张柳琳, 赵立艳, 苏安祥, 等. 常压和高压煮制对双孢蘑菇风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 253−261. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010125

ZHANG Liulin, ZHAO Liyan, SU Anxiang, et al. Effects of Atmospheric and High-pressure Cooking on Flavor Compounds in *Agaricus bisporus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 253−261. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010125

· 分析检测 ·

常压和高压煮制对双孢蘑菇风味物质的影响

张柳琳[1], 赵立艳[2], 苏安祥[1], 胡秋辉[1,*]

（1.南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023;
2.南京农业大学食品科学技术学院, 江苏南京 210095）

摘　要: 本研究探究压力对双孢蘑菇水提液风味品质的影响，通过对比常压煮制法（BO）和高压煮制法（PO）工艺，分析压力差异对风味物质的影响。结果表明：非挥发性风味物质中，BO 组总游离氨基酸（66.79±0.05 mg/g）、鲜味核苷酸（366.38±33.10 μg/g）、等效鲜味浓度值（10600.56±1370.38 mg MSG/G）显著高于 PO 组（P<0.05），但有机酸含量较低；电子舌分析进一步表明，BO 组在甜味、咸味和涩味传感器上的响应值更具优势。挥发性成分分析显示，气相色谱-质谱技术（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）从 BO 组鉴定出 20 种香气物质，以酸类、醇类为主，且大多具有愉悦香气特征；PO 组则检测出 30 种，以芳香类和烷烃类为主。气相-离子迁移谱联用技术（gas chromatography-ion mobility spectrometry，GC-IMS）共检出 28 种挥发性风味组分，其中 BO 组醇类、醛类和酯类风味物质丰富度更高。电子鼻证实，两种煮制方式在香气轮廓上存在显著差异，表明常压煮制更有利于形成层次丰富的风味特征。本研究将为双孢蘑菇风味物质的精深加工工艺优化及高附加值产品开发提供理论依据和技术支撑。

关键词: 食用菌, 双孢蘑菇, 煮制方式, 鲜味, 风味成分

中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0253−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010125

本文网刊:

Effects of Atmospheric and High-pressure Cooking on Flavor Compounds in *Agaricus bisporus*

ZHANG Liulin[1], ZHAO Liyan[2], SU Anxiang[1], HU Qiuhui[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China;
2.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China）

Abstract: This study explored the influence of pressure on the flavor quality of the aqueous extract of *Agaricus bisporus*. By comparing the processes of boiling under normal pressure (BO) and boiling under high-pressure (PO), the effect of pressure differences on flavor substances was analyzed. The results showed that among the non-volatile flavor substances, the total free amino acids (66.79±0.05 mg/g), umami nucleotides (366.38±33.10 μg/g), and equivalent umami concentration value (10600.56±1370.38 mg MSG/G) in the BO group were significantly higher than those in the PO group (P<0.05), but the organic acid content was lower. Electronic tongue analysis further indicated that the BO group had more advantages in the response values of the sweet, salty, and astringent sensors. The analysis of volatile components showed that gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) identified 20 aroma substances in the BO group, mainly acids and alcohols, most of which had pleasant aroma characteristics. The PO group detected 30 substances, mainly aromatics and alkanes. Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) detected a total of 28 volatile flavor components, among which the BO group had a higher richness of alcohols, aldehydes, and esters. Electronic nose confirmed that there were significant differences in the aroma profiles between the two boiling methods, indicating that boiling under normal pressure was more conducive to the formation of rich flavor characteristics. This study will provide a theoretical basis and technical support for the

收稿日期: 2025−01−14

作者简介: 张柳琳（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: liulinzhangwork@163.com。

*** 通信作者:** 胡秋辉（1962−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: qiuhuihu@nufe.edu.cn。

optimization of the deep processing technology of flavor substances in *Agaricus bisporus* and the development of high-value-added products.

Key words: edible fungus; *Agaricus bisporus*; cooking method; umami; flavor components

双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*),又称白蘑菇,是世界上产量最高、种植面积最广、销量最高的食用菌之一[1],因营养价值丰富,具有独特鲜味,深受人们喜爱。食用菌的风味主要来自呈味氨基酸、呈味核苷酸、短肽、有机酸、可溶性糖等[2],这些物质共同作用赋予食用菌鲜美滋味。食用菌通常经过烹调处理供人们食用,但烹调过程中会造成某些化学成分的降解和损失[3],常见烹调方式有煮制[4]、蒸制[5]、烤制[6]、油炸[7],目前已衍生出微波[8]、酶解[9] 等新型风味物质加速释放的处理方法。不同的处理方式将诱发一系列化学反应,产生许多挥发性中间体将有助于形成独特的蘑菇风味[10],但是,不同烹调方式对食用菌风味物质的影响有待进一步研究。

煮制方式是食用菌最传统的烹调方式之一[11],在家庭烹调中常加入食用菌从而提升汤料的整体风味,以煮制方式使食用菌中各种非挥发性化合物充分溶解在提取液中,赋予其甜味、咸味和鲜味[12]。在实际生活中,主要有常压煮制和高压煮制两种煮制方式,常压煮制作为最原始的煮制方式具有成本低,操作简便的优点,而高压煮制可以有效缩短煮制时间,提高风味释放速率[13]。目前,两种煮制方式的对比研究大多以鸡肉[14]、猪肉[15] 等肉类为原料进行展开,但针对压力对食用菌风味释放规律的相关对比研究暂不清楚。另外,低盐对鲜味增强有着促进作用,Na^+通过与鲜味氨基酸和 5'-核苷酸相互作用协同增强鲜味[16]。与此同时,Cl^-的存在可以降低酸味感知,同时增强甜味和鲜味感[17],因此在煮制过程中添加少量盐有利于食用菌风味物质的释放[18]。添加少量食盐,模拟真实煮制处理方式对双孢蘑菇进行处理,对挥发性化合物和非挥发性化合物进行分析和鉴定,阐明不同煮制方式对风味物质的影响规律,对更好地开发和利用食用菌风味物质具有重要意义。除煮制方式外,原料选取也较为重要,新鲜食用菌易腐败变质,商业价值较低,而干制食用菌可以降低运输、加工成本,从而提高经济价值。

本研究将着眼于食用菌的工业化生产,以干制双孢蘑菇为原料,粉碎处理以提高溶解效率,再分别用两种优化后的煮制方法(常压煮制和高压煮制)提取双孢蘑菇中的风味物质,并对其中的风味物质进行对比表征,该研究为双孢蘑菇风味物质的提取与在调味品领域的进一步加工提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

双孢蘑菇 北域珍奇山林食品有限公司;5'-腺苷酸(5'-AMP)、5'-胞苷酸(5'-CMP)、5'-肌苷酸(5'-IMP)、5'-鸟苷酸(5'-GMP)、酒石酸、苹果酸、琥珀酸、柠檬酸、葡萄糖、果糖、海藻糖、甘露醇 上海源叶生物科技有限公司;甲醇、乙腈 色谱纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;四丁基氢氧化铵、2-辛醇(>98%) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

