

配料组成对高温芝麻饼粕蛋白酶解物制备肉味香精的影响

芦鑫, 张丽霞, 孙强, 游静, 黄纪念

Effects of Ingredients Composition on Meat Flavor Prepared with High Temperature Sesame Cake Protein Hydrolysate

LU Xin, ZHANG Lixia, SUN Qiang, YOU Jing, and HUANG Jinian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080220>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近红外光谱结合偏最小二乘法快速测定糖果中水分含量

Rapid determination of moisture content in candy by near infrared spectroscopy combined with partial least squares

食品工业科技. 2018, 39(7): 255-258,322 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.07.045>

混料设计优化花生粕制备呈味基料复合酶配比

Optimization of Mixed Enzyme Ratio of Taste-based Materials Prepared by Enzymatic Hydrolysis of Peanut Meal by Mixture Design

食品工业科技. 2021, 42(23): 184-191 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030209>

圆鳕暗色肉蛋白酶解物的抗疲劳作用

Anti-fatigue effect of enzymatic hydrolysates from *Auxis tapeinosom* dark muscle protein

食品工业科技. 2018, 39(10): 315-319,323 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.10.058>

核桃饼粕蛋白提取、多肽制备条件优化及其酶解液的抗氧化性研究

Study on Protein Extraction, Polypeptide Preparation and Antioxidant Activity of Walnut Pulp Hydrolysate

食品工业科技. 2020, 41(11): 151-157 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.11.023>

基于流变学参数及混料回归设计的浑浊型南瓜汁饮料工艺及配方优化

Application of rheological parameters and mixture design to optimize the formula of cloudy pumpkin juice beverages

食品工业科技. 2017(07): 193-198 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.07.029>

响应面法优化南极磷虾蛋白酶解物溶解性工艺

Optimization of hydrolysis process on solubility of protein from Antarctic krill(*Euphausia superba*) by response surface methodology

食品工业科技. 2018, 39(5): 151-156 <https://doi.org/>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

芦鑫, 张丽霞, 孙强, 等. 配料组成对高温芝麻饼粕蛋白酶解物制备肉味香精的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 50–61. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080220

LU Xin, ZHANG Lixia, SUN Qiang, et al. Effects of Ingredients Composition on Meat Flavor Prepared with High Temperature Sesame Cake Protein Hydrolysate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 50–61. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080220

· 研究与探讨 ·

配料组成对高温芝麻饼粕蛋白酶解物制备肉味香精的影响

芦鑫^{1,2}, 张丽霞^{1,2}, 孙强^{1,2,3}, 游静^{1,2}, 黄纪念^{1,2,3,*}

(1. 河南省农业科学院农产品加工研究中心, 河南郑州 450002;

2. 河南省农产品生物活性物质工程技术研究中心, 河南郑州 450002;

3. 农业部油料加工重点实验室, 湖北武汉 430062)

摘要: 为分析配料 (硫化物、糖) 组成对高温芝麻饼粕蛋白酶解物 (High temperature sesame cake protein hydrolysate, HTSPH) 制备肉味香精的影响, 首先固定木糖与 HTSPH 含量, 考察 5 种硫化物如半胱氨酸 (L-Cys)、甲硫氨酸 (L-Met)、硫胺素 (VB₁) 对美拉德反应产物 (Maillard reaction products, MRPs) 的感官特性、挥发性成分、pH、褐变与糖基化程度的影响, 随后对比木糖、核糖、半乳糖等 9 种糖与 L-Cys、HTSPH 反应得到 MRPs 的特性差异, 最后, 混料试验考察 L-Cys、木糖、HTSPH 三者组成对 MRPs 感官特性与挥发性成分影响。结果显示, 不同硫化物形成 MRPs 的挥发性成分组成差异明显, L-Cys 的 MRPs 肉味突出, 感官评价得分最高 (69.32±1.34)。对比不同糖的 MRPs 的性质组成发现, 戊糖的 MRPs 中感官评价得分显著高于己糖的 MRPs, 其挥发性成分中富含肉香味成分, 木糖是适宜由 HTSPH 制作肉味香精的糖类。混料试验表明 L-Cys、木糖与 HTSPH 组成会显著影响 MRPs 风味特征。偏最小二乘回归分析发现 22 种关键挥发性成分。5-甲基-2-噻吩甲醛、二糠基二硫醚、5-乙基噻吩-2-甲醛、4,6-二甲基-1H,3H-噻吩并 [3,4-c] 噻吩、苯甲醛、2-糠基-2-甲基-3-呋喃基二硫化物、2-糠基硫醇与感官得分正相关。本研究为高温芝麻饼粕制备肉味香精提供理论指导。

