

酶解工艺对香菇风味物质的影响

崔国梅¹ 李顺峰¹ 高帅平¹ 刘丽娜¹ 胡雅婷² 许方方¹ 王安建¹

(1. 河南省农业科学院农产品加工研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学, 河南 郑州 450002)

摘要: [目的] 研究酶解工艺对香菇风味物质的影响。[方法] 采用优化后的酶解工艺, 以游离氨基酸、5'-核苷酸、等效鲜味浓度(EUC)、挥发性风味物质及感官评价为指标, 多角度探讨酶解工艺对香菇风味物质的影响。[结果] 酶解后, 香菇中游离氨基酸含量为 19.85 mg/g, 为酶解前的 1.45 倍, 其中谷氨酸和天冬氨酸含量分别提升了 83.80%, 27.13%; 5'-核苷酸含量为 0.44 mg/g, 为酶解前的 1.76 倍, 其中 5'-GMP 含量提升了 166.67%, 5'-AMP 提升了 125.00%; EUC 为 63.35 g/100 g, 为酶解前的 2.03 倍。酶解前后挥发性成分种类及数量也有较大差异, 酶解后综合感官评分显著提高。[结论] 酶解工艺对香菇中非挥发性风味成分提升有明显效果, 并显著改变了香菇的挥发性成分。

关键词: 香菇; 酶解工艺; 游离氨基酸; 5'-核苷酸; EUC; 挥发性成分

Effect of enzymatic hydrolysis process on flavor compounds of *Lentinula edodes*

CUI Guomei¹ LI Shunfeng¹ GAO Shuaiping¹ LIU Lina¹ HU Yating²
XU Fangfang¹ WANG Anjian¹

(1. Institute of Agro-products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2. Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: [Objective] To study the effect of the enzymatic hydrolysis process on the flavor compounds of *Lentinula edodes*. [Methods] The optimized enzymatic hydrolysis process is adopted, with free amino acid, 5'-nucleotide, equivalent umami concentration (EUC), volatile flavor compounds, and sensory evaluation as indicators, to explore the effect of enzymatic hydrolysis process on flavor compounds of *Lentinula edodes* from multiple perspectives. [Results] After enzymatic hydrolysis, the free amino acid content in *Lentinula edodes* is 19.85 mg/g, 1.45 times higher than that before enzymatic hydrolysis, with glutamic acid and aspartic acid increasing by 83.80% and 27.13%, respectively. The 5'-nucleotide is 0.44 mg/g, 1.76 times higher than that before enzymatic hydrolysis, with 5'-GMP increasing by 166.67% and 5'-AMP by 125.00%. The EUC is 63.35 g/100 g, 2.03 times higher than that before enzymatic hydrolysis. There are also significant differences in the types and quantities of volatile components before and after enzymatic hydrolysis. The sensory score is significantly improved after enzymatic hydrolysis. [Conclusion] The enzymatic hydrolysis process significantly enhances the non-volatile flavor compounds of *Lentinula edodes* and noticeably changes their volatile components.

Keywords: *Lentinula edodes*; enzymatic hydrolysis process; free amino acid; 5'-nucleotides; EUC; volatile components

香菇的风味分为滋味和气味, 鲜美滋味主要因其含有丰富的游离氨基酸、单核苷酸等非挥发性风味物质。香菇等食用菌中特有的鲜味物质为单核苷酸, 如 5'-鸟苷酸(5'-GMP)、5'-肌苷酸(5'-IMP)、5'-黄苷酸(5'-XMP)和 5'-腺苷酸(5'-AMP), 其中 5'-GMP 含量最丰富^[1]。游离氨基酸为香菇重要的呈鲜物质, 其中谷氨酸与天门冬氨酸是

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(编号: 242102111068); 河南省重点研发专项项目(编号: 231111112500); 河南省农业科学院自主创新项目(编号: 2025ZC86)

通信作者: 王安建(1969—), 男, 河南省农业科学院农产品加工研究中心研究员, 硕士。E-mail: 309294051@qq.com

收稿日期: 2024-11-15 **改回日期:** 2025-04-30

引用格式: 崔国梅, 李顺峰, 高帅平, 等. 酶解工艺对香菇风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(10): 186-193.

Citation: CUI Guomei, LI Shunfeng, GAO Shuaiping, et al. Effect of enzymatic hydrolysis process on flavor compounds of *Lentinula edodes*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 186-193.

最具典型的蘑菇风味^[2]。香菇中含硫化化合物、醇类、醛类等物质共同构成香菇的特征香气。

酶解技术是公认的绿色、高效、营养的加工方式,在食品风味释放、分子降解、活性物质提取等方面具有显著效果。目前,有关酶解工艺提升香菇风味的研究多以香菇(柄)粉为原料提取风味物质,并进行浓缩用作调味料的基料^[3-4];或考察某种单酶或复合酶对香菇某种鲜味成分的影响^[5-7]。而以鲜香菇为原料,多角度考察酶解工艺对香菇中游离氨基酸含量、5'-核苷酸、等效鲜味浓度(EUC)、挥发性成分及感官评定等指标的影响尚未见报道。

