

李泽林, 王秋婷, 郭其洪, 等. 鸡骨液酶解工艺优化及其酶解前后风味物质分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 206–215. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080186

LI Zelin, WANG Qiuting, GUO Qihong, et al. Optimization of Enzymatic Hydrolysis Process of Chicken Bone Homogenate and Its Flavor Components Analysis before and after Enzymatic Hydrolysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 206–215. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080186

· 工艺技术 ·

鸡骨液酶解工艺优化及其酶解前后 风味物质分析

李泽林, 王秋婷⁺, 郭其洪, 桂海佳, 谷大海, 王雪峰, 肖智超, 王桂瑛, 范江平^{*}
(云南农业大学食品科学技术学院, 云南昆明 650201)

摘要: 目的: 为探究鸡骨液酶解前后风味差异。方法: 以鸡骨为原材料, 在单因素实验的基础上, 采用响应面设计优化鸡骨液酶解工艺, 然后采用氨基酸自动分析仪与顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 结合味觉活性值 (taste activity value, TAV) 和香气活性值 (odor activity value, OAV) 筛选出酶解前后关键的呈味游离氨基酸和挥发性香气化合物。结果: 得到最优工艺为: 时间 5.1 h、酶添加量 0.61%、料液比 1:3 g/mL, 水解度为 33.68%±1.53%, 经验证得水解度为 33.24%±0.61%。共有 13 个游离氨基酸的 TAV 大于 1, 其中有 8 个游离氨基酸 TAV 大于 10, 对鸡骨液滋味贡献大。共鉴定出挥发性化合物 92 种, 酶解前 63 种、酶解后 66 种, 其中 OAV≥1 酶解前 13 种、酶解后 16 种, 包括醇类 4 种、酯类 2 种、呋喃类 2 种、醛类 9 种, 酶解前鸡骨液有强烈的脂肪味, 酶解后脂肪味减弱同时烘烤、绿豆、瓜香和肉香增加, 使整体风味更丰富。结论: 本研究为酶解前后的鸡骨液风味物质的研究提供了依据。

关键词: 鸡骨液, 酶解, 风味, 味觉活性值, 香气活性值

中图分类号: S831.9

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)10-0206-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080186



本文网刊:

Optimization of Enzymatic Hydrolysis Process of Chicken Bone Homogenate and Its Flavor Components Analysis before and after Enzymatic Hydrolysis

LI Zelin, WANG Qiuting⁺, GUO Qihong, GUI Haijia, GU Dahai, WANG Xuefeng, XIAO Zhichao, WANG Guiying, FAN Jiangping^{*}

(College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Objective: To investigate the flavor difference of chicken bone homogenate before and after enzymatic hydrolysis. Methods: On the basis of single factor experiments, response surface experimental design was used to optimize the enzymatic hydrolysis process of chicken bone homogenate. Then, the amino acid automatic analyzer and headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) combined with taste activity value (TAV) and odor activity value (OAV) were used to carry out the key free amino acids and volatile aroma compounds for the flavor. Results: The optimal process was as follows: Time 5.1 h, enzyme addition 0.61%, solid-liquid ratio 1:3 g/mL, hydrolysis degree 33.68%±1.53%. The degree of hydrolysis was verified (33.24%±0.61%). A total of 13 free amino acids had TAV greater than 1, among which 8 free amino acids had TAV greater than 10, which made great contribution to the taste of chicken bone homogenate. A total of 92 volatile compounds were identified, 63 before and 66 after enzymatic hydrolysis. The 13 and 16 compounds of OAV≥1 was found before and after enzymatic hydrolysis, including 4 alcohols, 2

收稿日期: 2020-12-08 +并列第一作者

基金项目: 云南省院士专家工作站 (202005AF150016)。

作者简介: 李泽林 (1995-), 男, 博士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1054994094@qq.com。

王秋婷 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1258298167@qq.com。

* 通信作者: 范江平 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学与功能性食品研究, E-mail: 1993033@ynau.edu.cn。

esters, 2 furans and 9 aldehydes. Before the enzymatic hydrolysis, the chicken bone homogenate had a strong fat flavor, but after the enzymatic hydrolysis, the fat flavor was weakened, and the roasted, bean and melon and meat flavor were increased at the same time, which increased the overall flavor. Conclusion: This paper would provide experimental basis for the study of flavor components of chicken bone homogenate before and after enzymatic hydrolysis.

Key words: chicken bone homogenate; enzymatic hydrolysis; flavor; taste activity value; odor activity value

我国是鸡肉等禽肉生产大国,2020 年肉鸡总产量约为 1485 万吨,是四大肉鸡主产国之一,肉鸡在加工过程中会产生大量副产品,其中鸡骨就是主要副产物之一^[1]。鸡骨中含有丰富的蛋白质(含量可达 16.3% 与等量鸡肉相似)、脂肪、矿物质、氨基酸、软骨素、酸性黏多糖和维生素等多种营养素,比例均衡、生物价高,是优质的蛋白源^[2-3];目前,有少部分鸡骨被制作成鸡骨泥或粉添加到食品中,有部分被用来制作明胶、提取鸡骨素和蛋白水解物等^[4];鸡骨被水解后会释放大量的呈味游离氨基酸,还会产生和谐的香气,具有良好的制作调味料基料的潜质;但是,鲜有文献报道鸡骨酶解前后关键的风味化合物,因此探明鸡骨关键呈味游离氨基酸和关键香气化合物有助于推动以鸡骨为基料的食品风味机制的探究。

味觉活性值^[5](taste activity value, TAV)和香气活性值^[6](odor activity value, OAV)是评价食品中化合物对滋味和香气贡献大小的重要量化指标;前者可以评价化合物,如游离氨基酸对食品酸、甜、苦、咸、鲜滋味的贡献度,后者则可以评估挥发性化合物对食品香气轮廓的贡献^[7]。目前, TAV 和 OAV 已被广泛应用到食品领域,用来评估分析食品成分对滋气味的影响。张曼等^[8]结合 TAV 和 OAV 筛选发现不同产地的鲜辣椒没有特征凸出的呈味氨基酸,有 17 种关键香气成分(OAV>1),其中 2-甲氧基-3-异丁基吡嗪、乙酸己酯、 α -合欢烯是构成鲜辣椒风味的关键物质。孙圳等^[9]在卤制鸡肉中发现正辛醛、反-2-癸烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇和芳樟醇 OAV>1,并确定这些化合物为卤制鸡肉的关键香气物质。

因此,为了探究鸡骨液酶解前后游离氨基酸及挥发性香气成分的变化情况,本研究拟展开鸡骨液酶解工艺优化研究,并分析酶解前后的游离氨基酸及挥发性成分,以筛选出对其滋味和香气有关键贡献的游离氨基酸和挥发性香气化合物。旨在为鸡骨的综合利用以及其风味的深入研究提供实验基础和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白羽肉鸡全骨(干净剔除鸡身所有肉、油、皮和筋) 云南农业大学实验鸡场提供;动物蛋白水解酶(食品级,4 万 U/g)、风味蛋白酶(食品级,5 万 U/g)

