朱渝钱, 赖妮, 张玲, 等. 平菇头酶解液美拉德反应制备调味基料工艺优化及风味分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 273−285. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080052
ZHU Yuqian, LAI Ni, ZHANG Ling, et al. Optimization of Maillard Reaction Process for the Enzymatic Hydrolysates of Stalk Residue of *Pleurotus ostreatus* and Flavor Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 273−285. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080052

· 工艺技术 ·

平菇头酶解液美拉德反应制备调味基料工艺优化及风味分析

朱渝钱[1], 赖　妮[1], 张　玲[1,*], 宋泰良[2], 陈俊澄[1], 曾梓隽[1], 梁倩琪[1], 王　杰[1]
（1.广东石油化工学院生物与食品工程学院, 广东省农产品绿色与智能生产重点实验室, 广东 茂名 525000;
2.化州市中良菌业科技有限公司, 广东 茂名 525100）

摘　要: 为综合利用平菇头下脚料，提高其附加值，开发食用菌调味料生产基料，以浓缩后的平菇头酶解液为原料，添加葡萄糖，采用美拉德反应对其进行增香、增色。以感官评分、体系 pH、褐变程度为评价指标，采用单因素实验和正交试验优化美拉德反应条件。对浓缩液和最佳反应条件制得的美拉德反应产物（Maillard reaction products，MRPs）进行了游离氨基酸含量检测并分析了氨基酸对滋味的贡献。采用气相色谱-质谱联用仪（Gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）对 MRPs 进行特征风味分析。对浓缩酶解液和 MRPs 的抗氧化能力进行了比较。结果显示，美拉德反应四个单因素的影响顺序为初始 pH>葡萄糖添加量>反应温度>反应时间；美拉德反应的最佳条件为葡萄糖添加量 7.0%、初始 pH7.0，在 100 ℃ 下反应 80 min，制得的产物红棕色、鲜味明显、微甜，具有平菇典型气味并混合焦榛子香；在浓缩液和 MRPs 中均检测出 17 种游离氨基酸，其中谷氨酸、丝氨酸、丙氨酸和酪氨酸含量较高，美拉德反应后苦味氨基酸含量降低，鲜味氨基酸（天冬氨酸和谷氨酸）含量为 2.733 mg/g，占总游离氨基酸含量的 33.4%，对滋味贡献较大的谷氨酸和丙氨酸滋味活性值（Taste activity value，TAV）分别为 8.097、1.240，MRPs 的呈味氨基酸成分相比浓缩液得到改善；MRPs 中共检测鉴定出 42 种挥发性物质，包括 17 种醛类、10 种酮类、6 种烃类、5 种醇类、3 种杂环类和 1 种酸类，相对含量较多的化合物有杂环类（44.93%）、醛类（33.07%）；相对气味活度值（Relative odor activity value，ROAV）计算结果显示，2,4-癸二烯醛（ROAV=100）、2-戊基呋喃（ROAV=50.29）及 C_6~C_{10} 脂肪族醛类是 MRPs 的主要香气贡献物。抗氧化实验结果表明，MRPs 的还原力与 DPPH 自由基清除能力（IC_{50}=0.86 mg/mL）均显著提高。本研究建立了一种对平菇头下脚料资源化利用的有效方法，为开发食用菌调味基料提供理论基础。

关键词: 平菇头, 酶解, 美拉德反应, 氨基酸, 滋味活性值, 风味分析
中图分类号: S646.1+4; TS255.5　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0273−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080052
本文网刊:

Optimization of Maillard Reaction Process for the Enzymatic Hydrolysates of Stalk Residue of *Pleurotus ostreatus* and Flavor Analysis

ZHU Yuqian[1], LAI Ni[1], ZHANG Ling[1,*], SONG Tailiang[2], CHEN Juncheng[1], ZENG Zijun[1], LIANG Qianqi[1], WANG Jie[1]
（1.Guangdong Provincial Key Laboratory of Green and Intelligent Agricultural Production, College of Biological and Food Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;
2.Huazhou Zhongliang Mushroom Industry Technology Co., Ltd., Maoming 525100, China）

收稿日期: 2025−08−11
基金项目: 茂名市科技专项资金项目（2023SZX007）; 广东省科技创新战略专项资金（科技支撑“百千万工程”）项目（2024E03006）。
作者简介: 朱渝钱（2004−）, 男, 本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: zhuyvqian@126.com。
*** 通信作者:** 张玲（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工技术和固体废弃物资源化利用, E-mail: mmzhl1130@126.com。

Abstract: To comprehensively utilize stalk residue of *Pleurotus ostreatus*, improve its added value, and develop a production base material for edible fungus condiments, this study carried out the following work: Using the concentrated enzyme-hydrolyzed solution of stalk residue of *Pleurotus ostreatus* as raw material, glucose was added, and the Maillard reaction was applied to prepare the flavor base material. Single-factor experiments and orthogonal experiments were used to optimize Maillard reaction conditions, with sensory score, system pH and browning degree as evaluation indicators. Free amino acid content was determined in the concentrated solution and the Maillard reaction products (MRPs) prepared under the optimal reaction conditions, and the contribution of amino acids to taste was also analyzed. The characteristic flavor of MRPs was analyzed using a gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) instrument, and the antioxidant capacities of the concentrated enzyme-hydrolyzed solution and MRPs were compared. The results showed that the order of influence of the four single factors on the Maillard reaction was: initial pH>glucose addition amount>reaction temperature>reaction time. The optimal conditions for the Maillard reaction were: 7.0% glucose addition, initial pH7.0, and reaction at 100 ℃ for 80 minutes. The prepared product was reddish-brown, with obvious umami taste and slight sweetness, and had a typical *Pleurotus ostreatus* aroma mixed with a roasted hazelnut scent. Seventeen free amino acids were detected in both the concentrated solution and MRPs, among which glutamic acid, serine, alanine, and tyrosine had relatively high contents. After the Maillard reaction, the content of bitter amino acids decreased; the content of umami amino acids (aspartic acid and glutamic acid) was 2.733 mg/g, accounting for 33.4% of the total free amino acid content. The taste activity values (TAV) of glutamic acid and alanine—both contributing significantly to taste—were 8.097 and 1.240, respectively, and the taste-active amino acid composition of MRPs was improved compared with that of the concentrated solution. A total of 42 volatile substances were detected and identified in MRPs, including 17 aldehydes, 10 ketones, 6 hydrocarbons, 5 alcohols, 3 heterocyclic compounds and 1 acid. The compounds with relatively high relative contents were heterocyclic compounds (44.93%) and aldehydes (33.07%). Relative odor activity value (ROAV) results show that 2,4-decadienal (ROAV=100), 2-pentylfuran (ROAV=50.29) and C_6~C_{10} aliphatic aldehydes are the main aroma contributors of MRPs. Results of antioxidant experiments indicated that both the reducing power and DPPH free radical scavenging capacity (IC_{50}=0.86 mg/mL) of MRPs were significantly improved. This study established an effective method for the resource utilization of stalk residue of *Pleurotus ostreatus*, provided a new approach for condiment production, and had good market application prospects.

Key words: stalk residue of *Pleurotus ostreatus*; enzymatic hydrolysis; Maillard reaction; amino acid; taste activity values (TAV); flavor analysis

平菇(*Pleurotus ostreatus*)在我国食用菌产量中排第三位，2023 年全国共生产 613.21 万吨，占食用菌总产品的 14.15%[1]。近年来各地平菇产地企业正逐步形成规模化和产业化生产，废弃菇头数量也急剧增加，其深加工也显得尤为必要和紧迫。平菇头是平菇子实体和栽培基质之间的海绵状菌体(图 1)，其质量一般占鲜平菇质量的 20%~30%。菇头不同于菇渣(栽培基质)，菇渣的综合利用形式一般有生产饲料、有机肥、沼气等[2]，但不能在食品领域被利用，而菇头是蘑菇的一部分，只因食用品质较为低劣而成为平菇生产的下脚料，但仍具备转化成食品的基本条件，如不加以合理利用则是一种极大的资源浪费和环境污染因素。

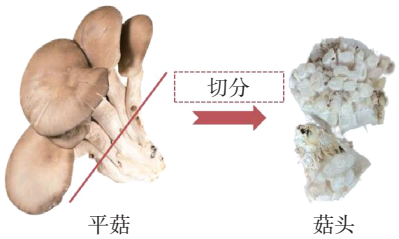


图 1 平菇及平菇头

Fig.1 *Pleurotus ostreatus* and stalk residue

食用菌因其形美味鲜，已被广泛应用于调味料中[3−5]，其产品被称为食用菌调味料，不仅营养鲜美，更具有优良的多糖、蛋白质、氨基酸、核苷酸等营养成分，水溶性和稳定性佳，易于包装和储藏，非常适宜现代消费者的日常食用[6]，被认为是第三代调味料，是近年来兴起的一种集美味、营养、健康于一身，深受消费者喜爱的调味料，具有很强的市场竞争力。在欧美、日韩等发达国家居民的厨房里，食用菌调味品已成为必备的调味品，中国的食用菌调味品也不少，但缺乏龙头品牌，目前尚处在成长期，前景广阔。采用食用菌下脚料制备调味料的研究报道也较多[7−9]，但平菇头几乎没有被利用，相关的研究报道也十分鲜见。

美拉德反应(Maillard reaction)是一种非常普遍的食品热加工生产方法，其本质是醛、酮、还原糖的羰基与氨基酸、肽、蛋白质等含氮化合物的游离氨基之间发生反应，该反应可以产生肉类风味物质，近年来已成为制作咸味香精尤其是肉味香精的主要途径之一。Chen 等[10] 以蘑菇水解液为原料，在一定条件下与 D-木糖和 L-半胱氨酸反应得到呈焦糖和蘑菇鲜味的美拉德反应物；张历[11] 研究了真姬菇复合酶解工艺的最佳条件，并对所得酶解液进行美拉德反应，制备含肉香、烧烤香味的真姬菇美拉德反应浆液；de Sousa 等[12] 探讨硫胺素、半胱氨酸和木糖促进山羊蛋白水解物美拉德反应中肉类调味化合物形成，挖掘新的风味前体物质组合；刘美娇等[13] 以金鲳鱼