FW 高速粉碎机 天津市泰斯特仪器有限公司;MY-QC50A5 高压热水浸提锅 美的生活电器制造有限公司;LA8080 超高速全自动氨基酸分析仪 日立科学仪器有限公司;1260 高效液相色谱仪 安捷伦科技有限公司;TS-5000Z 电子舌系统 日本 INSENT 公司;7890A 气相色谱-5975C 质谱联用仪 安捷伦科技有限公司;Flavour Spec© GC-IMS 仪 德国 G.A.S 公司;PEN3 电子鼻 德国 AIRSENSE 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理 原料双孢蘑菇干品使用粉碎机粉碎,并过 80 目筛,储存待用。

1.2.2 样品制备 参照 Lu 等[19] 和张治文[20] 的制备方法,结合预实验结果获得具体参数条件,双孢蘑菇粉按照以下条件进行制备:

常压热水煮制法(BO):双孢蘑菇粉按料液比 1∶4 加入去离子水,添加 0.6% 食盐,于室温溶解后,在 70 ℃ 条件下蒸煮 2.5 h。待溶液冷却至室温,经双层纱布过滤,对滤液进行离心处理(10000 r/min,4 ℃,20 min),收集上清液,真空冷冻干燥得粉末状双孢蘑菇粉,于−20 ℃ 保存。

高压热水煮制法(PO):双孢蘑菇粉按料液比 1∶4 加入去离子水,添加 0.6% 食盐,于室温溶解,在蒸煮压力 50 kPa 下蒸煮 2.5 h,后续操作与 BO 法相同。

1.2.3 游离氨基酸测定 取冻干样品粉末 0.1 g 加入超纯水配制成 2 mg/mL 样品溶液,加入等量 10% 磺基水杨酸进行除蛋白操作,漩涡混匀后于 12000 r/min 条件下离心 15 min,上清液过 0.22 μm 滤膜后于氨基酸自动分析仪中分析,检测波长为 570 nm 和 440 nm[21−22]。

1.2.4 呈味核苷酸测定 参照 Zhou 等[23] 的实验方法,称取样品粉末配制成 50 mg/mL 溶液,并过 0.45 μm 滤膜待测。采用 Zorbax Eclipse SB-C_{18}(250 mm×4.6 mm, 5 μm)色谱柱对样品进行分析,流动相选择超纯水-甲醇-冰乙酸-四丁基氢氧化铵(894.5∶100∶5∶0.5),设置检测波长 254 nm,流速 1 mL/min,柱温 25 ℃,进样量 10 μL。

1.2.5 滋味活度值计算 滋味活度值(taste activity values, TAV)是评价游离氨基酸、呈味核苷酸、有机酸浓度对滋味的影响程度的指标。当 TAV>1 时,表

示该物质对样品的滋味有重要影响，且数值越大，影响越显著；当 TAV<1 时，表示该物质对样品的滋味影响不大。TAV 的计算公式如下：

$$TAV = \frac{C_i}{T_i} \quad 式（1）$$

式中：C_i 表示测得物质的浓度，mg/g；T_i 表示该物质阈值，mg/g。

1.2.6　等效鲜味浓度计算　等效鲜味浓度（equivalent umami concentration，EUC）指在 100 g 干物质中，与鲜味物质总量相对应的味精当量。计算公式[24] 如下：

$$EUC = \sum a_i b_i + 1218\left(\sum a_i b_i\right)\left(\sum a_j b_j\right) \quad 式（2）$$

式中：EUC 为等效鲜味浓度，即 mg MSG/g；a_i 为呈鲜氨基酸（谷氨酸、天冬氨酸）浓度，mg/g；b_i 为呈鲜氨基酸对应的鲜度系数（谷氨酸：1；天冬氨酸：0.077）；a_j 为呈味核苷酸（5’-肌苷酸、5’-鸟苷酸、5’-腺苷酸）浓度，单位 mg/g；b_j 为呈味核苷酸对应的鲜度系数（5’-肌苷酸=1；5’-鸟苷酸=2.3；5’-腺苷酸=0.18）；1218 为协同作用常数。

1.2.7　有机酸测定　对 Pei 等[25] 的测定方法加以改进，称取样品粉末以超纯水溶解配制成 20 mg/mL 样品溶液，离心后 0.45 μm 滤膜过滤待测。采用 Zorbax Eclipse XDB-C_{18} 色谱柱（250×4.6 mm，5 μm），柱温 25 ℃，流动相为体积比 95∶5 的 KH_2PO_4（0.01 mol/L，pH2.55）和甲醇，检测波长 215 nm，流量 0.5 mL/min；进样量为 10 μL。

1.2.8　电子舌指纹图谱分析　采用 TS-5000Z 电子舌系统对 1 mg/mL 的样品溶液进行检测，选择其中较为稳定的 3 次结果进行分析。

1.2.9　GC-MS 测定　对条件参数进行调整[26−27]，每组设置三个平行，以 2-辛醇为内标（50 μg/mL，10 μL），与 5 mL 样品溶液（50 mg/mL）混合放入 20 mL 顶空进样瓶中，DVB/CAR/PDMS 萃取头活化并插入进样瓶隔垫内。在 60 ℃ 水浴条件下平衡 15 min，顶空静态吸附 30 min，于 GC-MS 进样口解吸 3 min。

色谱条件：色谱柱选用 HP-5 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为氦气，流速为 1 mL/min，进样口温度为 250 ℃。色谱柱升温程序为：初始温度为 40 ℃ 保持 3 min，以 3 ℃/min 的速度升至 70 ℃ 后，再以 5 ℃/min 的速度升至 180 ℃，最后以 10 ℃/min 的速度升至 230 ℃，保持时间 2 min。

质谱条件：选择离子源 EI 模式，离子源温度为 230 ℃，四级杆温度为 150 ℃，接口温度为 250 ℃，电离电压为 70 eV，采用全扫描模式，质量扫描范围为 30~550 m/z。

定性方法：通过将 GC-MS 分离分析获得的质谱图与 NIST 等标准质谱库进行检索比对（匹配度>80%），并同时对比其计算保留指数与文献中的标准保留指数，结合两者信息对化合物进行定性。

定量分析：采用内标法进行定量分析，通过化合物与内标化合物的峰面积比值计算各挥发性成分的含量。

1.2.10　GC-IMS 测定　在相关研究基础上有所调整[28]，取浓度为 1 mg/mL 的样品溶液 2 mL 置于 20 mL 的顶空进样瓶中，在 60 ℃ 搅拌速度下孵育 20 min，利用系统的进样器单元在 85 ℃ 下以非分流模式自动注入 500 μL 气体。

GC-IMS 条件：色谱柱型号 FS-SE-54-CB-1（非极性，15 m×0.53 mm×0.5 μm）；色谱柱温度为：60 ℃，运行时间为 30 min，载气为高纯氮气（纯度 99.999%），漂移管流量为 150 mL/min，初始流速为 2 mL/min，保持 2 min，8 min 内升至 10 mL/min，再升至 100 mL/min 保持 10 min，20~30 min 升至 150 mL/min。IMS 漂移管温度为 45 ℃，漂移气流速为 150 mL/min。计算各挥发性化合物的保留指数（retention index，RI），将 RI 值和漂移时间与 GC-IMS 库中物质进行对比定性。