浙江一诺生物科技有限公司;C₇~C₃₀ 正构烷烃标准品、3-辛醇标准品 美国 Sigma 公司;硫酸 天津市风船化学试剂科技有限公司。

PL303 型分析天平 梅特勒-托利多仪器有限公司;PHS-3C 型雷磁 pH 计 上海仪电科学仪器股份有限公司;S-433 型氨基酸自动分析仪 德国 sykam 公司;SCION SQ 456-GC 型气质联用仪 美国力可有限公司;DB-WAX 型色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μ m) 安捷伦科技(中国)有限公司;PG-150 型碎骨机 诸城市广优机械科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鸡骨液酶解工艺 取鸡骨→碎骨机破碎(过 60 目筛)→加水混匀→调节 pH→加入酶→水浴酶解→灭酶→离心→取上清液备用。

操作要点:鸡骨匀浆液先调整 pH 到 7 使其达到动物蛋白酶与风味酶最适值,再加入酶(两者比例 1:1, w/w);待酶解完成后,酶解液沸水浴灭酶 10 min;最后在 4000 r/min 条件下离心 15 min。

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 酶解时间对样品水解度的影响 以水解度为指标,固定料液比 1:3 g/mL、酶解温度 50 $^{\circ}$ C、复合酶添加量 0.5%,探讨不同酶解时间(3、4、5、6 h)下样品水解度的大小。

1.2.2.2 酶解温度对样品水解度的影响 以水解度为指标,固定酶解时间 5 h、料液比 1:3 g/mL、复合酶添加量 0.5%,探讨不同酶解温度(45、50、55、60 $^{\circ}$ C)下样品水解度的大小。

1.2.2.3 料液比对样品水解度的影响 以水解度为指标,固定酶解时间 5 h、酶解温度 50 $^{\circ}$ C、复合酶添加量 0.5%,探讨不同料液比(1:2、1:3、1:4、1:5 g/mL)下样品水解度的大小。

1.2.2.4 酶添加量对样品水解度的影响 以水解度为指标,固定酶解时间 5 h、酶解温度 50 $^{\circ}$ C、料液比 1:3 g/mL,探讨不同复合酶添加量(0.4%、0.5%、0.6%、0.7%)下样品水解度的大小。

1.2.3 响应面试验 根据单因素实验结果,固定酶解温度 50 $^{\circ}$ C 进行三因素三水平响应面试验设计,因素水平见表 1。

1.2.4 水解度测定 氨基酸态氮的测定:根据 GB 5009.235《食品中氨基酸态氮的测定》的方法进行测定;总氮的测定:根据 GB 5009.5《食品中蛋白质的测定》的方法进行测定。按照公式(1)计算水解度:

$$\text{水解度} = \text{样品中氨基酸态氮} / \text{总氮含量} \quad \text{式 (1)}$$

1.2.5 游离氨基酸测定 取酶解前后的鸡骨液进行游离氨基酸的测定:根据 GB 5009.124《食品中氨基

表 1 响应面试验因素水平设计

Table 1 Factor level design of response surface test

因素	编码值	水平		
		-1	0	1
酶解时间(h)	A	4	5	6
酶添加量(%)	B	0.5	0.6	0.7
料液比(g/mL)	C	1:2	1:3	1:4

酸的测定》的方法使用氨基酸自动分析仪进行检测。

1.2.6 味觉活性值计算 参考 Zhang 等^[10]的方法,利用味觉活性值(taste activity value, TAV)评价各呈味氨基酸对鸡骨液滋味的影响。按以下公式(2)计算 TAV:

$$\text{TAV} = \text{样品浓度/味觉阈值式} \quad \text{式(2)}$$

1.2.7 挥发性成分的 GC-MS 检测 样品处理:取酶解前后鸡骨液样品 6 mL 于顶空瓶(20 mL)中,插入萃取头萃取 30 min(60 ℃)后取出,再插入气相色谱进样口解吸 3 min(250 ℃)。GC 条件:色谱柱:DB-WAX 石英毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);柱流量:恒流的模式进样(0.8 mL/min);载气:高纯度氦气;起始温度 40 ℃(3 min),第一阶段 5 ℃/min 升至 90 ℃,第二阶段 10 ℃/min 升至 250 ℃(6 min);进样口的温度为 250 ℃。MS 条件:离子源:EI;离子源温度 200 ℃;电压 70 eV;色谱-质谱接口温度 250 ℃。

挥发性化合物定性:将质谱数据与相应标准进行比对,并与 NIST 14 的数据进行比较。保留指数(RI)的计算方法如下:以标准品保留时间和相同色谱条件下 C₇~C₃₀ 正构烷烃的保留时间计算检测物质的保留指数(RI)。定量:对挥发性化合物定量时添加 3-辛醇为内标物,以内标物的峰面积与气味活性化合物的峰面积比值计算各物质的含量。

1.2.8 香气活性值计算 参考 Yang 等^[11]的方法,利用香气活性值(odor activity value, OAV)评价各挥发性化合物对鸡骨液酶解前后香气轮廓的影响。按以下公式(3)计算 OAV:

$$\text{OAV} = \text{挥发性化合物浓度/气味阈值式} \quad \text{式(3)}$$

1.3 数据处理

试验均重复三次取平均数,使用设计专家设计响应面试验,Excel 2016 制作雷达图及数据处理。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 酶解温度对水解度的影响 由图 1a 可知,当酶解温度在 45~50 ℃ 时,水解度随着温度升高而增加,当温度为 50 ℃ 时,水解度最大 32.46%±0.68%。当酶解温度高于 50 ℃ 时水解度随着温度的升高而下降,原因是温度过高引起蛋白质分子过度聚合,酶的活力受到影响,酶蛋白变性,水解度随之降低。因此,50 ℃ 为最优酶解温度。