加工副产物酶解液为原料，利用单因素实验与正交试验优化美拉德反应条件，采用电子鼻、电子舌及 GC-MS 技术分析美拉德反应产物风味成分，经真空冷冻浓缩制成粉状调味基料。然而，目前对平菇头原料用美拉德反应加工为调味基料的研究鲜有报道。

本研究以平菇头为原料，对其进行酶解和浓缩预处理，再通过美拉德反应改善风味，以感官评分、pH 和褐变程度（吸光值）为评价指标，采用单因素实验考察葡萄糖添加量、反应温度、反应时间和反应初始 pH 对美拉德反应效果的影响，采用正交试验优化了制备工艺条件，并对最佳工艺条件下制得的美拉德反应基料进行挥发性物质分析、游离氨基酸含量测定及抗氧化能力评价，研究结果可为进一步研制食用菌调味料，实现平菇头的高值化利用提供理论依据和实践参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

平菇头　化州市中良菌业科技有限公司；中性蛋白酶（50 U/mg）、DPPH　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；无水碳酸钠、三氯乙酸　均为分析纯，山东科源生化有限公司；柠檬酸、无水葡萄糖、铁氰化钾　均为分析纯，天津市永大化学试剂有限公司。

BXM-30R 高压灭菌锅　上海博迅实业有限公司；XMTD205 恒温数显水浴锅　常州普天仪器制造有限公司；DZS-706F-A 多参数分析仪　上海仪电科学仪器股份有限公司；UVmini-1280 紫外分光光度计　岛津仪器（苏州）有限公司；1580R 冷冻高速离心机　Gene Company Limited；RE-52AA 旋转蒸发器　上海亚荣生化仪器厂；GCMS-TQ8040NX 气相色谱-质谱联用仪　岛津仪器（苏州）有限公司；Biochrom 30+全自动氨基酸分析仪　大昌华嘉商业（中国）有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　平菇头基本成分测定　水分含量测定：直接干燥法，参照 GB 5009.3-2016；粗蛋白含量测定：凯氏定氮法，参照 GB 5009.5-2025；灰分含量测定：参照 GB 5009.4-2016；粗纤维含量测定：参照 GB/T 5009.10-2003；粗脂肪含量测定：参照 GB 5009.6-2016；总糖含量测定：参照 GB/T 15672-2009。

1.2.2　平菇头酶解液及浓缩液的制备　不同类型的蛋白酶具有水解特异性，会导致酶解产物组成和风味等方面的差异。因此，选择合适的蛋白酶进行酶解对美拉德反应及产物风味起着至关重要的作用。本研究选择以中性蛋白酶水解平菇头制备水解物，并通过预实验确定酶解液制备条件。

将干制的平菇头粉碎，过 80 目筛，用蒸馏水调整料液比为 1∶30（g/mL），于 95 ℃ 加热 15 min 熟化处理，以 1 mol/L 碳酸钠溶液和 0.5 mol/L 柠檬酸溶液调节体系 pH 为 7.0，按照 3000 U/g 用量加入中性蛋白酶，40 ℃ 下酶解 3 h，再于 95 ℃ 下加热 15 min 灭酶，6500×g 离心力离心 10 min，取上清液即制得酶解液（采用甲醛电位滴定法测得氨基氮含量为 17.23%±0.42%）。对酶解液进行减压浓缩，浓缩至原体积的一半，即制得浓缩液。

1.2.3　美拉德反应单因素实验　a.葡萄糖添加量的影响：以感官评价、pH、褐变程度为指标，固定反应初始 pH 为 7.0，120 ℃ 下反应 60 min，考察葡萄糖添加量为 0、1.0%、2.5%、4.0%、5.5%、7.0% 对美拉德反应效果的影响。

b.反应时间的影响：以感官评价、pH、褐变程度为指标，固定反应初始 pH 为 7.0，葡萄糖添加量采用 1.2.3（a）中确定的最佳值，反应温度为 120 ℃，考察反应 20、40、60、80、100 min 对美拉德反应效果的影响。

c.反应温度的影响：以感官评价、pH、褐变程度为指标，固定反应初始 pH 为 7.0，葡萄糖添加量采用 1.2.3（a）中确定的最佳值，反应时间选择 1.2.3（b）中确定的最佳值，考察反应温度为 80、90、100、110、120 ℃ 对美拉德反应效果的影响。

d.反应初始 pH 的影响：以感官评价、pH、褐变程度为指标，葡萄糖添加量采用 1.2.3（a）中确定的最佳值，反应时间选择 1.2.3（b）中确定的最佳值，反应温度选择 1.2.3（c）中确定的最佳值，考察不同反应初始 pH 为 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 对美拉德反应的影响。

以上实验均平行做三次，结果以平均值±标准差表示。

1.2.4　美拉德反应正交优化试验　在单因素实验基础上，以葡萄糖添加量（A）、反应时间（B）、反应温度（C）、反应初始 pH（D）为自变量，以感官评分为指标，设计四因素三水平正交试验，优化美拉德反应条件，因素和水平见表 1。

表 1　正交试验因素水平

Table 1　Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	A葡萄糖添加量（%）	B反应时间（min）	C反应温度（℃）	D反应初始 pH
1	4.0	40	100	6.0
2	5.5	60	110	7.0
3	7.0	80	120	8.0

1.2.5　感官评价　根据《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则第 1 部分：优选评价员》（GB/T 16291.1-2012）优选出 10 名人员构成的感官评定小组。要求所有评价员评价前 2 h 内禁食重口味食品，为避免顺序与残留效应，所有样本都用三位数编码，并以随机顺序呈现给每个评价员；相邻样品间隔≥60 s，提供温水与无盐苏打饼干清洁口腔。各评价员在独立空间中（白炽灯照明，温度 25 ℃）评价，呈样量与温度按同一标准控制[14]。对样品的气味、滋味、色泽按表 2 进行评审，各项满分为 10 分，综合加权评分，其中气味、滋味、色泽的感官评分权重分别为

表 2 感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation criteria

项目(权重)	评分标准		
	7~10分	4~6分	1~3分
气味(40%)	鲜香味浓郁, 具有食用菌特有的芳香	食用菌芳香味较淡, 无异味	无食用菌特有芳香, 异味较重
滋味(40%)	口感柔和醇厚, 味道鲜美, 无苦味	鲜味较少, 略带苦味或异味	鲜味很淡, 口感较差, 有明显苦味或异味
色泽(20%)	呈黄棕色或红棕色, 有光泽	颜色较深, 光泽较少	颜色呈深褐色, 暗淡无光泽

40%、40%、20%。每个样品均重复三次评定, 取各项目平均值总和为感官综合得分, 对感官综合得分进行单因素方差分析(ANOVA), 事后多重比较采用 Duncan 法。

1.2.6 pH 的测定 反应体系最终 pH 可用于评价美拉德反应程度[15]。本实验采用 pH 计测定美拉德反应, 结束后于冰水浴内冷却至室温的样品的 pH。

1.2.7 褐变程度的测定 将样品稀释 10 倍, 在 420 nm 波长下测定样品的吸光值, 吸光值越高表示褐变程度越高。以浓缩液作为空白[16]。

1.2.8 游离氨基酸分析 参考 Lestari 等[17] 的方法并略作修改。游离氨基酸液体样品前处理: 取样品 1 mL, 按照体积比 1∶1 加入 5% 磺基水杨酸溶液混匀, 6000×g 离心力离心 10 min, 吸取上清液 1 mL 用 0.22 μm 膜过滤上机。

氨基酸分析仪检测条件: 缓冲液流速为 25 mL/hr, 反应流速为 10 mL/hr, 分离柱 Na 型阳离子树脂层析柱, 长度直径为 200 mm×4.6 mm, 8 μm 颗粒, 紫外检测波长 570、440 nm; 柱温为 55-65-77 ℃ 程序升温, 反应槽温度 138 ℃, 进样量 20 μL。

1.2.9 游离氨基酸滋味活性值(Taste activity value, TAV)的计算 滋味活性值(TAV)是一种用于评估食品中特定化合物对整体风味贡献的定量方法。通过比较某种化合物的浓度与其味觉阈值, 可以判断该化合物是否对食品的风味有显著影响[18]。TAV 的计算见公式(1):

$$TAV = \frac{化合物浓度(mg/g)}{味道阈值(mg/g)} \quad 式(1)$$

1.2.10 调味基料挥发性成分分析 参考张历[11] 方法, 并作适当修改, 样品前处理方法: 采用顶空固相微萃取(SPME)法, 取 4 mL 样液于 20 mL 样品瓶中, 在 250 ℃, 30 min 条件下对萃取纤维(50/30 μm DVB/CAR/PDMS)进行老化, 老化完后插入样品瓶液面上方, 于 60 ℃ 下恒温萃取 30 min。最后将吸附了分析组分的萃取纤维插入气相色谱进样器中解析 10 min。气相色谱(GC)条件: 毛细管柱型号: DB-WAX(L.D: 30 m×0.25 mm, 液膜厚度: 0.25 μm); 载气 He, 流速 1.0 mL/min, 不分流; 程序升温初始温度 40 ℃, 保持 3 min, 3 ℃/min 升温至 80 ℃, 再以 3 ℃/min 的速率升至 240 ℃, 保持 10 min; 检测器温度: 250 ℃。质谱(MS)检测条件: 电子轰击离子源(EI), 电子能量 70 eV, 离子源温度 200 ℃, 接口温度 250 ℃, 扫描范围(m/z): 25~550 amu。

通过与 NIST 20 质谱数据库和人工检索处理, 选择相似度大于 80% 的化合物进行定性分析, 并采用峰面积归一化法进行相对定量, 计算各挥发性成分的相对百分含量。