研究拟以鲜香菇为原料,利用优化后的酶解工艺对香菇进行处理,借助HPLC、GC-IMS等分析手段考察酶解工艺对香菇风味物质的影响,为香菇等食用菌制品的风味提升提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香菇:无腐烂霉变等,产地为河南嵩县;

5'-磷酸二酯酶(食品级,1万U/g)、风味蛋白酶(2万U/g)、纤维素酶(食品级,2万U/g)、木瓜蛋白酶(食品级,5万U/g)、中性蛋白酶(食品级,2万U/g):南宁庞博生物工程有限公司;

氨基酸标准品(谷氨酸、天冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸、脯氨酸、甘氨酸、精氨酸、丙氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、甘氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、色氨酸):美国Sigma公司;

核苷酸标准品(5'-AMP、5'-GMP、5'-IMP、5'-XMP):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

甲醇:色谱级,美国Dikma公司;

其他试剂均为国产分析纯;

WXT-5毛细管柱:15 m×0.53 mm,0.53 μm,美国Restek公司;

紫外可见分光光度计:UV-1800型,岛津仪器(苏州)有限公司;

台式高速冷冻离心机:H2050R型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

艾柯超纯水机:E-xceed-BC-16型,成都康宁实验专用纯水设备厂;

恒温磁力搅拌器:DF-101S型,巩义市予华仪器有限公司;

恒温振荡器:THZ-98AB型,上海一恒科学仪器有限公司;

GC-IMS仪:Flavour Spec 1H1-00053型,德国GAS公司;

高效液相色谱仪:Ultimate3000型,美国戴安公司;

氨基酸自动分析仪:835-50型,日本日立公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料预处理 挑拣同批采收,成熟度与大小均匀一致、且无机械损伤的香菇,清洗干净;切片大小、厚度均匀一致;90℃漂烫4 min,沥干水分;粉碎,冷藏备用。

1.2.2 复合酶筛选 以氨基酸态氮和5'-核苷酸含量为指标,选择风味蛋白酶、纤维素酶、5'-磷酸二酯酶、木瓜蛋白酶、中性蛋白酶在其最适反应条件下进行酶解,筛选出性能较好的酶按比例进行复配。

1.2.3 单因素试验 分别考察复合酶添加量(0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%)、酶解pH(3,4,5,6,7)、酶解时间(1,2,3,4,5 h)和酶解温度(30,40,50,60,70℃)对香菇中氨基酸态氮、5'-核苷酸含量的影响。

1.2.4 正交试验 在单因素试验基础上,选择复合酶添加量、酶解pH、酶解时间、酶解温度4个因素进行L₉(3⁴)正交试验,以氨基酸态氮、5'-核苷酸含量为指标,采用综合平衡法得到复合酶最佳酶解条件。

1.2.5 氨基酸态氮的定量 按GB 5009.235—2016执行,以NH₃-N含量为横坐标,吸光度值(400 nm)为纵坐标,绘制标准曲线方程 $y=0.8549x-0.0069$ ($R^2=0.9927$)。

1.2.6 5'-核苷酸含量的定量 参照陈钧辉等^[8]的方法,以磷含量为横坐标,吸光度值(660 nm)为纵坐标,绘制标准曲线方程 $y=4.836x-0.0492$ ($R^2=0.9977$)。

1.2.7 滋味活性值(TAV)及滋味成分阈值测定 参照陈万超等^[9]的方法。

1.2.8 游离氨基酸含量测定 参照刘芹等^[10]的方法并稍作改动。6 000 r/min离心10 min,收集上清液,采用微孔过滤膜(0.22 μm)过滤,滤液进氨基酸自动分析仪进行测定和分析。

1.2.9 呈鲜核苷酸(5'-AMP、5'-GMP、5'-IMP、5'-XMP)含量测定 参照刘芹等^[10]的方法并稍作改动。香菇酶解前后样液于6 000 r/min离心10 min,上清液过0.45 μm滤膜后进行HPLC分析,通过比对氨基酸混合标品的峰谱对样品中氨基酸含量进行定性和定量分析。

1.2.10 等效鲜味浓度(EUC)测定 用EUC值表征食品的鲜味浓度^[11],以谷氨酸钠(MSG)的量表示呈鲜物质的总量,参照李顺峰等^[11]的方法计算EUC值。

1.2.11 挥发性成分测定 参照姜宁等^[12]的方法略有改动。准确称取(0.20±0.003) g香菇样品于20 mL顶空进样瓶中,60℃孵化20 min,经顶空进样利用GC-IMS进行测试。气相色谱(GC)条件:石英毛细管柱(15 m×0.53 mm,0.5 μm);色谱柱温度40℃;载气程序N₂(纯度≥99.999%);载气速度:0~2 min,2 mL/min;2~10 min,2~10 mL/min;10~20 min,10~100 mL/min;20~30 min,100~150 mL/min;分析时间30 min。