2.1.2 酶解时间对水解度的影响 由图 1b 可知,酶

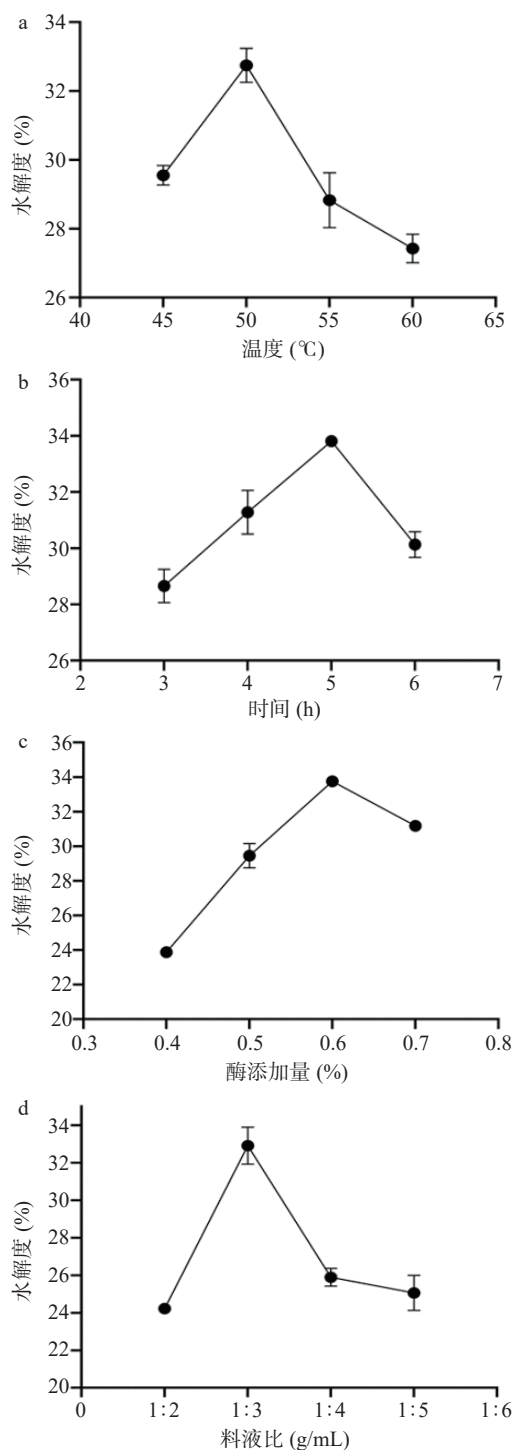


图 1 单因素实验结果

Fig.1 Single factor test results

解 3~5 h 时水解度逐渐增大,酶解 5 h 时水解度最高 33.79%±0.84%,酶解时间继续增加化学反应平衡后,反应向反方向进行,水解度降低。因此,5 h 为最优酶解时间。

2.1.3 酶添加量对水解度的影响 由图 1c 可知,随着酶添加量的增加、酶活增大,水解度增高,当酶添加量为 0.6% 时,水解度最大 33.72%±0.48%,当超过 0.6% 时水解度下降。因此,酶添加量 0.6% 为最优值。

2.1.4 料液比对水解度的影响 由图 1d 可知,随着

料液比的减小, 鸡骨的水解度呈先增大后减小的趋势, 在料液比为 1:3 g/mL 时, 鸡骨的水解度最大为 32.7%±1.07%。料液比决定了酶解底物的浓度, 在 1:2 g/mL 时因底物的浓度过高, 影响了反应的化学平衡导致水解度低; 当料液比超过 1:3 g/mL 时, 反应底物的浓度过低, 化学反应变慢, 导致水解度下降。因此, 1:3 g/mL 为最佳料液比。

2.2 响应面试验结果

根据单因素的实验结果, 在温度 50 ℃、复合酶比例 1:1 条件下, 通过响应面试验设计, 对酶解鸡骨液工艺进一步优化。结果如表 2 所示。

表 2 响应面设计及结果
Table 2 Response surface design and results

实验号	A	B	C	水解度(%)
1	0	0	0	32.30±1.45
2	0	-1	1	31.49±1.82
3	0	0	0	32.77±0.98
4	1	1	0	30.44±2.01
5	1	-1	0	30.80±2.37
6	1	0	-1	31.95±1.28
7	-1	1	0	30.42±1.16
8	-1	0	1	31.57±1.75
9	0	0	0	33.38±2.32
10	0	-1	-1	25.84±2.51
11	0	0	0	32.90±1.02
12	0	1	1	31.15±2.21
13	0	1	-1	29.09±2.30
14	-1	-1	0	23.12±1.96
15	1	0	1	30.30±1.38
16	-1	0	-1	24.92±1.58
17	0	0	0	34.42±1.45

对表 2 数据进行回归分析, 结果得到二次多项回归方程为: $Y=33.15+1.68A+1.23B+1.59C-1.92AB-2.07AC-0.90BC-2.08A^2-2.38B^2-1.39C^2$

根据表 3, 对回归模型方差进行分析。模型

表 3 回归模型方差分析及模型显著性检验

Table 3 Regression model analysis of variance and model significance test

方差来源	平方和	自由度	均方差	F值	P值	显著性
模型	145.74	9	16.19	18.85	0.0004	**
A	22.65	1	22.65	26.36	0.0013	**
B	12.13	1	12.13	14.12	0.0071	**
C	20.19	1	20.19	23.50	0.0019	**
AB	14.67	1	14.67	17.07	0.0044	**
AC	17.22	1	17.22	20.05	0.0029	**
BC	3.22	1	3.22	3.75	0.0940	
A ²	18.27	1	18.27	21.27	0.0024	**
B ²	23.77	1	23.77	27.66	0.0012	**
C ²	8.09	1	8.09	9.41	0.0181	*
残差	6.01	7	0.86			
失拟项	3.42	3	1.14	1.76	0.2940	不显著
纯误差	2.60	4	0.65			
$R^2=0.9604$						
$R^2_{Adj}=0.9094$						

注: **表示极显著($P<0.01$); *表示显著($P<0.05$)。

$P<0.01$, 失拟项 $P=0.2940>0.05$, 说明模型显著具有可行性。模型的决定系数 $R^2=0.9604$, $R^2_{Adj}=0.9094$, 两者相差较小, 说明此模型可用于分析酶解鸡骨的工艺优化。模型中, 一次项 A、B、C, 交互项 AB 和 AC, 二次项 A²、B² 对水解度的影响极显著($P<0.01$), 根据 F 值可以得出因素对水解度的影响顺序依次为酶解时间>料液比>酶添加量。

2.3 交互作用分析及模型验证

响应曲面图与等高线图可以反映两个变量之间的交互类型以及各因素对水解度影响的显著性。由图 2a~c 可知, 随着因素的增大, 水解度先增大后下降, 这与单因素实验结果相一致。图 2a~b 的等高线图属于椭圆形, 说明交互作用显著, 而图 2c 的等高线图接近圆形, 说明交互作用不显著, 这与方差分析表中的结果相一致。

通过模型得到的最优结果为: 时间 5.1 h、酶添加量 0.61%、料液比 1:3 g/mL, 水解度为 33.68%±1.53%。根据此工艺条件进行 3 组重复试验, 并计算其水解度的平均值为 33.24%±0.61%, 与理论值相比无显著性差异($P>0.05$), 说明该工艺具有可行性。

2.4 酶解对鸡骨液游离氨基酸含量及味觉活性值的影响

鸡骨中的蛋白质有 90% 以上属于结构性的胶原蛋白、呈纤维状, 其含量占机体总蛋白的 25%~30%^[12], 这些蛋白被酶解后可添加到风味基料和调味料中以增强其风味的丰富度及层次感。由表 4 可知, 鸡骨酶解前游离氨基酸含量较低, 呈甜味的氨基酸总含量最高仅为 535.37 mg/kg, 酶解后 17 种游离氨基酸含量均极显著($P<0.01$)增加, 以苦味氨基酸增幅最大总含量达到了 9776.58 mg/kg, 相比酶解前增加了 27.9 倍, 与丁小燕等^[13]研究的双酶水解鸡骨泥结果一致。虽然苦味氨基酸在酶解后极显著($P<0.01$)增加, 但苦味氨基酸不具备味觉活性, 且其苦味易被其他呈味氨基酸的味道掩盖^[14]。此外, 呈甜味的精氨酸与呈鲜味的谷氨酸协同作用下可以呈现令人愉快的味道, 也可以掩盖大部分苦味。所以, 鸡骨酶解液滋味主要以鲜味和甜味为主。