关键词: 硫化物, 戊糖, 醛糖, 混料设计, 偏最小二乘法回归

中图分类号: TS229

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)14-0050-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080220



本文网刊:

Effects of Ingredients Composition on Meat Flavor Prepared with High Temperature Sesame Cake Protein Hydrolysate

LU Xin^{1,2}, ZHANG Lixia^{1,2}, SUN Qiang^{1,2,3}, YOU Jing^{1,2}, HUANG Jinian^{1,2,3,*}

(1. Research Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences,

Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Engineering Research Centre of Bioactive Substances in Agricultural Products, Zhengzhou 450002, China;

3. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

Abstract: To analyze the effect of the composition of ingredients (Sulfur-containing substance, saccharide) on meat flavor derived from high temperature sesame cake protein hydrolysate (HTSPH), the influence of five sulfides such as cysteine (L-Cys), methionine (L-Met), thiamine (VB₁) on the sensory evaluation, volatile component, pH, brown intensity and glycosylation degree of the maillard reaction products (MRPs) of HTSPH was first investigated under the constant content of HTSPH and xylose, then the difference in the characteristics of MRPs obtained from the reaction of nine saccharides

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102110037); 国家特色油料产业技术体系 (CARS-14); 河南省农业科学院科技创新团队项目 (2023TD23)。

作者简介: 芦鑫 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 蛋白加工, E-mail: xinlu1981@foxmail.com。

* 通信作者: 黄纪念 (1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: hjinian@sina.com。

including xylose, ribose and galactose with L-Cys and HTSPH was compared. Finally, the mixture design was conducted to explore the effects of the composition of L-Cys, xylose and HTSPH on the properties and volatile components of MRPs. Results showed that the volatile components of MRPs formed from various sulfides differed remarkably, the MRPs generated by L-Cys had a prominent meaty flavor and the highest sensory evaluation score (69.32 ± 1.34). Comparison of the properties and composition of MRPs produced from various saccharides revealed that the sensory scores of MRPs prepared from pentoses were significantly higher than those of the MRPs prepared with hexoses, and its volatile compounds were rich in meat flavor components. Xylose was the suitable saccharide for preparing meat flavor from HTSPH. Mixture design revealed the composition of L-Cys, xylose and HTSPH dramatically affected the flavor profile of MRPs. 22 key volatile components have been identified through Partial least squares regression. 5-methyl-2-thiophenecarbaldehyde, difurfuryl disulfide, 5-ethylthiophene-2-carbaldehyde, 4,6-dimethyl-1H,3H-thieno[3,4-c]-thiophene, benzaldehyde, 2-furfuryl 2-methyl-3-furyl disulfide, and 2-furfurylthiol were positively correlated with the sensory score of MRPs produced by HTSPH. This study provides theoretical guidance for the preparation of the meat flavor from high-temperature sesame cake meal.

Key words: sulfur-containing substance; pentose; aldose; mixture design; partial least squares regression

蛋白酶解物通过美拉德反应制备肉味香精是蛋白利用的重要途径。研究表明,芝麻蛋白酶解液经美拉德反应可以制备肉味香精^[1],随后发现将高温芝麻饼粕蛋白酶解物(High temperature sesame cake protein hydrolysate, HTSPH),添加木糖与 L-Cys 经美拉德反应也可生成肉味香精^[2]。与芝麻蛋白相比,采用高温芝麻饼粕蛋白制备肉味香精,具有不影响芝麻香油生产,资源丰富、成本低的优点,更有应用价值。

目前虽然已经证实高温芝麻饼粕蛋白制备肉味香精的可行性,但尚未探讨反应物种类、比例对肉味香精挥发性成分的影响。美拉德反应受反应物组成^[3-5]、反应条件影响^[6],如糖类影响美拉德反应制备肉味香精的香气成分^[7]。因此,有必要研究硫化物与糖种类以及配比对采用 HTSPH 制备肉味香精的影响。

