

酶解法制备菌菇酱工艺优化

Study on optimization of enzymatic hydrolysis technology for mushroom sauce

陈 静 唐浩国 王嘉康 司启贺 申茹晓

CHEN Jing TANG Haoguo WANG Jiakang SI Qihe SHEN Ruxiao

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471003)

(College of Food & Bioengineering, Henan University of Science & Technology,
Luoyang, Henan 471003, China)

摘要:目的:以香菇、杏鲍菇、双孢菇为原料,采用纤维素酶对其进行酶解处理制备菌菇酱。方法:采用酶解法,以氨基酸态氮含量为指标,通过响应面法优化菌菇酱的最佳酶解工艺。结果:菌菇酱的最佳酶解工艺条件为酶添加量0.6%、pH 6、酶解温度50℃、料液比1:30(g/mL),此工艺条件下,实测菌菇酱的氨基酸态氮含量为0.418 μg/100 g。结论:该菌菇酱的感官评定及营养成分指标均达到或优于国标标准,表明该工艺切实可行,具有一定的推广应用价值。

关键词:菌菇酱;酶解法;氨基酸态氮;响应面优化

Abstract: Objective: This study aimed to prepare a kind of mushroom paste with *Lentinus edodes*, *Pleurotus eryngii* and *Agaricus bisporus* as raw materials by enzymolysis with cellulase. **Methods:** The response surface method was used to optimize the optimal enzymatic hydrolysis process of the mushroom paste with amino acid nitrogen content as the index. **Results:** The optimal enzymolysis conditions were as follows: enzyme dosage 0.6%, pH 6, enzymolysis temperature 50℃, solid-liquid ratio 1:30 (g/mL). Under these conditions, the actual amino acid nitrogen content was 0.418 μg/100 g. **Conclusion:** The sensory evaluation and nutritional indexes of the mushroom paste are up to or better than the national standard, which indicates that the process is feasible and has certain popularization and application values.

Keywords: fungus mushroom sauce; enzymatic hydrolysis; amino acid nitrogen; response surface optimization

食用菌是可供人类食用的大型真菌,有肉眼可见的

子实体,通称为蘑菇,其种类繁多、热量低且营养丰富,有较高的保健和药用价值^[1-3]。香菇、杏鲍菇、双孢菇是日常生活中的常见食用菌,其营养价值^[4-6]接近肉类,但不易贮藏,采收后极易腐败。将食用菌加工成酱制品^[7],可延长其保质期,提高利用率。目前,有关食用菌的研究主要集中在食用菌的营养^[8-10]和保健功能^[11]分析、功能成分的提取及贮藏保鲜等方面。而且采用食用菌制酱的工艺简单且菌种单一,香菇和其他菌类进行复配制酱的研究尚未见报道。

食用菌呈味物质常采用的处理方法为水解法,但该方法耗时长、含量低、重现性差。通过生物酶解技术^[12-13],可高效释放营养成分,时间短、效率高,且减少了营养物质的浪费。为提取不同食用菌中的功能营养成分,均衡食用菌营养,提高产品中的营养物质含量,研究拟采用酶解法对香菇、杏鲍菇、双孢菇进行处理,以氨基酸态氮含量作为评价指标,采用响应面法优化菌菇酱酶解工艺,旨在为食用菌的开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

香菇、双孢菇、杏鲍菇:市售;

纤维素酶:食用级,酶活 ≥ 15 U/mg,上海金穗生物科技有限公司;

甲醛:分析纯,洛阳市化学试剂厂;

乙酸:分析纯,江苏强盛功能化学股份有限公司;

乙酸钠、硫酸铵:分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司;

乙酰丙酮:分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司。

1.2 仪器与设备

粉碎机:200T型,永康市铂欧五金制品有限公司;

作者简介:陈静,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:唐浩国(1968—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: tanghaoguo@126.com

收稿日期:2022-10-27 改回日期:2023-12-25

热鼓风干燥箱:DHG-9030A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

分光光度计:T6 型,北京普析通用仪器有限责任公司;