1.2.12 感官评价 感官评价小组由8男8女组成,年龄为28~40岁,以香菇的鲜味、甜味、苦味、气味及综合评分

作为评价指标。为评价鲜味,在感官评价前用不同质量浓度(0.08,0.12,0.17,0.24,0.34,0.49,0.70,1.00 g/L)的谷氨酸钠溶液对相关人员进行培训。各指标评分采用十分制:0~<2,很弱;2~<4,弱;4~<6,中等;6~<8,强;8~<10,非常强^[13]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 23.0、Excel 软件进行数据分析整理,利用 Origin 9.6 软件作图。利用 GC-IMS library search 软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对香菇子实体挥发性风味物质进行定性分析,采用 GC-IMS 设备内置的 LAV 软件的 GalleryPlot 插件绘制指纹图谱。

2 结果与分析

2.1 香菇酶解工艺优化

2.1.1 复合酶的筛选 由图 1 可知,5'-磷酸二酯酶酶解液中 5'-核苷酸含量最高,为(0.285±0.020) mg/g,且与其他组差异显著($P<0.05$)。木瓜蛋白酶酶解液中氨基酸态氮含量最高,为(0.647±0.030) mg/g,且与其他组差异显著($P<0.05$)。因此,选择 5'-磷酸二酯酶与木瓜蛋白酶进行复配。5'-磷酸二酯酶主要贡献为提高 5'-核苷酸含量,而木瓜蛋白酶主要贡献为提高氨基酸态氮含量,根据预试验,两者按质量比 1:1 进行复配。

2.1.2 单因素试验 由图 2 可知,当复合酶添加量为

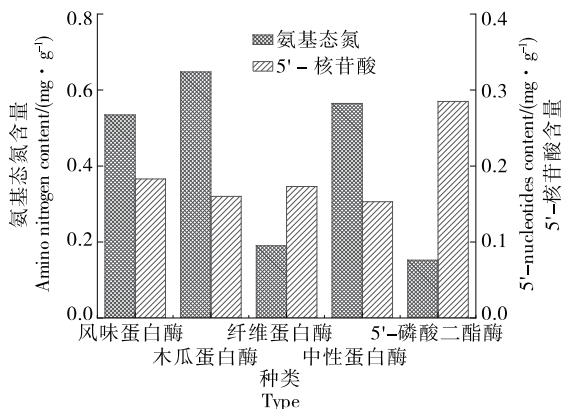


图 1 酶对氨基酸态氮和 5'-核苷酸含量的影响

Figure 1 Effect of different enzymolysis on amino acid nitrogen and 5'-nucleotide content

0.3%时,氨基酸态氮含量为(0.423±0.013) mg/g,5'-核苷酸含量为(0.135±0.010) mg/g,之后均呈缓慢上升趋势,且与0.4%,0.5%的添加量无显著差异,因此复合酶添加量取0.3%。当酶解时间为3 h时,氨基酸态氮含量为(0.450±0.010) mg,之后几乎不再增加;当酶解时间为4 h时,5'-核苷酸含量为(0.275±0.007) mg/g,之后不再显著上升,综合考虑,酶解时间取4.0 h。同理,酶解温度为50℃、酶解pH