本文以 HTSPH 为原料,分别考察 L-Cys、L-Met、VB₁、硫脲、2,5-二羟基-1,4-二噁烷等 5 种硫化物和 9 种糖(8 种单糖与 1 种双糖)经美拉德反应对美拉德反应产物(Maillard reaction products, MRPs)挥发性成分与感官评价的影响,并分析 pH、褐变程度、糖基化差异,确立最佳的硫化物与糖类后,通过混料试验分析 HTSPH、硫化物与糖类三者比例对 MRPs 挥发性成分的影响并确定最佳配比,最后由偏最小二乘法回归辨别关键挥发性成分,为后续优化肉味香精工艺参数提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

高温芝麻饼粕 蛋白含量($40.44\% \pm 0.96\%$),河南省久创科技有限公司;胰糜蛋白酶(酶活 400349 ± 4576 U/g)、D-木糖、D-麦芽糖 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;风味蛋白酶(酶活 197042 ± 2477 U/g) 安琪酵母股份有限公司;L-Cys、L-Met、VB₁、硫脲、2,5-二羟基-1,4-二噁烷(简称二噁烷)、D-葡萄糖、D-果糖、D-阿拉伯糖、L-鼠李糖、D-甘露糖、D-核糖 上海麦克林生化科技股份有限公司;Alcalase

(酶活 178152 ± 1267 U/g) Sigma-Aldrich 公司;D-半乳糖、其他试剂 国药集团化学试剂有限公司。

JDY-6 恒温磁力搅拌油浴锅 南京金城致杰实验仪器厂;ROTANTA460R 离心机 德国 Hettich 科学仪器公司;Infinite M Nano 酶标仪 瑞士 TECAN 公司;K1100 全自动凯氏定氮仪 海能未来技术集团股份有限公司;7890A 气相色谱、5975C 质谱仪、Cary Eclipse 荧光分光光度计 美国安捷伦有限公司;XSR205DU 电子天平、FE20 实验室 pH 计 梅特勒-托利多仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 高温芝麻饼粕蛋白提取与酶解 参考芦鑫等^[2]的方法,将高温芝麻饼粕粉碎脱脂后,利用碱溶酸沉提取蛋白,冻干后,采用 Alcalase-胰糜蛋白酶-风味蛋白酶三酶水解,酶解完毕后,中和、8000 r/min 离心,取上清冻干后,获得 HTSPH。

1.2.2 不同硫化物参与制备肉味香精 参考 Shen 等^[1]的方法,取 5 g HTSPH 加入蒸馏水配成 10% (w/v) HTSPH 溶液,加入 1.5 g 木糖,分别加入 0.005 mol/L L-Cys、L-Met、VB₁、硫脲、2,5-二羟基-1,4-二噁烷,将 pH 调至 7.5,转移入耐压玻璃管,加入转子并旋塞,120 °C 搅拌加热 2 h,冰水浴冷却,获得 MRPs,4 °C 储藏备用。

1.2.3 不同糖类参与制备肉味香精 与 1.2.2 类似,配成 50 mL 10% HTSPH 溶液后,加入 0.6 g L-Cys,分别加入 0.01 mol/L 木糖、阿拉伯糖、核糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖、果糖、鼠李糖、麦芽糖,120 °C 搅拌加热 2 h,冰水浴冷却,获得 MRPs。

1.2.4 酶解物、硫化物、糖类配比的混料设计 考察反应物配比对美拉德制备肉味香精的影响,根据 Shen 等^[1]的研究结果,采用极端顶点混料设计。单次试验中,酶解物、L-Cys、木糖三者质量总和 7.1 g,溶于 50 mL 水中,调节 pH 7.5,120 °C 反应 2 h,冷却得到 MRPs。对以上 MRPs 进行感官评价,并采用 GC-MS 测定挥发性成分。选取在 3 种样品以上出

现的风味化合物为自变量,感官得分为因变量,进行偏最小二乘法回归分析(Partial least squares regression, PLS)。

1.2.5 美拉德反应程度评价 为分析硫化物、糖类及比例对美拉德反应的影响,采用 pH、褐变程度、糖基化程度进行分析,用 pH 计测定 MRPs 的 pH;将 MRPs 中固形物稀释到 0.05 mg/mL,测定 420 nm 与 294 nm 处的吸光度,以吸光度强弱评价褐变程度^[8];将 MRPs 中固形物稀释到 0.1 mg/mL,采用 340 nm 激发,狭缝宽度 5 nm,扫描范围 360~600 nm,以评价糖基化程度^[9]。

