (*E*, *E*)-2, 4-庚二烯醛; 11. 顺芷醛; 12. 反式-2-戊烯醛; 13. 反-2-辛烯醛; 14. 2 壬醛; 15. (*E*, *E*)-2, 4-癸二烯醛; 16. 十二醛; 17. 3-甲基丁醛; 18. 2-甲基丁醛; 19. 2-甲基-2-戊烯醛; 20. 青叶醛; 21. 癸醛; 22. (*E*)-壬烯醛; 23. 1-甲基丙基乙酸酯; 24. 己二酸二异丁酯; 25. 苯甲酸苄酯; 26. 棕榈酸异丙酯; 27. 脱氢枞酸甲酯; 28. 乙酸-3-甲基丁酯; 29. 3-甲基戊酸甲酯; 30. 1-戊醇; 31. 己醇; 32. 1-辛烯-3-醇; 33. 4-乙基环己醇; 34. 1-戊烯-3-醇; 35. 2-甲基-1-戊醇; 36. 3-甲基-1-丁醇; 37. 庚醇; 38. 1-辛醇; 39. 2-异丙基-5-甲基-1-庚醇; 40. 2, 4-二甲基环己醇; 41. 十三醇; 42. 2-庚酮; 43. 3-辛烯-2-酮; 44. 3, 5-辛二酮; 45. 2-辛酮; 46. 6, 10, 14-三甲基-2-十五烷酮; 47. 1-辛烯-3-酮; 48. 甲基庚烯酮; 49. 3-辛酮; 50. 十二烷; 51. 十三烷; 52. 十四烷; 53. 十五烷; 54. 右旋萜二烯; 55. 苯甲酸; 56. 壬酸; 57. 2-戊基呋喃。

图 5 香气物质聚类热图

Fig.5 Clustering heat map of aroma substance

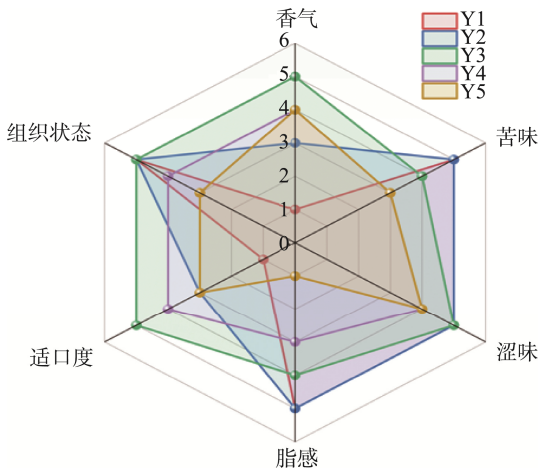


图 6 感官评价得分雷达图

Fig.6 Radar chart of sensory evaluation scores

3 结 论

本研究利用风味蛋白酶与碱性蛋白酶协同作用对核桃乳进行不同时间的适度酶解(0、30、60、120 min), 同时对核桃乳的品质进行分析, 随着酶解时间的延长, 核桃乳低聚肽含量和氨基酸含量明显增加, 特别是在 120 min 的酶解条件下, 低聚肽和氨基酸的含量达到最高, 表明适度酶解能够有效水解核桃乳中的蛋白质。核桃乳静态稳定性分析表明酶解 30 min 的核桃乳静态稳定性最好。通过 HP-SPME/GC-MS 分析, 酶解样品中醛类、酮类和醇类香气物质的相对含量增加, 尤其是酶解 30 min 的样品中, 香气成分更加丰富, 显著改善了核桃乳的风味特征。感官评价表明, 酶解 30 min 核桃乳的接受度较高。总体而言, 酶解 30 min 为

核桃乳的最佳酶解时间，此时核桃乳的营养成分、稳定性、风味均有所改善，同时提升了感官质量。本研究不仅为实际生产提供了参考价值，同时为适度酶解技术在植物蛋白饮料中的应用提供更深入的理论支持。

参考文献

[1] 张素姣，杨大霞，吴彦兵，等. 核桃大豆植物奶加工工艺研究及品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(12): 287–296.
ZHANG SJ, YANG DX, WU YB, *et al*. Research on the processing technology of walnut-soybean plant milk and analysis of its quality [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(12): 287–296.