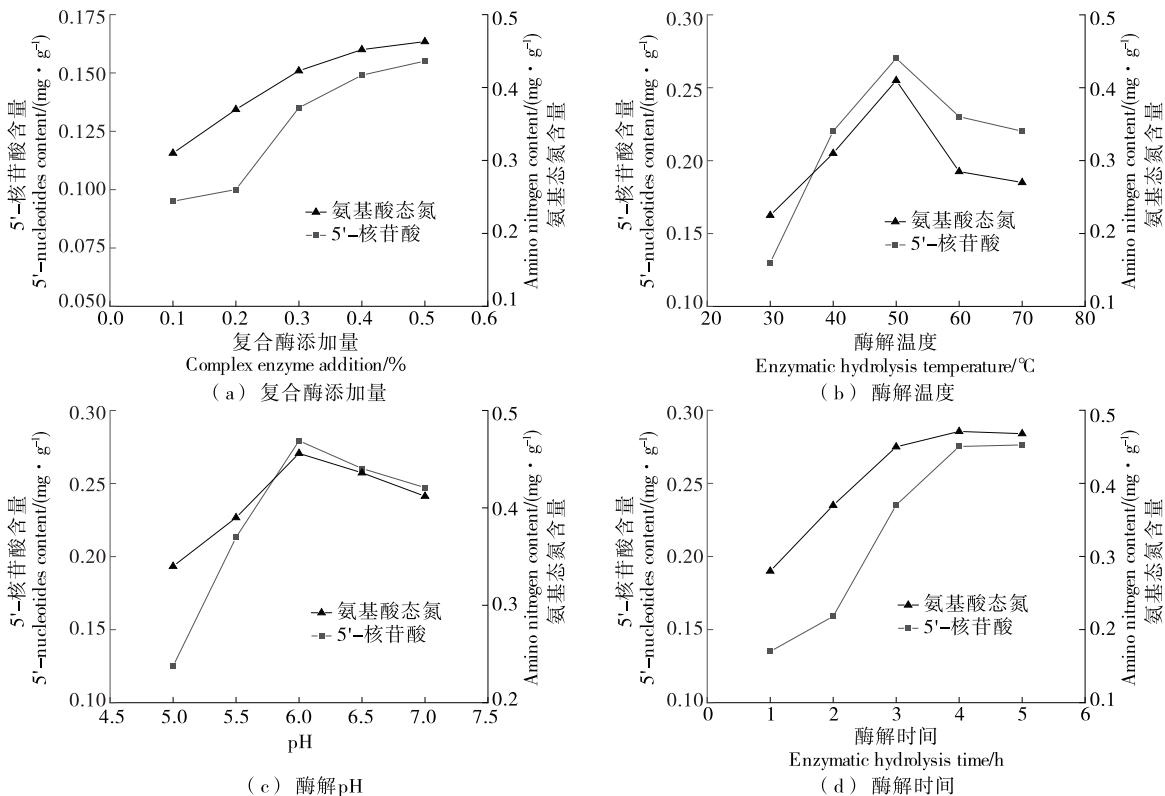


图 2 各单因素对氨基酸态氮及 5'-核苷酸含量的影响

Figure 2 Effect of each single factor on amino acid nitrogen and 5'-nucleotide content

为6.0时,氨基酸态氮及5'-核苷酸含量均为最高。

2.1.3 正交优化试验 在单因素试验基础上,选取复合酶添加量、酶解温度、酶解时间、酶解pH进行正交试验。试验因素水平表见表1,试验设计及结果见表2。

表1 正交试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal tests

水平	A 复合酶添 加量/%	B 酶解温 度/℃	C 酶解时 间/h	D 酶解 pH
1	0.2	40	3	5.5
2	0.3	50	4	6.0
3	0.4	60	5	6.5

由表2可知,各因素对氨基酸态氮含量的影响顺序依次为D>A>C>B,最佳组合为A₃B₂C₁D₃,对5'-核苷酸含量的影响顺序依次为B>D>A>C,最佳组合为A₃B₂C₁D₂。从极差R值来看,对于氨基酸态氮而言,酶解pH对氨基酸态氮含量影响最大,对于5'-核苷酸而言,酶解pH并非其首要影响因素。综合考虑,最佳酶解工艺为复合酶添加量0.4%、酶解温度50℃、酶解时间3h、酶解pH6.5,此时氨基酸态氮含量为(0.969±0.017)mg/g,5'-核苷酸含量为(0.217±0.012)mg/g。

2.2 酶解对氨基酸含量的影响

游离氨基酸是食用菌重要的呈鲜成分,其中的谷氨

酸及天冬氨酸(MSG-like)可与T1R1+T1R3等鲜味受体结合,再由5'-核苷酸进行强化^[14]。根据游离氨基酸味觉特征将其分为苦味、鲜味、甜味和无味四类^[15-16],甜味氨基酸和MSG-like氨基酸是食用菌味道鲜美的重要原因之一^[17]。由表3可知,酶解前后共检出16种游离氨基酸,色氨酸因含量较低或未检测到,与刘芹等^[10]的研究结果一致。酶解后鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸及各氨基酸含量均有显著提高,对于每种游离氨基酸而言,呈鲜味的谷氨酸含量增加尤为明显,其谷氨酸酶解后TAV为10.56,是酶解前的1.47倍,对整体鲜味的提升贡献较大。

酶解前鲜味氨基酸含量为3.53mg/g,酶解后为5.55mg/g,提升了57.22%。根据Yang等^[18]对鲜味氨基酸的分级:低等(<5mg/g)、中等(5~20mg/g)和高等(>20mg/g),酶解前鲜味氨基酸含量处于低等水平,而酶解后处于中等水平,说明酶解工艺不仅可提高香菇中游离氨基酸总量,还可显著提高呈鲜氨基酸含量,在改善产品风味的同时也可增加其营养价值。

酶解前甜味氨基酸含量为3.54mg/g,酶解后为4.84mg/g,含量有所升高,与李晓龙等^[19]的研究趋势不同,可能是烹饪过程中甜味氨基酸在高温条件下参与美拉德反应形成Schiff碱和其他中间体,或者发生了脱氨基作用转变为酮酸或醛酸,导致其含量降低,而酶解工艺通过水解蛋白及多肽等提高了甜味氨基酸含量。甜味氨基酸中丙氨酸的TAV值>1,说明该氨基酸对甜味贡献

表2 正交试验设计及结果

Table 2 Design and results of orthogonal tests

试验号		A	B	C	D	氨基酸态氮含量/ (mg·g ⁻¹)	5'-核苷酸含量/ (mg·g ⁻¹)
1		1	1	1	1	0.645±0.010	0.107±0.007
2		1	2	2	2	0.650±0.013	0.203±0.009
3		1	3	3	3	0.676±0.009	0.104±0.004
4		2	1	2	3	0.688±0.014	0.089±0.002
5		2	2	3	1	0.621±0.007	0.201±0.008
6		2	3	1	2	0.672±0.011	0.186±0.010
7		3	1	3	2	0.753±0.012	0.173±0.007
8		3	2	1	3	0.969±0.017	0.217±0.012
9		3	3	2	1	0.647±0.015	0.166±0.006
氨基酸态氮	k ₁	0.657	0.695	0.762	0.638		
	k ₂	0.660	0.747	0.662	0.692		
	k ₃	0.790	0.665	0.683	0.778		
	R	0.133	0.082	0.100	0.140		
5'-核苷酸	k ₁	0.138	0.123	0.170	0.158		
	k ₂	0.159	0.207	0.153	0.187		
	k ₃	0.185	0.152	0.159	0.137		
	R	0.047	0.084	0.017	0.050		