1.2.6 挥发性成分测定 采用固相微萃取结合气相色谱法测定 MRPs 的挥发性成分,样品中添加间二甲苯用作内标,参考芦鑫等^[2]的实验方法。挥发性成分的鉴定采用 NIST20 谱库,对匹配度大于 700 的成分,定量分析,并依据 VCF online(<https://www.vcf-online.nl/VcfCompoundSearchResult.cfm>)与 LSB([https://www.leibniz-lsb-tum-odorant-database/odorantdb/](https://www.leibniz-lsb.de/en/databases/leibniz-lsb-tum-odorant-database/odorantdb/))对成分进行风味描述,并查询风味阈值。

1.2.7 感官评价 选取年龄在 20~45 岁的 10 名评价人员,男女比例为 1:1,经过培训后,对样品进行感官评价。评价时,将 MRPs 稀释 10 倍,25 ℃ 下进行评价,评分内容与标准见表 1。统计分析,将各项目得分乘以权重(表 1)、相加,计算感官评价总分^[10-11]。

1.3 数据处理

所有实验平行测定三次。Minitab 17 分析混料试验设计;IBM SPSS 27 进行单因素分析(显著水平 0.05)。Origin 2022 对风味成分进行热图聚类分析(Apps 为 Heat map with dendrogram,聚类方法为组间平均,采用皮尔逊相关系数聚类)与相关性分析(APPs 为 Correlation plot)。

2 结果与分析

2.1 硫化物种类对 HTSPH 的 MRPs 的挥发性成分与感官特性的影响

不同硫化物对于 HTSPH 制备肉味香精的影响见图 1。由于美拉德反应过程中,氨基消耗的同时,

有酸类生成,导致 pH 下降^[12-13],因此 pH 下降幅度可以评价美拉德反应程度。图 1A 所示,5 种硫化物

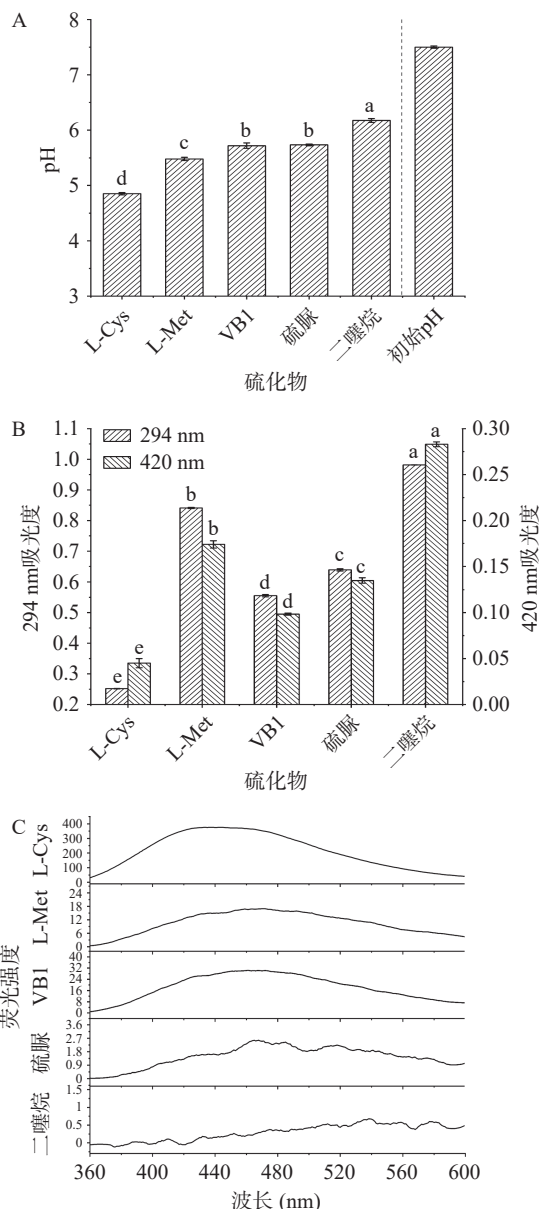


图 1 不同硫化物的 MRPs 的 pH(A)、褐变程度(B)与糖基化程度(C)

Fig.1 pH (A), brown intensity (B) and glycosylation degree (C) of MRPs derived from various sulfides