1.2.11　电子鼻分析　取浓度为 1 mg/mL 样品溶液 10 mL 于 40 mL 顶空进样瓶中，静置 30 min，于 PEN3 电子鼻系统中检测。设置以下参数：载气流速为 400 mL/min，传感器归零时间为 5 s，样品准备时间为 5 s，分析采样时间为 60 s，清洗时间为 80 s，样品平行测定三次。电子鼻系统传感器及其响应特征参考物质见表 1。

表 1　电子鼻系统传感器及其响应特征参考物质

Table 1　Reference materials for electronic nose system sensors and their response characteristics

序号	传感器	响应特征物质
1	W1C	芳香类、苯类
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	芳香类、氨类
4	W6S	氢化物
5	W5C	短链烷烃、芳香类
6	W1S	甲烷类
7	W1W	无机硫化合物
8	W2S	醇类、醛酮类
9	W2W	芳香类、有机硫化物
10	W3S	高浓度烷烃类

1.3　数据处理

结果以平均值±标准差的形式表示（n=3）。使用 SPSS 26.0 软件处理数据，使用 Origin 2022 软件绘制 PCA、雷达图等，使用 Laboratory Analytical Viewer（LAV 版本 2.0.0，G.A.S.，多特蒙德，德国）绘制三维图、伪色图等。

2　结果与分析

2.1　游离氨基酸含量分析

游离氨基酸对风味成分的分析具有重要参考价值，根据呈味特性可分为鲜味、甜味、苦味和芳香族氨基酸。天冬氨酸和谷氨酸作为鲜味氨基酸，能与甜

味氨基酸、鲜味核苷酸产生协同效应[29−30]。实验数据显示(表 2), PO 组天冬氨酸含量(0.90±0.01 mg/g)约为 BO 组的 4 倍, 而 BO 组谷氨酸含量高达 20.31±2.22 mg/g, 两组间差异具有统计学意义(P<0.05)。BO 组的苦味氨基酸及氨基酸总量指标均明显优于 PO 组, 鲜味氨基酸、甜味氨基酸和芳香族氨基酸的差异不显著(P>0.05)。通过对比表明, 常压煮制更有利于游离氨基酸的富集, 该现象可能是由于高压条件促进美拉德反应发生, 氨基酸作为前体物质参与非酶褐变反应, 导致水提液中游离氨基酸含量降低[9]。此外, 部分氨基酸的热稳定性较差, 在高温高压条件下易发生氧化降解[31]。谷氨酸在两组水提液中均表现最高浓度, 其 TAV 明显高于其他 16 种氨基酸, 表明该物质对双孢蘑菇水提液的鲜味特征起主导作用。相比之下, 同为鲜味氨基酸的天冬氨酸 TAV<1, 其风味贡献度相对有限。甜味氨基酸中, 丙氨酸表现出仅次于谷氨酸的 TAV(TAV>20), 提示其不仅能增强体系甜味感知, 更能通过与鲜味氨基酸的协同增效作用提升整体风味复杂度[32]。综合分析各游离氨基酸含量及其 TAV 可得出: 谷氨酸和丙氨酸是水提液风味体系的关键呈味物质, 常压煮制工艺在保留这两种氨基酸方面具有明显优势。结合目标呈味氨基酸浓度及总游离氨基酸含量等指标, 本研究证实常压煮制法是获得更多呈味氨基酸的煮制方法。

2.2 呈味核苷酸含量分析

呈味核苷酸对食用菌的鲜味特征有极大贡献, 一些核苷酸(5'-IMP、5'-GMP)除了自身具有鲜味特征外, 也能与鲜味氨基酸产生协同效应, 从而大大提高鲜味强度, 因此常作为鲜味剂使用。5'-AMP 不具有鲜味特征, 但可以有效降低食用菌的苦味和涩味, 提供甜味强度[30]。本研究测定了两种煮制方式下双孢蘑菇水提液中四种主要 5'-核苷酸的含量(表 3)。比较鲜味核苷酸含量可知, BO 组含量大于 PO 组, 约为后者的两倍, 这可能是由于在适宜的温度下会促进 ATP 的降解及其代谢产物的扩散, 从而增加核苷酸的含量, 但高压条件下可能会导致核苷酸的降解或变性[34]。三种核苷酸的 TAV 均小于 1, 说明呈味核苷酸对双孢蘑菇水煮液的滋味贡献并不显著。此外, BO 组的 EUC 值显著高于 PO 组(P<0.05), 由于 EUC 值与鲜味氨基酸及呈味核苷酸含量相关, 该结果与鲜味氨基酸、呈味核苷酸的结论一致, 这可以说明, 常压煮制法在一定程度上具有提升双孢蘑菇水提液风味的潜力, 这与 Li 等[35] 实验结论相似, 即高压处理后的菌菇汤中 5'-核苷酸含量较水煮条件有所降低。

2.3 有机酸含量分析

有机酸与氨基酸、芳香化合物和其他挥发性风味物质的合成和代谢有关, 对食用菌中风味物质的合成有一定影响。琥珀酸不仅能与鲜味氨基酸产生协

表 2 两种方法对水提液中游离氨基酸含量的影响及 TAV

Table 2 Effects of the two methods on the content of free amino acids in the aqueous extract and TAV

游离氨基酸	含量(mg/g)		呈味特征[33]	味道阈值(mg/g)[22]	TAV	
	BO	PO			BO	PO
天冬氨酸	0.23±0.01^{b}	0.90±0.01^{a}	鲜/酸	1.00	0.23	0.90
谷氨酸	20.31±2.22^{a}	14.88±0.05^{b}	鲜/酸	0.30	67.70	49.60
丙氨酸	12.30±2.99^{a}	12.02±0.05^{a}	甜	0.60	20.50	20.03
甘氨酸	1.12±0.39^{a}	1.66±0.01^{a}	甜	1.30	0.86	1.28
丝氨酸	4.54±1.25^{a}	3.25±0.01^{a}	甜	1.50	3.03	2.17
苏氨酸	7.24±0.63^{a}	1.98±0.00^{b}	甜	2.60	2.78	0.76
组氨酸	1.27±0.00^{a}	0.86±0.00^{b}	苦	0.20	6.35	4.30
脯氨酸	–	6.00±0.03	甜/苦	3.00	–	2.00
亮氨酸	3.49±0.03^{a}	2.39±0.01^{b}	苦	1.90	1.84	1.26
缬氨酸	3.87±0.00^{a}	2.93±0.01^{b}	甜/苦	0.40	9.68	7.33
蛋氨酸	–	–	甜/苦	0.30	–	–
异亮氨酸	2.06±0.00^{a}	1.74±0.00^{b}	苦	0.90	2.29	1.93
精氨酸	2.39±0.01^{a}	1.36±0.00^{b}	甜/苦	0.50	4.78	2.72
苯丙氨酸	2.26±0.06^{a}	1.51±0.01^{b}	苦	0.90	2.51	1.67
酪氨酸	1.50±0.09^{a}	1.07±0.02^{b}	苦	–	–	–
半胱氨酸	0.76±0.56^{b}	3.70±0.08^{a}	苦	–	–	–
赖氨酸	3.43±0.01^{a}	1.75±0.01^{b}	甜/苦	0.50	6.86	3.50
鲜味氨基酸	20.54±2.21^{a}	15.78±0.06^{a}	–	–	–	–
甜味氨基酸	26.47±1.50^{a}	25.77±0.04^{a}	–	–	–	–
苦味氨基酸	11.82±0.03^{a}	8.41±0.02^{b}	–	–	–	–
芳香族氨基酸	7.96±0.70^{a}	8.02±0.10^{a}	–	–	–	–
总游离氨基酸	66.79±0.05^{a}	57.98±0.14^{b}	–	–	–	–