1.2.11 相对气味活度值(Relative odor activity value, ROAV)的计算 相对气味活度值(ROAV)是一种同时考虑化合物含量与阈值来评估其风味贡献的方法, 应用于关键风味物质的识别与分析。当某一化合物的 ROAV≥1 时, 说明该物质对整体气味具有显著贡献, 而其数值越高, 说明其对风味特征的影响越突出[19]。ROAV 的计算见公式(2):

$$ROAV_i \approx \frac{C_i \times T_{max}}{C_{max} \times T_i} \times 100 \quad 式(2)$$

式中: $ROAV_i$ 表示相对气味活度值; C_i 和 T_i 分别表示为某挥发性物质的相对含量(%)和嗅觉阈值(mg/kg); C_{max} 表示每个处理组所测风味物质中相对含量的最大值(%); T_{max} 表示每个处理组所测风味物质中嗅觉阈值的最大值(mg/kg)。

1.2.12 美拉德反应物抗氧化能力的测定 a.还原力的测定: 向试管中加入 3 mL 准确配制不同浓度梯度的样品溶液和 2.5 mL 的磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH6.6)以及 2.5 mL 铁氰化钾溶液(10 g/L), 混合均匀, 50 ℃ 水浴静置反应 30 min, 反应结束加入 2.5 mL 三氯乙酸溶液(100 g/L), 混匀, 取 2.5 mL 上述液体加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 氯化铁溶液(1 g/L), 混匀后室温下反应 10 min, 用分光光度计在 700 nm 下测定溶液吸光度, 同时以蒸馏水代替样液做空白实验。每个样品重复测定三次, 取平均值作为最终结果[20]。

b.DPPH 自由基清除率的测定: 取 2 mL 准确配制不同浓度梯度的样品溶液和 2 mL DPPH 溶液(0.1 mmol/L), 充分摇匀后, 在室温下避光静置反应 30 min, 在 517 nm 下测定吸光度, 同时以蒸馏水代替样液做空白实验, 对照组用无水乙醇代替 DPPH 溶液。以相同质量浓度的 2,6-二叔丁基对甲酚(Butylated hydroxytoluene, BHT)作为阳性对照, 每个样品重复测定三次, 取平均值作为最终结果。DPPH 自由基清除率按照公式(3)计算[21]:

$$清除率(\%) = [1 - (A_{样品} - A_{对照})/A_{空白}] \times 100 \quad 式(3)$$

以不同待测溶液浓度下的清除率曲线, 计算得

到清除率为 50% 时的质量浓度，即半抑制浓度（Half maximal inhibitory concentration，IC_{50}），IC_{50} 值越小，表明样品对自由基的清除能力越强。

1.3　数据处理

数据整理与计算采用 Excel 2021 软件，绘图采用 Origin 2024 软件，用 SPSS 26 软件中的单因素方差分析和 Duncan 法对数据进行分析。

2　结果与分析

2.1　平菇头原料基本成分分析

龙瑞等[22]对不同地区的平菇子实体进行了营养成分的测定，研究结果显示各地区平菇之间的营养成分相差较大，其蛋白质含量为 15.89~31.44 g/100 g，总糖含量为 21.90~63.33 g/100 g。本实验测得干平菇头基本成分见表 3，其中粗蛋白含量为 14.7±0.5 g/100 g，虽略低于完整平菇子实体粗蛋白含量，但作为下脚料依然含有值得利用的蛋白质，可在热反应和酶解反应中生成鲜味增强的含氮杂环化合物；总糖含量达 41.5±0.4 g/100 g，与平菇子实体含量相当，说明其总糖价值不输于子实体，可为后续美拉德反应体系提供羰基来源，作为本实验的理想原料。因此，平菇头虽为下脚料，但仍具有利用价值，可开发为天然风味调味基料或低脂型美拉德反应底物。

2.2　美拉德反应单因素实验结果

2.2.1　葡萄糖添加量对美拉德反应程度及感官评分的影响　预实验显示，不额外添加还原糖进行美拉德反应后，产物综合得分仅 2.67 分，pH 为 6.91，吸光值为 0.098，制得的产物风味不佳，说明需额外添加还原糖以增强美拉德反应效果。本实验选用葡萄糖，因为葡萄糖已被证明是一种具有良好反应性的还原糖，能够显著提高美拉德反应效果[23]。

葡萄糖添加量对美拉德反应程度的影响见图 2(a)，对感官评分的影响见图 2(b)。

图 2(a)显示，随着葡萄糖添加量(0~7.0%)的增加，反应体系 pH 显著降低，吸光值不断提高，这说明美拉德反应程度随着葡萄糖用量的增加而增强。图 2(b)显示，综合得分呈现先上升后下降的趋势，当葡萄糖添加量为 0~1.0% 时综合得分较低，是因为美拉德反应程度较低，色泽变化不明显，香气形成有限且葡萄糖对浓缩液苦味的遮掩作用较小；当葡萄糖用量为 5.5% 时，综合得分达到最大值 7.80 分($P<0.05$)，此时气味、滋味与色泽协同优化，而添加 7.0% 的葡萄糖导致体系出现焦苦味，可能是因为葡萄糖发生美拉德反应的同时，还能在高温下发生焦糖化反应，很多研究认为美拉德反应与焦糖化反应以平行的

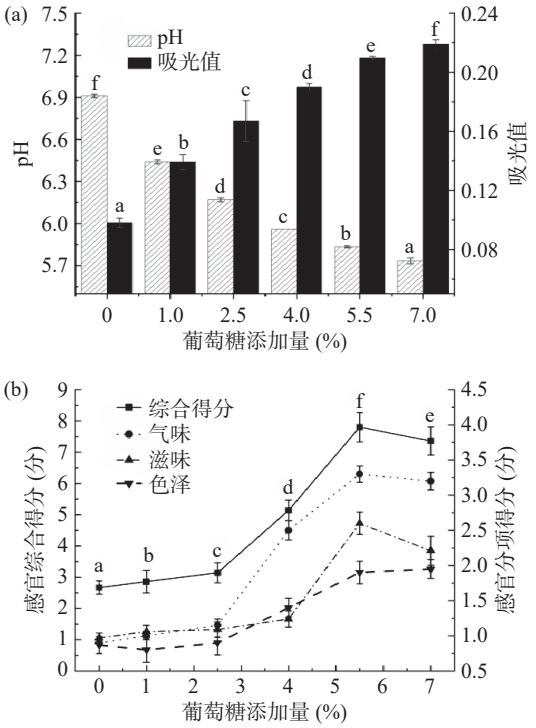


图 2　葡萄糖添加量对美拉德反应程度(a)和感官评分(b)的影响

Fig.2　Effect of glucose addition amount on degree of Maillard reaction (a) and sensory score (b)

注：不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)，图 3~图 5 同。

形式同步进行，二者通过复杂的相互作用彼此影响，从而提升了反应体系的化学多样性及产物复杂性[24]，本实验中添加 7.0% 葡萄糖后可能是焦糖化反应程度增大，产生了焦苦味从而降低了样品的整体接受性使得综合得分下降。综合分析，选取葡萄糖添加量为 5.5% 为宜。

2.2.2　反应时间对美拉德反应程度及感官评分的影响　反应时间对美拉德反应程度的影响见图 3(a)，对感官评分的影响见图 3(b)。

反应时间是影响美拉德反应程度的一个重要因素，由于美拉德反应可分为初期、增长期以及晚期反应阶段，各个阶段产生的代表性产物不同[25]，因此不同的反应时间所发生的化学反应以及产生的化合物有所差异。

由图 3(a)可知，在 20~100 min 范围内，pH 随时间延长持续下降，而吸光值逐步升高；当时间≥60 min 时，两指标的变化更为显著，表明美拉德反应程度不断提高。由图 3(b)可知，感官结果呈先升后降然后趋于平稳的趋势。在反应早期(20 min)，关键香气与呈味物质生成有限，色泽尚浅，综合得分较低；

表 3　平菇头的主要成分

Table 3　Ingredients of stalk residue of *Pleurotus ostreatus*

成分	水分	灰分	粗蛋白	粗脂肪	总糖	粗纤维
含量(g/100 g)	11.9±0.2	8.7±0.2	14.7±0.5	0.8±0.1	41.5±0.4	11.1±0.8

注：水分为湿基含量，其余成分均为干基含量。

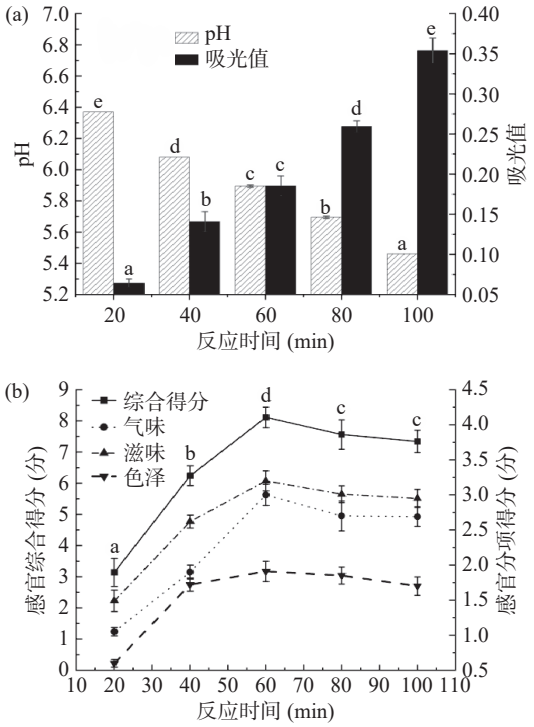


图 3 反应时间对美拉德反应程度(a)和感官评分(b)的影响

Fig.3 Effect of reaction time on degree of Maillard reaction (a) and sensory score (b)