电热恒温水浴锅:DZKW-S-4 型,北京市永光明医疗仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理 取新鲜香菇、双孢菇和杏鲍菇,清洗去杂,100℃水浴灭酶,于 35℃干燥 12 h,粉碎过 150 目筛,常温放置备用。

1.3.2 酶解工艺 根据文献[14],准确称取 1 g 菌菇粉于 50 mL 容量瓶中,按一定的料液比加水稀释,混匀调浆,使用 1 mol/L 的 HCl 和 NaOH 调节溶液 pH 值,加入纤维素酶,经一定酶解时间和酶解温度处理后,95℃水浴灭酶 15 min,7 000 r/min 离心 15 min,取上清液,测定氨基酸态氮含量。

1.3.3 氨基酸态氮含量测定 采用比色法[15]。以吸光度值为纵坐标、氨基酸态氮含量为横坐标绘制标准曲线,所得标准曲线方程为 $y=1.049x-0.011(R^2=0.999\ 3)$ 。

1.3.4 单因素试验 固定酶添加量为 0.6%,pH 为 7,酶解温度为 50℃,酶解时间为 4 h,料液比为 1:40 (g/mL),采用控制变量法考察酶添加量(0.2%,0.4%,0.6%,0.8%,1.0%)、酶解时间(2,3,4,5,6 h)、pH(4,5,6,7,8)、酶解温度(30,40,50,60,70℃)、料液比[1:20,1:30,1:40,1:50,1:60 (g/mL)]对菌菇酱中氨基酸态氮含量的影响。

1.3.5 响应面优化设计 在单因素试验基础上,选取酶解温度、酶添加量、pH、料液比 4 个因素作为考察对象,以氨基酸态氮含量为响应值,采用 Design-Expert 8.0 软件进行四因素三水平响应面优化试验。

1.3.6 营养成分对比分析 按照 GB 5009.5—2016 和 GB 5009.6—2016 执行。

1.3.7 感官评定 选取 10 名经过感官培训的人员组成感官评定小组,按表 1 对菌菇酱的各项指标进行评分。

1.3.8 安全卫生指标 按照 T/SZZL 002—2023 执行。

1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 23 软件、Design Expert 8.0.6.1 软件进行数据处理和响应面分析,每组试验重复 3 次并取平均值;图中标注的字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 酶添加量对氨基酸态氮含量的影响 由图 1 可知,氨基酸态氮含量随酶添加量的增大呈先增加后趋于平缓的趋势。当酶添加量为 0.2%~0.6%时,氨基酸态氮

表 1 感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation standard

指标	评价标准	评分
色泽	呈红褐色,颜色均匀,有光泽	15~25
	呈褐色,颜色均匀,有光泽	10~15
	呈棕黑色,颜色不均匀,无光泽	0~10
风味	菇香浓郁,无异味	15~25
	菇香较淡,无明显异味	10~15
	无菇香气,略有异味	0~10
鲜味	有菇特有的鲜香味	15~25
	菇鲜香味较淡	10~15
	无菇特有的鲜香	0~10
组织形态	质地均匀,流动呈液状,无杂质	15~25
	质地稍均匀,无杂质	10~15
	质地不均,有细微杂质	0~10

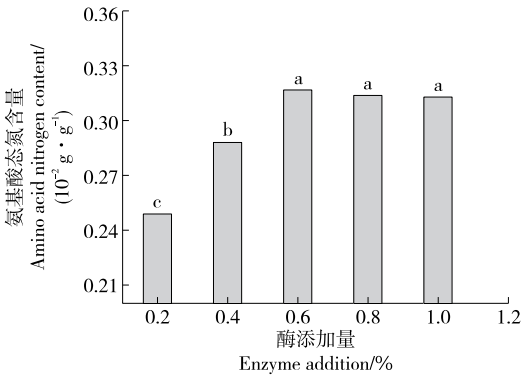


图 1 酶添加量对氨基酸态氮含量的影响

Figure 1 Effects of enzyme addition amount on amino acid nitrogen content

含量显著增加,可能是纤维素酶使食用菌细胞壁破裂,内容物溶出,酶添加量越大,酶解越完全,氨基酸态氮含量越高。当酶添加量为 0.6%~1.0%时,氨基酸态氮含量趋于平缓,可能是添加量为 0.6%时,酶已基本充分水解出菌菇中的氨基酸态氮[16]。因此,酶添加量选择 0.6%左右进行后续研究。