表 3 酶解前后游离氨基酸成分对比^{[18-19]†}

Table 3 Comparison of free amino acid components before and after enzymatic hydrolysis

类别	呈味成分	阈值	游离氨基酸含量/ (mg·g ⁻¹)		TAV 值	
			酶解前	酶解后	酶解前	酶解后
鲜味	天冬氨酸	1.0	1.37	1.88	1.37	1.88
	谷氨酸	0.3	2.16	3.67	7.20	10.56
	小计		3.53	5.55		
甜味	丙氨酸	0.6	0.74	1.05	1.23	1.75
	丝氨酸	1.5	0.72	1.00	0.48	0.67
	苏氨酸	2.6	0.72	0.98	0.28	0.38
	甘氨酸	1.3	0.72	0.93	0.55	0.72
	脯氨酸	3.0	0.62	0.88	0.21	0.29
	小计		3.54	4.84		
苦味	异亮氨酸	0.9	0.62	0.84	0.69	0.93
	亮氨酸	1.9	1.03	1.50	0.54	0.79
	缬氨酸	0.4	1.21	1.59	3.03	3.98
	组氨酸	0.2	0.40	0.56	2.00	2.80
	精氨酸	0.5	0.82	1.16	1.64	2.32
	苯丙氨酸	0.9	0.68	0.97	0.76	1.08
	小计		4.21	6.62		
	其他		0.60	0.82		
	赖氨酸		0.80	1.36		
	酪氨酸		0.52	0.66		
	小计		1.92	2.84		

† “—”表示未查到或无法计算。

最大。

酶解前苦味氨基酸含量为 4.21 mg/g, 占总氨基酸含量的 30.66%, 酶解后苦味氨基酸含量为 6.62 mg/g, 占总氨基酸含量的 34.57%, 含量和占比均有所升高, 与李延年^[20]的研究并不一致, 这可能与原料和酶解工艺有关。酶解前后有几种苦味氨基酸的 TAV 值>1, 且苦味氨基酸含量有所提高, 但氨基酸苦味特性可能会被甜味及鲜味掩盖, 从而使整体不呈现苦味^[21], 反而增加了风味的层次感。

2.3 酶解对 5'-核苷酸含量的影响

5'-核苷酸本身不直接呈现鲜味, 可通过与 MSG-like

氨基酸的协同作用而对食用菌鲜味产生远大于 MSG-like 氨基酸的贡献^[22], 故常被用作鲜味增强剂^[23]。由图 3 可知, 酶解前 5'-核苷酸含量为 0.25 mg/g, 酶解后为 0.44 mg/g, 为酶解前的 1.76 倍。酶解后各 5'-核苷酸含量均有所增加, 尤其是 5'-AMP 和 5'-GMP, 酶解后 5'-GMP 含量较酶解前提升了 166.67%, 5'-AMP 提升了 125.00%, 5'-IMP 提升了 20.00%, 5'-XMP 提升了 40.00%, 其中 5'-GMP 含量为 0.16 mg/g, 超过其阈值, 说明其对鲜味贡献最为显著。5'-GMP 是一种鲜味增强剂, 能够赋予食用菌肉香味, 也可产生比味精更强的鲜味。

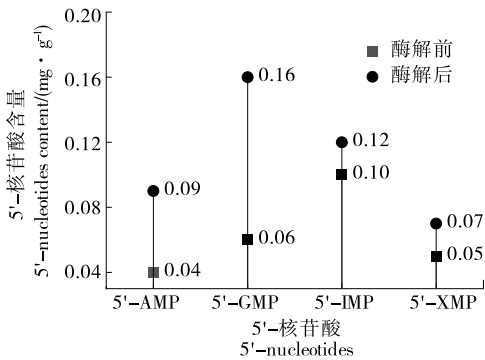


图 3 酶解前后 5'-核苷酸含量对比

Figure 3 Comparison of 5'-nucleotide content before and after enzymatic hydrolysis

2.4 酶解对 EUC 的影响

EUC 值表征食品鲜味程度, Mau^[28]将 EUC 分为 4 个等级: 第一等级>1 000 g/100 g、第二等级 100~1 000 g/100 g、第三等级 10~100 g/100 g 及第四等级<10 g/100 g。由表 4 可知, EUC 从酶解前的 31.19 g/100 g 显著提升至酶解后的 66.99 g/100 g, 酶解前后 EUC 均处于第三等级, 但酶解后 EUC 为酶解前的 2.15 倍。综上, 酶解可提升香菇的鲜味成分含量, 尤其对谷氨酸和 5'-GMP 具有显著效果。

2.5 酶解对香菇挥发性风味成分的影响

GC-IMS 以其高灵敏度、高分辨率、可视化等优势被用于食用菌^[24-25]、果蔬^[26-27]、肉制品^[28-29]、油脂^[30]等食品风味分析中。由表 5 可知, 酶解前后香菇中共鉴定出 26 种挥发性化合物, 包括醇类 4 种, 酯类 5 种, 醛类 5 种, 杂环类 6 种, 烷烃类 2 种, 其他类 4 种。由图 4 可知, 酶解前

