

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.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020256

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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020256

· 分析检测 ·

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

李晓龙^{1,2}, 杨焱², 李文², 刘艳芳², 吴迪², 杨焕玲², 陈万超^{2,*}, 李景军^{1,*}

(1. 安徽科技学院食品工程学院, 安徽滁州 233100;

2. 上海市农业科学院食用菌研究所, 农业农村部南方食用菌资源利用重点实验室,
国家食用菌工程技术研究中心, 上海 201403)

摘要: 为探究不同烹饪方式下鹿茸菇营养特性及非挥发性风味物质的变化规律, 本研究以新鲜鹿茸菇为原料, 采用汽蒸、水煮、无油空气炸制、烘烤四种烹饪方式对鹿茸菇进行热处理, 通过营养成分测定、离子色谱法、高效液相色谱法以及电子舌技术对不同烹饪方式处理后的鹿茸菇中的多糖、总酚、蛋白质和总膳食纤维含量以及可溶性糖、游离氨基酸和 5'-核苷酸非挥发性风味物质含量以及等效鲜味浓度 (equivalent umami concentration, EUC) 进行分析, 结果表明水煮显著降低了鹿茸菇多糖、总酚、蛋白质和总膳食纤维含量以及可溶性糖、游离氨基酸、5'-核苷酸风味物质含量, 而烤箱烘烤对上述指标总体的保留或提升效果最好。汽蒸和无油空气炸制的处理效果介于水煮和烤箱烘烤之间, 其中汽蒸能较好的保留鹿茸菇中的营养成分, 与烤箱烘烤的样品风味相似。对电子舌数据进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 发现不同烹饪方式下鹿茸菇的滋味物质存在较大差异, 汽蒸和烘烤两种烹饪方式下的样品点距离较近, 处理后的鹿茸菇在滋味上差异较小。而对照、水煮和无油空气炸制三种烹饪方法下的样品点则分布在三个不同的象限, 且相互之间的距离较远, 表明这三种烹饪方式处理后的鹿茸菇在风味上存在较大的差异。本文通过研究本文通过对汽蒸、水煮、无油空气炸制和烘烤处理后的鹿茸菇中营养物质和非挥发性风味物质变化规律, 发现四种烹饪方式中, 烘烤处理的鹿茸菇对营养物质和非挥发性风味物质的保留效果最好, 为更加科学合理的烹饪鹿茸菇以及其他食用菌提供了一定的理论依据。

关键词: 鹿茸菇, 烹饪, 营养, 风味, 主成分分析, 电子舌

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)03-0304-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020256



本文网刊:

Effects of Different Cooking Methods on Nutritional Properties and Non-volatile Flavor Substances of *Lyophyllum decastes*

LI Xiaolong^{1,2}, YANG Yan², LI Wen², LIU Yanfang², WU Di², YANG Huanling²,
CHEN Wanchao^{2,*}, LI Jingjun^{1,*}

(1. School of Food Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China;

2. Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Edible Fungi Resources and Utilization (South), Ministry of Agriculture, National Engineering
Research Center of Edible Fungi, Shanghai 201403, China)

Abstract: In order to explore the nutritional characteristics and non-volatile flavor substances under different cooking techniques, this study utilized fresh *Lyophyllum decastes* and subjected them to four different cooking methods: Steaming,

收稿日期: 2024-03-01

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助 (CARS-20); 上海市奉贤区社会类科技发展基金 (202209)。

作者简介: 李晓龙 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1364214558@qq.com。

* 通信作者: 陈万超 (1987-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食用菌营养风味研究及产品开发, E-mail: chenwanchao@saas.sh.cn。

李景军 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品科学, E-mail: 2003jjli@163.com。

boiling, air frying without oil and baking. The contents of polysaccharide, total phenol, protein and total dietary nutrients, as well as non-volatile flavor substances such as soluble sugar, free amino acid and 5'-nucleotide and equivalent umami concentration (EUC) in *L. decastes* treated by different cooking methods were analyzed by ion chromatography, high performance liquid chromatography and electronic tongue technology. The results showed that boiling significantly reduced the levels of polysaccharides, total phenols, protein, total dietary fiber, soluble sugar, free amino acid, and 5'-nucleotide flavor content. Conversely, baking was found to be the most effective method in preserving or even enhancing these nutritional and flavor profiles. The processing effects of steaming and air frying without oil fall between boiling and oven baking, with steaming retained more nutrients in *L. decastes* and produced a flavor profile similar to that of oven-baked samples. Principal component analysis (PCA) of electronic tongue data revealed significant variations in the flavor profiles of *L. decastes* across different cooking methods. The sample points for steaming and baking were closer together, indicating a smaller difference in taste after these two cooking methods. In contrast, the sample points for control, boiling, and air frying without oil were distributed in three different quadrants, with relatively large distances from each other, suggesting that these three cooking methods lead to greater differences in the flavor of *L. decaste*. This study examines the changes in nutritional components and non-volatile flavor compounds in *L. decaste* subjected to steaming, boiling, air frying without oil, and baking. Among these methods, baking preserves both nutrients and non-volatile flavor compounds most effectively, offering a theoretical basis for optimizing the cooking of *L. decaste* and other edible fungi.

Key words: *Lyophyllum decastes*; cooking; nutritional; flavor; PCA; E-tongue

鹿茸菇(*Lyophyllum decastes*)别称荷叶离褶伞,又名荷叶蘑,因其切片和珍贵中药鹿茸的切片形状相似而得名^[1],属于担子菌亚门(Basidiomycotina)、层菌纲(Hymenomycetes)、伞菌目(Agaricales)、离褶伞科(Lyophyllaceae)、离褶伞属(*Lyophyllum*),其主要分布在我国中南部等地,是一种非常珍贵的药食两用食用真菌^[2]。鹿茸菇中富含多糖、粗蛋白、氨基酸,脂肪含量较低,并且还含有大量维生素和对人体有益的微量元素,具有抗降血压、降血脂等功效^[3],此外还对防治特异性皮肤炎有很好的效果^[4]。

烹饪是人们在日常生活中一种常见的食品加工方式,可以改善食品的口感和风味,它通过对食品原料进行加热处理,引起蛋白质变性、细胞组织结构破坏以及细胞内容物的释放^[5-6]。常见的烹饪方式有水煮、汽蒸、无油空气炸制和烘烤,其中水煮可使食物中一些可溶性物质溶于水中,包括糖类^[7]、水溶性维生素^[8]、矿物质^[9]和酚类物质^[10],导致其含量降低;汽蒸过程中并不与水直接接触,因此对食物中的可溶性成分的影响小于水煮^[11];空气炸锅是几年来一种新型的烹饪食物的设备,通过向底部吹如热空气来熟化食物,在保持油炸食物的口感和色泽的同时,能够降低食物中蛋白质、多糖等营养物质的损失,并提升其风味品质^[12]。Tan等^[13]报道了烹饪方式对平菇汤多酚和抗氧化活性的影响,相较于汽蒸、微波等加工方式,水煮处理的平菇多酚含量显著降低,而汽蒸处理中则提升。Sun等^[14]研究了国产烹饪方法对蘑菇汤营养成分和风味成分的影响,经炸制处理后蘑菇产生了新的风味物质,提升了整体的风味品质。这些结果表明,每种方法对食用菌的性质都有特定的影响。根据菌种、烹饪方法的不同,其营养成分、风味成分等的含量也会有所不同。