当 TAV 值大于 1 时, 认为该物质具有强烈的滋味活性, 对食物的整体滋味轮廓贡献大, 且 TAV 的大小和其对滋味贡献成正比^[15]。本研究酶解前游离氨基酸的 TAV 只有谷氨酸(8.76)、丙氨酸(2.65)、缬氨酸(1.43)和赖氨酸(5.56)大于 1, 酶解后所有检测到的游离氨基酸 TAV 均大于 1。其中, 天门冬氨酸(13.85)、谷氨酸(78.92)、丙氨酸(24.60)、缬氨酸(41.09)、蛋氨酸(32.30)、异亮氨酸(16.52)、亮氨酸(13.97)和赖氨酸(81.99)的 TAV 均大于 10 远大于 1, 对其整体风味贡献极强。

2.5 酶解前后鸡骨液挥发性风味物质的变化

采用 HS-SPME-GC-MS 对酶解前后的鸡骨液检测, 结果如表 5 所示, 共检测出挥发性化合物

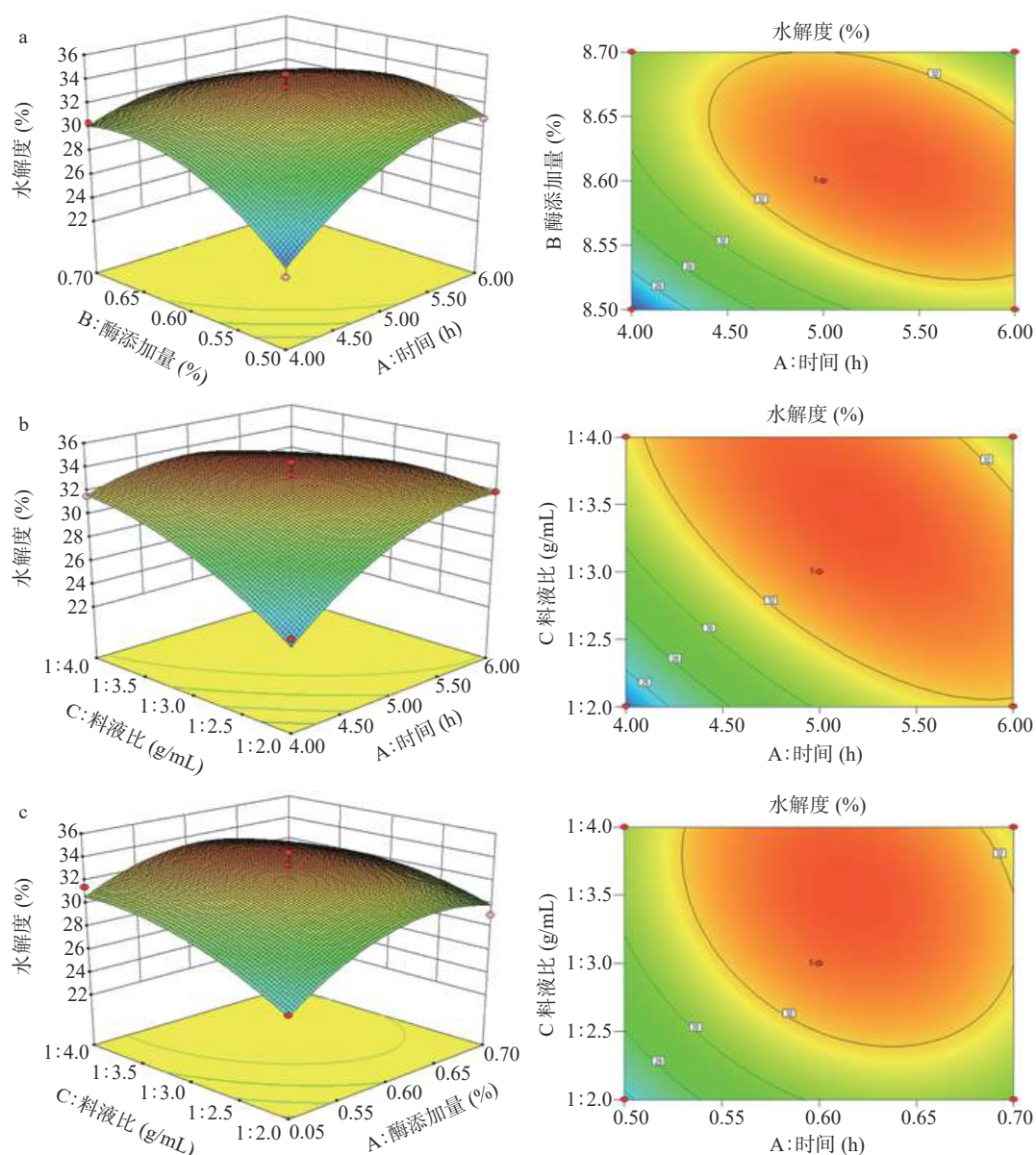


图2 各因素交互作用响应曲面及等高线图

Fig.2 Response surface and contour plot of interaction of various factors

表4 鸡骨液酶解前后游离氨基酸含量、阈值、呈味特性及TAV值

Table 4 Contents, thresholds in water, taste contribution and TVA value of free amino acids in chicken bone homogenate before and after enzymolysis

编号	游离氨基酸	滋味阈值(mg/kg) ^[14]	浓度(mg/kg)		TAV值		呈味特性
			酶解前	酶解后	酶解前	酶解后	
1	天门冬氨酸(Asp)	100	78.60±3.25	1385.41±11.64**	0.79	13.85	鲜味
2	苏氨酸(Thr)	260	118.14±5.63	1057.79±10.23**	0.45	4.07	甜味
3	丝氨酸(Ser)	150	115.57±1.87	779.69±9.85**	0.77	5.20	甜味
4	谷氨酸(Glu)	30	262.72±4.31	2367.49±12.31**	8.76	78.92	鲜味
5	甘氨酸(Gly)	130	111.38±3.52	447.54±9.46**	0.86	3.44	甜味
6	丙氨酸(Ala)	60	159.18±5.69	1475.70±12.38**	2.65	24.60	甜味
7	胱氨酸(Cys)	—	5.43±1.18	242.36±5.23**	—	—	无味
8	缬氨酸(Val)	40	57.18±2.31	1643.50±6.89**	1.43	41.09	苦味
9	蛋氨酸(Met)	30	25.66±1.79	968.91±7.85**	0.86	32.30	苦味
10	异亮氨酸(Ile)	90	33.84±1.40	1486.89±8.05**	0.38	16.52	苦味
11	亮氨酸(Leu)	190	61.17±2.03	2654.00±13.76**	0.32	13.97	苦味
12	酪氨酸(Tyr)	—	29.67±2.19	264.38±3.94**	—	—	苦味