2.1.2 酶解时间对氨基酸态氮含量的影响 由图 2 可知,氨基酸态氮含量随酶解时间的延长呈增大趋势。当酶解时间为 2~5 h 时,氨基酸态氮含量上升较快,随酶解时间的增大而提高;当酶解时间>5 h 时,氨基酸态氮含量趋于稳定,可能是经过 5 h 酶解后,纤维素酶已将底物水解完全[17]。

2.1.3 pH 对氨基酸态氮含量的影响 由图 3 可知,氨基酸态氮含量随 pH 的升高呈先增加后降低趋势。当 pH 为 4~5 时,氨基酸态氮含量明显增大;当 pH 为 6~8 时,氨基酸态氮含量明显降低,可能是溶液偏碱性时,纤维素酶活力下降,导致氨基酸态氮含量下降,酶解未发挥最大

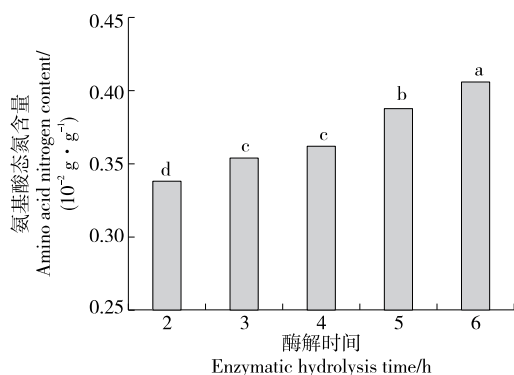


图2 酶解时间对氨基酸态氮含量的影响

Figure 2 Effects of enzymatic hydrolysis time on amino acid nitrogen content

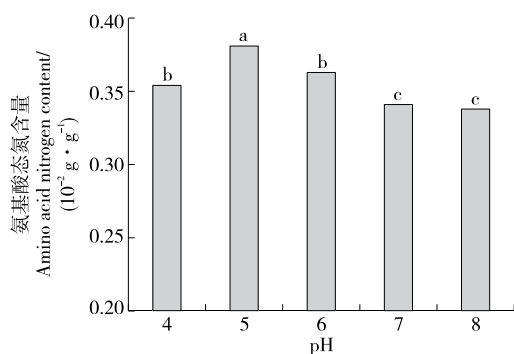


图3 pH对氨基酸态氮含量的影响

Figure 3 Effects of pH on amino acid nitrogen content

效力,无法将底物水解完全^[18]。因此,pH选择5左右进行后续研究。

2.1.4 酶解温度对氨基酸态氮含量的影响 由图4可知,氨基酸态氮含量随酶解温度的升高呈先增加后降低趋势。当酶解温度为40℃时,氨基酸态氮含量达到最大;当酶解温度为50~70℃时,氨基酸态氮含量下降较为显著,可能是酶解温度过高,纤维素酶失活,无法完全

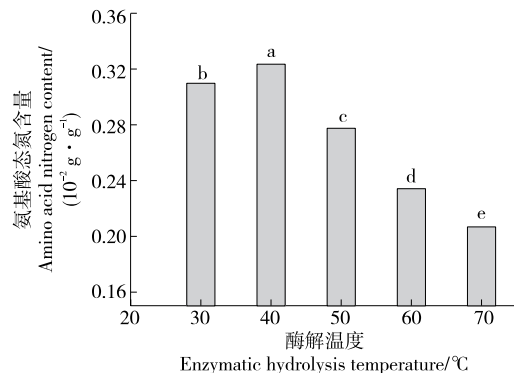


图4 酶解温度对氨基酸态氮含量的影响

Figure 4 Effects of enzymatic hydrolysis temperature on amino acid nitrogen content