近年来,随着人们对健康的关注度增加,人们对烹饪方式对食品营养特性以及风味物质的影响越来越

关注,目前关于烹饪方式对食用菌的品质影响的研究主要集中在营养物质和抗氧化性能方面,对于风味方面的研究较少。因此,本文以鹿茸菇为原料,分析不同烹饪方式(汽蒸、水煮、无油空气炸制、烘烤)对鹿茸菇营养特性和非挥发性风味物质的影响,为鹿茸菇以及其他食用菌的烹饪加工提供科学的理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鹿茸菇 江苏菇本堂生物科技股份有限公司;无水乙醇、硫酸 国药集团化学试剂有限公司;Folin-Ciocalteu 试剂、没食子酸 北京莱宝科技有限公司;甲醇 分析纯,美国 Dikma 公司;岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、葡萄糖胺、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、赤藻糖醇、甘露醇、海藻糖、阿拉伯糖标准品 美国 Sigma 公司;17 种氨基酸混合标准品 Waters 公司。

C22-IH80E 型电磁炉 浙江绍兴苏泊尔生活电器有限公司;CRDF32WBL 型电烤箱 广东伟仕达电器科技有限公司;ZGE232306 电蒸锅 广东美的生活电器制造有限公司;Allegra25RCentrifuge 型离心机 美国 Beckman 公司;QE-400 型高速粉碎机 浙江屹立工贸有限公司;Dionex ICS2500 型阴离子色谱仪 美国 Dionex 公司;Biochrom30 型全氨基酸自动分析仪 大昌华嘉商业(中国)有限公司;Waters 2996 型高效液相色谱仪 美国 Waters 公司;SA402B 型电子舌味觉分析系统 日本 Insent 公司;HWS-28 型电热恒温水浴锅 上海跃鹏贸易有限公司;YTLG-10B 型冷冻干燥机 北京依珊汇通科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同烹饪方式鹿茸菇样品制备 烹饪条件参考 Sun 等^[14]和 Lee 等^[15]的方法进行,稍微调整。将新鲜的鹿茸菇洗净,用不锈钢刀切成尽可能大小均一

的小块,充分混匀,将其随机分为五份,每份 200 g。以未加工的鹿茸菇为对照,其余四份采用水煮、汽蒸、无油空气炸制和烘烤方式进行处理。水煮:将 200 g 菇块加入 2000 mL 蒸馏水中,沸水煮制 10 min;汽蒸:将 200 g 菇块放于瓷盘中,置于蒸锅中,待出现蒸汽后加热 10 min;无油空气炸制:将 200 g 菇块置于空气炸锅中,160 ℃ 加热 15 min;烘烤:将 200 g 菇块放于烤盘中,用刷子蘸取油在菇块表面涂抹,置于烤箱 180 ℃ 加热 8 min。加热完成后,迅速捞出菇块,沥干表面水分或油分,冷却至室温,经真空冷冻干燥后,用粉碎机粉碎,过 60 目筛,于通风干燥处保存备用,供后续实验使用。

1.2.2 营养成分分析

1.2.2.1 多糖含量测定 将 500 g 菇粉置于 50 mL 离心管中,加入 20 mL、80% 的乙醇混匀,600 W 超声辅助提取 30 min 于 8000 r/min 离心 10 min,弃去上清,再加入 10 mL、80% 的乙醇,再次离心弃去上清,加入蒸馏水定容至 40 mL,沸水浴提取 2 h,冷却至室温,8000 r/min 离心 10 min,收取上清液。参照 GB/T 15672-2009《食用菌中总糖含量测定》,采用苯酚-硫酸法鹿茸菇多糖含量,用葡萄糖制作标准曲线,于 490 nm 处测定吸光度,根据标准曲线 $y=8.5865x+0.0348$, $R^2=0.9991$ 将吸光度带入,计算多糖含量。

1.2.2.2 总酚含量测定 称取 500 g 菇粉,加入 20 mL 80% 乙醇,混合均匀,600 W 超声辅助提取 30 min,4 ℃ 下 8000 r/min 离心 15 min,弃去沉淀,收集上清并定容至 50 mL。采用 Folin-Ciocalteu 法^[6]测定样品总酚含量,以标准没食子酸制作标准曲线,于 750 nm 处测定吸光度值,根据标准曲线 $y=3.6679x+0.0514$, $R^2=0.9993$ 将吸光度带入求得 C 值,计算总酚含量。

$$\text{总酚含量}(\text{mg/g}) = \frac{C \times V}{W}$$

式中,C 为总酚质量浓度,mg/mL;V 为粗提液体积,mL;W 为样品质量,g。

1.2.2.3 总膳食纤维含量测定 参照 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维测定》测定总膳食纤维含量。

1.2.2.4 蛋白质含量测定 参照 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质测定》采用凯氏定氮法测定蛋白质含量。

1.2.3 非挥发性化合物分析

1.2.3.1 可溶性糖含量测定 参考陈万超等^[16]的方法,取 500 mg 菇粉加入 30 mL 80% 乙醇,25 ℃ 摇床振荡 45 min,8000 r/min 离心 10 min 后用 80% 乙醇冲洗滤渣 3 次,滤液用 55 ℃ 旋蒸去除乙醇,用超纯水定容至 25 mL,然后 8000 r/min 离心 10 min,将上清液稀释到一定浓度后过 0.22 μm MCE 微孔滤膜上离子色谱仪测试。

单糖色谱条件:CarboPac PA-20 色谱柱(3 mm×

150 mm),进样量 25 μL,流速 0.4 mL/min,柱温 30 ℃,流动相为 0.25 mol/L NaOH 和超纯水。

糖醇测定色谱条件:CarboPac MA-1 色谱柱(4 mm×250 mm),进样量 25 μL,流速 0.4 mL/min,柱温 30 ℃,流动相为 0.48 mol/L NaOH。

1.2.3.2 游离氨基酸含量测定 参考陈荣荣等^[17]方法,准确称取 500 mg 鹿茸菇样品于 50 mL 离心管,加入 20 mL 超纯水,沸水浴提取 10 min,冷却至室温后定容至 50 mL,混匀后过 0.22 μm MCE 微孔滤膜。将样品和 17 种氨基酸混合标准品进行衍生处理,分别吸取 20 μL 不同质量浓度(0.25、0.5、0.75、1、1.25 和 1.5 μmol/mL)的氨基酸混合标准溶液于衍生管(6 mm×50 mm)中,加入 140 μL 硼酸盐缓冲液,混匀后再加入 40 μL 衍生剂,室温放置 1 min,55 ℃ 加热 10 min 后取出,用 Biochrom30 型全氨基酸自动分析仪检测。

色谱条件:AccQ-Tag 氨基酸分析色谱柱(3.9 mm×150 mm×4 μm),流速 1.0 mL/min。柱温 37 ℃,紫外检测波长 248 nm,进样量 10 μL。流动相 A 为乙腈,流动相 B 为超纯水,流动相 C 为醋酸盐-磷酸盐缓冲液。梯度洗脱程序为 0~0.5 min:1%A 和 99%C;0.5~13.5 min:4%A 和 96%C;13.5~19 min:12%A 和 88%C;19~25 min:17%A 和 83%C;25~32 min:60%A 和 40%B;32~40 min:100%C。