续表 4

编号	游离氨基酸	滋味阈值(mg/kg) ^[14]	浓度(mg/kg)		TAV值		呈味特性
			酶解前	酶解后	酶解前	酶解后	
13	苯丙氨酸(Phe)	90	31.72±1.82	1119.04±7.70**	0.35	12.43	苦味
14	组氨酸(His)	—	97.92±2.45	1063.84±14.83**	—	—	无味
15	赖氨酸(Lys)	20	111.13±1.99	1639.86±19.46**	5.56	81.99	苦味
16	精氨酸(Arg)	50	31.13±0.98	207.35±5.32**	0.62	4.15	甜味
17	脯氨酸(Pro)	—	53.26±1.46	307.16±2.43**	—	—	无味
	游离氨基酸总量		1383.7±63.30	19110.9±723.65**	—	—	—
	Σ鲜味氨基酸		341.32±130.19	3752.9±694.44**	9.55	92.77	鲜味
	Σ甜味氨基酸		535.37±46.63	3988.07±499.67**	5.35	41.46	甜味
	Σ苦味氨基酸		350.37±33.03	9776.58±797.51**	8.90	198.30	苦味

注: “—”表示未检测到; ***P*<0.01 vs酶解前。

表 5 鸡骨液酶解前后挥发性成分比较
Table 5 Comparison of volatile components of chicken bone homogenate before and after enzymatic hydrolysis

编号	化合物名称	RT(min)	CAS	鉴定方式	相对含量(μg/kg)	
					酶解前	酶解后
醇类						
1	顺-2-壬烯-1-醇	6.75	31502-14-4	MS, RI	135.31	11.00
2	1-戊烯-3-醇	9.62	616-25-1	MS, RI	129.49	—
3	11-十三炔-1-醇	10.26	33925-75-6	MS, RI	65.86	—
4	戊醇	11.72	30899-19-5	MS, RI	1363.27	185.43
5	正己醇	14.02	111-27-3	MS, RI	248.34	61.91
6	1-辛烯-3-醇	15.75	3391-86-4	MS, RI	666.90	346.67
7	庚醇	15.89	111-70-6	MS, RI	192.88	17.56
8	反式-2-庚烯-1-醇	16.77	33467-76-4	MS, RI	65.53	—
9	2,4-二甲基环己醇	17.24	69542-91-2	MS, RI	62.62	—
10	辛醇	17.50	111-87-5	MS, RI	100.33	575.52
11	反式-2-辛烯醇	18.27	18409-17-1	MS, RI	1012.24	13.29
12	(Z)-3-甲基-2-庚烯-1-醇	18.34	26001-58-1	MS, RI	23.92	—
13	1,2-庚二醇	18.68	3710-31-4	MS, RI	1239.11	12307.32
14	2,4-癸二烯-1-醇	22.71	14507-02-9	MS, RI	86.88	398.56
15	反-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化-2-呋喃甲醇	16.12	34995-77-2	MS, RI	—	160.41
16	4-乙基环己醇	16.40	4534-74-1	MS, RI	—	34.63
17	5-壬醇	17.19	623-93-8	MS, RI	—	26.89
18	芳樟醇	17.23	78-70-6	MS, RI	—	57.32
19	(2Z)-2-辛烯-1-醇	18.28	26001-58-1	MS, RI	—	57.87
20	1-甲基环庚醇	18.36	3761-94-2	MS, RI	—	90.00
21	正壬醇	19.55	143-08-8	MS, RI	—	84.11
22	1-癸醇	20.20	112-30-1	MS, RI	—	18.08
23	(Z)-5-癸烯-1-醇	20.53	51652-47-2	MS, RI	—	14.41
24	2-甲基-3-癸醇	21.32	83909-79-9	MS, RI	—	11.53
25	反-2-十二烯-1-醇	21.93	69064-37-5	MS, RI	—	112.34
26	十七烷-9-醇	22.49	624-08-8	MS, RI	—	39.16
27	薄荷醇	20.05	89-78-1	MS, RI	12.64	72.46
酮类						
28	3-甲基-2-庚酮	3.64	2371-19-9	MS, RI	47.71	—
29	2,3-戊二酮	6.84	600-14-6	MS, RI	12.01	—
30	5-甲基-3-庚酮	11.48	541-85-5	MS, RI	18.86	—
31	1-辛烯-3-酮	12.64	4312-99-6	MS, RI	141.03	—
32	甲基庚烯酮	13.50	110-93-0	MS, RI	31.41	—
33	3-辛烯-2-酮	14.93	1669-44-9	MS, RI	33.82	21.21
34	(3E,5E)-辛-3,5-二烯-2-酮	16.83	38284-27-4	MS, RI	43.89	9.33
35	2,6-二甲基-3-庚酮	18.48	19549-83-8	MS, RI	138.04	63.04
36	2,3-辛二酮	18.55	19549-83-8	MS, RI	15.87	—