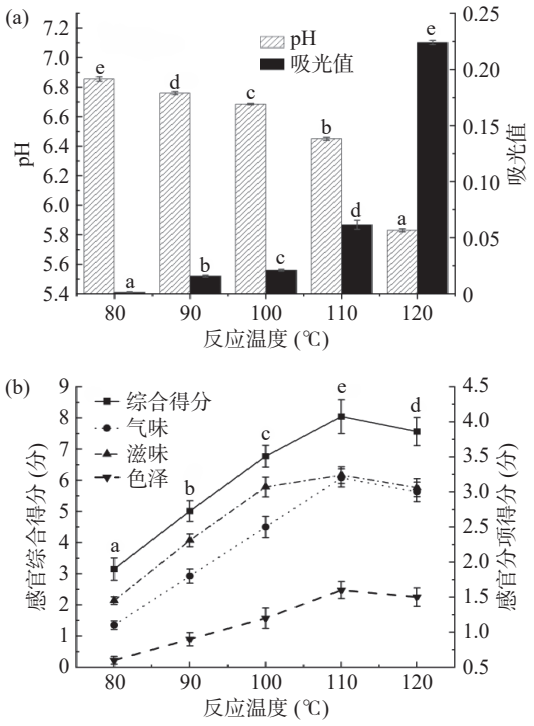


图 4 反应温度对美拉德反应程度(a)和感官评分(b)的影响

Fig.4 Effect of reaction temperature on degree of Maillard reaction (a) and sensory score (b)

随时间延长至 60 min, 气味、滋味与色泽协同提升, 综合得分达到峰值 8.04(P<0.05)。进一步延长时间至 80~100 min, 综合得分及分项得分均出现回落, 可能是当前体系下较长的反应时间会导致美拉德反应过度, 伴随焦糊、苦味上升, 破坏了风味的平衡, 导致综合得分下降[26]。综合考虑, 选取反应时间 60 min。

2.2.3 反应温度对美拉德反应反应程度及感官评分的影响 反应温度对美拉德反应程度的影响见图 4(a), 对感官评分的影响见图 4(b)。

反应温度是美拉德反应的重要影响因素之一, 通常温度越高还原糖和氨基之间的反应越快, 温度相差 10 ℃, 褐变速度能相差 3~4 倍[27]。由图 4(a)所示, 当温度低于 100 ℃ 时, pH 与吸光值变化缓慢; 当温度升至 110 ℃ 后, pH 显著下降而吸光值显著升高, 表明美拉德反应程度明显增强。由图 4(b)可知, 感官评价随温度先升后降。在 80~110 ℃ 区间内, 综合得分及其分项(气味、滋味、色泽)均持续上升, 并在 110 ℃ 达到峰值(综合得分 8.11, 显著高于其他温度组, P<0.05)。当温度进一步提高至 120 ℃ 时, 综合得分及各分项均出现回落。其原因可能是较低温度下美拉德反应程度不足, 色泽与风味提升不明显; 而过高温度会使反应过度推进, 伴随焦糖化与美拉德晚期产物(如类黑精等)增多, 焦糊与苦味感知增强, 产物颜色加深, 整体可接受性下降。综合考虑, 选取反应温度 110 ℃ 为宜。

2.2.4 初始 pH 对美拉德反应反应程度及感官评分的影响 初始 pH 对美拉德反应程度的影响见图 5(a), 对感官评分的影响见图 5(b)。

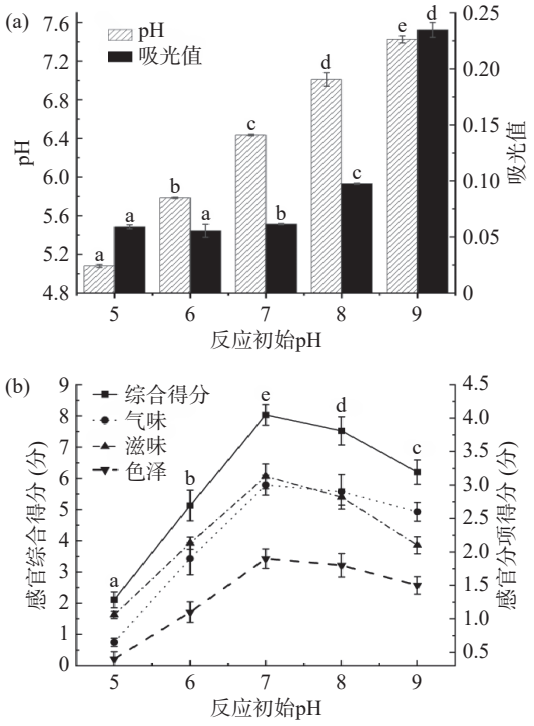


图 5 初始 pH 对美拉德反应程度(a)和感官评分(b)的影响

Fig.5 Effect of initial pH on degree of Maillard reaction (a) and sensory score (b)

初始 pH 不仅影响美拉德反应速率, 也影响其反应进程。在 pH 较低时, Amadori 重排产物或 Heyns 重排产物进入 1,2-烯醇化路径, 而 pH 较高时则走 2,3-烯醇化路径[28]。从图 5(a)可知, 吸光值随初始 pH 升高而单调增加: pH5.0 时吸光值最低; 当 pH≥7.0 时, 吸光值显著升高, 表明反应程度明显加深。由

图 5(b)所示，感官结果呈先升后降的趋势。在弱酸性至中性区间(pH5.0~7.0)，综合得分及分项(气味、滋味、色泽)随 pH 升高而上升，这可能是因为在弱酸性环境中，美拉德反应程度受到抑制，反应程度较低[29]，风味变化不明显，当初始 pH 在 7.0 左右时，综合评分达到最大值 8.03(P<0.05)，表示此时可能产生的风味物质组合与适度褐变协同，获得最佳可接受性。当 pH 继续升高到 8.0~9.0 时，感官评分有所下降，尽管较高 pH 可进一步加速美拉德反应，但同时可能促进过量的晚期产物与聚合色素形成，并增加焦糊味、苦味及碱味，从而削弱整体愉悦度，影响了整体风味评价。综合考虑，选取反应初始 pH7.0 为宜。

2.3　正交优化试验设计及结果分析

基于单因素实验结果分析，可知在反应体系 pH、褐变程度(吸光值)和感官评分三个评价指标中，以感官评分最能说明反应程度与美拉德反应产物质量的关系，因此，为了简化实验过程，正交试验阶段仅选择感官评分为评价指标。四因素三水平正交试验结果见表 4，方差分析结果见表 5。

表 4　美拉德反应优化正交试验结果

Table 4　Orthogonal test results of Maillard reaction process optimization

试验号	A葡萄糖添加量	B反应时间	C反应温度	D初始pH	感官评分(分)
1	1	1	1	1	5.34±0.22
2	1	2	2	2	7.02±0.14
3	1	3	3	3	6.69±0.21
4	2	1	2	3	6.45±0.14
5	2	2	3	1	6.11±0.19
6	2	3	1	2	8.45±0.18
7	3	1	3	2	7.95±0.19
8	3	2	1	3	7.42±0.17
9	3	3	2	1	6.01±0.18
k_1	6.350	6.580	7.070	5.820	
k_2	7.003	6.850	6.493	7.807	
k_3	7.127	7.050	6.917	6.853	
R	0.777	0.470	0.577	1.987	
因素主次	D>A>C>B				
最优组合	$A_3B_3C_1D_2$				

由表 4 可知，按照极差值(R)判断，各因素对感官评分影响的顺序为：初始 pH>葡萄糖添加量>反应温度>反应时间。最佳工艺条件组合为 $A_3B_3C_1D_2$，即葡萄糖添加量为 7.0%，反应时间为 80 min，反应温度为 100 ℃，初始 pH 为 7.0。本研究中，单因素实验结果表明温度和时间的最佳水平分别为 110 ℃ 与 60 min，而正交优化结果显示最佳组合为 100 ℃ 与 80 min，两者存在一定差异。这一差异可能归因于温度与时间的交互效应。在较高温度条件下，尽管能在较短时间内加速美拉德反应产物的生成，但过快的反应速率易导致苦味物质或过度褐变的产生，从而降低感官评分[30]。相反，在相对较低温度下，延长反应时间能够实现产物的逐步积累，既保证了风味物质的形成，又避免了副产物的过量生成。由表 5 可知，由方差分析结果可知，反应时间，葡萄糖添加量、反应温度和初始 pH 四个因素对美拉德反应感官评分的影响均呈极显著影响(F=72.829>$F_{0.01}$(8, 18)=3.71; F=38.989>$F_{0.01}$(2, 18)=6.01; F=12.498>$F_{0.01}$(2, 18)=6.01; F=19.725>$F_{0.01}$(2, 18)=6.01)，方差分析与正交分析结果一致。将最佳条件组合平行实验 3 次，进行验证实验，得到的产物感官评分为 8.64±0.16，高于表 4 中的任一组合数据，说明正交试验得到的美拉德工艺优化参数具有适用性和可靠性。

表 5　方差分析结果

Table 5　Analysis result of variance

来源	偏差平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	23.573	8	2.947	72.829	**
葡萄糖添加量	3.155	2	1.577	38.989	**
反应时间	1.011	2	0.506	12.498	**
反应温度	1.596	2	0.798	19.725	**
初始pH	17.811	2	8.905	220.107	**
误差	0.728	18	0.040		
总计	1282.319	27			
修正后总计	24.301	26			

注：F表示检验统计量，*和**分别表示影响显著(P<0.05)和影响极显著(P<0.01)。

2.4　游离氨基酸分析

为明确美拉德反应前后体系中游离氨基酸种类和含量的变化，合理评价氨基酸在反应前后体系中 TAV 的变化，对平菇头浓缩液和最佳反应条件制得的美拉德反应产物(Maillard reaction products, MRPs)进行了游离氨基酸检测和分析。氨基酸分离图谱见图 6，氨基酸结果分析见表 6。