注:不同字母表示数据间差异显著($P<0.05$);图 4 同。

表 1 美拉德反应产物的感官评价标准表

Table 1 Sensory evaluation criterion of maillard reaction products

分数(分)	肉香味	甜香味	烘烤坚果味	葱蒜味	纯正性(硫臭、焦糊、苦味等)	饱满性
80~100	肉香浓郁,逼真自然	甘甜突出,令人愉悦	风味明显、突出、逼真	味道纯正自然,令人愉悦	异味微弱或无	香气协调、醇厚浓郁强烈,且层次丰富
60~80	肉香较浓郁,较逼真	甜香较强,难以掩盖	味道较强,较逼真	味道突出,较逼真,能接受	异味能察觉,但可接受	香气较醇厚强烈,但层次饱满稍差,总体协调
40~60	肉香一般但易察觉,有点失真	甜香强度偏弱,但能易察觉	风味易察觉,稍显失真	味道稍显失真,尚能接受	异味中等,但尚可接受	香气协调性差,层次较少,风味浓郁一般
20~40	肉香较弱且失真	甜香薄弱	风味薄弱	味道较弱、或过强,有强刺激性	异味明显,较难接受	风味寡淡,层次少,或某种味道突出掩盖其他味道
0~20	肉香难以察觉	难以察觉	微弱或无	微弱或强烈至掩盖肉味	异味强烈、突出,难以接受	香气不协调,味道单一、寡淡
权重	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

体系的 pH 从 7.5 下降到 4.85~6.18 之间, 2,5-二羟基-1,4-二噻烷体系的下降幅度小, 而添加 L-Cys 的样品 pH 最低, 这表明添加 L-Cys 有利于美拉德反应。观察褐色程度变化(图 1B)发现, L-Cys 有最低的吸光值, 这与 L-Cys 同其他氨基化合物竞争处于优势, 阻碍其他氨基化合物与糖类发生反应生成褐色物质有关^[14]。420~440 nm 的荧光强度与蛋白质与多肽的糖基化产物有关^[9], 根据峰值与出峰位置可知, 添加 L-Cys 体系中参与美拉德反应的蛋白与多肽多, L-Met 与硫胺素体系参与美拉德反应的蛋白与

多肽较少,而硫脲与2,5-二羟基-1,4-二噻烷体系中蛋白与多肽几乎未参与美拉德反应(图1C)。综合上述结果,5种硫化物的美拉德反应途径有差异。

采用 GC-MS 从 5 种硫化物的 MRPs 中共检测出 86 种挥发物, 其组成与分布见图 2。基于数据库 Volatile Compounds in Food (VCF online) 与 Leibniz-LSB@TUM Odorant (LSB) 对挥发物的风味描述, 本实验的挥发物可划分成 10 类, 其中肉香味成分 13 种, 脂肪味成分 9 种, 甜味成分 7 种, 烘烤味成分 9 种、坚果味成分 13 种, 葱蒜味成分 9 种, 花果味成