续表 5

编号	化合物名称	RT(min)	CAS	鉴定方式	相对含量(μg/kg)	
					酶解前	酶解后
37	3-辛酮	3.64	106-68-3	MS, RI	—	13.59
酸类						
38	醋酸	15.69	64-19-7	MS, RI	64.12	—
39	正己酸酐	18.88	2051-49-2	MS, RI	167.09	8.91
40	己酸	20.99	142-62-1	MS, RI	6.43	34.85
41	庚酸	22.14	111-14-8	MS, RI	49.04	573.46
42	辛酸	23.24	124-07-2	MS, RI	18.22	195.81
43	壬酸	24.27	112-05-0	MS, RI	58.54	286.09
44	2-氧代辛酸	15.15	328-51-8	MS, RI	—	52.72
45	戊酸	19.74	109-52-4	MS, RI	—	70.11
46	2-辛烯酸	23.61	1470-50-4	MS, RI	—	15.33
酯类						
47	己酸乙酯	10.97	123-66-0	MS, RI	51.28	7.51
48	乙酸己酯	11.93	142-92-7	MS, RI	9.90	3.42
49	辛酸乙酯	15.40	142-92-7	MS, RI	249.61	82.43
50	2-甲基丙酸酯	17.14	74367-30-9	MS, RI	14.22	—
51	丙烯酸癸酯	13.36	2156-96-9	MS, RI	—	196.78
52	丙位辛内酯	23.07	104-50-7	MS, RI	—	2.42
53	异硫氰酸苯甲酯	23.78	622-78-6	MS, RI	—	283.53
烃类						
54	2,4-二甲基-1-庚烯	13.17	19549-87-2	MS, RI	43.31	—
55	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	15.08	61142-36-7	MS, RI	36.06	—
56	顺式-3-癸烯	11.01	19398-86-8	MS, RI	—	11.04
57	1,3-己二烯	15.06	61142-36-7	MS, RI	—	40.53
58	正庚烷	2.05	142-82-5	MS, RI	81.17	—
59	1-辛烷	2.55	111-65-9	MS, RI	366.36	148.28
60	六甲基环三硅氧烷	3.11	541-05-9	MS, RI	26.56	—
61	硅氮烷	5.51	556-67-2	MS, RI	21.33	—
62	十二烷	6.29	112-40-3	MS, RI	8.27	—
63	十一烷	7.58	1120-21-4	MS, RI	7.94	—
64	十六烷	16.44	544-76-3	MS, RI	26.13	—
65	十七烷	17.93	629-78-7	MS, RI	25.70	—
66	正十九烷	19.26	629-92-5	MS, RI	18.12	—
67	二十四烷	20.46	646-31-1	MS, RI	48.02	—
68	(1S)-(-)-CIS蒎烷	18.13	4755-33-3	MS, RI	—	79.22
酚类						
69	3-甲基-6-丙基苯酚	21.10	31143-55-2	MS, RI	76.62	236.06
杂环类						
70	2-戊基呋喃	10.69	3777-69-3	MS, RI	74.55	356.93
71	2-乙基呋喃	4.57	3208-16-0	MS, RI	—	11.71
72	2-正丁基呋喃	8.37	4466-24-4	MS, RI	—	5.54
醛类						
73	正戊醛	5.03	110-62-3	MS, RI	72.67	35.32
74	己醛	7.34	66-25-1	MS, RI	985.60	663.82
75	5-甲基-己醛	9.74	1860-39-5	MS, RI	211.18	—
76	辛醛	12.30	124-13-0	MS, RI	187.80	162.63
77	壬醛	14.62	124-19-6	MS, RI	476.73	253.36
78	2-辛烯醛	15.31	2363-89-5	MS, RI	234.52	481.34
79	反-2,4-庚二烯醛	16.41	4313-03-5	MS, RI	36.56	—
80	癸醛	16.46	112-31-2	MS, RI	61.42	25.03
81	苯甲醛	16.88	100-52-7	MS, RI	34.84	18.10
82	顺-6-壬烯醛	17.06	2277-19-2	MS, RI	97.49	207.56
83	反式-2-癸烯醛	18.59	3913-81-3	MS, RI	145.21	542.90

续表 5

编号	化合物名称	RT(min)	CAS	鉴定方式	相对含量(μg/kg)	
					酶解前	酶解后
84	(E,E)-2,4-壬二烯醛	19.35	5910-87-2	MS, RI	73.24	103.91
85	2-十一烯醛	19.96	2463-77-6	MS, RI	54.32	90.08
86	反,反-2,4-癸二烯醛	20.67	25152-84-5	MS, RI	56.93	21.19
87	十四醛	22.98	124-25-4	MS, RI	10.51	30.67
88	庚醛	9.67	111-71-7	MS, RI	—	11.86
89	(反式)-4-壬烯醛	15.35	2277-16-9	MS, RI	—	9.63
90	反-2-,顺-6-壬二烯醛	17.79	557-48-2	MS, RI	—	47.03
91	(E,E)-2,4-十二碳二烯醛	20.10	21662-16-8	MS, RI	—	46.12
92	十六醛	25.96	629-80-1	MS, RI	—	4.90

注: “—”表示未检测到; “RT(min)”表示保留时间(分钟); “CAS”表示化学文摘社编号。

92 种, 酶解前 63 种, 酶解后 66 种, 其中包含了 27 个醇、10 个酮、9 个酸、7 个酯、15 个烃类、1 个酚、3 个杂环和 20 个醛类。这些化合物构成了鸡骨酶解前后的挥发性风味轮廓, 醇和酸类相对含量在酶解后增加, 醛类、烃类和酮类减少, 说明这些化合物含量的变化使酶解前后鸡骨液挥发性组成成分以及其对香气的贡献有所差别。

醇和酸主要是赋予食物芳香、花香、甜味、水果味、酸味和蘑菇味的主要来源, 酸可以由氨基酸降解后经氧化或还原作用产生, 也可能由饱和脂肪酸本身氧化降解产生, 是酯类化合物合成的前体物质^[16-18]。本研究中, 酶解后辛醇、1,2-庚二醇、芳樟醇、薄荷醇和庚酸、壬酸、戊酸等对花香、香甜、酸香和水果香有贡献的化合物含量增加。烃类化合物可能是由脂质自氧化产生, 且大部分烃类物质被报道香气较弱或无气味^[19]; 醛类也可以由食物中脂肪酸的氧化和蛋白质的 Strecker 降解反应而生成且气味阈值较低^[20], 与

酮类等挥发性化合物具有麦芽味、青草味、甜味、烤面包香、焦糖香和咖啡香等^[21-22]。本研究中, 1-辛烯-3-酮、5-甲基-3-庚酮、甲基庚烯酮和正戊醛、己醛、壬醛、苯甲醛等在酶解后消失或者含量降低会造成香气的减弱, 但反式-2-癸烯醛、十四醛、庚醛和十六醛等的增加会减少青草味等不愉快的气味。此外, 酶解后 2-戊基呋喃、2-乙基呋喃和 2-正丁基呋喃含量的增加会增强鸡骨液的烤香味。

2.6 鸡骨液关键挥发性香气成分及其香气轮廓分析

OAV 是将 GC-MS 所测定的挥发性化合物浓度与每种挥发性化合物对应的嗅觉阈值相结合分析, 可有效地评估每一个挥发性成分对样品香气轮廓的贡献大小^[23]。化合物的 OAV 大于或等于 1 说明该挥发性成分能被感官察觉且对鸡骨的整体香气贡献较大。

由表 6 可知, 鸡骨液酶解前后 OAV ≥ 1 的风味物质共有 17 种, 其中酶解前 13 种、酶解后 16 种, 包

表 6 鸡骨液酶解前后挥发性风味物质的 OAV
Table 6 OAV of volatile flavor compounds of chicken bone homogenate before and after enzymatic hydrolysis

编号	化合物名称	水中阈值(μg/kg) ^[24-26]	相对含量(μg/kg)		OAV		香气描述 ^[27-29]
			酶解前	酶解后	酶解前	酶解后	
1	1-辛烯-3-醇	1.00	666.90	346.67	666.90	346.67	蘑菇、薰衣草、玫瑰
2	庚醇	5.40	192.88	17.56	35.72	3.25	化学、绿色
3	芳樟醇	25.00	—	57.32	—	2.29	花香、薰衣草
4	正壬醇	5.00	—	84.11	—	16.82	橙子、蔷薇香
5	己酸乙酯	14.00	51.28	7.51	3.66	0.54	青苹果、草莓
6	辛酸乙酯	19.30	249.61	82.43	12.93	4.27	水果香
7	2-戊基呋喃	6.00	74.55	356.93	12.43	59.49	烘烤香、绿豆、黄油
8	2-正丁基呋喃	5.00	—	5.54	—	1.11	芳香味
9	己醛	4.50	985.60	663.82	219.02	147.51	青草、苹果
10	辛醛	0.70	187.80	162.63	268.29	232.33	脂肪、柠檬、草果味、甜橙、蜂蜜
11	壬醛	15.00	476.73	253.36	31.78	16.89	生青味
12	2-辛烯醛	3.00	234.52	481.34	78.17	160.45	黄瓜、鸡肉香
13	苯甲醛	3.50	34.84	18.10	9.95	5.17	果香
14	反式-2-癸烯醛	3.00	145.21	542.90	48.40	180.97	动物油脂
15	2-十一烯醛	1.40	54.32	90.08	38.80	64.57	肥皂、脂肪、青草
16	反,反-2,4-癸二烯醛	0.03	56.93	21.19	1897.67	706.33	油炸、蜡、脂肪
17	庚醛	3.00	—	11.86	—	3.95	脂肪、柑橘、酸败