水解底物^[19]。因此,酶解温度选择40℃左右进行后续研究。

2.1.5 料液比对氨基酸态氮含量的影响 由图5可知,氨基酸态氮含量随料液比的增加呈先上升后下降的趋势。当料液比为1:10~1:30(g/mL)时,氨基酸态氮含量随料液比的增大而增大;当料液比>1:30(g/mL)时,氨基酸态氮含量随料液比的增大而减小,可能是不同料液比对酶的稀释程度不同。刘涛等^[14]研究表明,酶稀释度过大会使其实际作用效果降低。因此,料液比选择1:30(g/mL)左右进行后续研究。

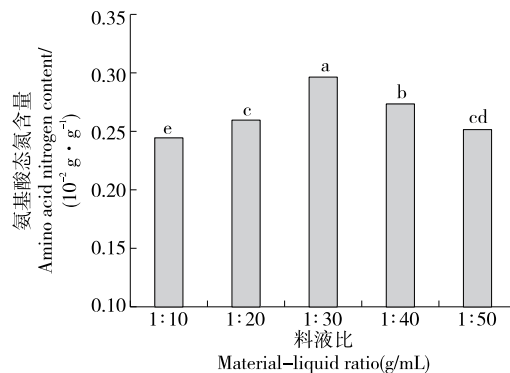


图5 料液比对氨基酸态氮含量的影响

Figure 5 Effects of material-liquid ratio on amino acid nitrogen content

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面优化试验结果 综合各因素,固定酶解时间为4h,以氨基酸态氮含量为响应值,以酶解温度、酶添加量、pH、料液比4个因素为变量,进行四因素三水平响应面优化试验。试验因素与水平见表2,试验设计及结果见表3。

采用 Design-Expert 8.0.6.1 软件对表3中数据进行回归拟合,得到二次多项式回归方程为:

$$Y = 0.41 + 5.167E - 003A - 4.750E - 003B - 0.002C + 5.917E - 003D + 0.032AB - 0.015AC - 0.016AD + 0.016BC + 4.250E - 003BD + 0.015CD - 0.051A^2 - 0.061B^2 - 0.046C^2 - 0.061D^2. \quad (1)$$

由表4可知,该模型 $P < 0.0001$,极显著,失拟项 $P >$

表2 响应面设计优化因素及水平表

Table 2 Response surface design optimization factors and level table

水平	A 酶解温度/℃	B 酶添加量/%	C pH	D 料液比(g/mL)
-1	30	0.4	4	1:20
0	40	0.6	5	1:30
1	50	0.8	6	1:40

表 3 响应面试验设计及结果
Table 3 Response surface test design and results

试验号	A	B	C	D	氨基酸态氮含量/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	试验号	A	B	C	D	氨基酸态氮含量/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)
1	0	0	1	-1	0.257	16	0	0	0	0	0.409
2	1	1	0	0	0.329	17	0	0	0	0	0.412
3	0	1	-1	0	0.311	18	-1	0	0	1	0.321
4	0	0	0	0	0.418	19	1	0	1	0	0.283
5	0	0	1	1	0.305	20	-1	1	0	0	0.262
6	0	1	0	-1	0.278	21	-1	0	1	0	0.303
7	0	0	0	0	0.411	22	1	0	-1	0	0.351
8	1	0	0	-1	0.323	23	0	-1	0	-1	0.295
9	0	-1	1	0	0.276	24	-1	0	0	-1	0.273
10	-1	0	-1	0	0.311	25	0	0	-1	1	0.326
11	1	0	0	1	0.307	26	0	-1	0	1	0.288
12	0	1	0	1	0.288	27	0	0	-1	-1	0.338
13	-1	-1	0	0	0.338	28	1	-1	0	0	0.277
14	0	0	0	0	0.416	29	0	1	1	0	0.301
15	0	-1	-1	0	0.352						