表 4 酶解前后鲜味成分对比							
Table 4 Comparison of umami components before and after enzymatic hydrolysis							
组别	呈鲜氨基酸/(mg·g ⁻¹)		呈鲜核苷酸/(mg·g ⁻¹)				EUC/(10 ⁻² g·g ⁻¹)
	谷氨酸	天冬氨酸	5'-AMP	5'-GMP	5'-IMP	5'-XMP	
酶解前	2.16	1.37	0.04	0.06	0.10	0.05	31.19
酶解后	3.67	1.88	0.09	0.16	0.12	0.07	66.99

表5 复合酶酶解前后挥发性成分对比[†]
Table 5 Comparison of volatile components before and after enzymatic hydrolysis of compound enzyme

种类	化合物名称	保留时间/s	迁移时间/ms	酶解后	酶解前
醇类	乙二醇	187.455	1.169 91	✓	
	正丁醇	173.093	1.185 60	✓	
	2-乙氧基乙醇	200.888	1.338 52		✓
	1,3-丁二醇	287.998	1.127 00		✓
酯类	丙酸己酯	830.821	1.433 39		✓
	3-己烯酸乙酯	595.653	1.251 17	✓	
	丁酸乙酯	289.146	1.557 86	✓	
	丙酸甲酯	162.985	1.095 44	✓	✓
醛类	丙烯酸丁酯	409.464	1.261 46		✓
	壬醛	810.612	1.484 03	✓	
	2-乙基丁醛	240.921	1.511 00	✓	
	2-己烯醛	404.093	1.185 47		✓
杂环类	正己醛-D	270.289	1.299 51		✓
	庚醛	424.093	1.338 31	✓	
	4-甲基噻唑	280.843	1.344 94	✓	
	硫代呋喃	152.349	1.060 69	✓	✓
烷烃类	2-乙基呋喃-D	205.366	1.305 52		✓
	乙基吡嗪	404.018	1.514 74		✓
	2,4,5-三甲基噻唑	538.474	1.148 34	✓	
	2,4-二甲基-1,3-二氧戊环	216.306	1.076 92		✓
其他类	1-苯基丙烷	537.784	1.147 20	✓	
	1,4-桉叶素	604.776	1.307 79		✓
其他类	己酸	547.075	1.301 89		✓
	苯乙烯	423.488	1.415 88	✓	
	2-戊酮-D	180.976	1.372 17	✓	
	2-二乙氨基乙胺	240.855	1.219 73	✓	

[†] -D代表二聚体;“✓”表示含有此种成分。

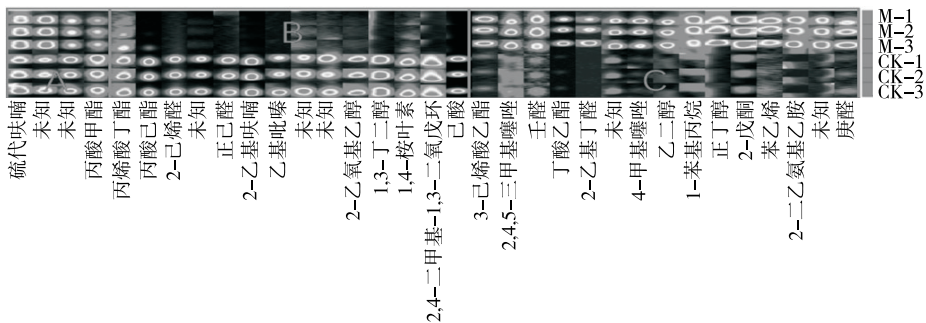
后挥发性成分种类有较大差异,与李延年^[24]的研究较为一致。

区域A为酶解前后样品共有的挥发性成分特征峰区域,只有4种,其中定性出2种,为丙酸甲酯和硫代呋喃。酶解前后各化合物的特征峰差异较显著,则其具体成分差异也较大,说明酶解处理可以显著改变香菇挥发性成分的组成及释放,从而影响其风味。这可能是因为酶解可以将香菇中的蛋白质、核苷酸等大分子分解并释放出氨基酸、核苷等小分子,这些小分子在后续反应中生成挥发性风味物质,如含硫化合物、醛类、酮类等。此外,酶解过程不仅涉及酶解作用机理,还可能涉及美拉德反应、脂肪酸氧化等复杂生化过程。

区域B为酶解前香菇特有的特征峰区域,共13种化合物,定性出11种,包括2-乙氧基乙醇、1,3-丁二醇、丙酸己酯、丙烯酸丁酯、2-己烯醛、正己醛-D、2-乙基呋喃-D、乙基吡嗪、2,4-二甲基-1,3-二氧戊环、1,4-桉叶素、己酸等成分。区域C为酶解后香菇特有的特征峰区域,共15种化合物,定性出13种,包括乙二醇、正丁醇、3-己烯酸乙酯、丁酸乙酯、壬醛、2-乙基丁醛、庚醛、4-甲基噻唑、2,4,5-三甲基噻唑、1-苯基丙烷、苯乙烯、2-戊酮-D、2-二乙氨基乙胺等成分。这些成分之间存在着复杂的相互作用,表现为可相互增强彼此香气的协同效应、相互减弱彼此香气的抑制效应、相互生成或转化效应等,比如醇醛相互作用可增强含硫化合物的香气,含硫化合物与氨基酸在美拉德反应中生成新的杂环类化合物,使香菇及其制品风味更为浓郁,这些复杂的相互作用共同构成了香菇及其制品独特的风味特征。