注: "–"表示未检测到; BO: 常压煮制法; PO: 高压煮制法; 鲜味氨基酸: 天冬氨酸、谷氨酸; 甜味氨基酸: 丙氨酸、甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸、组氨酸、脯氨酸; 苦味氨基酸: 亮氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、精氨酸; 芳香族氨基酸: 苯丙氨酸、酪氨酸、半胱氨酸、赖氨酸; 同一行中不同字母标记的数据存在显著差异(P<0.05)。

表 3　两种方法对水提液中呈味核苷酸含量的影响及 TAV、EUC 值

Table 3　Effects of the two methods on the content of flavor nucleotides in aqueous extract and TAV, EUC values

呈味核苷酸	含量(μg/g)		呈味特征[33]	味道阈值(mg/g)[22]	TAV	
	BO	PO			BO	PO
5'-CMP	7299.05±423.15^{a}	9198.13±989.11^{a}	–	–	–	–
5'-AMP	14.73±0.89^{a}	16.79±3.60^{a}	甜	0.5	0.02	0.04
5'-GMP	45.24±9.80^{a}	41.31±2.62^{a}	鲜	0.60	0.08	0.07
5'-IMP	321.14±35.74^{a}	138.54±9.12^{b}	鲜	1.30	0.25	0.11
鲜味核苷酸	366.38±33.10^{a}	179.86±10.60^{b}	鲜	–	–	–
EUC值(mg MSG/g)	10600.56±1370.38^{a}	4321.62±232.49^{b}	–	–	–	–

注："–"表示未检测到；BO：热水煮制法；PO：高压煮制法；鲜味核苷酸：5'-GMP、5'-IMP；同一行中不同字母标记的数据存在显著差异(P<0.05)。

同效应，还能与钠离子螯合形成琥珀酸钠—该化合物与谷氨酸钠具有相似的呈味特性，当其与谷氨酸及柠檬酸形成复合体系时，可产生显著的鲜味增益效应[25,36]。根据表 4 结果可知，不同煮制工艺对有机酸分布有显著影响：PO 组中三种有机酸含量较 BO 组有显著提升(P<0.05)，其中琥珀酸含量达 21.44±0.48 mg/g，约为 BO 组的四倍，这一现象表明高压处理能有效促进琥珀酸的溶出。柠檬酸具有良好的热稳定性[9]，高压处理更有利于柠檬酸从双孢蘑菇组织内部溶出，使得 PO 中柠檬酸含量更高。从 TAV 来看，四种有机酸(TAV>1)对风味体系具有实质性贡献，其中酒石酸与琥珀酸呈现主导作用。因此，根据两种水提液中有机酸含量来看，高压煮制法能有效提高双孢蘑菇水提液中有机酸的提取率，从而与其他呈味物质产生交互作用大大提升整体鲜味。

表 4　两种方法对水提液中有机酸含量的影响及 TAV

Table 4　Effects of the two methods on the content of organic acids in aqueous extract and TAV

有机酸	含量(mg/g)		味道阈值(mg/g)[22]	TAV	
	BO	PO		BO	PO
酒石酸	0.98±0.01^{b}	1.54±0.03^{a}	0.02	49.00	77.00
苹果酸	12.22±0.07^{a}	13.00±0.07^{a}	0.49	24.94	26.54
柠檬酸	0.68±0.02^{b}	0.92±0.04^{a}	0.45	1.51	2.04
琥珀酸	5.84±0.01^{b}	21.44±0.48^{a}	0.11	53.09	194.91

注：BO：热水煮制法；PO：高压煮制法；同一行中不同字母标记的数据存在显著差异(P<0.05)。

2.4　电子舌结果分析

对两种提取方式下的水提液进行电子舌指纹图谱分析，结果表明两种水提液滋味差异较小(图 1A)。响应值为负值是指该味觉物质浓度低于人的尝味阈值范围，但并不代表不存在该味觉物质。BO 样品组在甜味、咸味、酸味和涩味传感器上的响应值略高于 PO 样品组，PO 样品组在苦味传感器上的响应值略高于 BO 样品组，对比其他传感器的响应值，两者无明显差异。从电子舌结果来看，BO 样品组整体滋味较 PO 样品组略有优势，所得水提液滋味更加醇厚。对电子舌结果进行主成分分析(图 2B)，第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 贡献率分别为 66.3%和 21.1%，两个主成分的累计贡献率为 87.4%(总贡献率≥70%，数据有效)，说明两个主成分可以很好地反映出两种煮制方式间的关系。两者在图上的分布间隔较近，说明结果兼具部分差异性和部分相似性，这与电子舌雷达图结果对应，两样品在某些传感器上的响应值差距不大。

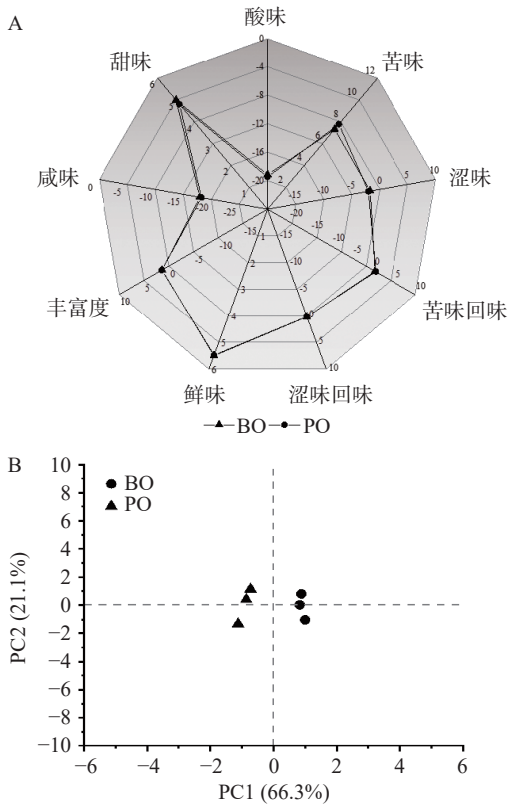


图 1　两种水提液的电子舌雷达图及 PCA

Fig.1　E-tongue radar map and PCA of the two aqueous extracts

2.5　GC-MS 结果分析

基于 GC-MS 的挥发性物质分析表明，两种水提液中共鉴定出 38 种挥发性化合物，其中 BO 组 20 种，PO 组 30 种(表 5)。结果表明，压力是双孢蘑菇水提液风味物质存在差异的原因之一。BO 组中酸类化合物含量显著高于 PO 组(P<0.05)，独具果香、脂肪味的己酸、坚果味特征的苯甲酸，但由于酸类化合物的阈值普遍偏高，因此该类物质对水提液的风味贡献较小。醇类通常被描述为香气柔和，具有植物和泥土气味[37]，BO 组中检测到 2,3-丁二醇、苯甲醇、