1.2.3.3 5'-核苷酸含量测定 参考 Taylor 等^[18]的提取方法,称取菇粉 300 mg,加入 10 mL 超纯水,沸水浴提取 10 min,冷却至室温后,12000 r/min 离心 15 min,取出上清,过 0.22 μm MCE 微孔滤膜,再经 Waters 2996 高效液相色谱仪测定。

色谱条件:Ultimate AQ-C₁₈ 色谱柱(250 mm×4.6 mm×5 μm),流动相为 pH4.68 的 10 mmol/L 的 KH₂PO₄ 缓冲盐,流速 1.0 mL/min,柱温 30 ℃,进样量 10 μL,紫外线检测波长 249 nm。

1.2.3.4 鲜味等效浓度(equivalent umami concentration, EUC)值计算 等鲜浓度是指在 100 g 干样品中,呈鲜物质的总量采用谷氨酸钠(monosodium glutamate, MSG)^[19]的含量表示,按下式计算:

$$\text{EUC}(\text{g MSG}/100 \text{ g}) = \sum a_i b_i + 1218(\sum a_i b_i)(\sum a_i b_i)$$

式中, a_i 为呈鲜氨基酸(谷氨酸或天冬氨酸)的质量分数,%; a_j 为呈鲜核苷酸(5'-鸟苷酸,5'-guanylic acid,5'-GMP)、5'-肌苷酸(5'-inosine acid,5'-IMP)、5'-黄苷酸(5'-xanthylic acid,5'-XMP)、5'-腺苷酸(5'-adenylic acid,5'-AMP)的质量分数,%; b_i 为呈鲜氨基酸相对谷氨酸的值(谷氨酸=1,天冬氨酸=0.077); b_j 为呈鲜核苷酸相对 5'-IMP 的值(5'-IMP=1,5'-GMP=2.3、5'-XMP=0.61、5'-AMP=0.18);1218 为协同作用常数。

1.2.3.5 电子舌检测 准确称取 1000 mg 鹿茸菇粉末,加入 30 mL 超纯水,沸水浴提取 30 min,冷却至

室温, 8000 r/min 离心 15 min, 将上清用超纯水稀释 5 倍, 制备待测液。五味如酸味、苦味、涩味、鲜味、咸味以及甜味的数据通过仪器自带的数据处理软件获得。每个样品重复检测三次, 取平均值作为最终测试结果, 对电子舌检测出的酸味、涩味、鲜味、咸味以及甜味五种味觉值进行 PCA 分析。

1.3 数据处理

采用 Office Excel 和 SPSS 22.0 进行数据处理和分析, 采用单因素方差分析以及事后多重比较法进行显著性分析; 采用 Origin 2021 作雷达指纹图和电子舌 PCA 图。

2 结果与分析

2.1 不同烹饪方式对鹿茸菇营养物质含量影响

2.1.1 不同烹饪方式对鹿茸菇多糖含量影响 多糖是鹿茸菇中主要营养成分和活性成分之一, 具有诸多保健功能和药用价值。烹饪加工方式对鹿茸菇多糖含量影响如图 1 所示。未加工鹿茸菇的多糖含量为 53.96 mg/g, 经水煮处理后的鹿茸菇多糖含量最低, 相较于对照组下降了 15.49%, 原因可能是水煮过程中, 鹿茸菇直接与沸水接触, 使鹿茸菇中的多糖溶解在水中, 导致多糖含量降低; 经汽蒸、无油空气炸制和烘烤处理后的鹿茸菇多糖含量相较于对照组分别上升了 8.73%、3.20% 和 8.40%。汽蒸、无油空气炸制和烘烤处理过程中, 多糖含量升高的潜在原因是高温蒸汽或烘烤处理, 致使鹿茸菇的细胞结构受到破坏, 促使胞内多糖的释放, 使多糖测定值升高, 这在香菇以及杏鲍菇的烹饪加工中也得到类似的结论^[20-21]。

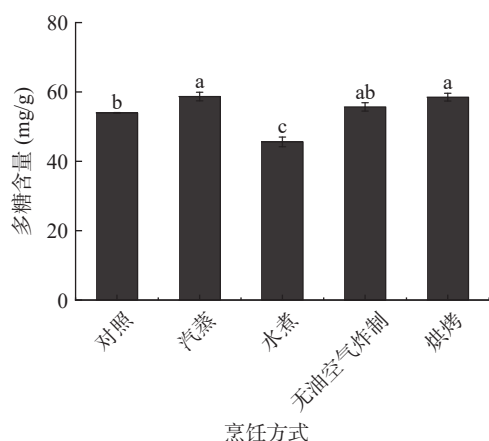


图 1 烹饪方式对鹿茸菇中多糖含量的影响

Fig.1 Effect of cooking methods on polysaccharide content in *Lyophyllum decastes*

注: 小写字母不同表示不同烹饪方式下目标参数差异显著 ($P < 0.05$); 图 2~图 4 同。

2.1.2 不同烹饪方式对鹿茸菇总酚含量影响 烹饪加工方式对鹿茸菇总酚含量影响如图 2 所示。未加工的鹿茸菇总酚含量为 6.35 mg/g, 水煮处理中, 鹿茸菇总酚含量损失最大, 相较于对照组减少了 37.30%, 总酚含量降低的原因可能是由于酚类化合物的浸出,

即在煮沸过程中, 亲水性酚类物质以及部分结合态的总酚经过水煮处理过程从菇中溶解释放到沸水中, 导致总酚含量降低^[22-23]。经汽蒸、无油空气炸制和烘烤处理的鹿茸菇含量分别增加了 7.40%、10.55% 和 14.17%。在汽蒸、无油空气炸制和烘烤处理中鹿茸菇总酚含量上升的原因可能是膳食纤维具有多孔性, 为多酚提供了结合位点, 而热处理破坏了鹿茸菇的组织结构, 使多酚与膳食纤维的结合键变得更容易断裂, 促进酚类物质的释放^[24]。Wachtel-Galor 等^[25]报道了水煮可使西兰花和卷心菜总酚含量降低 60% 以上。张慢等^[26]发现无油空气炸制后的秀珍菇总酚含量最高, 汽蒸次之, 水煮含量最低, 与本研究趋势相似。

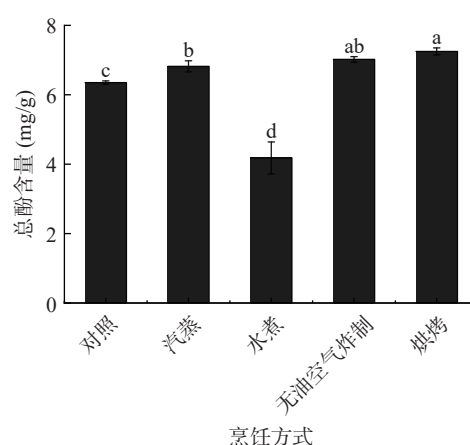


图 2 烹饪方式对鹿茸菇中总酚含量的影响

Fig.2 Effect of cooking methods on the total phenol content in *Lyophyllum decastes*