表 4 方差分析[†]
Table 4 Analysis of variance

变异	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.066	14	4.690E-003	93.02	<0.000 1	* *
A	3.203E-004	1	3.203E-004	6.35	0.024 5	*
B	2.708E-004	1	2.708E-004	5.37	0.036 1	*
C	5.808E-003	1	5.808E-003	115.19	<0.000 1	* *
D	4.201E-004	1	4.201E-004	8.33	0.012 0	*
AB	4.096E-003	1	4.096E-003	81.24	<0.000 1	* *
AC	9.000E-004	1	9.000E-004	17.85	0.000 8	* *
AD	1.024E-003	1	1.024E-003	20.31	0.000 5	* *
BC	1.089E-003	1	1.089E-003	21.60	0.000 4	* *
BD	7.225E-005	1	7.225E-005	1.43	0.251 2	不显著
CD	9.000E-004	1	9.000E-004	17.85	0.000 8	* *
A ²	0.017	1	0.017	331.02	<0.000 1	* *
B ²	0.024	1	0.024	480.27	<0.000 1	* *
C ²	0.014	1	0.014	274.89	<0.000 1	* *
D ²	0.024	1	0.024	472.44	<0.000 1	* *
残差	7.059E-004	14	5.042E-005			
失拟项	6.511E-004	10	6.511E-004	4.75	0.073 3	不显著
纯误差	5.480E-005	4	1.370E-005			
总和	0.066	28				

[†] * * 表示差异极显著($P<0.01$); * 表示差异显著($P<0.05$); $R^2=0.986\ 1$; $R^2_{Adj}=0.972\ 2$ 。

0.05, 不显著, 说明该模型误差小。 $R^2 = 0.9894$, $R^2_{Adj} = 0.9787$, 说明模型拟合度与置信度较好, 证明该模型可用于预测菌菇酱中氨基酸态氮含量并对其进行分析。对回归模型进行显著性检验可知, A、B、C、D、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 、AB、AC、AD、BC、BD、CD 项对菌菇酱中氨基酸态氮含量均有显著影响 ($P < 0.05$)。根据 F 值可知, 各因素对菌菇酱中氨基酸态氮含量影响的强弱顺序为 $pH > \text{料液比} > \text{酶解温度} > \text{酶添加量}$ 。

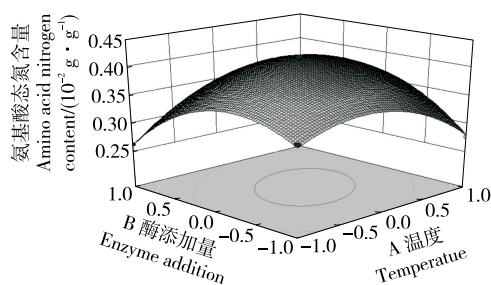
2.2.2 各因素交互作用的响应面分析 由图 6~图 8 可知, AB、AD、BD 交互作用下食用菌氨基酸态氮含量增加明显, 其等高线图呈椭圆状, 说明两因素间的交互作用极

显著。

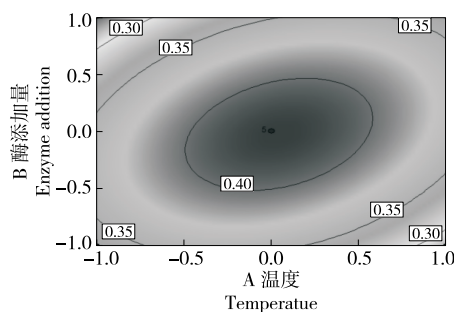
2.2.3 验证实验 通过响应面优化试验结果分析, 得到食用菌氨基酸态氮的最佳酶解工艺为酶解温度 40°C 、酶添加量 0.6% 、 $pH\ 5$ 、料液比 $1:30$ (g/mL), 此时氨基酸态氮含量为 $0.418\text{ g}/100\text{ g}$ 。将最优组合调整为酶解温度 40°C 、酶添加量 0.6% 、 $pH\ 5$ 、料液比 $1:30$ (g/mL), 此时氨基酸态氮含量为 $0.418\text{ g}/100\text{ g}$, 3 次验证实验平均值为 $0.421\text{ g}/100\text{ g}$, 与模型预测值相近, 说明该最优工艺具有很大的可靠性。