苯乙醇三种醇类化合物，三种物质风味柔和，为 BO 组水提液带来较为积极的风味贡献。醛类化合物香气阈值较低，一般具有水果、草、脂肪等特征气味[38]，BO 组检测到具有杏仁气味的苯甲醛，PO 组中含有油脂味的顺-4-庚烯醛。在 PO 组中检测到种类丰富的芳香族化合物，主要为具有烤制和焦糖气

表 5　基于 GC-MS 的双孢蘑菇水提液挥发性风味物质分析

Table 5　Analysis of volatile compounds in aqueous extracts of *Agaricus bisporus* based on GC-MS

分子式	化合物	CAS号	气味描述	含量(mg/kg)	
				BO	PO
	酸类（6）				
$C_2H_4O_2$	醋酸	64-19-7	醋味	557.62±34.12^a	479.92±27.91^b
$C_5H_{10}O_2$	异戊酸	503-74-2	汗臭	435.29±34.14	–
$C_6H_{12}O_2$	己酸	142-62-1	果香、脂肪	592.84±50.16	–
$C_7H_6O_2$	苯甲酸	65-85-0	坚果	140.73±52.24	–
$C_8H_{16}O_2$	辛酸	124-07-2	花香、果香	–	279.27±40.64
$C_9H_{18}O_2$	正壬酸	112-05-0	发霉味	314.45±22.28^b	433.89±23.88^a
	醇类(3)				
$C_4H_{10}O_2$	2,3-丁二醇	513-85-9	果味	31.01±2.49	–
C_7H_8O	苯甲醇	100-51-6	苹果香气	4424.58±501.65^a	3143.92±192.27^b
$C_8H_{10}O$	苯乙醇	60-12-8	玫瑰香	205.8±16.53	–
	醛类(2)				
C_7H_6O	苯甲醛	100-52-7	杏仁气味	383.22±30.97	–
$C_7H_{12}O$	顺-4-庚烯醛	6728-31-0	油脂香	–	322.41±42.35
	酮类（3）				
$C_6H_{10}O_3$	二氢-3-羟基-4,4-二甲基-2(3H)呋喃酮	599-04-2	棉花糖味	–	985.75±162.24
C_4H_7NO	2-吡咯烷酮	616-45-5	水果味	427.75±70.65^b	8909.48±398.19^a
$C_6H_8O_4$	2,3-二氢-3,5二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	28564-83-2	–	–	505.25±26.26
	酯类(2)				
$C_{20}H_{38}O_4$	己二酸辛酯	65185-85-5	–	18.37±0.54^b	128.40±10.93^a
$C_{24}H_{38}O_4$	邻苯二甲酸二酯	117-84-0	–	–	395.32±11.57
	芳香族（10）				
$C_{14}H_{11}N$	2-氨基蒽	613-13-8	–	–	238.96±40.52
$C_8H_9NO_2$	甲氧基苯肟	67160-14-9	–	–	351.94±53.54
$C_{21}H_{30}$	芳香族化合物1	55682-87-6	–	180.49±9.03	–
$C_{17}H_{12}ClN_3O_3$	芳香族化合物2	63673-76-7	–	48.86±6.83^b	271.71±23.82^a
$C_{24}H_{20}ClN_3O$	芳香族化合物3	55056-35-4	–	–	88.97±8.67
$C_6H_8N_2$	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	泥土味	1364.73±151.52^b	8917.65±573.92^a
$C_7H_{10}N_2$	2-乙基-6-甲基吡嗪	13925-03-6	烤土豆味-	–	315.03±34.46
$C_7H_8N_2$	2-甲基-6-乙烯吡嗪	13925-09-2	榛子味	–	984.32±171.81
$C_8H_{12}N_2$	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	13360-65-1	可可味	–	1667.28±80.83
$C_7H_{11}NO$	6-乙酰-1,2,3,4-四氢吡啶	19615-27-1	–	–	308.31±25.85
	烷烃类（9）				
C_9H_{20}	2,3,5-三甲基己烷	1069-53-0	–	–	100.95±3.5
$C_{27}H_{56}$	正二十七烷	593-49-7	–	13.99±1.96^b	90.85±4.58^a
$C_{10}H_{22}$	2,3-二甲基辛烷	7146-60-3	–	–	86.50±8.7
$C_{16}H_{34}$	正十六烷	544-76-3	–	17.01±4.12^b	64.68±3.7^a
C_9H_{20}	2,4-二甲基庚烷	2213-23-2	–	9.67±0.16^b	59.81±6.87^a
$C_{19}H_{40}$	正十九烷	629-92-5	–	–	226.32±31.12
$C_{15}H_{32}$	正十五烷	629-62-9	蜡味	10.93±0.49^b	79.63±3.41^a
$C_{28}H_{58}$	二十八烷	630-02-4	–	17.22±3.75^b	41.69±29.51^a
$C_{28}H_{58}$	9-辛基-二十烷	13475-77-9	–	–	88.29±3.75
	其他（3）				
C_3H_9N	三甲胺	75-50-3	鱼腥味	–	1457.90±207.21
$C_4H_{12}ClNO_4$	高氯酸四甲基铵	2537-36-2	–	703.95±36.34	–
$C_4H_9NO_2$	2-羟基-N-甲基丙酰胺	51676-15-4	–	–	941.15±76.39

注：“–”未检测到；BO：热水煮制法；PO：高压煮制法；芳香族化合物1：1H氢-三烯,2,3,4,5,6,7,8,9-八氢-1,1,4,4,9,9；芳香族化合物2：2-氯-4-(4-甲氧基苯基)-6-(4-硝基苯基)嘧啶；芳香族化合物3：7-氯-2,3-二氢-3-(4-N,N-对二甲氨基苯亚甲基)-5-苯基-1N-1,4-苯二氮-2-1；同一行中不同字母标记的数据存在显著差异(P<0.05)；气味描述参考网址https://www.perflavory.com/search.php。

味[39]的吡嗪类化合物，与 BO 组具有显著性差异（P<0.05），其中 2,5-二甲基吡嗪具有泥土气味，PO 组含量（8917.65±573.92 mg/kg）是 BO 组的六倍，3-乙基-2,5-甲基吡嗪、6-乙酰-1,2,3,4-四氢吡啶和三甲胺作为 PO 组中独特的风味物质，其中三甲胺具有鱼腥味，这种不良风味成为了 PO 组整体香气的关键风味，这可能是由于高压引起的美拉德反应促进了不良气味的生成。因此，常压煮制法有利于保留愉悦柔和的风味前体，而高压处理通过美拉德反应生成更多芳香类、烷烃类特征性香气组分，但需优化反应条件以抑制不良副产物的形成。