2.1.3 不同烹饪方式对鹿茸菇膳食纤维含量影响

膳食纤维在食用菌中含量丰富, 其在维持人体正常功能方面起着重要的作用。烹饪方式对鹿茸菇中总膳食纤维含量的影响如图 3 所示, 其对总膳食纤维含量的影响趋势与多糖变化趋势相似。未加工的总膳食纤维含量为 265.32 mg/g, 经汽蒸、无油空气炸制和烘烤处理的鹿茸菇中总膳食纤维含量相比于对照

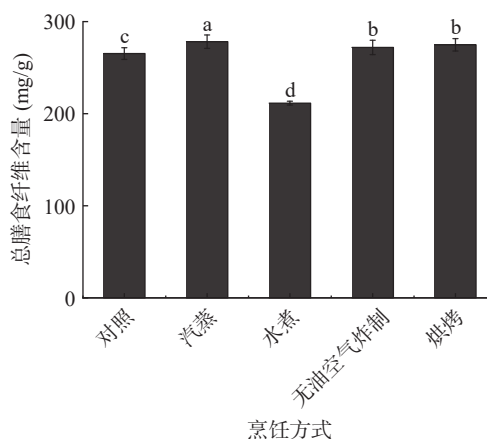


图 3 烹饪方式对鹿茸菇中总膳食纤维含量的影响

Fig.3 Effect of cooking methods on total dietary fiber content in *Lyophyllum decastes*

组略有增加,分别增加了 4.86%、2.49% 和 3.70%;而经水煮处理的鹿茸菇总膳食纤维含量最低,为 211.44 mg/g,相较于对照组下降了 20.30%,其原因可能是水煮处理过程中,一些可溶性膳食纤维溶解在水中,部分细胞壁结构被破坏,导致不溶性膳食纤维致密有序排列被打破,导致总膳食纤维含量下降^[27]。

2.1.4 不同烹饪方式对鹿茸菇蛋白质含量影响 食用菌中的蛋白质属于优质蛋白,蛋白质含量为 10%~40%^[28]。鹿茸菇中富含蛋白质以及多种必需氨基酸,氨基酸种类齐全,具有较高的营养价值^[29]。烹饪方式对鹿茸菇蛋白质含量的影响如图 4 所示,未加工的鹿茸菇蛋白质含量为 287.42 mg/g,所有烹饪方式均使鹿茸菇蛋白含量下降,其中水煮处理的蛋白质含量最低,为 218.35 mg/g,相较于对照组下降 24.04%。原因一方面是高温使蛋白质发生变性和降解,导致蛋白质含量降低^[30]。另一方面可能是蛋白质中水溶性蛋白质易溶于水,水煮过程中部分水溶性蛋白溶于水中,导致总蛋白质含量降低^[26],汽蒸、无油空气炸制和烘烤并未与水直接接触,故蛋白质相较于水煮处理的鹿茸菇蛋白质含量损失较小。

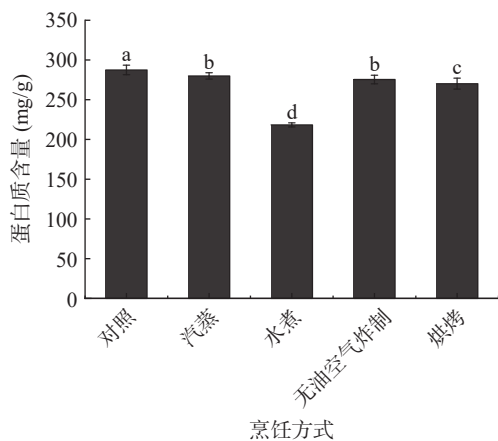


图 4 烹饪方式对鹿茸菇中蛋白质含量的影响
Fig.4 Effect of cooking methods on protein content in *Lyophyllum decastes*

2.2 不同烹饪方式对鹿茸菇非挥发性风味物质的影响

2.2.1 不同烹饪方式对鹿茸菇可溶性糖含量的影响

可溶性糖是产生甜味并影响蘑菇口感的主要物质^[31],与食用菌滋味密切相关,其可以和氨基酸相互作用,从而影响蘑菇的风味^[32]。研究显示海藻糖和甘

露糖是食用菌中主要的可溶性糖,不同食用菌之间,其可溶性糖含量之间也会有较大差异^[33]。不同烹饪方式下的鹿茸菇可溶性糖含量如表 1 所示,结果显示共检测出 4 种可溶性糖,包括葡萄糖、果糖、赤藻糖醇以及海藻糖。未加工的鹿茸菇可溶性糖总含量为 362.21 mg/g,经汽蒸、水煮、无油空气炸制以及烘烤处理后,鹿茸菇中总可溶性糖含量相较于对照组均有不同程度的下降,其中经汽蒸和烘烤处理的鹿茸菇可溶性糖保留率较高,其次为无油空气炸制,而水煮处理的鹿茸菇可溶性糖总量降低最为显著($P<0.05$),相较于对照组下降 43.28%。其原因可能是在加工过程中,可溶性糖发生脱水、热降解,导致可溶性糖含量降低。

2.2.2 不同烹饪方式对鹿茸菇游离氨基酸含量的影响

氨基酸赋予蘑菇风味,在非挥发性风味物质中占有十分重要的地位,是蘑菇中的重要营养成分^[34]。根据其呈味特征,游离氨基酸分为鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸和无味氨基酸四类。鲜味氨基酸中主要为天冬氨酸和谷氨酸,可以产生蘑菇味^[35]。不同烹饪方式下的鹿茸菇游离氨基酸含量如表 2 所示,鹿茸菇中共检测出 17 种氨基酸,不同烹饪方式样品中游离氨基酸含量差异显著($P<0.05$)。由表 2 可知,鹿茸菇经烹饪加工处理后,游离氨基酸的总含量均有所下降,原因可能是由于氨基酸的 Strecker 降解或氨基酸与还原糖之间的美拉德反应^[36]。其中经水煮处理后的鹿茸菇游离氨基酸含量为 18.37 mg/g,降低效果最为显著($P<0.05$),原因可能是大部分游离氨基酸在热水中容易溶解^[37],而经烘烤游离氨基酸含量为 44.18 mg/g,在所有烹饪方式中含量最高。

鲜味氨基酸和甜味氨基酸是产生蘑菇风味的主要氨基酸。未加工的鹿茸菇鲜味氨基酸总含量为 5.58 mg/g,占总氨基酸含量的 10.38%,其中天冬氨酸和谷氨酸在未加工的鹿茸菇样品中含量分别为 0.98 mg/g 和 4.60 mg/g。经加工后的鹿茸菇样品的鲜味氨基酸的比列均有所升高,其中除水煮处理的样品外,其他烹饪方式均使天冬氨酸含量上升,说明适当的热处理有助于增加样品中的鲜味。未加工的鹿茸菇样品甜味氨基酸总含量为 19.26 mg/g,占总氨基酸含量的 35.84%,甜味氨基酸(主要为苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸和脯氨酸)经烹饪加工后总含量

表 1 不同烹饪方式对鹿茸菇中可溶性糖含量的影响

Table 1 Effect of different cooking methods on the content of soluble sugar in *Lyophyllum decastes*