2.3 营养成分对比

由表 5 可知, 食用菌经酶解后营养成分含量显著提



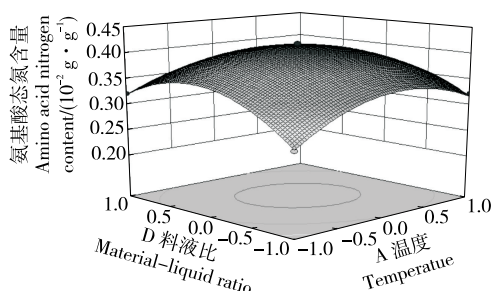
(a) 响应面图



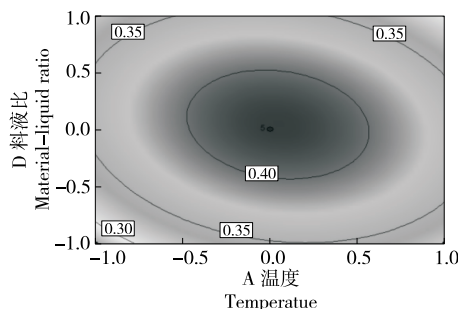
(b) 等高线图

图 6 AB 交互作用对氨基酸态氮含量的影响

Figure 6 Effects of the interaction between AB on amino acid nitrogen content



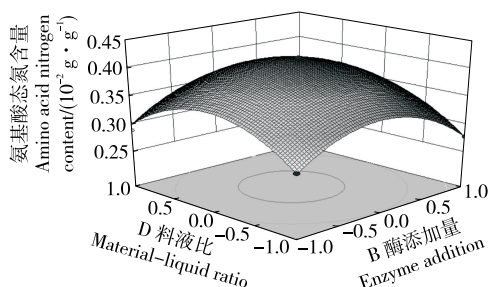
(a) 响应面图



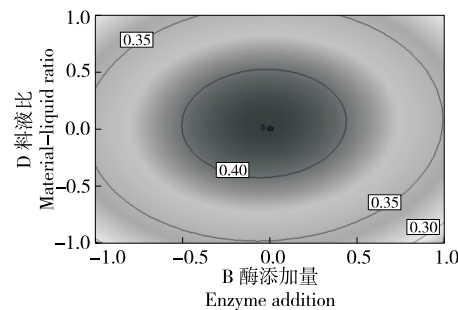
(b) 等高线图

图 7 AD 交互作用对氨基酸态氮含量的影响

Figure 7 Effects of the interaction between AD on amino acid nitrogen content



(a) 响应面图



(b) 等高线图

图 8 BD 交互作用对氨基酸态氮含量的影响

Figure 8 Effects of the interaction between BD on amino acid nitrogen content

表 5 食用菌酶解前后营养成分对比

Table 5 Comparison of nutritional components of edible fungi before and after enzymatic hydrolysis

组别	能量/ (10 ⁻² kJ · g ⁻¹)	碳水化合物/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	蛋白质/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	脂肪/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	膳食纤维/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	钠/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	氨基酸态氮/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)
酶解前	2 039	16.7	9.80	38	22.4	1 641	0.263
酶解后	2 201	17.0	11.63	43	25.0	2 000	0.418
增加量/%	7.9	1.8	26.9	13.2	11.6	21.9	0.6

高,说明酶解可提取食用菌中的功能营养成分,可均衡食用菌营养,提高产品中营养物质含量。

2.4 感官评定

感官评定结果表明,酶解法制备的香菇酱色泽呈红褐色,有光泽;菇香浓郁,无异味;有菇特有的鲜香味;组织形态质地均匀,流动呈液状,无杂质,感官评分为 95 分。

2.5 安全卫生指标

菌菇酱安全卫生指标见表 6。

表 6 菌菇酱安全卫生指标

Table 6 Mushroom paste safety and health indicators

项目	单位	标准	产品
水分	g/100 g	85	24.03
酸价(KOH)	mg/g	5	0.45
过氧化值(以脂肪计)	g/100 g	0.25	0.03
大肠菌群	CFU/g	≤1 000	<10
金黄色葡萄球菌	CFU/g	≤10 000	<10
沙门氏菌	25 g	不得检出	—