2.6　GC-IMS 结果分析

GC-IMS 综合了气相色谱与离子迁移谱的优点，具有操作简便、高灵敏度的特点[40]，可以有效弥补 GC-MS 在低含量风味物质检测中的技术局限[28]。如图 2A 三维谱所示，BO 组显示出更为复杂的挥发性物质组成。同时，为更清楚地比较两样品间的数据差异，对反应物离子峰（RIP）和离子迁移时间进行归一化处理和降维处理（图 2B），发现两组样品主要挥发性风味物质均分布于 200~800 s 之间。指纹图谱分析（图 2C）进一步揭示：两组样品共鉴定出 28 种特征挥发性组分（排除二聚体），涵盖 6 类化学物质，各物质的香气特征见表 6。其中酸类挥发性风味物质

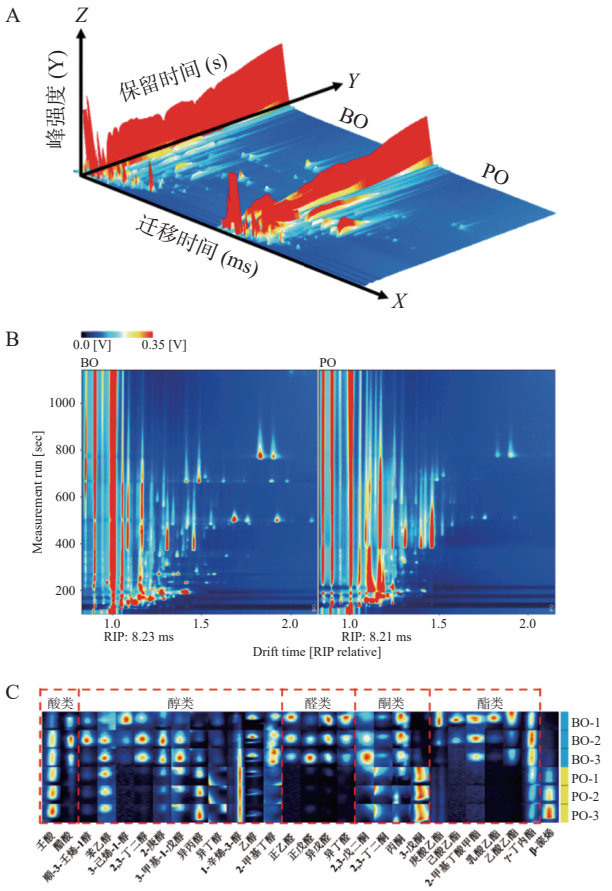


图 2　两种双孢蘑菇水提液的 GC-IMS 分析

Fig.2　GC-IMS analysis of aqueous extracts of two kinds of *Agaricus bisporus*

注：（A）三维图；（B）二维图；（C）指纹图谱。

表 6　两种双孢蘑菇水提液的 GC-IMS 挥发性风味物质的鉴定结果

Table 6　Results of GC-IMS volatile flavor compounds identification of aqueous extracts of two *Agaricus bisporus* species

分类	中文名称	CAS	分子式	RI	气味描述
酸类	壬酸	112-05-0	$C_9H_{18}O_2$	965.8	发霉味、辛辣味
	醋酸	64-19-7	$C_2H_4O_2$	643.5	醋味
醇类	顺-3-壬烯-1-醇	10340-23-5	$C_9H_{18}O$	1130.0	–
	苯乙醇	1960-12-8	$C_8H_{10}O$	1094.5	玫瑰香
	3-己烯-1-醇	544-12-7	$C_6H_{12}O$	848.0	青草味
	2,3-丁二醇	513-85-9	$C_4H_{10}O_2$	794.5	水果味、奶油味
	2-庚醇	543-49-7	$C_7H_{16}O$	890.1	柠檬味、青草味
	3-甲基-1-戊醇	589-35-5	$C_6H_{14}O$	848.8	辛辣味、酒味
	异丙醇	67-63-0	C_3H_8O	484.8	辛辣味
	异丁醇	78-83-1	$C_4H_{10}O$	636.4	苦味、涩味
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	$C_8H_{16}O$	971.4	蘑菇味
	乙醇	64-17-5	C_2H_6O	442.4	强烈、刺鼻味
	2-甲基丁醇	137-32-6	$C_5H_{12}O$	726.4	果香
醛类	正乙醛	66-25-1	$C_6H_{12}O$	795.9	辛辣、刺激
	正戊醛	110-62-3	$C_5H_{10}O$	738.6	发酵味、酸奶味
	异戊醛	590-86-3	$C_5H_{10}O$	654.4	巧克力味、麦芽味
	异丁醛	78-84-2	C_4H_8O	564.5	辛辣、苦杏仁
酮类	2,3-戊二酮	600-14-6	$C_5H_8O_2$	681.9	坚果味、奶油味
	2,3-丁二酮	431-03-8	$C_4H_6O_2$	594.9	奶油味、发酵味
	丙酮	67-64-1	C_3H_6O	512.1	辛辣味
	3-戊酮	96-22-0	$C_5H_{10}O$	678.1	–
酯类	庚酸乙酯	106-30-9	$C_9H_{18}O_2$	1086.8	花香、果香
	己酸乙酯	123-66-0	$C_8H_{16}O_2$	999.6	果味、苹果味
	2-甲基丁酸甲酯	868-57-5	$C_6H_{12}O_2$	736.5	果香
	乳酸乙酯	97-64-3	$C_5H_{10}O_3$	790.4	果味、奶油味
	乙酸乙酯	141-78-6	$C_4H_8O_2$	614.9	果味、甜味
	γ-丁内酯	96-48-0	$C_4H_6O_2$	925.4	干草味
其他	β-蒎烯	2437-95-8	$C_{10}H_{16}$	937.9	青草味、松木味

注：“–”表示无该物质的相关气味描述。气味描述参考网址https://www.perflavory.com/search.php。

与 GC-MS 结果一致；关键风味物质 1-辛烯-3-醇在两组中都存在，BO 组独有 2,3-丁二醇和 2-甲基丁醇等醇类；醛类化合物作为脂肪酸的降解产物，其低感知阈值对整体水提液风味具有较大贡献[41]；酯类化合物来源于脂质代谢反应和酯化反应，具有较低阈值。从 BO 组中鉴定出了 4 种醛类化合物和 6 种具有愉快气味特征的酯类化合物，这说明高压处理将导致醛类和酯类物质减少。两组中均检测出 4 种酮类化合物，如 3-戊酮、2,3-丁二酮等，酮类化合物既可由美拉德反应和不饱和脂肪酸氧化降解产生[42]，也可以由酯类化合物降解产生[43]。本研究发现，常压煮制法在抑制美拉德反应进程的同时，促使醛类、酯类等关键风味前体的保留率提升，从而提高水提液的丰富度。