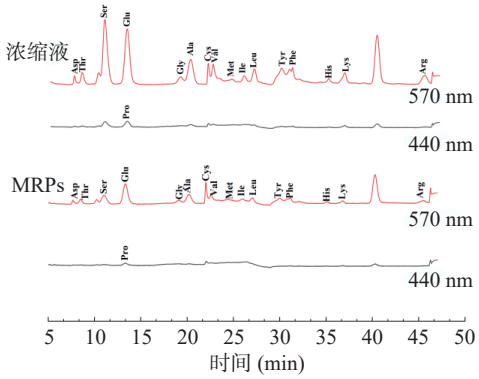


图 6　浓缩液、MRPs 中游离氨基酸分离谱图

Fig.6　Chromatographic separation of free amino acids of concentrate and MRPs

呈味氨基酸是食品重要的滋味成分和一些挥发性物质的前体物质，对食品整体的风味有着独特的作用，根据呈味氨基酸的呈味特性，将氨基酸分为鲜味、甜味、苦味及无味 4 种类型[32]。表 6 显示，在浓缩液和 MRPs 中均检测出 17 种游离氨基酸，总含量分别为 35.601 mg/g 和 7.680 mg/g，MRPs 的氨基酸总含量相较于浓缩液有所减少，表明了浓缩液中游离氨

表 6 浓缩液和 MRPs 的游离氨基酸的变化

Table 6 Change in free amino acid composition of concentrate and MRPs

氨基酸名称	特征滋味	呈味阈值[31] (mg/g)	绝对含量(mg/g)		TAV	
			浓缩液	MRPs	浓缩液	MRPs
天冬氨酸(Asp)	鲜/甜(+)	1.00	1.099	0.304	1.099	0.304
苏氨酸(Thr)	甜(+)	2.60	0.945	0.288	0.363	0.111
丝氨酸(Ser)	甜(+)	1.50	7.310	0.787	4.870	0.525
谷氨酸(Glu)	鲜(+)	0.30	9.750	2.429	32.500	8.097
甘氨酸(Gly)	甜(+)	1.30	0.521	0.114	0.400	0.088
丙氨酸(Ala)	甜(+)	0.60	3.319	0.742	5.532	1.240
胱氨酸(Cys)	无味	ND	0.622	0.126	–	–
缬氨酸(Val)	甜/苦(+)	0.40	1.406	0.335	3.515	0.838
蛋氨酸(Met)	苦/甜/硫(−)	0.30	0.179	0.076	0.596	0.253
异亮氨酸(Ile)	苦(−)	0.90	0.708	0.324	0.787	0.360
亮氨酸(Ieu)	苦(−)	1.90	1.242	0.321	0.654	0.168
酪氨酸(Tyr)	苦(−)	2.60	3.210	0.811	1.235	0.312
苯丙氨酸(Phe)	苦(−)	0.90	1.749	0.374	1.943	0.415
组氨酸(His)	苦(−)	0.20	0.445	0.125	2.225	0.625
赖氨酸(Lys)	苦/甜(−)	0.50	1.294	0.194	2.588	0.388
精氨酸(Arg)	苦/甜(−)	0.50	1.802	0.330	3.604	0.660
脯氨酸(Pro)	甜/苦(+)	3.00	0.400	0.502	0.133	0.167

注: (+)表示对滋味有好的贡献; (−)表示对滋味有不好的贡献; 味道阈值: 是指水溶液中的阈值; ND表示无相关数据; −表示未计算。

基酸较多地与还原糖反应, MRPs 中的 Ile、leu、Tyr、Phe、His、Lys、Arg 等苦味氨基酸总含量(2.479 mg/g)相比浓缩液中的总含量(10.450 mg/g)有所下降, 鲜味氨基酸(Asp 和 Glu)含量为 2.733 mg/g, 占游离氨基酸总含量的 33.4%。

通过比较氨基酸的含量与其味觉阈值可得出该氨基酸的 TAV, 当 TAV≥1 时, 表明该氨基酸对滋味有贡献, 且数值越大贡献越大; 当 TAV<1 时, 表明该滋味物质对整体滋味贡献不显著[18]。浓缩液中 TAV 大于 1 的氨基酸包括 Asp、Ser、Glu、Ala、Val、Tyr、Phe、His、Lys、Arg, 其中鲜味氨基酸 Asp 和 Glu 的 TAV 分别为 1.099、32.500, 表明平菇头经酶解后释放的鲜味氨基酸较多, 但 Tyr、Phe、His、Lys、Arg 等苦味氨基酸的 TAV 也均大于 1, 这些苦味氨基酸可能主要是由平菇头蛋白质酶解后产生, 大多具有疏水基团, 对人的苦味受体具有刺激作用, 使人能够感受到苦味[33], 因此浓缩液品尝起来会有明显的回苦也可能是由这些苦味氨基酸导致的; MRPs 中 TAV 大于 1 的氨基酸包括 Glu 和 Ala, 其 TAV 分别为 8.097 和 1.240, Glu 是鲜味氨基酸, 能增强滋味的醇厚感和持久性, 而 Ala 是甜味氨基酸, 能够增加食品的甜味, 调和食品的整体风味。此外, 浓缩液中 TAV 大于 1 的苦味氨基酸(Tyr、Phe、His、Lys、Arg)在 MRPs 中的 TAV 均有所下降, 绝对含量也均低于呈味阈值, 有研究表明一些苦味氨基酸如 Phe、Tyr, 绝对含量未达到呈味阈值时, 可增强其他氨基酸的鲜味和甜味[34], 因此 MRPs 品尝起来无明显的苦味且更能尝出鲜味和甜味。

但值得注意的是, 在食品体系中, 体现鲜味的物质除氨基酸外, 还有肽类、核苷酸等物质, 另外还存在能协同增鲜的物质, 如有机酸等, 这些物质共存于食品体系中对鲜味的最终呈味常存在显著的协同或拮抗作用。例如, Glu 与 5'-IMP、5'-GMP 等核苷酸间具有显著的协同增鲜效应, 可显著提升鲜味强度[35]。同时, 有机酸还可能通过改变体系 pH, 间接影响氨基酸及肽类物质的呈味活性, 如琥珀酸及其钠盐不仅具有鲜味且阈值较低, 能与鲜味氨基酸及其他有机酸如柠檬酸等进行协同增鲜的作用[36]。因此, 全面而准确分析食品的呈鲜物质本身是极其复杂的工作, 目前的多数研究仍停留在具体分析某类物质对鲜味的贡献, 本论文研究的氨基酸 TAV 指标虽可定量描述产物由氨基酸体现的鲜味轮廓, 但仍存在一定的局限性。

2.5 挥发性成分分析

2.5.1 MRPs 挥发性成分定性定量分析 挥发性风味物质是 MRPs 的另外一类重要的呈味物质。本实验在最佳条件下制得的 MRPs 具有平菇典型气味并混合焦榛子香, 为充分解析其挥发性物质组成对其进行 GC-MS 分析, 其总离子流图见图 7, 结果分析见表 7。

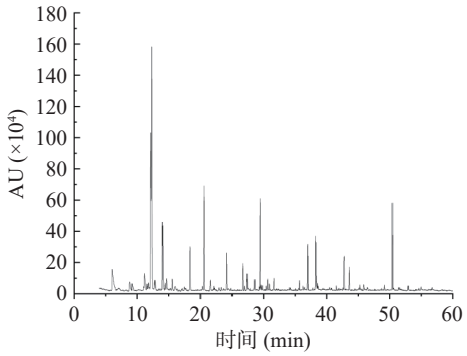


图 7 MRPs 的 GC-MS 的总离子流图

Fig.7 Total ion current chromatogram of GC-MS for MRPs

通过对挥发性成分的分类统计, MRPs 中共检测鉴定出 42 种挥发性物质, 包括 17 种醛类、10 种酮类、6 种烃类、5 种醇类、3 种杂环类和 1 种酸类, 其中以杂环类(44.93%)、醛类(33.07%)为主, 其次是烃类、酮类及少量醇类、酸类等。

醛类化合物与 Maillard 和 Strecker 反应有着重要联系, 加热过程中, 糖类物质的羰基与氨基酸的氨基可以反应生成醛类物质[42], 其中 C_6~C_{12} 饱和醛类物质阈值较低[29], 对 MRPs 的风味有较大的贡献, 本实验中检测出来的醛类有 17 种, 主要有正己醛(7.88%)、正壬醛(6.19%)、正癸醛(4.03%)等, 其中正己醛在低浓度时具有清香和青草味, 正庚醛、苯甲醛、正辛醛和苯乙醛等具有水果、脂芳香、坚果香等香气, 这些复合香气使得产物的整体风味得到增强, 更富有层次感。