3 结论

菌菇酱的最佳酶解工艺条件为酶解温度 40 ℃、酶添加量 0.6%、pH 5、料液比 1 : 30 (g/mL),此时氨基酸态氮含量可达到 0.418 g/100 g。酶解法制备的菌菇酱产品具有食用菌独特气味,香味协调,口感醇厚,理化指标和安全卫生指标达到或优于国标标准。

多种食用菌复配结合酶解法制备菌菇酱的方法,不仅可以协调不同食用菌的功能活性成分,还能同时增加产品的营养成分含量,提高成品营养价值。该菌菇酱的氨基酸态氮含量高于单一食用菌的,但仍有很大提升空间。后续可进一步探究可行的酶解工艺,以提高食用菌中营养物质的利用率,为制备菌菇酱提供优良工艺参考。

参考文献

[1] 徐慧君,边才苗,王锦文. 3 种食用菌营养成分的测定[J]. 安徽

农业科学, 2010, 38(14): 7 544-7 546.

XU H J, BIAN C M, WANG J W. Determination of nutritional components in three kinds of edible [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(14): 7 544-7 546.

[2] ZHANG Y R, WANG D W, CHEN Y T, et al. Healthy function and high valued utilization of edible fungi[J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(4): 408-420.

[3] 李潇卓. 食用菌食品的营养价值及保健功能探讨[J]. 食品安全导刊, 2020(15): 83-84.

LI X Z. Study on nutritional value and health care function of edible mushroom food[J]. China Food Safety Magazine, 2020(15): 83-84.

[4] 李妍. 食用菌食品的营养价值及其保健功能[J]. 现代食品, 2020, 12(23): 153-155.

LI Y. Nutritional value and prominent health function of edible fungus food[J]. Modern Food, 2020, 12(23): 153-155.

[5] 兰天康,顾浩峰,王燕. 食用菌中主要营养素与硒元素含量的相关性分析[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(1): 42-46.

LAN T K, GU H F, WANG Y. Correlation analysis of main nutrients and selenium content in edible fungi [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2017, 63(1): 42-46.

[6] 李丽. 食用菌的营养成分和活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015(12): 139-142.

LI L. Development of effective component and activity of edible mushroom[J]. Food Research and Development, 2015(12): 139-142.

[7] 刘义,韦云路,胡文森,等. 糟辣食用菌酱的研制[J]. 中国调味品, 2021, 46(5): 119-123, 132.

LIU Y, WEI Y L, HU W S, et al. Preparation of fermented chili edible fungi sauce[J]. China Condiment, 2021, 46(5): 119-123, 132.

[8] YAN J M, ZHU L, QU Y H, et al. Analyses of active antioxidant polysaccharides from four edible mushrooms [J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2019, 123: 945-956.

[9] ELHUSSEINY S M, EI-MAHDY T S, AWAD M F, et al. Proteome analysis and in vitro antiviral, anticancer and antioxidant capacities of the aqueous extracts of *Lentinula edodes* and *Pleurotus ostreatus* edible mushrooms[J]. Molecules, 2021, 26(15): 4 623.

[10] 张建锋. 食用菌的营养成分和保健功能分析[J]. 中国食用菌, 2020, 39(7): 185-187.