可溶性糖	含量(mg/g)				
	对照	汽蒸	水煮	无油空气炸制	烘烤
葡萄糖	40.64±0.30 ^a	20.36±1.96 ^b	11.56±0.89 ^c	11.66±1.89 ^c	17.14±0.77 ^b
果糖	11.87±0.80 ^a	4.85±0.68 ^b	2.34±0.18 ^c	2.03±0.07 ^c	3.82±0.20 ^b
赤藻糖醇	3.50±0.29 ^a	2.99±0.25 ^{ab}	2.14±0.06 ^c	2.80±0.16 ^b	2.77±0.05 ^b
海藻糖	303.23±2.32 ^b	328.90±2.88 ^a	188.28±3.37 ^d	275.89±4.77 ^c	333.64±4.56 ^a
总量	362.21±4.32 ^a	358.98±4.42 ^a	205.44±2.13 ^c	294.79±6.79 ^b	359.35±3.54 ^a

注: 同行字母不同表示不同烹饪方式下目标参数差异显著($P<0.05$); 表2~表3同。

表 2 不同烹饪方式对鹿茸菇中游离氨基酸含量的影响

Table 2 Effect of different cooking methods on the content of free amino acids in *Lyophyllum decastes*

氨基酸	含量(mg/g)				
	对照	汽蒸	水煮	无油空气炸制	烘烤
天冬氨酸	0.98±0.07 ^b	1.06±0.06 ^b	0.36±0.04 ^c	1.22±0.03 ^a	1.32±0.05 ^a
苏氨酸	3.08±0.08 ^a	2.65±0.01 ^c	1.22±0.08 ^e	2.38±0.01 ^d	2.94±0.05 ^b
丝氨酸	6.76±0.30 ^a	5.08±0.22 ^b	2.45±0.07 ^c	5.21±0.19 ^b	7.07±0.03 ^a
谷氨酸	4.60±0.17 ^{ab}	4.64±0.01 ^a	1.75±0.00 ^c	4.60±0.06 ^{ab}	4.41±0.02 ^b
甘氨酸	2.31±0.02 ^{ab}	2.12±0.06 ^{bc}	1.05±0.01 ^d	1.99±0.02 ^c	2.75±0.05 ^a
丙氨酸	4.79±0.06 ^a	2.94±0.05 ^c	1.35±0.01 ^c	2.67±0.01 ^d	3.84±0.05 ^b
半胱氨酸	1.04±0.00 ^a	0.77±0.03 ^c	0.42±0.00 ^d	0.81±0.03 ^c	0.95±0.06 ^b
缬氨酸	3.14±0.12 ^a	1.63±0.23 ^b	0.73±0.02 ^c	1.68±0.23 ^b	1.98±0.30 ^b
蛋氨酸	0.60±0.02 ^a	0.25±0.03 ^b	0.13±0.01 ^c	0.25±0.00 ^b	0.31±0.05 ^b
异亮氨酸	1.78±0.00 ^a	0.95±0.01 ^d	0.46±0.04 ^e	1.01±0.01 ^c	1.24±0.01 ^b
亮氨酸	3.39±0.02 ^a	1.61±0.04 ^d	0.83±0.00 ^e	1.77±0.05 ^c	2.12±0.00 ^b
酪氨酸	2.27±0.14 ^a	1.65±0.05 ^b	0.80±0.10 ^c	1.61±0.05 ^b	1.79±0.03 ^b
苯丙氨酸	2.72±0.16 ^a	1.73±0.02 ^c	0.87±0.06 ^d	1.72±0.01 ^c	2.06±0.05 ^b
组氨酸	2.50±0.11 ^a	1.33±0.00 ^c	0.57±0.05 ^d	1.30±0.46 ^c	1.89±0.02 ^b
赖氨酸	3.41±0.03 ^a	2.59±0.04 ^b	1.47±0.09 ^c	2.39±0.15 ^b	2.39±0.03 ^b
精氨酸	8.04±0.00 ^a	6.04±0.07 ^b	3.00±0.02 ^c	5.50±0.17 ^c	5.05±0.06 ^d
脯氨酸	2.32±0.11 ^a	1.86±0.05 ^c	0.93±0.01 ^d	1.92±0.08 ^{bc}	2.06±0.06 ^b
鲜味氨基酸	5.58±0.10 ^b	5.70±0.07 ^{ab}	2.11±0.04 ^c	5.81±0.09 ^a	5.73±0.03 ^{ab}
甜味氨基酸	19.26±0.57 ^a	14.65±0.38 ^b	7.00±0.12 ^c	14.17±0.23 ^b	18.66±0.24 ^a
苦味氨基酸	24.44±0.32 ^a	15.19±0.46 ^c	7.36±0.20 ^d	14.86±0.04 ^c	16.44±0.35 ^b
无味氨基酸	4.45±0.03 ^a	3.35±0.07 ^b	1.89±0.09 ^c	3.20±0.19 ^b	3.34±0.09 ^b
必需氨基酸	17.53±0.36 ^a	11.16±0.35 ^c	5.57±0.01 ^d	10.97±0.44 ^c	13.03±0.49 ^b
总量	53.74±0.95 ^a	38.89±0.97 ^c	18.37±0.26 ^d	38.04±0.09 ^c	44.18±0.65 ^b

均有所下降, 含量范围在 7.00~18.66 mg/g; 而鲜味氨基酸总含量经汽蒸、无油空气炸制和烘烤处理后有所上升, 分别为 5.70、5.81 和 5.73 mg/g; 未加工的鹿茸菇苦味氨基酸总含量为 24.44 mg/g, 占总氨基酸比例的 45.47%, 苦味氨基酸占比最高, 经加工处理后苦味氨基酸占比和含量均有所下降。苦味物质的苦味特性可能会被甜味物质的甜味所掩盖, 从而样品整体不呈现苦味^[38]。

2.2.3 不同烹饪方式对鹿茸菇 5'-核苷酸含量的影响

鹿茸菇口感不仅与游离氨基酸含量有关, 而且与 5'-核苷酸含量有关^[39]。5'-核苷酸是增味剂, 能够为食用菌提供鲜味^[36]。核苷酸包括含胞嘧啶核苷酸(5'-CMP)、尿嘧啶核苷酸(5'-UMP)、鸟嘌呤核苷酸(5'-GMP)、次黄嘌呤核苷酸(5'-IMP)和腺嘌呤核苷酸(5'-AMP), 其中次黄嘌呤核苷酸(5'-IMP)是蘑菇中主要的口感活性成分^[40-41]。不同烹饪方式处理的鹿茸菇核苷酸水平见表 3。5'-GMP、5'-IMP 和 5'-AMP 为鲜味核苷酸, 5'-CMP 和 5'-UMP 为呈味核苷酸。对照组核苷酸总量为 1.32 mg/g, 除水煮样品外, 其余加工方式均使核苷酸总量有所上升, 其中无油空气炸制样品核苷酸总量与对照组相比并无显著性差异 ($P>0.05$), 而烘烤处理的鹿茸菇核苷酸含量最高为 1.60 mg/g, 其次是汽蒸, 水煮处理的鹿茸菇样品核苷酸含量最低, 为 0.58 mg/g, 相较于对照组下降了 56.06%。对照组中最主要的核苷酸为 5'-GMP, 5'-