酮类化合物主要的来源途径有不饱和脂肪酸的氧化和降解以及醇类的氧化[43], 本实验中一共检测出 10 种酮类, 主要有 2-庚酮(2.39%)、3-辛烯-2-酮

表 7　MRPs 挥发性成分分析

Table 7　Volatile component analysis of MRPs

编号	化合物	相似度(%)	相对含量(%)	气味描述[37−41]
1	1,1,2,3-四甲基环丙烷	82	0.94	−
2	1-己基-2-(1-甲基乙基)环丙烷	81	0.18	−
3	环丙烷	86	2.78	−
4	8-甲基-1-十一烯	83	1.23	−
5	(+)-(Z)- 长叶蒎烷	80	5.85	−
6	4-乙基-3-壬烯-5-炔	83	0.49	−
	烃类(6种, 11.47%)			
7	正己醛	96	7.88	青草香、水果香
8	正庚醛	90	1.85	水果香
9	反-2-庚醛	84	0.47	脂芳香
10	苯甲醛	84	3.38	杏仁香
11	正辛醛	96	1.31	水果香
12	苯乙醛	92	1.72	玫瑰香、蜂蜜味
13	反-2-辛烯醛	94	1.78	脂肪、青草味
14	正壬醛	95	6.19	玫瑰味、柑橘味
15	反-2-壬烯醛	96	1.05	黄瓜味
16	13-甲基十四醛	90	0.39	−
17	正癸醛	96	4.03	甜香、柑橘香
18	2-十一醛	94	0.35	脂肪香、花香
19	2,4-癸二烯醛	97	0.41	脂香
20	2-甲基壬乙醛	87	0.08	柑桔香
21	椰子醛	95	1.25	椰子香
22	3-(2-氧代环己基)丙醛	84	0.66	−
23	十二醛	83	0.27	柑橘香
	醛类(17种, 33.07%)			
24	正壬醇	92	0.23	玫瑰香
25	2-壬基醇	91	0.45	花香、果香
26	十五醇	92	0.12	−
27	反式-橙花叔醇	90	0.19	花香
28	4,7-二甲基-3,7-癸二烯-5,6-二醇	85	0.14	−
	醇类(5种, 1.12%)			
29	2-庚酮	90	2.39	梨香味
30	3-辛烯-2-酮	91	1.22	菌菇香
31	2-壬酮	91	0.38	水果香、花香
32	反式-3-壬烯-2-酮	92	0.38	果香、脂香
33	2-十一酮	95	1.17	水果、奶油味
34	2-十三烷酮	92	0.19	椰子香
35	2-环己烯-1-酮	83	0.82	−
36	香叶基丙酮	95	0.86	花香和果香
37	顺-1-甲基双环癸烷-2,10-二酮	86	0.32	−
38	2-十四酮	87	0.42	芳香气味
	酮类(10种, 8.15%)			
39	棕榈酸	92	0.31	−
	酸类(1种, 0.31%)			
40	3-甲基-2-(5H)-呋喃酮	91	0.53	果香、焦糖香
41	4,5-二氢-N-羟基-N-苯基-3-呋喃酰胺	86	0.12	−
42	2-戊基呋喃	94	44.29	果香、青草香
	杂环类(3种, 44.93%)			

注：−表示无相关数据或信息。

(1.22%)、2-十一酮(1.17%)等，不同链长的酮类物质气味特征也不一样，短链的气味特征为脂香和焦香香气，长链酮类更多为花香气息[44]，样品中如 2-庚酮、2-壬酮、十二醛、正壬醇等大多具有花香、果香等香气，还有具有菌菇特征香气的 3-辛烯-2-酮。由表 7 可知，酮类化合物的相对含量低于醛类化合物，且酮类化合物的呈味阈值要高于其同分异构体的醛类化合物，因此相对醛类化合物，酮类对整体的风味贡献不大[45]，但有研究表明若从挥发性风味物质中去除羰基化合物，肉品特有的风味便会消失，说明少量的羰基化合物在肉品香味形成中的作用不可忽视[46]。因此，作为羰基化合物的酮类物质在美拉德反应及风味的生成中可能发挥着重要作用。

醇类化合物通常由脂质氧化生成，阈值较高[47]，一般具有植物的清香气味，如正壬醇和 2-壬基醇带有一定的花果香，本研究中检测出来的醇类物质含量较低，可能是平菇头原料本身含脂较少或是在美拉德反应中被氧化为羰基化合物，但仍然可与其他物质对风味形成重叠效应[48]。

杂环化合物通常阈值较低，对风味有很大的贡献[16]，本研究中杂环类化合物的相对含量最多，主要以 2-戊基呋喃为主，占了香气成分的 44.93%，美拉德反应中的呋喃主要是通过还原糖或典型氨基酸的热降解产生[49]，有研究表明，2-戊基呋喃是热加工肉制品香气的主要贡献者，本身带有果香和青草香[50]，赋予了平菇头浓缩液美拉德反应液独特的风味，另外 3-甲基-2-(5H)-呋喃酮也贡献了类似果糖焦糖的香气。

此外，在本研究中也测出了一些烃类、酸类，这些化合物的含量较少，但它们对整体的风味也可能起重要的作用。

2.5.2　MRPs 挥发性成分 ROAV 分析　在评估样品风味特性时，风味形成受挥发性物质浓度影响，同时需达到嗅觉阈值才能被感知。为了定量描述挥发性风味物质对产物风味的贡献，本实验采用 ROAV 方法结合 GC-MS 分析结果筛选出关键的香味化合物，根据在《化合物香味阈值汇编》[51] 中查得的阈值计算各挥发性物质的 ROAV。ROAV 法得出的关键香气成分结果较气味活度值(Odor activity value, OAV)法的更为准确可靠，ROAV≥1 的化合物为关键性风味成分。

本实验鉴定出的 42 种挥发性物质中，能检索到风味阈值的仅有 19 种，按照相应的计算方法，算得 19 种挥发性物质的 ROAV 结果如表 8 所示。

表 8 中，2,4-癸二烯醛被设为 ROAV=100，虽然该化合物的相对含量较低，仅为 0.41%，但该化合物阈值极低，根据 ROAV 计算结果可得 2,4-癸二烯醛为第一关键物质，是典型脂香关键物质；2-戊基呋喃是 MRPs 中含量最高的物质，计算得到的 ROAV 为 50.29，对 MRPs 的风味起到骨架作用。脂肪族醛类

表 8 MRPs 挥发性成分 ROAV

Table 8 ROAV of volatile flavor compounds in MRPs

序号	物质	CAS号	阈值(mg/kg)	相对含量(%)	ROAV
1	2,4-癸二烯醛	25152-84-5	0.000027	0.41	100.00
2	2-戊基呋喃	3777-69-3	0.0058	44.29	50.29
3	正壬醛	124-19-6	0.0011	6.19	37.06
4	反-2-壬烯醛	18829-56-6	0.00019	1.05	36.39
5	正辛醛	124-13-0	0.0008	1.31	10.78
6	正己醛	66-25-1	0.005	7.88	10.38
7	正癸醛	112-31-2	0.003	4.03	8.85
8	正庚醛	111-71-7	0.0028	1.85	4.35
9	反-2-辛烯醛	2548-87-0	0.003	1.78	3.91
10	苯乙醛	122-78-1	0.0063	1.72	1.80
11	2-十一酮	112-12-9	0.0055	1.17	1.40
12	3-甲基-2-(5H)-呋喃酮	104-61-0	0.0097	0.53	0.36
13	2-十一醛	112-44-7	0.0125	0.35	0.18
14	2-庚酮	110-43-0	0.14	2.39	0.11
16	2-壬基醇	628-99-9	0.058	0.45	0.05
17	正壬醇	143-08-8	0.0455	0.23	0.03
18	苯甲醛	100-52-7	0.75089	3.38	0.03
19	2-壬酮	821-55-6	0.2	0.38	0.01

整体贡献显著，1<ROAV<50 的化合物有正壬醛(37.06)、反-2-壬烯醛(36.39)、正辛醛(10.78)、正己醛(10.38)、正癸醛(8.85)、正庚醛(4.35)、反-2-辛烯醛(3.91)，说明 C_6~C_{10} 饱和或不饱和醛是 MRPs 香气的主要来源，赋予水果、脂芳香、坚果香等基调；此外，苯乙醛(1.80)提供水果香、青草香，2-十一酮(1.40)等酮类提供次要的果脂风味。0.1<ROAV<1 的成分总体对整体香气贡献有限，如 3-甲基-2-(5H)-呋喃酮(0.36)、2-十一醛(0.18)等，但对整体气味仍有修饰作用[52]；综上，MRPs 的香气主要由不饱和醛与 C_6~C_{10} 脂肪族醛和杂环化合物主导，并构成了 MRPs 风味轮廓。

由于本实验是基于单体化合物阈值进行的分析，未充分考虑基质相互作用与协同和掩蔽效应，且 42 种挥发性物质仅有 19 种能进行 ROAV 计算和分析，因此也存在一定的局限性。

2.6 抗氧化能力测定

2.6.1 还原力 抗氧化剂的还原能力和抗氧化活性存在相关关系，抗氧化剂可以通过给出电子以清除自由基表现出还原作用，因此可通过测定样品的还原能力来说明其抗氧化活性的大小[53]。图 8 显示的是浓缩液(4.4~22.2 mg/mL)和 MRPs(2.2~11.1 mg/mL)的还原力。由图 8 可知，两组样品的吸光度随着样品浓度的提高而增加，当浓缩液浓度为 22.2 mg/mL 时，A_{700} 达最大值 1.128；而 MRPs A_{700} 最大值为 0.928，此时 MRPs 的浓度为 11.1 mg/mL，即在经过美拉德反应后，同等浓度下 MRPs 的还原力比浓缩液的要高，这可能是因为美拉德反应过程中会产生一些具有还原性的化合物，如类黑精等[54]。

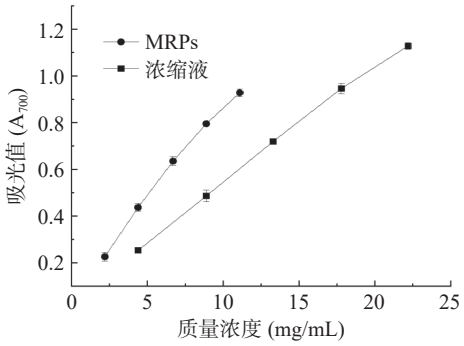


图 8 浓缩液和美拉德反应产物的还原力分析

Fig.8 Analysis of the reducing capacity of concentrate and MRPs

2.6.2 DPPH 自由基清除率 DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)为一种带发色基团的自由基，其醇溶液呈紫色，分子中存在大 π 键。当 DPPH 接受自由基清除剂的单电子或氢离子时，会配对成稳定的 DPPH-H 分子，使溶剂逐渐褪色，其程度与接受的电子数量成定量关系[55]。因此 DPPH 自由基清除活性测定已被描述为评价其抗氧化活性的标准。不同浓度的浓缩液(1.4~8.0 mg/mL)和 MRPs、BHT(0.6~4.0 mg/mL)清除 DPPH 自由基能力的变化如图 9 所示。三组样品的 DPPH 自由基清除率都随着浓度的增加而先急剧上升而后又趋于平缓。当浓缩液浓度为 8.0 mg/mL 时，DPPH 自由基清除率达最大值 69.94%；而 MRPs 对 DPPH 自由基的清除率最大值为 76.53%，此时 MRPs 的浓度为 4.0 mg/mL，其它同等浓度的 MRPs 清除 DPPH 自由基的活性也比浓缩液的要高。通过对不同质量浓度下的 MRPs、浓缩液的清除率曲线，计算出 IC_{50} 依次为 0.86、1.62 mg/mL，这表明美拉德反应可以提高对 DPPH 自由基的清除能力，与还原力的实验结果相对应。