- ZHANG J F. Analysis of nutritional components and health care function of edible fungi[J]. *Edible Fungi of China*, 2020, 39(7): 185-187.
- [11] SCHARLAU D, BOROWICKI A, HABERMANN N. Mechanisms of primary cancer prevention by butyrate and other products formed during gut flora-mediated fermentation of dietary fibres[J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2009, 682(1): 39-53.
- [12] 高虹, 程薇, 史德芳, 等. 香菇柄复合酶解工艺研究[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(23): 5 823-5 827.
- GAO H, CHENG W, SHI D F, et al. Hydrolysis effects of cellulase and neutral protease on *Lentinus edodes* Stipe [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(23): 5 823-5 827.
- [13] 揭广川, 陈红杰, 李必金. 微波辅助复合酶法提取草菇中的风味物质[J]. *食品与机械*, 2015, 31(1): 164-166, 243.
- JIE G C, CHEN H J, LI B J. Preparation of flavor compounds from *Volvarella volvacea* by microwave-composite enzyme synergistic extraction[J]. *Food & Machinery*, 2015, 31(1): 164-166, 243.
- [14] 刘涛, 杨焱, 冯涛, 等. 响应面法优化酶法水解香菇子实体中氨基酸的工艺[J]. *食用菌报*, 2017, 24(2): 93-98.
- LIU T, YANG Y, FENG T, et al. Optimization of enzyme-mediated release of flavor-enhancing amino acids from *Lentinula edodes* fruit bodies using response surface methodology[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2017, 24(2): 93-98.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定: GB 5009.235—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-5.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National standards for food safety, determination of amino acid nitrogen in food: GB 5009.235—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-5.
- [16] 陈海强, 胡汝晓, 黄晓辉, 等. 复合酶法水解香菇工艺的研究[J]. *微生物学报*, 2012, 39(1): 62-67.
- CHEN H Q, HU R X, HUANG X H, et al. Study on hydrolysis technology of *Lentinula edodes* degraded by composite enzyme[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 39(1): 62-67.
- [17] 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.
- [18] 薛淑静, 李露, 杨德, 等. 响应面优化双孢菇预煮液酶解工艺研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(22): 5 926-5 930.
- XUE S J, LI L, YANG D, et al. Optimization of the enzymatic hydrolysis process of blanching liquid from *Agaricus bisporus* by response surface analysis[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(22): 5 926-5 930.
- [19] 王雨生, 陈海华, 王莹钰, 等. 超声波协同酶法制备香菇酶解液及其鲜味物质研究[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(9): 134-141.
- WANG Y S, CHEN H H, WANG Y Y, et al. Preparation of mushroom hydrolysate by ultrasonic-enzyme synergistic method and studies on its umami substances [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(9): 134-141.
- (上接第 186 页)
- [16] 付冬雪, 罗旋飞, 谢蓝华, 等. 昭通苹果脆片热风干燥特性及动力学模型研究[J]. *食品工业*, 2022, 43(11): 128-134.
- FU D X, LUO X F, XIE L H, et al. Study on hot air drying characteristics and kinetic model of Zhaotong apple chips[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(11): 128-134.
- [17] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 387-392.
- MENG Y C, WANG J, FANG S, et al. Drying characteristics and mathematical modeling of hot air drying of cooked sweet potatoes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7): 387-392.
- [18] 刘鹤, 田友, 焦俊华, 等. 甘薯切片热风干燥特性及模型研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(8): 30-36.
- LIU H, TIAN Y, JIAO J H, et al. Study on hot air drying characteristics and model of sweet potato slices[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(8): 30-36.
- [19] 张记, 彭桂兰, 张雪峰, 等. 黄芪切片热风干燥特性及动力学模型研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 22-28, 56.
- ZHANG J, PENG G L, ZHANG X F, et al. Study on hot-air drying characteristics and kinetics model of *Astragalus slice*[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(8): 22-28, 56.
- [20] 白冰玉, 傅鑫程, 丁胜华, 等. 切片厚度对苦瓜片热风干燥特性及相关品质的影响研究[J]. *农产品加工*, 2019(17): 1-5.
- BAI B Y, FU X C, DING S H, et al. Effect of slice thickness on drying characteristics and related quality of balsam pear slices[J]. *Farm Products Processing*, 2019(17): 1-5.
- [21] 孟淑真, 马飞, 吴拥军, 等. 细菌型豆豉热风干燥特性及干燥模型[J/OL]. *中国食物与营养*. (2023-06-08) [2023-10-07]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20230607.002>.
- MENG S Z, MA F, WU Y J, et al. Hotair drying characteristics and drying model of bacterial douchi[J/OL]. *Food and Nutrition in China*. (2023-06-08) [2023-10-07]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20230607.002>.
- [22] ŞAHİN U, ÖZTURK H K. Comparison between artificial neural network model and mathematical models for drying kinetics of osmotically dehydrated and fresh figs under open sun drying[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(5): e12804.