2.7　电子鼻结果分析

对两种煮制方式下的双孢蘑菇水提液进行电子鼻分析检测（图 3A），结果显示：PO 组在 W1C、W3C、W5C 传感器上的响应值比 BO 组大，根据 GC-MS 结果可知，这是由于 PO 组中含有大量的芳香类挥发性化合物，因此对应芳香类化合物的传感器上的响应值

比 BO 组大。BO 组样品在 W5S、W1S、W6S、W2S 传感器上的响应值较大，其中 W2S 传感器对应醇酮醛类化合物，根据 GC-MS 与 GC-IMS 结果可知，BO 组中醇醛酮类化合物含量较大，因此对该传感器更敏感。由于 GC-MS 和 GC-IMS 检测鉴定出的挥发性风味物质有限，对于另外三种传感器的响应值差异暂时无法解释，后续将通过其他测定方法实验结果进行验证。图 3B 为基于电子鼻结果的 PCA 二维图，其中第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 的贡献率分别为 57.1% 和 24.6%，总贡献率为 81.7%（总贡献率≥70%，数据有效），说明 PC1 和 PC2 几乎包含了样品的所有信息，两种样品散点分布情况表明，电子鼻测定结果可以较为有效地区分这两种样品。

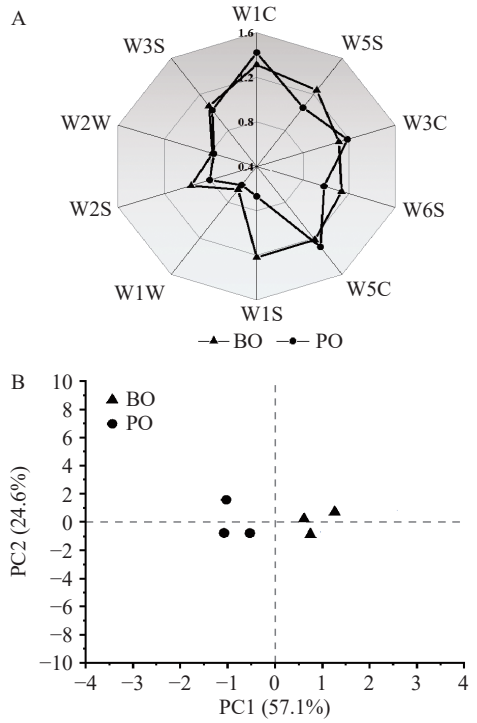


图 3 两种水提液的电子鼻雷达图及 PCA

Fig.3 E-nose radar map and PCA of the two aqueous extracts

3 结论

本研究通过多角度分析，系统阐明了常压与高压煮制工艺对双孢蘑菇水提液风味物质的影响。研究结果表明：在非挥发性风味物质层面，常压煮制显著促进游离氨基酸及呈味核苷酸的溶出，但也导致有机酸提取率显著降低；挥发性香气物质检测显示，常压煮制法可以有效保留醛类、醇类、酯类等特征香气组分，并得到具有愉悦气味特征的苯甲醛、苯甲醇等挥发性风味物质，该结论在电子鼻传感器响应值中得到进一步验证。基于风味物质测定结果，本研究揭示两种煮制工艺的风味释放规律：常压煮制工艺通过维持温和的热力学环境，在降低美拉德反应强度的同时，最大限度保留热敏性风味物质；而高压煮制工艺虽能提高有机酸提取率，但高压环境将加速氨基酸、核苷酸氧化降解及挥发性物质逸散，同时易产生三甲胺、2,5-二甲基吡嗪等不良风味物质。因此，综合滋味特征与香气特征结果，常压煮制被证实为更优的双孢蘑菇风味物质提取方法，将为双孢蘑菇风味的精准调控提供理论支撑。

© 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] XU Yeling, CHEN Gaole, CUI Zhiyong, et al. Novel umami peptides from mushroom (*Agaricus bisporus*) and their umami enhancing effect via virtual screening and molecular simulation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024. DOI:10.1021/acs.jafc.3c04608.

[2] SUN Libin, ZHANG Zhiyong, XIN Guang, et al. Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 176−187.

[3] DONG Xiuping, LI Deyang, HUANG Ying, et al. Nutritional value and flavor of turbot (*Scophthalmus maximus*) muscle as affected by cooking methods[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1972−1985.

[4] 王慧清, 马栋, 吴素蕊, 等. 松茸菌汤熬制工艺参数优化及风味成分分析[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 25−30. [WANG Huiqing, MA Dong, WU Surui, et al. Optimization of processing conditions and analysis of volatile compounds in pine-mushroom (*Tricholoma matsutake* Sing.) soup[J]. Food Science, 2015, 36(16): 25−30.]

[5] 李晓龙, 杨焱, 李文, 等. 不同烹饪方式对鹿茸菇营养特性和非挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 304−312. [LI Xiaolong, YANG Yan, LI Wen, et al. Effects of different cooking methods on nutritional properties and non-volatile flavor substances of *Lyophyllum decastes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 304−312.]

[6] WANG Linhan, QIAO Kaina, DUAN Wen, et al. Comparison of taste components in stewed beef broth under different conditions by means of chemical analyzed[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(2): 955−964.

[7] 张沙沙, 孙达锋, 罗晓莉, 等. 鸡[土从]菌油炸前后风味物质的变化分析[J]. 中国食用菌, 2023, 42(4): 95−102. [ZHANG Shasha, SUN Dafeng, LUO Xiaoli, et al. Analysis of the changes of flavor substances in *Termitomyces albuminosus* before and after frying[J]. Edible Fungi of China, 2023, 42(4): 95−102.]

[8] WANG Yueyao, TIAN Guifang, MAO Kemin, et al. Effects of four cooking methods on flavor and sensory characteristics of scallop muscle[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1022156.

[9] DU Jiaxin, XI Jiapei, CHEN Xiao, et al. Effects of different extraction methods on the release of non-volatile flavor components in shiitake mushroom (*Lentinus edodes*)[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106001.

[10] SISSONS J, DAVILA M, DU Xiaofen. Sautéing and roasting effect on free amino acid profiles in portobello and shiitake mushrooms, and the effect of mushroom- and cooking-related volatile aroma compounds on meaty flavor enhancement[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 28: 100550.

[11] SUN Yujing, LV Feiyan, TIAN Jinhu, et al. Domestic cooking methods affect nutrient, phytochemicals, and flavor content in mushroom soup[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 1969−1975.

[12] LAI Jing, WU Ruiyun, WANG Ji, et al. Effect of cooking modes on quality and flavor characteristic in *Clitocybe squamulose* chicken soup[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1048352.