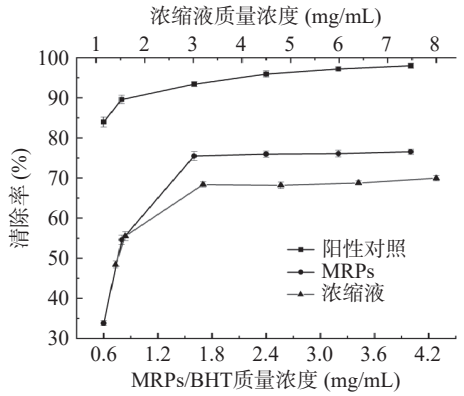


图 9 浓缩液和美拉德反应产物的 DPPH 自由基清除能力

Fig.9 DPPH radical-scavenging activities of concentrate and MRPs

3 结论

本研究从平菇头的高值化综合利用出发，以其为原料，采用中性蛋白酶制得酶解液，并进行浓缩处理，添加葡萄糖，利用美拉德反应改善浓缩液风味。通过单因素实验和正交试验得出最佳的制备条件为：

葡萄糖添加量为 7.0%，反应时间为 80 min，反应温度为 100 ℃，反应初始 pH 为 7.0，此时得到的 MRPs 感官评分为 8.64±0.16，呈红棕色，味道鲜甜，具有平菇典型气味并混合焦榛子香。另外，对浓缩液和最佳反应条件下制得的 MRPs 的游离氨基酸分析显示，浓缩液经美拉德反应后 Tyr、Phe、His 等苦味氨基酸的含量及 TAV 明显降低，MRPs 的呈味氨基酸成分相比浓缩液的得到了改善，鲜味氨基酸（Asp 和 Glu）含量占总游离氨基酸含量的 33.4%，对滋味贡献较大的 Glu 和 Ala 的 TAV 分别为 8.097 和 1.240，因此 MRPs 品尝起来味鲜而不苦；挥发性物质分析结果则显示，在 MRPs 中分离鉴定出的 42 种化合物中主要以杂环类和醛类为主，ROAV 分析表明不饱和醛与 C_6~C_{10} 脂肪族醛和杂环化合物为关键香气物质。因氨基酸呈味分析尚未明确核苷酸、有机酸对鲜味的协同效应，而挥发性物质中还有部分物质的阈值是未知的，本文对美拉德反应产物的风味分析还有一定的局限性。抗氧化实验表明，MRPs 具有一定的还原力和 DPPH 自由基清除能力，显示出较好的体外抗氧化潜力。本研究结果是后续菇精调味料生产的基础，可为平菇头的高值化利用提供理论参考和实践指导。

© 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］我国食用菌行业产值、产量及出口数量均为增长趋势 香菇、黑木耳、平菇合计占比超过 63%[EB/OL]. (2025-01-09)[2025-07-29]. https://www.chinabaogao.com/tuozi/202501/739728.html. ［The output value, production volume and export volume of China's edible fungi industry are all on the rise. The combined proportion of shiitake mushrooms, black fungus and *Pleurotus ostreatus* exceeds 63%[EB/OL]. (2025-01-09)[2025-07-29]. https://www.chinabaogao.com/tuozi/202501/739728.html.］

［2］唐贝，吕颖捷，石文军，等. 平菇菌渣智能化综合利用优势分析[J]. 农业工程技术，2023，43(8)：81−82. ［TANG Bei, LÜ Yingjie, SHI Wenjun, et al. Advantage analysis of intelligent comprehensive utilization of *Pleurotus ostreatus* residue[J]. Agricultural Engineering Technology, 2023, 43(8): 81−82.］

［3］SIMANUNGKALIT R, KARO-KARO T, SUHAIDI I. Effect of ratio of oyster mushroom with straw mushroom and the type of filling flour on the quality of natural seasoning[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 782(3): 032090.

［4］YOO S J, KIM S H, WON H R. Component analysis and antioxidant activity of natural seasoning using shiitake (*Lentinus edodes*) powder[J]. The Korean Journal of Community Living Science, 2012, 23(3): 245−254.

［5］PARK E J, LEE S O, LEE S P. Development of natural fermented seasoning with *Flammulina velutipes* powder fortified with γ-aminobutyric acid (GABA) by lactic acid fermentation[J]. Korean Journal of Food Preservation, 2017, 24(2): 237−245.

［6］沈文凤，王文亮，崔文甲，等. 食用菌调味料开发现状与发展趋势[J]. 中国食物与营养，2016，22(10)：35−38. ［SHEN Wenfeng, WANG Wenliang, CUI Wenjia, et al. Research status and development trends of edible fungi seasoning[J]. Food and Nutrition in China, 2016, 22(10): 35−38.］

［7］黄爱云，董晓博，康淑芳，等. 不同蛋白酶处理对真姬菇菌盖与菌柄鲜味物质释放的影响[J]. 中国食品学报，2022，22(8)：153−162. ［HUANG Aiyun, DONG Xiaobo, KANG Shufang, et al. Effects of different protease treatments on the release of umami compounds in the pileus and stipe of *Hypsizygus marmoreus*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(8): 153−162.］

［8］沈琪. 双孢菇废弃菇柄干燥特性及其呈味核苷酸的提取研究[D]. 郑州：河南农业大学，2014. ［SHEN Q. Study on drying characteristics and extraction of flavor nucleotides from *Agaricus bisporus* waste stipe[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.］

［9］高虹，史德芳，周明，等. 香菇柄风味物质高效释放技术研究及菇精调味料的开发[R]. 湖北：湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究，2011-11-15. ［GAO H, SHI D F, ZHOU M, et al. Research on the efficient release technology of flavors from mushroom stems and the development of mushroom essence seasoning materials[R]. Hubei: Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, 2011-11-15.］

［10］CHEN Xiao, YU Jingyang, CUI Heping, et al. Effect of temperature on flavor compounds and sensory characteristics of Maillard reaction products derived from mushroom hydrolysate[J]. Molecules, 2018, 23(2): 247.

［11］张历. 基于美拉德反应的真姬菇调味品的研究[D]. 福州：福建农林大学，2015. ［ZHANG Li. Study on the seasoning of *Hypsizygus marmoreus* by the Maillard reaction[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.］

［12］de SOUSA F V M, de SOUSA G M, de CARVALHO M L, et al. Thiamine, cysteine and xylose added to the Maillard reaction of goat protein hydrolysate potentiates the formation of meat flavoring compounds[J]. Food Chemistry, 2024, 445: 138398.

［13］刘美娇，黎铸毅，陈秋翰，等. 酶解-美拉德反应制备金鲳鱼调味基料的工艺研究及风味分析[J]. 中国调味品，2024，49(6)：83−90,118. ［LIU Meijiao, LI Zhuyi, CHEN Qiuhan, et al. Study on preparation process of seasoning basic material of *Trachinotus ovatus* by enzymatic hydrolysis-Maillard reaction and flavor analysis[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 83−90,118.］

［14］顾千辉. 碳基辣椒素类物质电化学传感器的构建及在休闲酱卤肉制品辣度分级中的应用[D]. 无锡：江南大学，2023. ［GU Qianhui. Construction of carbon based electrochemical sensor for capsaicinoids and its application in spiciness classification of leisure sauced meat products[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］

［15］吴靖娜，靳艳芬，陈晓婷，等. 鲍鱼蒸煮液美拉德反应制备海鲜调味基料工艺优化[J]. 食品科学，2016，37(22)：69−76. ［WU Jingna, JIN Yanfen, CHEN Xiaoting, et al. Optimization of preparation of seafood flavor condiment base from cooked abalone juice by Maillard reaction[J]. Food Science, 2016, 37(22): 69−76.］

［16］张伟伟. 榆黄蘑酶解物鲜味特性及其美拉德反应呈味机理的研究[D]. 天津：天津科技大学，2023. ［ZHANG W W. Study on umami properties and flavor formation mechanism of the Maillard reaction obtained from enzymatic hydrolysate of *Pleurotus citrinopileatus*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.］

［17］LESTARI S D, SHOBIRIN M H A, MUSTAFA S, et al. Bacterial community structure, predicted metabolic activities, and formation of volatile compounds attributed to Malaysian fish sauce flavour[J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136568.

[18] 任佳怿, 翟营营, 黄晶晶, 等. 酵母抽提物滋味成分分析及其复合调味料对鲢鱼风味的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 210−217. [REN Jiayi, ZHAI Yingying, HUANG Jingjing, et al. Analysis of taste components of yeast extract and effect of composite seasoning containing it on the flavor of silver carp[J]. Food Science, 2020, 41(16): 210−217.]

[19] 刘旭龙, 孙萌彤, 肖凯, 等. 浓缩方式对莱阳梨膏流变学特性与风味的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 361−371. [LIU Xulong, SUN Mengtong, XIAO Kai, et al. Effects of concentration methods on the rheological properties and flavor profile of Laiyang pear paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 361−371.]

[20] 刘洁. 玉米蛋白酶水解及水解产物的分离纯化[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014. [LIU J. Enzymatic hydrolysis of corn gluten and separation and purification of the hydrolysates[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014.]

[21] HUANG Meigui, LIU Ping, SONG Shiqing, et al. Contribution of sulfur-containing compounds to the colour-inhibiting effect and improved antioxidant activity of Maillard reaction products of soybean protein hydrolysates[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(4): 710−720.