注: “—”表示未检测到。

括醇类 4 种、酯类 2 种、呋喃类 2 种、醛类 9 种, 酶解后 OAV ≥ 1 的挥发性化合物增加, 香气轮廓更加丰富。与上述结果一致, 低阈值的醛类对香气是贡献最大的, 其 OAV 也大。酶解后鸡骨液中己醛(OAV: 147.51)、辛醛(OAV: 232.33)、壬醛(OAV: 16.89)、苯甲醛(OAV: 5.17)、反,反-2,4-癸二烯醛(OAV: 706.33)、1-辛烯-3-醇(OAV: 346.67)、庚醇(OAV: 3.25)、己酸乙酯(OAV: 0.54)的含量及 OAV 下降, 降低了挥发性物质产生的花香、果香以及蜡味等香气, 但是芳樟醇(OAV: 2.29)、正壬醇(OAV: 16.82)、2-戊基呋喃(OAV: 59.49)、2-正丁基呋喃(OAV: 1.11)、2-辛烯醛(OAV: 160.45)、反式-2-癸烯醛(OAV: 180.97)、庚醛(OAV: 3.95)的含量及 OAV 上升, 增加了瓜香、肉香、烘烤香、动物油脂味, 使整体风味更加和谐。

鸡骨液酶解前后的挥发性香气包含了水果香、花香、脂肪香、瓜香、草味、烘烤香、肉香、蘑菇、柠檬味和绿豆味。根据香气化合物的风味特征, 以及参照香气轮中的模块分类可以将计算得到 OAV ≥ 1 的各香气化合物绘制香气轮廓图^[30]。如图 3 所示, 酶解后香气轮廓比酶解前小, 特别酶解前呈脂肪味的挥发性组分总 OAV 达到了 2415.38, 使鸡骨液的脂肪味过于凸出, 而掩盖其它化合物的香气, 但是酶解后下降到了 1081.48, 相比于与酶解前减小了 2.23 倍, 很大程度的降低了脂肪味; 虽然酶解会降低呈花香、果香果香的化合物浓度, 但是增加了呈烘烤、绿豆、瓜香和肉香化合物的浓度, 从而让鸡骨酶解液香气更丰富, 接受度会更高, 与郑晓杰等^[31]的研究结果相似。

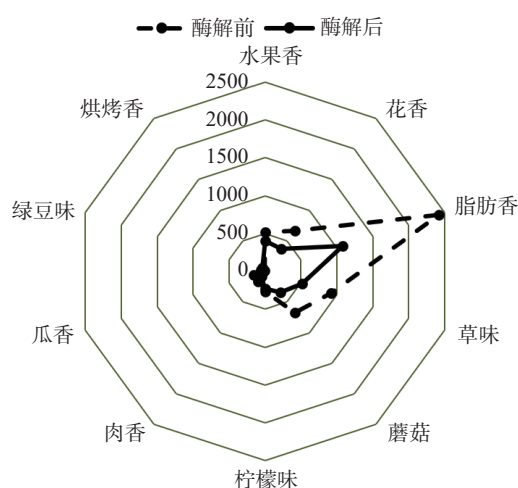


图 3 鸡骨液酶解前后风味轮廓

Fig.3 Flavor profile of chicken bone homogenate before and after enzymatic hydrolysis

3 结论

鸡骨是肉鸡加工过程中产生的主要可利用副产物, 含有丰富的蛋白质、氨基酸等, 具有较好的开发价值。本研究发现, 共有 13 个游离氨基酸的 TAV 大于 1, 其中天门冬氨酸(13.85)、谷氨酸(78.92)、丙氨酸(24.60)、缬氨酸(41.09)、蛋氨酸(32.30)、异亮

氨酸(16.52)、亮氨酸(13.97)和赖氨酸(81.99)大于 10, 对鸡骨液滋味贡献极大。共鉴定出挥发性化合物 92 种, 酶解前 63 种, 酶解后 66 种, 其中 OAV ≥ 1 酶解前 13 种、酶解后 16 种, 包括醇类 4 种、酯类 2 种、呋喃类 2 种、醛类, 酶解前鸡骨液有强烈的脂肪味, 酶解后脂肪味减弱其 OAV 降低了 2.23 倍, 同时花香、果香香气贡献减低, 但是增加了烘烤、绿豆、瓜香和肉香的贡献。可为今后鸡骨酶解风味的研究提供试验基础和理论依据, 但是为了更准确的对其香气轮廓的表征, 在后续的研究中可以增加嗅闻、香气缺失和香气重组等试验。

参考文献

- [1] 张怡, 赵婉丽, 姜常宜, 等. 2020 年全球肉鸡生产、贸易及产业经济发展研究[J]. 中国家禽, 2021, 43(5): 62-69. [ZHANG Y, ZHAO W L, JIANG C Y, et al. Global broiler production, trade and industrial economic development research in 2020[J]. China Poultry, 2021, 43(5): 62-69.]
- [2] 马亚萍, 白腾辉, 康壮丽, 等. 响应面法优化鸡骨蛋白酶解工艺条件[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 219-223. [MA Y P, BAI T H, KANG Z L, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis conditions for chicken protein by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(19): 219-223.]
- [3] 丁小燕, 张雯, 陈延锋, 等. 复合风味蛋白酶水解鸡骨泥工艺条件的研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 89-92. [DING X Y, ZHANG W, CHEN Y F, et al. Study on enzymolysis conditions of chicken-mashed bone by flavour zyme[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(1): 89-92.]
- [4] 李睿, 王海燕, 尚永彪. 鸡骨的综合利用研究进展[J]. 肉类工业, 2010, 355(11): 54-57. [LI R, WANG H Y, SHANG Y B. Research progress on comprehensive utilization of chicken bone[J]. Meat Industry, 2010, 355(11): 54-57.]
- [5] 范婷婷, 赵晓燕, 李晓贝, 等. 人工栽培和野生羊肚菌游离氨基酸主成分分析及综合评价[J]. 食品科学, 2021, 12(6): 14. [FAN T T, ZHAO X Y, LI X B, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of free amino acids between cultivated and wild *Morchella*[J]. Food Science, 2021, 12(6): 14.]
- [6] 赵玉, 詹萍, 王鹏, 等. 猕猴桃中关键香气组分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 1-10. [ZHAO Y, ZHAN P, WANG P, et al. Analysis on the key aroma compounds in kiwifruit[J]. Food Science, 2020, 41(12): 1-10.]
- [7] 杨鹏飞, 张增辉, 何春雨, 等. 基于分子感官科学的烟用香精关键香气活性成分分析[J]. 轻工学报, 2021, 36(2): 34-42. [YANG P F, ZHANG Z H, HE C Y, et al. Analysis of key aroma-active constituents in tobacco flavors based on molecular sensory science[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(2): 34-42.]
- [8] 张曼, 汤艳燕, 魏雪, 等. 不同产地鲜辣椒风味成分比较分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 264-270. [ZHANG M, TANG Y Y, WEI X, et al. Comparison and analysis the flavor components of zha-chili derived from different places in China[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(14): 264-270.]
- [9] 孙圳, 韩东, 张春晖, 等. 定量卤制鸡肉挥发性风味物质剖面分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 3030-3045. [SUN Z, HANG D, ZHANG C H, et al. Profile analysis of the volatile flavor