[13] 张龙, 李晶, 许志华, 等. 压力锅烹饪工艺对鸡汤鲜味提升的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(4): 97−102. [ZHANG Long, LI

Jing, XU Zhihua, et al. The influence of pressure cooker cooking technology on the improvement of chicken soup flavor[J]. The Food Industry, 2022, 43(4): 97−102.]
[14] 张硕, 何珊, 王昱苏, 等. 不同压力煮制对鸡胸肉风味的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(1): 28−35. [ZHANG Shuo, HE Shan, WANG Yusu, et al. Effects of different pressure cooking methods on the flavor of chicken breast[J]. Storage and Process, 2024, 24(1): 28−35.]
[15] 张冬梅, 石森, 陈苗, 等. 高压熬时间对猪头骨汤理化性质及风味品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 292−308. [ZHANG Dongmei, SHI Miao, CHEN Miao, et al. Effect of high-pressure boiling time on the physical and chemical properties and flavor quality of pork skull broth[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 292−308.]
[16] LAPLAMOOL T, SUWONSICHON S, SITTIKETGORN S, et al. Sensory flavor profile of split gill mushroom (*Schizophyllum commune*) extract and its enhancement effect on taste perception in salt solution and seasoned clear soup[J]. Foods, 2023, 12(20): 3745.
[17] LÜ Yanan, BAI Xuting, ZHAO Honglei, et al. Flavor characteristics of large yellow croaker soup served with different dried edible fungi[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101059.
[18] XIE Limei, GUO Shaoli, RAO Hongting, et al. Characterization of volatile flavor compounds and aroma active components in button mushroom (*Agaricus bisporus*) across various cooking methods[J]. Foods, 2024, 13(5): 685.
[19] LU Qi, WANG Shaohua, XUE Shujing, et al. Comparison of non-volatile flavor compounds in *Stropharia rugosoannulata* soup processed by different methods[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(10): 4025−4036.
[20] 张治文. 双孢蘑菇中 kokumi 肽的分离纯化及其呈味特性的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2017. [ZHANG Zhiwen. Research on the purification of kokumi peptides from *Agaricus bisporus* and its taste properties[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2017.]
[21] NIE Jinlan, FU Xiaoting, WANG Lei, et al. Impact of *Monascus purpureus* fermentation on antioxidant activity, free amino acid profiles and flavor properties of kelp (*Saccharina japonica*)[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 133990.
[22] 彭佳佳, 张小军, 田鑫, 等. 核桃内种皮游离氨基酸呈味特征及其营养评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 226−232. [PENG Jiajia, ZHANG Xiaojun, TIAN Xin, et al. Study on flavor characteristics and nutritional evaluation of free amino acids in walnut pellicle[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 226−232.]
[23] ZHOU Xiaoli, GUAN Qinglin, WANG Yanli, et al. Effect of different cooking methods on nutrients, antioxidant activities and flavors of three varieties of *Lentinus edodes*[J]. Foods, 2022, 11(17): 2713.
[24] YAMAGUCHI S, YOSHIKAWA T, IKEDA S, et al. Measurement of the relative taste intensity of some L-α-amino acids and 5'-nucleotides[J]. Journal of Food Science, 1971, 36(6): 846−849.
[25] PEI Fei, SHI Ying, GAO Xingyang, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. Food Chemistry, 2014, 165: 547−554.
[26] LAI Siting, LI Li, LI Qian, et al. Discrimination of internal browning in pineapple during storage based on changes in volatile compounds[J]. Food Chemistry, 2024, 433: 137358.
[27] XU Ligen, MAO Tingting, XIA Minquan, et al. New evidence for gut-muscle axis: Lactic acid bacteria-induced gut microbiota regulates duck meat flavor[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139354.
[28] ZHONG Yuanyuan, CUI Yuan, YU Jiangtao, et al. Volatile flavor behavior characterization of *Hericium erinaceus* during postharvest storage using E-nose, HS-GC-IMS, and HS-SPME-GC-MS after treated with electron-beam generated X-ray irradiation[J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139771.
[29] MOERDIJK-POORTVLIET T C W, de JONG D L C, FREMOUW R, et al. Extraction and analysis of free amino acids and 5'-nucleotides, the key contributors to the umami taste of seaweed[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131352.
[30] LUO Dongsheng, WU Jihong, MA Zhuo, et al. Production of high sensory quality Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) by pulsed air-impingement jet drying (AID) technique[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128290.
[31] ZAMORA R A, FUENTES-LEMUS E, BARRIAS P, et al. Free radicals derived from γ-radiolysis of water and AAPH thermolysis mediate oxidative crosslinking of eGFP involving Tyr-Tyr and Tyr-Cys bonds: The fluorescence of the protein is conserved only towards peroxyl radicals[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2020, 150: 40−52.
[32] YANG Juan, HUANG Yuran, CUI Chun, et al. Umami-enhancing effect of typical kokumi-active γ-glutamyl peptides evaluated via sensory analysis and molecular modeling approaches[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128018.
[33] 张浩, 顾思远, 姜元华, 等. 基于 GC-IMS 分析不同煸炒温度对郫县豆瓣风味影响及游离氨基酸呈味分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(7): 60−68,85. [ZHANG Hao, GU Siyuan, JIANG Yuanhua, et al. Effects of different stir-frying temperatures on flavor of Pixian bean paste and analysis of taste of free amino acids based on GC-IMS[J]. China Condiment, 2024, 49(7): 60−68,85.]
[34] PÉREZ-PALACIOS T, EUSEBIO J, FERRO PALMA S, et al. Taste compounds and consumer acceptance of chicken soups as affected by cooking conditions[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): S154−S165.
[35] LI Q, ZHANG H H, CLAVER I P, et al. Effect of different cooking methods on the flavour constituents of mushroom (*Agaricus bisporus* (Lange) Sing) soup[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(5): 1100−1108.
[36] 李自会. 鸡肉风味基料的酶解制备及其呈味机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. [LI Zihui. Preparation of chicken flavor base by enzymatic hydrolysis and its flavor formation mechanism[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.]
[37] MA D, LIN T, ZHAO H, et al. Development and comprehensive SBSE-GC/Q-TOF-MS analysis optimization, comparison, and evaluation of different mulberry varieties volatile flavor[J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138578.
[38] BI Jicai, LI Bian, CHEN Zhuo, et al. Comparative study of volatile flavor compounds in green onion (*Allium fistulosum* L.) processed with different cooking methods[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 35: 100878.
[39] PARK H, CHO I H. Sensorial flavor characteristics and volatile Maillard reaction products of *Tenebrio molitor* mealworm based-reaction flavors with beef broth-like flavor[J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(3): 645−651.
[40] WANG Shuqi, CHEN Haitao, SUN Baoguo. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.
[41] ZHU Ruiyu, WEN Yuxi, WU Weihao, et al. The flavors of edible mushrooms: A comprehensive review of volatile organic compounds and their analytical methods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(16): 5568−5582.
[42] GIRI A, OSAKO K, OHSHIMA T. Identification and characterisation of headspace volatiles of fish miso, a Japanese fish meat based fermented paste, with special emphasis on effect of fish species and meat washing[J]. Food Chemistry, 2010, 120(2): 621−631.
[43] LU Xiaoshuo, HOU Hui, FANG Donglu, et al. Identification and characterization of volatile compounds in *Lentinula edodes* during vacuum freeze-drying[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(6): e13814.