IMP 含量最低, 5'-GMP 具有鲜味或可口的味道, 有很强的助鲜作用, 但经烹饪加工处理后显著降低($P<0.05$), 这可能是由于其热敏性有关, 导致降解为核糖^[42]。5'-IMP 是蘑菇中主要的味觉活性成分^[41], 在汽蒸处理的样品中含量最高。5'-AMP 是一种苦味抑制剂, 能够增加甜味和减少酸味、涩味、苦味^[43], 在经烹饪处理后, 除水煮处理外, 其余烹饪方式均使其含量升高, 这在水芹^[44] 和蟹蟹^[45] 中也有相似的结论。

2.2.4 不同烹饪方式鹿茸菇中鲜味等效浓度(EUC)

差异分析 由鲜味氨基酸和鲜味核苷酸根据 EUC 计算公式计算不同方式处理下鹿茸菇的 EUC 值, 结果见表 3。由表 3 可以看出, 不同烹饪方式处理的鹿茸菇 EUC 值差异显著 ($P<0.05$)。EUC 值分为 4 个水平: >1000 g MSG/100 g、 $100\sim1000$ g MSG/100 g、 $10\sim100$ g MSG/100 g、 <10 g MSG/100 g^[46]。鲜味氨基酸和呈味核苷酸的协同作用可增强蘑菇的鲜味^[47-48], 对 EUC 值产生影响。不同烹饪方式鹿茸菇 EUC 值在 2.69~19.37 g MSG/100 g, 其中烘烤处理的样品 EUC 值最高, 为 (19.37 ± 0.17) g MSG/100 g, 而经煮沸处理的鹿茸菇 EUC 值最低 (2.69 ± 0.22) g MSG/100 g, 对 EUC 值不同水平划分可知, 除煮沸处理的鹿茸菇为第 4 水平 (<10 g MSG/100 g) 外, 其他处理方式的鹿茸菇均处于第 3 水平 ($10\sim100$ g MSG/100 g)。结合表 2 和表 3 可知, 烘烤处理后的鹿茸菇样品鲜味氨基酸、鲜味核苷酸和呈味核苷酸含量最

表 3 不同烹饪方式对鹿茸菇中 5'-核苷酸含量的影响

Table 3 Effect of different cooking methods on the content of 5'-nucleotide in *Lyophyllum decastes*

核苷酸	含量(mg/g)				
	对照	汽蒸	水煮	无油空气炸制	烘烤
5'-CMP	0.33±0.03 ^c	0.51±0.02 ^b	0.20±0.01 ^d	0.51±0.03 ^b	0.64±0.01 ^a
5'-UMP	0.38±0.01 ^a	0.09±0.00 ^d	0.03±0.00 ^e	0.14±0.01 ^b	0.11±0.01 ^c
5'-GMP	0.41±0.01 ^a	0.14±0.01 ^{bc}	0.08±0.01 ^d	0.13±0.02 ^c	0.15±0.00 ^b
5'-IMP	0.02±0.00 ^d	0.25±0.01 ^a	0.15±0.01 ^c	0.19±0.01 ^b	0.21±0.01 ^b
5'-AMP	0.17±0.01 ^d	0.42±0.01 ^b	0.13±0.01 ^c	0.35±0.04 ^c	0.49±0.01 ^a
鲜味核苷酸	0.61±0.08 ^d	0.81±0.03 ^b	0.36±0.02 ^e	0.67±0.08 ^c	0.85±0.01 ^a
EUC(g MSG/100 g)	18.05±0.35 ^b	15.70±0.52 ^c	2.69±0.22 ^d	14.83±0.29 ^c	19.37±0.17 ^a
总量	1.32±0.02 ^c	1.41±0.01 ^b	0.58±0.02 ^d	1.32±0.00 ^c	1.60±0.00 ^a

高,因此烘烤处理后的鹿茸菇样品的 EUC 值最高,说明烘烤能显著提升鹿茸菇的鲜味强度。

2.2.5 不同烹饪方式鹿茸菇电子舌分析 通过电子舌分析不同烹饪方式处理的鹿茸菇样品的酸味、涩味、鲜味、咸味以及甜味这五张味道的味觉值,结果见表 4。由表 4 可知,酸味、涩味和咸味均为负值,在电子舌中负值代表未检测出这种味道,因此这 3 种味道可以忽略不计。经烹饪加工后鹿茸菇的甜味除水煮外,其余烹饪方式相比对照组均有所提高,具有显著性差异($P<0.05$),说明汽蒸、无油空气炸制和烘烤易产生甜味物质。鲜味值中,对照组鲜味值最高,经烹饪加工后鹿茸菇鲜味值均有所降低,其中汽蒸处理的鹿茸菇鲜味值最高,无油空气炸制与其并无显著性差异($P>0.05$),而根据 EUC 结果表明烘烤样品的鲜味等效浓度是显著高于其他样品的,而电子舌结果与其不一致,说明只凭 EUC 来判断不同烹饪处理的鹿茸菇样品鲜味并不准确,有研究报道称谷氨酸与 5'-IMP 浓度的比例太低或者太高会对电子舌的检测结果产生影响^[49],这可能是电子舌结果和 EUC 值产生差异的原因。

为了进一步分析不同烹饪方式处理后鹿茸菇风味的区别,对电子舌数据进行 PCA。PCA 累计贡献率越大,说明 PCA 对电子鼻传感器数据的反映程度

越好。图 6 表示不同烹饪方式处理后鹿茸菇电子舌分析采集的数据进行主成分分析所得到的结果,从图中可知,PC1 贡献率为 84.6%,PC2 贡献率为 11.4%,总贡献率为 96.0%,说明可以代表不同烹饪方式处理后鹿茸菇的原始数据整体信息。汽蒸和烘烤距离较近,滋味差异较小,而对照、水煮和无油空气炸制的样品分别分布在 3 个不同的象限,并且距离较远,说明它们之间滋味差异较大。总的来看样品之间基本并无交叉,说明电子舌能够分析出鹿茸菇经不同烹饪方式处理后的滋味差异。

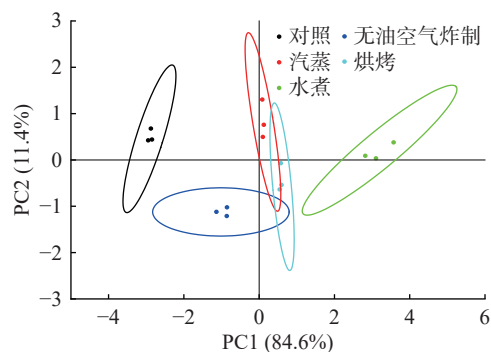


图 6 不同烹饪方式的鹿茸菇电子舌 PCA 分析图
Fig.6 PCA plot of E-tongue results from different cooking methods of *Lyophyllum decastes*

表 4 不同烹饪方式对鹿茸菇味觉值的影响

Table 4 Effect of different cooking methods on taste values in *Lyophyllum decastes*

烹饪方式	酸味	涩味	鲜味	咸味	甜味
对照	-51.70±0.14 ^c	-10.06±0.06 ^d	9.29±0.04 ^a	-3.12±0.01 ^a	14.93±0.07 ^d
汽蒸	-50.74±0.08 ^d	-9.06±0.07 ^b	8.71±0.03 ^b	-4.31±0.03 ^c	16.32±0.06 ^b
水煮	-47.04±0.06 ^a	-7.29±0.06 ^a	6.20±0.03 ^d	-8.12±0.05 ^e	13.86±0.01 ^c
无油空气炸制	-50.04±0.09 ^c	-9.52±0.04 ^c	8.69±0.04 ^b	-3.50±0.03 ^b	15.85±0.06 ^c
烘烤	-49.35±0.08 ^b	-9.18±0.07 ^b	8.28±0.06 ^c	-4.50±0.06 ^d	18.79±0.10 ^a