[2] ZHU K, MA J, CONG J, *et al*. The road to reuse of walnut by-products: A comprehensive review of bioactive compounds, extraction and identification methods, biomedical and industrial applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 104264.

[3] MORALES-DE LPM, MIRANDA-MEJÍA GA, MARTÍN-BELLOSO O. Recent trends in fermented beverages processing: The use of emerging technologies [J]. Beverages, 2023, 9(2): 51.

[4] 齐兵，赵慧博，赵慧敏，等. 均质条件对核桃乳稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 201–207.
QI B, ZHAO HB, ZHAO HM, *et al*. Effect of homogenization conditions on the stability of walnut milk [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 201–207.

[5] ZHAI J, ZHENG J, JIA Q, *et al*. Comparative nutritional and physicochemical analysis of plant-based walnut yogurt and commercially available animal yogurt [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2024, 212: 116959.

[6] HU Y, LI Z, CAO X, *et al*. Improvement of physicochemical properties and stabilization of oat milk by composite enzymatic hydrolysis [J]. Food Research International, 2025,219:117146.

[7] BOLAT EB, SALUM P, ERBAY Z. The single-step operation for enzyme-modified cheese production: Influence and importance of process parameters [J]. International Dairy Journal, 2025, 160: 106101.

[8] FENG L, WU Y, HAN Y, *et al*. Structural characteristics, functional properties and nutritional value of walnut protein by limited enzymatic hydrolysis [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2024, 197: 115923.

[9] YANG L, ZHU W, DING Y, *et al*. New insights into altering the structures and improving the functional properties of walnut protein: Synergistic high-pressure homogenization/limited enzymatic hydrolysis [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 102: 104018.

[10] 吴传江. 超声预处理辅助酶解改善核桃—亚麻籽复合植物乳食用品质研究[D]. 武汉：武汉轻工大学, 2025.
WU CJ. Enhancing the edible quality of walnut-flaxseed composite plant milk by ultrasonic pretreatment-assisted enzymatic hydrolysis [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2025.

[11] 温浩然，冀艳华，韩星，等. 利用柱前在线衍生-高效液相色谱法测定培植牛黄及天然牛黄中 18 种氨基酸的含量[J]. 中国现代中药, 2020, 22(2): 231–236.
WEN HR, JI YH, HAN X, *et al*. Determination of 18 kinds of amino acids in cultured bezoar and bovisc alculus using pre-column derivatization HPLC [J]. Modern Chinese Medicine, 2020, 22(2): 231–236.

[12] HAN M, ZHAO J, WU Q, *et al*. Effects of packaging materials on structural and simulated digestive characteristics of walnut protein during accelerated storage [J]. Foods, 2023, 12(3): 620.

[13] DI-FILIPPO G, MELCHIOR S, PLAZZOTTA S, *et al*. Effect of enzymatic hydrolysis with alcalase or protamex on technological and antioxidant properties of whey protein hydrolysates [J]. Food Research International, 2024, 188: 114499.

[14] 王雅宁，夏君霞，齐兵，等. 带皮核桃仁制备核桃乳去涩工艺优化及产品品质研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(5): 158–167.
WANG YN, XIA JX, QI B, *et al*. Optimization of the technology of removing astringency in walnut milkprepared from walnut kernel with skin and its quality evaluation [J]. China Food Additives, 2023, 34(5): 158–167.

[15] 夏君霞，齐兵，赵慧博，等. 牛奶咖啡饮料的稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(3): 92–100.
XIA JX, QI B, ZHAO HB, *et al*. Study on the stability of milk coffee drinks [J]. China Food Additives, 2020, 31(3): 92–100.

[16] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography–ion mobility spectrometry (GC–IMS) [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.

[17] BLECKER C, HABIB-JIWAN J, KAROUI R. Effect of heat treatment of rennet skim milk induced coagulation on the rheological properties and molecular structure determined by synchronous fluorescence spectroscopy and turbiscan [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1809–1817.