- compounds of quantitative marinated chicken during processing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(15): 3030–3045.]
- [10] ZHANG Q, JING R, WANG B, et al. Fast mode decision based on gradient information in 3D-HEVC[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 135448–135456.
- [11] YANG Y, DENG Q, JIA X, et al. Characterization of key odorants in peeled and unpeeled flaxseed powders using solvent-assisted flavor evaporation and odor activity value calculation[J]. *LWT*, 2021, 138: 110724.
- [12] 张恒. 鸡骨酶解过程中的呈味特性及氨基酸释放规律研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010. [ZHANG H. Taste characteristics and release of amino acid of chicken bone hydrolysates during enzymatic hydrolysis[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010.]
- [13] 丁小燕, 张雯, 倪莉, 等. 双酶水解鸡骨泥的工艺优化[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 205–208. [DING X Y, ZHANG W, NI L, et al. The study on the enzymatic hydrolysis process on chicken bone paste with double enzyme combination[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(1): 205–208.]
- [14] 魏光强, 李子怡, 黄艾祥, 等. 基于游离氨基酸, 挥发性组分和感官评价的 2 种酸化技术加工乳饼的滋味特征差异分析[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 1–14. [WEI G Q, LI Z Y, HUANG A X, et al. Differential taste characteristics of rubbing cheese made by two acidification methods revealed by free amino acids, volatile compounds and sensory evaluation[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 1–14.]
- [15] 马黎, 聂靖茹, 鲁绍雄, 等. 迪庆藏猪与野藏杂交猪肌肉全谱游离氨基酸味道强度值比较[J]. 中国畜牧兽医, 2021, 48(4): 1275–1283. [MA L, NIE J R, LU S X, et al. Comparison of the taste activity value of full spectrum free amino acid in muscle of Diqing Tibetan pig and wild Boar×Diqing Tibetan pig[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2021, 48(4): 1275–1283.]
- [16] 吉艳莉, 李瑞英, 郭萌, 等. 不同发酵菌种及发酵时间对蛋酪风味成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(2): 214–221. [JI Y L, LI R Y, GUO M, et al. Effect of different fermentation strains and fermentation time on the flavor components of egg cheese[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(2): 214–221.]
- [17] 赵芬, 张立彦, 曾清清. 不同熬煮方法对鸡骨汤风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 314–319. [ZHAO C, ZHANG L Y, ZENG Q Q. Effect of different boiling methods on flavor components of chicken skeleton soup[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(7): 314–319.]
- [18] 赵宁, 魏新元, 樊明涛, 等. SPME-GC-MS 结合电子鼻技术分析不同品种猕猴桃酒香气物质[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 249–255. [ZHAO N, WEI X Y, FAN M T, et al. Analysis of volatile components of kiwifruit wines made from different cultivars using solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. *Food Science*, 2019, 40(22): 249–255.]
- [19] BIANCHI F, CARERI M, MUSCI M, et al. Fish and food safety: Determination of formaldehyde in 12 fish species by SPME extraction and GC-MS analysis[J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(3): 1049–1053.
- [20] HAMMER A K, ALBRECHT F, HAHNE F, et al. Biotechnological production of odor-active methyl-branched aldehydes by a novel α -dioxygenase from *Crocospaera subtropica*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(38): 10432–10440.
- [21] CANAS S, ANJOS O, CALDEIRA I, et al. Are the furanic aldehydes ratio and phenolic aldehydes ratios reliable to assess the addition of vanillin and caramel to the aged wine spirit[J]. *Food Control*, 2019, 25: 77–84.
- [22] LIGUORI L, DE FRANCESCO G, ORILIO P, et al. Influence of malt composition on the quality of a top fermented beer[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(6): 2295–2303.
- [23] ZHANG H, PU D, SUN B, et al. Characterization and comparison of key aroma compounds in raw and dry porcini mushroom (*Boletus edulis*) by aroma extract dilution analysis, quantitation and aroma recombination experiments[J]. *Food Chemistry*, 2018, 258(30): 260–268.
- [24] 陈迎春, 张晶莹, 官磊, 等. 六个早熟鲜食葡萄品种果实香气成分分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2021(1): 24–30, 35. [CHEN Y C, ZHANG J Y, GONG L, et al. Analysis on fruit aromatic compounds of six early ripening table grape cultivars[J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2021(1): 24–30, 35.]
- [25] 刘欢, 张德权, 王振宇, 等. 北京烤鸭腿皮与腿肉关键挥发性风味物质解析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(2): 308–318. [LIU H, ZHANG D Q, WANG Z Y, et al. Analysis of aroma compounds in leg skin and leg meat from Beijing roasted duck[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(2): 308–318.]
- [26] 李凯, 商佳胤, 张娜, 等. HS-SPME-GC-MS 分析天津产区‘巨玫瑰’葡萄果实香气成分[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(1): 68–74. [LI K, SHANG J Y, ZHANG N, et al. Analysis on aroma components of grape ‘Jumeigui’ grown in Tianjin by HS-SPME-GC-MS[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2021, 44(1): 68–74.]
- [27] 孙宝国. 食品添加剂[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2013. [SUN B G. Food additives[M]. Second Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.]
- [28] 刘野. 食品风味化学理论与研究动态探究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020. [LIU Y. Research on the theory and research trends of food flavor chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020.]
- [29] 宋焕禄, 王丽金. 食品风味化学与分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2021. [SONG H L, WANG L J. Food flavor chemistry and analysis[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2021.]
- [30] GENOVESE A, CAPORASO N, LEONE T, et al. Use of odorant series for extra virgin olive oil aroma characterisation[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(3): 1215–1224.
- [31] 郑晓杰, 林胜利, 聂小华, 等. 温度对鸡骨酶解液美拉德反应产物光谱特性和挥发性风味成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(8): 127–132. [ZHENG X J, LIN S L, NIE X H, et al. Effect of temperature on spectral characteristics and volatile compounds of Maillard reaction products from xylose-chicken bone hydrolysate system[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(8): 127–132.]