注: 同列字母不同表示不同烹饪方式下目标参数差异显著($P<0.05$)。

3 讨论与结论

本文研究汽蒸、水煮、无油空气炸制、烘烤 4 种烹饪方式对鹿茸菇主要营养成分和非挥发性风味物质的影响,烹饪方式的不同会对鹿茸菇中的营养物质和非挥发性风味物质产生不同程度的影响。实验结果显示,经水煮处理后,鹿茸菇中的营养成分损失较

大,大部分水溶性营养物质因为鹿茸菇与沸水接触导致流入到水中,因此菇汤中含有一定的营养成分。相较而言,经汽蒸、无油空气炸制和烘烤处理的鹿茸菇的营养成分能够较好地保留,甚至还会使一些营养成分含量略有升高。对于风味品质而言,每种烹饪方式处理后都会产生其独特的风味,四种加工方式处理

后,汽蒸和烘烤样品可溶性糖总含量较对照组无显著性差异($P>0.05$),无油空气炸制样品次之,水煮样品可溶性糖总量降低最显著($P<0.05$);游离氨基酸和核苷酸结果显示,鹿茸菇鲜品经不同烹饪方式处理后,游离氨基酸含量均有所降低,据报道蘑菇经烹饪后,游离氨基酸一般都会降低^[50-51]。四种烹饪方式中,烤箱烘烤的样品能显著提升核苷酸的含量($P<0.05$),同时其 EUC 值最高,说明烘烤样品的鲜味显著高于其他烹饪方式处理样品。但电子舌结果中对照组鲜味值最高。为更加全面评价烹饪方式对鹿茸菇风味品质的影响,本研究通过智能感官电子舌结合主成分分析,结果显示汽蒸和烘烤样品滋味类别较相似,对照组与四种烹饪方式处理样品滋味差异明显。综上所述,本文初步探究了汽蒸、水煮、无油空气炸制和烘烤处理后的鹿茸菇中营养物质和非挥发性风味物质变化规律,研究发现四种烹饪方式中,烘烤处理的鹿茸菇对营养物质和非挥发性风味物质的保留效果最好。本文为鹿茸菇的营养特性和非挥发性风味物质研究提供一定的理论参考,以便更加科学合理的烹饪鹿茸菇,但未对挥发性物质进行分析,因此下一步将研究不同烹饪方式对鹿茸菇挥发性风味物质的影响及其变化规律。

© The Author(s) 2025. 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] 李文俊,温世勇,张洪勇,等. 鹿茸菇研究进展[J]. 中国食用菌, 2022, 41(3): 1-5. [LI W J, WEN S Y, ZHANG H Y, et al. Research progress of *Lyophyllum decastes*[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(3): 1-5.]
- [2] 张凌娜. 鹿茸菇生态学特性与液体菌种配方的优化研究[J]. 食药菌, 2020, 28(6): 425-427, 439. [ZHANG L S. Study on ecological characteristics and optimization of liquid spawn formula of *Lyophyllum decastes*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2020, 28(6): 425-427, 439.]
- [3] 汤倩倩,孙育红. 以稻草和鹿茸菇菌渣为原料的大棚畦式草菇栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2022(1): 118-120. [TANG Q Q, SUN Y H. Cultivation of straw mushrooms in greenhouse beds using rice straw and *Lyophyllum decastes* dregs as raw materials[J]. China Vegetables, 2022(1): 118-120.]
- [4] 杨斌,方柄栋,郑峻,等. 鹿茸菇多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(24): 41-49. [YANG B, FANG B D, ZHENG J, et al. Extraction procedure optimization and antioxidant activity of polyphenols from *Lyophyllum decastes*[J]. Food Research and Development, 2021, 42(24): 41-49.]
- [5] 晁琛. 食品加工过程中淀粉与脂质等组分互作机制及其对营养健康特性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2021. [CHAO C. Mechanism underlying the interactions between starch and lipids during food processing and their effects on starch nutritional properties[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.]
- [6] 郭硕,刘景圣,郑明珠. 热处理过程中食品组分与淀粉相互作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 17-24.

- [7] GUO S, LIU J S, ZHENG M Z. Research progress on the interaction between food components and starch during heat treatment[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 17-24.]
- [8] YANG W J, LU X J, ZHANG Y, et al. Effect of cooking methods on the health-promoting compounds, antioxidant activity and nitrate of tatsoi (*Brassica rapa* L. ssp. *narinosa*) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(8): e14008.
- [9] VOLDEN J, BORGE G I, HANSEN M, et al. Processing (blanching, boiling, steaming) effects on the content of glucosinolates and antioxidant-related parameters in cauliflower (*Brassica oleracea* L. ssp. *botrytis*) [J]. Food Science and Technology, 2009, 42(1): 63-73.
- [10] KOPLIK R, MESTEK O, KOMINKOYA J, et al. Effect of cooking on phosphorus and trace elements species in peas[J]. Food Chemistry, 2004, 85(1): 31-39.
- [11] SUN L, BAI X, ZHUANG Y, et al. Effect of different cooking methods on total phenolic contents and antioxidant activities of four *Boletus* mushrooms[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3362-3368.
- [12] VOLDEN J, BORGE G I, BENGTSSON G B, et al. Effect of thermal treatment on glucosinolates and antioxidant-related parameters in red cabbage (*Brassica oleracea* L. ssp. *capitata* f. *rubra*) [J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 595-605.
- [13] 刘玉芬. 不同的加工方式对双孢菇食用品质的影响[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019. [LIU Y Q. Effect of different processing methods on the edible quality of *Agaricus bisporus*[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2019.]
- [14] TAN Y S, BASKARAN A, NALLATHAMBY N, et al. Influence of customized cooking methods on the phenolic contents and antioxidant activities of selected species of oyster mushrooms[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52: 3058-3064.
- [15] SUN Y J, LÜ F Y, TIAN J H, et al. Domestic cooking methods affect nutrient, phytochemicals, and flavor content in mushroom soup[J]. Food Sci & Nutrition, 2019, 7: 1969-1975.
- [16] LEE K, CHOI Y, KIM Y, et al. Effect of different cooking methods on the true retention of vitamins, minerals, and bioactive compounds in shiitake mushrooms (*L. edodes*) [J]. Food Sci Technol Res, 2019, 25: 115-122.
- [17] 陈万超,李文,吴迪,等. 11 个主栽品种香菇可溶性糖和有机酸测定及滋味品质评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 273-279. [CHEN W C, LI W, WU D, et al. Determination of soluble sugar and organic acid components and evaluation of taste quality of 11 main varieties cultivars of *Lentinula edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 273-279.]
- [18] 陈荣荣,李文,吴迪,等. 大球盖菇生长发育过程中营养、质构和滋味特征的动态变化[J]. 食用菌学报, 2022, 29(4): 42-54. [CHEN R R, LI W, WU D, et al. Nutrients, texture and taste characteristics of *Stropharia rugosoannulata* during growth and development[J]. Acta Edulis Fungi, 2022, 29(4): 42-54.]
- [19] TAYLOR M W, HERSHEY H V, LEVINE R A, et al. Improved method of resolving nucleotides by reversed-phase high-performance liquid chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 1981, 219(1): 133-139.
- [20] YAMAGUCHI S, YOSHIKAWA T, IKEDA S, et al. Measurement of the relative taste intensity of some α -amino acid and 5'-nucleotides[J]. Journal of Food Science, 2006, 36(6): 846-849.
- [21] 周浩宇,俞明君,聂远洋,等. 热加工方式对香菇营养特性和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 106-114. [ZHOU H Y, YU M J, NIE Y Y, et al. Effects of heat processing methods on nutritional properties and antioxidant activity of *Lentinus edodes*[J].