[18] 马杰，周建中，张涛，等. 植物基杏仁酸奶的研制及不同发酵剂对酸奶品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 57–67.
MA J, ZHOU JZ, ZHANG T, *et al.* Development of plant-based almond yogurt and influence of different starter cultures on yogurt quality [J]. Food Research and Development, 2023, 44(21): 57–67.

[19] 梁丽，朱俊龙，刘国艳，等. 一种枸杞风味核桃多肽乳的制备工艺研究[J]. 中国食品工业, 2023(22): 90–96.
LIANG L, ZHU JL, LIU GY, *et al*. Study on the preparation process of a wolfberry flavor walnut polypeptide milk [J]. China Food Industry, 2023(22): 90–96.

[20] ZHANG M, CAI S, WANG O, *et al*. A comprehensive review on walnut protein: Extraction, modification, functional properties and its potential applications [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 16: 101141.

[21] LI W, QIN Y, GONG J, *et al*. Comparative analysis of physicochemical properties, flavor compounds, and metabolites among three major cultivated walnut (*Juglans sigillata* Dode) varieties in China Yunnan [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2024, 212: 117003.

[22] WANG S, TANG Y, SU G, *et al*. Absorption, transport, blood-brain barrier penetration, and neuroprotection of walnut peptides LR and LPI [J]. Food

Research International, 2025, 209: 116305.

[23] UBAID M, SAINI CS. Enzymatic hydrolysis of grape seed protein: *In vitro* digestibility, functional, and structural insights as effected by enzyme concentration and enzymolysis time [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 309(4): 143077.

[24] WU D, WU W, ZHANG N, *et al*. Tailoring soy protein/corn zein mixture by limited enzymatic hydrolysis to improve digestibility and functionality [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101550.

[25] YOLANDANI, LIU D, RAYNALDO FA, *et al.* Comparison of prediction models for soy protein isolate hydrolysates bitterness built using sensory, spectrofluorometric and chromatographic data from varying enzymes and degree of hydrolysis [J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138428.

[26] 黄雅卿, 郭扬, 蒙温露儿, 等. 不同乳化剂对油酸和亚油酸乳状液稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 53–58.
HUANG YQ, GUO Y, MENG WLER, *et al*. Effects of different emulsifiers on the stability of oleic acid and linoleic acid emulsions [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 53–58.

[27] BOLAT EB, SALUM P, ERBAY Z. The single-step operation for enzyme-modified cheese production: Influence and importance of process parameters [J]. International Dairy Journal, 2025, 160: 106101.

[28] ELBARBARY A, JIN J, LI K, *et al*. Understanding the flavor dynamics of high-fat dairy products: Insights into mechanisms, aroma profiles, and sensory evaluation [J]. Food Research International, 2025, 212: 116504.

[29] HAO J, XU X, JIN F, *et al*. HS-SPME GC–MS characterization of volatiles in processed walnuts and their oxidative stability [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(7): 2693–2704.

[30] MU H, GAO H, CHEN H, *et al*. Study on the volatile oxidation compounds and quantitative prediction of oxidation parameters in walnut (*Carya cathayensis* Sarg.) oil [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2019, 121(6): 1800521.

[31] 李开, 范誉川, 丁岚, 等. 核桃蛋白酶解过程中香气成分的动态变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 41–49.
LI K, FAN YC, DING L, *et al*. Dynamic changes in volatile flavor components during enzymatic hydrolysis of walnut (*Juglans regia* L.) protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 41–49.

[32] 王勇. HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 法对市售核桃油香气成分的研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(6): 63–66.
WANG Y, Analysis of aroma component in commercial walnut oil by HS-SPME-GC-MS combined ROAV method [J]. Cereals & Oils, 2020, 33(6): 63–66.

[33] WENG Z, SUN L, WANG F, *et al.* Assessment the flavor of soybean meal hydrolyzed with Alcalase enzyme under different hydrolysis conditions by E-nose, E-tongue and HS-SPME-GC–MS [J]. Food Chemistry: X, 2021, 12: 100141.

(责任编辑：韩晓红 冯东慧)