[22] 龙瑞, 苏玲, 王琦. 不同地区平菇营养成分的分析比较[J]. 中国食用菌, 2020, 39(5): 43−49. [LONG Rui, SU Ling, WANG Qi. Nutrient composition comparative analysis of *Pleurotus ostreatus* from different main cultivation areas[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(5): 43−49.]

[23] MARTINS S I F S, JONGEN W M F, van BOEKEL M A J S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling[J]. Trends in Food Science & Technology, 2000, 11(9−10): 364−373.

[24] HEMMLER D, ROULLIER-GALL C, MARSHALL J W, et al. Insights into the chemistry of non-enzymatic browning reactions in different ribose-amino acid model systems[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 16879.

[25] 翟若涵. 羊乳粉加工和储藏过程中美拉德反应产物形成研究及其对品质变化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024. [ZHAI Ruohan. Study on the formation of Maillard reaction products during processing and storage of goat milk powder and its effect on quality changes[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024.]

[26] 王林果, 贾溅琳, 张鹏程, 等. 鱼味香精的制作工艺优化及风味分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(7): 175−180,185. [WANG Linguo, JIA Jianlin, ZHANG Pengcheng, et al. Optimization of processing technology and flavor analysis of fish-favor essence[J]. China Condiment, 2023, 48(7): 175−180,185.]

[27] NUNES L, MARTINS E, TULER P Í, et al. The Maillard reaction in powdered infant formula[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2019, 7(1): 33−40.

[28] 冯林慧. 谷胱甘肽 Amadori 化合物高效制备及其热加工风味形成调控机制[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [FENG Linhui. Efficient preparation of glutathione amadori compound and controlled formation of its thermal processing flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]

[29] 李娇. 基于美拉德反应的马铃薯汁液风味改善及其在沙拉酱开发中的应用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022. [LI Jiao. Flavor improvement of potato juice based on Maillard reaction and its application in salad dressing production[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.]

[30] 许春平, 吴艺虹, 李伟泽, 等. 白梅酶解液美拉德反应制备食用香料工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(12): 8−18. [XU Chunping, WU Yihong, LI Weize, et al. Optimization of preparation process for edible spices by Maillard reaction from white plum enzymatic hydrolysate and its antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2024, 35(12): 8−18.]

[31] 葛世鹏, 韩丽娟, 王富红, 等. 响应面优化藏羊肉酶解工艺及酶解液呈味特性分析[J/OL]. 食品工业科技, 1−30[2025-09-30]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040309. [GE S P, HAN L J, WANG F H, et al, Study on the optimization of enzymatic hydrolysis process for Tibetan sheep meat using response surface methodology and flavor characteristics of the enzymatic hydrolysate[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−30[2025-09-30]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040309.]

[32] ARDÖ Y. Flavour formation by amino acid catabolism[J]. Biotechnology Advances, 2006, 24(2): 238−242.

[33] TONG Xiaohong, LIAN Ziteng, MIAO Liming, et al. An innovative two-step enzyme-assisted aqueous extraction for the production of reduced bitterness soybean protein hydrolysates with high nutritional value[J]. LWT, 2020, 134: 110151.

[34] 赵静, 丁奇, 孙颖, 等. 香菇菌汤及酶解液中滋味成分及呈味特性的对比分析[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 99−104. [ZHAO Jing, DING Qi, SUN Ying, et al. Comparison of taste compounds and taste characteristics of shiitake mushroom soup and enzymatic hydrolysate[J]. Food Science, 2016, 37(24): 99−104.]

[35] FUKE S, KONOSU S. Taste-active components in some foods: A review of Japanese research[J]. Physiology & Behavior, 1991, 49(5): 863−868.

[36] ZHANG Z Y, ELFALLEH W, HE S D, et al. Heating and cysteine effect on physicochemical and flavor properties of soybean peptide Maillard reaction products[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 2137−2146.

[37] 奥斯曼·努尔艾合麦提, 冯作山, 尼格尔热依·亚迪卡尔, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析不同品种馕挥发性风味特征及关键成分[J/OL]. 食品工业科技, 1−21 [2025-11-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070214. [OSMAN N, FENG Z S, NIGARY Y, et al. Based on HS-SPME-GC-MS analysis of volatile flavor characteristics and key components in multiple varieties of naan[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−21[2025-11-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070214.]

[38] 张明, 于海, 周晓燕, 等. 日龄对盐水鹅挥发性风味成分和脂肪酸的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 58−64. [ZHANG Ming, YU Hai, ZHOU Xiaoyan, et al. Effect of age on volatile flavor and fatty acid of salted goose[J]. Food & Machinery, 2018, 34(4): 58−64.]

[39] 于日成, 葛鹏, 张主鹏, 等. 盐碱水罗氏沼虾虾粉对仙贝品质特性及风味特征的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1−18 [2025-11-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070157. [YU R C, GE P, ZHANG Z P, et al. The effect of shrimp powder from *Macrobrachium rosenbergii* cultured in saline-alkali water on the quality and flavor characteristics of senbei[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−18 [2025-11-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070157.]

[40] 徐恒, 王晓雨, 裴龙英, 等. 不同地区典型火腿的脂肪酸组成和挥发性风味物质对比分析[J]. 中国调味品, 2025, 50(11): 173−180. [XU Heng, WANG Xiaoyu, PEI Longying, et al. Comparative analysis of fatty acid composition and volatile flavor substances of typical ham from different regions[J]. China Condiment, 2025, 50(11): 173−180.]

［41］ 唐弦, 陈卫林, 马文瑞, 等. 基于新疆优良酵母菌发酵酸马乳中营养物质及风味物质分析[J/OL]. 食品工业科技, 1−14 [2025-11-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070181. ［TANG X, CHEN W L, MA W R, et al. Analysis of nutrients and flavor compounds in koumiss fermented with Xinjiang-derived superior yeast strains[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−14 [2025-11-18]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070181.］

［42］ VARLET V, PROST C, SEROT T. Volatile aldehydes in smoked fish: Analysis methods, occurence and mechanisms of formation[J]. Food Chemistry, 2007, 105(4): 1536−1556.

［43］ 徐慢. 谷氨酸—木糖美拉德反应中间体制备及其加工风味[D]. 无锡: 江南大学, 2019. ［XU Man. Preparation of glutamic acid-xylose Maillard reaction intermediate and its processing flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.］

［44］ 张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 116−121. ［ZHANG Yanrong, LÜ Chengwei, LIU Tong, et al. Effect of different drying methods on volatile flavor components in *Agaricus blazei*[J]. Food Science, 2016, 37(10): 116−121.］

［45］ 贝翠平, 柳艳霞, 赵改名, 等. 基于电子鼻与 GC-MS 分析精氨酸-葡萄糖美拉德反应体系挥发性风味成分的差异性[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 146−154. ［BEI Cuiping, LIU Yanxia, ZHAO Gaiming, et al. Analysis of the difference of volatile flavor components of arginine-glucose Maillard reaction system based on electronic nose and GC-MS[J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 146−154.］

［46］ 张玲, 罗嘉滨, 海金萍, 等. 海蜇皮酶解液美拉德反应产物的风味鉴定与分析[J]. 食品科学, 2012, 33(20): 257−261. ［ZHANG Ling, LUO Jiabin, HAI Jinping, et al. Analysis and evaluation of flavor compounds in Maillard reaction products of jellyfish protein peptic hydrolysate[J]. Food Science, 2012, 33(20): 257−261.］

［47］ 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 25−30. ［TANG Q S, LIU X M, CHI J W, et al. Effects of different drying methods on quality and volatile components of *Pleurotus eryngii*[J]. Food Science, 2016, 37(4): 25−30.］

［48］ 刘瑞, 刘智禹, 陈贝, 等. 双斑东方鲀鱼头美拉德反应工艺优化及挥发性风味物质分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(4): 109−115. ［LIU Rui, LIU Zhiyu, CHEN Bei, et al. Optimization of Maillard reaction process of *Takifugu bimaculatus* head and analysis of volatile flavor substances[J]. China Condiment, 2024, 49(4): 109−115.］

［49］ WANG Wenli, ZHANG Long, WANG Zhengquan, et al. Physicochemical and sensory variables of Maillard reaction products obtained from *Takifugu obscurus* muscle hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 40−46.

［50］ LI Xinzhi, LIU Shaoquan. Effect of pH, xylose content and heating temperature on colour and flavour compound formation of enzymatically hydrolysed pork trimmings[J]. LWT, 2021, 150: 112017.

［51］ 里奥, 范海默特. 化合物香味阈值汇编(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2015. ［van GEMERTL L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media (2nd ed)[M]. Beijng: Science Press, 2015.］

［52］ 毛兴萍, 黄晓琴, 张丽霞, 等. 日照白茶风味品质及关键呈香物质分析[J]. 食品科学, 2025, 46(21): 201−210. ［MAO Xingping, HUANG Xiaoqin, ZHANG Lixia, et al. Analysis of flavor quality and key aroma compounds of Rizhao white tea[J]. Food Science, 2025, 46(21): 201−210.］

［53］ 吕喜茹, 郭亮, 常明昌, 等. 姬松茸粗多糖抗氧化作用[J]. 食用菌学报, 2010, 17(1): 69−71. ［LÜ Xiru, GUO Liang, CHANG Mingchang, et al. Antioxidant activity of polysaccharide from *Agaricus blazei* Murill[J]. Acta Edulis Fungi, 2010, 17(1): 69−71.］

［54］ 张雅琼. 酱油类黑精的结构鉴定及其抗氧化活性初步研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023. ［ZHANG Y Q. Structural identification and preliminary study on antioxidant activity of soy sauce melanoidins[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.］

［55］ SHON M Y, KIM T H, SUNG N J. Antioxidants and free radical scavenging activity of *Phellinus baumii* (*Phellinus* of Hymenochaetaceae) extracts[J]. Food Chemistry, 2003, 82(4): 593−597.