Food Science, 2021, 42(15): 106–114.]

[21] 罗晓莉, 孙达锋, 曹晶晶, 等. 不同烹饪方法对杏鲍菇预制菜营养品质的影响[J]. 中国食用菌, 2022, 41(12): 52–56. [LUO X L, SUN D F, CAO J J. Effects of different cooking methods on nutritional quality of *Pleurotus eryngii* prepared dishes[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(12): 52–56.]

[22] PALERMO M, PELLEGRINI N, FOGLIANO V, et al. The effect of cooking on the phytochemical content of vegetables[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(6): 1057–1070.

[23] RUIZ-RODRIGUEZ A, MARIN F R, OCANA A, et al. Effect of domestic processing on bioactive compounds[J]. Phytochemistry Reviews, 2008, 7(2): 345–384.

[24] STEWART A J, BOZONNET S, MULLEN W, et al. Occurrence of flavonols in tomatoes and tomato-based products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(7): 2663–2669.

[25] WATCHTEL-GALOR S, WONG K W, BENZIE I F. The effect of cooking on Brassica vegetables[J]. Food Chemistry, 2008, 110: 706–710.

[26] 张慢, 邢苏徽, 千春录, 等. 不同加工方式对秀珍菇营养成分和抗氧化性的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 67–73. [ZHANG M, XING S W, QIANG C L, et al. Effects of different processing methods on nutritional components and antioxidant activity of *Pleurotus geesteranus*[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(12): 67–73.]

[27] SU C H, LAI M N, NG L T. Effects of different extraction temperatures on the physicochemical properties of bioactive polysaccharides from *Grifola frondosa*[J]. Food Chemistry, 2017, 220: 400–405.

[28] 张茜, 李超, 崔珏, 等. 香菇及香菇柄的研究进展[J]. 农产品加工, 2018(21): 53–56. [ZHANG Q, LI C, CUI Y, et al. Research progress of *Lentinus edodes* and *Lentinus edodes* stem[J]. Farm Products Processing, 2018(21): 53–56.]

[29] 席亚丽, 茆爱丽, 王晓琴, 等. 荷叶离褶伞子实体菌丝体及发酵液蛋白质营养价值评价[J]. 菌物学报, 2010, 29(4): 603–607. [XI Y L, MAO A L, WANG X Q, et al. Assessment for protein nutrition of fruit bodies, mycelia and fermentation broth of *Lyophyllum decastes*[J]. Mycosystema, 2010, 29(4): 603–607.]

[30] NG Z X, CHUA K H, KUPPUSAMY U R, et al. Proteomic analysis of heat treated bitter melon (*Momordica charantia* L. var. Hong Kong Green) using 2D-DIGE[J]. Food Chemistry, 2014, 148(4): 155–161.

[31] TSAI S Y, TSAI H L, MAU J L. Non-volatile taste components of *Agaricus blazei*, *Agrocybe cylindracea* and *Boletus edulis*[J]. Food Chemistry, 2008, 107(3): 977–983.

[32] 刘培基, 崔文甲, 王文亮, 等. 食用菌风味物质及其在美拉德反应中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 188–192. [LIU P J, CUI W J, WANG W L, et al. Research progress of edible fungi flavor substances and their application in Maillard reaction[J]. Food Research and Development, 2020, 41(15): 188–192.]

[33] MAU J H, LIN H C, CHEN C C. Non-volatile components of several medical mushrooms[J]. Food Research International, 2001(34): 521–526.

[34] ZENG C X, LI H G, LI J Q, et al. Effects of different cooking methods on proximate composition, digestion characteristics, and antioxidant activity of *Lentinus edodes*[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138107.

[35] LI W, GU Z, YANG Y, et al. Non-volatile taste components

of several cultivated mushrooms[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 427–431.

[36] MIRZAEI-BAKTASH H, HAMDAMI N, TORABI P, et al. Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(1): 108–115.

[37] ELBIR Z, OZ F. Determination of creatine, creatinine, free amino acid and heterocyclic aromatic amine contents of plain beef and chicken juices[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58: 3293–3302.

[38] YING L, FAN H, HONG Y, et al. Effects of preservation methods on amino acids and 5'-nucleotides of *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 221–225.

[39] TIAN Y T, ZHAO Y T, HUANG J J, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 714–722.

[40] 陈梦飞. 低温真空烹调对鸭肉风味特性及品质的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [CHEN M F. Research on the effect of sous vide cooking on the flavor characteristics and quality of duck meat[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]

[41] YU Y R, WANG G U, YIN X Y, et al. Effects of different cooking methods on free fatty acid profile, water-soluble compounds and flavor compounds in Chinese Piao chicken meat[J]. Food Research International, 2021, 149: 110696.

[42] VAN BOEKEL, M. A. J. S. Formation of flavor compounds in the Maillard reaction[J]. Biotechnology Advances, 2006, 24(2): 230–233.

[43] LEKSRIOMPONG P, GERARD P, OPECTCHARAT K L, et al. Bitter taste inhibiting agents for whey protein hydrolysate and whey protein hydrolysate beverages[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(8): 282–287.

[44] 陈国华. 烹饪方式对水芹品质和风味的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021. [CHEN G H. Effects of cooking methods on the quality and flavor of water celery[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.]

[45] 何捷, 蔡春芳, 王永玲, 等. 4种烹饪方式对中华绒螯蟹感官及风味品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 53–59. [HE J, CAI C F, WANG Y L, et al. Effect of cooking condition on the sensory and flavour quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food & Machinery, 2017, 33(6): 53–59.]

[46] MAU J. The umami taste of edible and medicinal mushrooms[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2005, 7(1): 119–126.

[47] SUN L, ZHANG Z, XIN G, et al. Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms[J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 96: 176–187.

[48] DONG M, QIN L, XUE J, et al. Simultaneous quantification of free amino acids and 5'-nucleotides in shiitake mushrooms by stable isotope-labeling-LC-MS/MS analysis[J]. Food Chemistry, 2018, 268: 57–65.

[49] YAMAGUCHI S, NINOMIYA K. Umami and food palatability[J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130(4): 921–926.

[50] REIS G C L, GUIDI L R, FERNANDES C, et al. UPLC-UV method for the quantification of free amino acids, bioactive amines, and ammonia in fresh, cooked, and canned mushrooms[J]. Food Anal Methods, 2020, 13(8): 1613–1626.

[51] ROTOLA-PUKKILA M, YANG B, HOPIA A. The effect of cooking on umami compounds in wild and cultivated mushrooms[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 56–66.