2.6 感官评价

由图5可知,酶解前后苦味和甜味无显著差异。酶解后甜味及苦味成分含量均有所增加,但苦味及甜味并不突出,一方面可能是很多成分尚未达到其阈值,另一方面可能是在鲜味等的融合及掩盖下未能突显出来。酶解后的鲜味及气味评分显著高于酶解前的($P<0.05$),说明酶



斑点越亮,挥发性成分含量越高;部分挥发性成分未能准确定性,以“未知”表示

图4 酶解前后挥发性成分指纹图谱

Figure 4 Fingerprints of volatile components before and after enzymatic hydrolysis

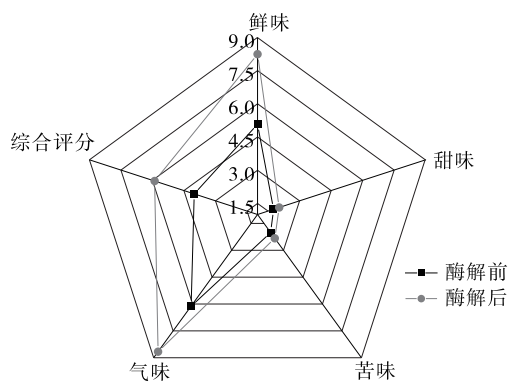


图5 酶解前后感官评分对比

Figure 5 Comparison of sensory scores before and after enzymatic hydrolysis

解更有利于鲜味和气味的释放。综合评分也与酶解前的差异显著($P<0.05$),说明酶解可以显著提升香菇的风味。

3 结论

香菇的最佳酶解工艺为复合酶添加量 0.4%、酶解温度 50℃、酶解时间 3 h、酶解 pH 6.5,此时氨基酸态氮含量为 (0.969 ± 0.017) mg/g, 5'-核苷酸含量为 (0.217 ± 0.012) mg/g。酶解后,游离氨基酸含量为 19.85 mg/g,为酶解前的 1.45 倍,其中谷氨酸和天冬氨酸含量分别提升了 83.80% 及 27.13%; 5'-核苷酸含量为 0.44 mg/g,为酶解前的 1.76 倍,其中 5'-鸟苷酸含量提升了 166.67%, 5'-腺苷酸含量提升了 125.00%; 等效鲜味浓度为 63.35 g/100 g,为酶解前的 2.03 倍。香菇中挥发性风味物质种类由酶解前的 17 种变为酶解后的 19 种,共有挥发性成分 4 种,且酶解前后挥发性成分种类差异较大。此外,酶解后综合感官评分也显著提高,表明酶解有助于香菇风味的提升。后续可对挥发性风味物质进行量化,并从机理上对酶解工艺进行阐述。

参考文献

- [1] 谷镇, 杨焱. 食用菌呈香呈味物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 363-367.
GU Z, YANG Y. Research progress in flavor components of edible fungus[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 363-367.
- [2] KOMAT A. The taste and constituents of foods[J]. Nippon Sho-kuhin Kogyo Gakkaishi, 1969, 3: 26.
- [3] 张婷婷, 丁婧微, 张宾乐. 香菇酶法制备调味品基料的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 199-205.
ZHANG T T, DING N W, ZHANG B L. Process optimization of enzymatic preparation of condiment base material by *Lentinus edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 199-205.
- [4] DU J X, XI J P, CHEN X, 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.

- [5] 李顺峰, 刘丽娜, 王安建, 等. 香菇煮菇水木瓜蛋白酶酶解增鲜技术研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 188-192.
LI S F, LIU L N, WANG A J, et al. Enzymatic hydrolysis to enhance the umami taste of *Lentinus edodes* boiling water by papain[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 188-192.
- [6] 刘丽娜, 李顺峰, 魏书信, 等. 不同蛋白酶对香菇酶解液性质的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41(3): 152-157.
LIU L N, LI S F, WEI S X, et al. Effects of different protease on the property of *Lentinus edodes* enzymatic hydrolysate[J]. China Brewing, 2022, 41(3): 152-157.
- [7] 李顺峰, 刘丽娜, 王安建, 等. 香菇煮菇水 5'-磷酸二酯酶酶解增鲜技术[J]. 河南农业科学, 2021, 50(2): 167-172.
LI S F, LIU L N, WANG A J, et al. Enzymatic hydrolysis to enhance umami taste of *Lentinus edodes* boiling water by 5'-phosphodiesterase[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(2): 167-172.
- [8] 陈钧辉, 陶力, 李俊, 等. 生物化学实验[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2003.
CHEN J H, TAO L, LI J, et al. Biochemistry protocols[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] 陈万超, 杨焱, 冯杰, 等. 不同产地商业品种香菇的滋味成分分析及评价[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 152-157, 166.
CHEN W C, YANG Y, FENG J, et al. Analysis and evaluation of taste components in dried *Lentinula edodes* collected from different areas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(8): 152-157, 166.
- [10] 刘芹, 崔筱, 孔维丽, 等. 不同成熟度香菇鲜味物质的比较分析[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 94-102.
LIU Q, CUI X, KONG W L, et al. Comparative analysis of taste component in shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) harvested at different stages of maturity[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 94-102.
- [11] 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.
- [12] 姜宁, 董浩然, 李巧珍, 等. 不同光质培养下香菇挥发性风味物质的比较分析[J]. 上海农业学报, 2023, 39(6): 32-40.
JIANG N, DONG H R, LI Q Z, et al. Comparative analysis of volatile components of *Lentinus edodes* cultured with different light illumination[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2023, 39(6): 32-40.
- [13] 律诗, 代赐鑫, 刘野, 等. 食用菌鲜味强度评价及鲜味氨基酸和核苷酸提取工艺优化[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 100-108.
LÜ S, DAI Y X, LIU Y, et al. Evaluation of umami intensity of edible fungi and optimization of umami amino acid and

- nucleotide extraction[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(1): 100-108.
- [14] AISALA H, MANNINEN H, LAAKSONEN T, et al. Linking volatile and non-volatile compounds to sensory profiles and consumer liking of wild edible Nordic mushrooms[J]. Food Chemistry, 2020, 304: 125403.
- [15] LIU Q, BAU T, JIN R X, et al. Comparison of different drying techniques for shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): changes in volatile compounds, taste properties, and texture qualities [J]. LWT-Food Science Technology, 2022, 164: 113651.
- [16] 于慧萍, 胡思, 黄文, 等. 干制方式对大球盖菇滋味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 251-256.
- YU H P, HU S, HUANG W, et al. Effects of drying process on the tasty components in *Stropharia rugoso-annulata*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 251-256.
- [17] HOU H, LIU C, LU X S, et al. Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis: influence of drying techniques[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111402.
- [18] YANG J H, LIN H C, MAU J L. Non-volatile taste components of several commercial mushrooms[J]. Food Chemistry, 2001, 72(4): 465-471.
- [19] 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 X L, YANG Y, LI W, 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.
- [20] 李延年. 香菇复配草菇酶解呈味物质的研究与产品开发[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021: 40-41.
- LI Y N. Study on flavor substances of the enzymatic hydrolysate of *Lentinus edodes* mixed with *Volvaria volavacea* and product development[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021: 40-41.
- [21] LIU Y, HUANG F, YANG H, et al. Effects of preservation methods on amino acids and 5'-nucleotides of *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 221-225.
- [22] WANG L Q, HU Q H, PEI F, et al. Influence of different storage conditions on physical and sensory properties of freeze-dried *Agaricus bisporus* slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 164-171.
- [23] RANGEL-VARGAS E, RODRIGUEZ J A, DOMÍNGUEZ R, et al. Edible mushrooms as a natural source of food ingredient/additive replacer[J]. Foods, 2021, 10(11): 2 687.
- [24] MAU J L. The umami taste of edible and medicinal mushrooms[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2005, 7(1/2): 119-126.
- [25] 杜佳馨, 席嘉佩, 方东路, 等. 猪肚菌不同部位的营养评价及风味特征分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(6): 743-756.
- DU J X, XI J P, FANG D L, et al. Nutritional evaluation and flavor characteristic analysis of different parts of *Clitocybe maxima*[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2021, 47(6): 743-756.
- [26] 陈俊宇, 凌建刚, 杜丽慧, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同干燥方式花菇的挥发性风味成分差异[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 43-52.
- CHEN J Y, LING J G, DU L H, et al. Differences in volatile components between different drying methods of *Lentinula edodes* analyzed by GC-IMS[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 43-52.
- [27] 王海波, 钟丹, 林芷欣, 等. 4 种番石榴绿熟期和黄熟期的挥发性物质差异比较[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 176-184, 191.
- WANG H B, ZHONG D, LIN Z X, et al. Comparison of volatile compounds between the green and yellow ripening fruits of four guava species[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 176-184, 191.
- [28] SONG Y T, DU B F, DING Z H, et al. Baked red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder flavor analysis and evaluation under different exogenous Maillard reaction treatment[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110525.
- [29] CHEN L P, TENG X Y, LIU Y, et al. The dynamic change of flavor characteristics in Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during depuration uncovered by mass spectrometry-based metabolomics combined with gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137277.
- [30] 贾效函, 沈才洪, 傅其旭, 等. 气相色谱—离子迁移谱法分析烹调白酒对鸡胗去腥增香的效果[J]. 食品与机械, 2025, 41(1): 208-218.
- JIA X H, SHEN C H, FU Q X, et al. Deodorizing and aroma-enhancing effects of different cooking Baijiu products on chicken gizzards based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food & Machinery, 2025, 41(1): 208-218.
- [31] 吴思雨, 谢萱, 刘雨雯, 等. 基于电子鼻、HS-SPME-GC-MS 和 HS-GC-IMS 评价不同制油工艺对大豆油品质及风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 183-196.
- WU S Y, XIE X, LIU Y W, et al. Effects of different production processes on the quality and flavor of soybean oil as evaluated by electronic nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Science, 2024, 45(4): 183-196.