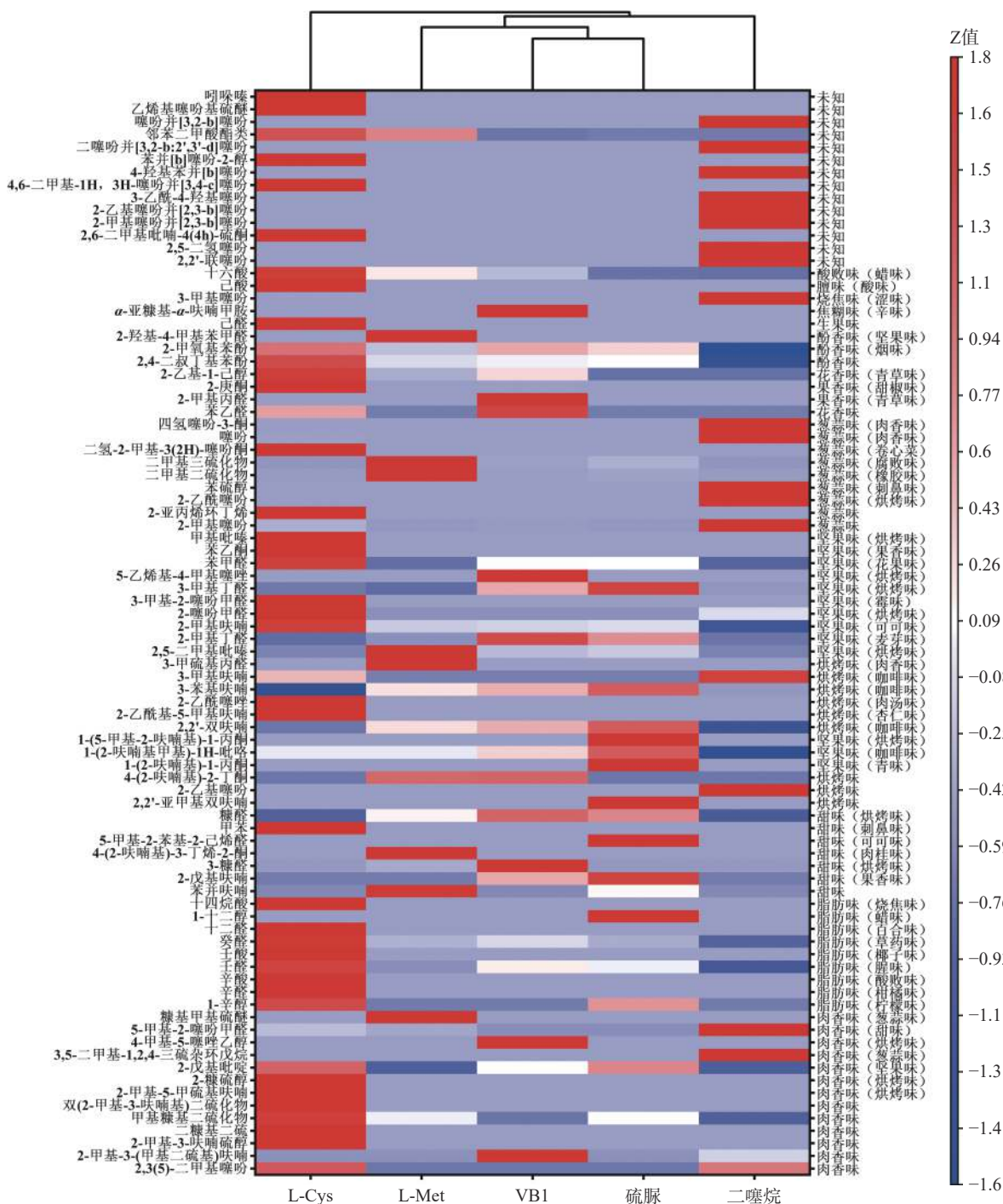


图2 5种硫化物与HTSPH、木糖的MRPs中挥发物成分聚类热图

Fig.2 Heat map with dendrogram of volatile compounds in MRPs generated by reacting 5 sulfides with HTSPH and xylose

注:图中右侧括号内文字为化合物的次要风味;图5~图6同。

分 4 种, 酚香味成分 3 种, 异味成分 5 种, 未知风味成分 14 种。以风味成分浓度为依据聚类发现, L-Cys 的 MRPs 的挥发物组成同其他 4 种硫化物的 MRPs 差异最大, 随后是 2,5-二羟基-1,4-二噻烷, L-Met 次之, VB₁ 与硫脲间差异较小。这表明美拉德反应途径不同, 造成 MRPs 也有明显差异。

L-Met 与 L-Cys 结构相似, 但两者的 MRPs 的含硫化合物差异较大, L-Cys 的 MRPs 挥发物中含硫化合物多, 有硫醇、硫醚与含硫杂环化合物组成, 而 L-Met 的 MRPs 中硫化物主要是硫醚, 如二甲基二硫化物、糠基甲基硫醚、二甲基三硫化物, 其浓度分别为 (115.96±4.33)、(22.86±1.74)、(18.02±1.09) μg/mL, 占挥发物总浓度的 72.66%。L-Cys 中 SH-与 CH₂-间 C-S 键和 L-Met 中 CH₃S-与 CH₂-间 C-S 键的键能是 272 kJ/mol, 相较于分子中的 C-C 键能 332 kJ/mol, 高温加热 C-S 键更易断裂, 故 L-Cys 与 L-Met 分别产生巯基与硫甲基自由基, 后续反应途径有差异^[15], 导致两者的 MRPs 组成有差别。VB₁ 与硫脲的 MRPs 挥发物中含硫类化合物较少, 这可能是硫脲中 C 与 S 由双键连接 (键能为 536 kJ/mol), VB₁ 中 S 在噻唑环上且有羟乙基、嘧啶基团形成的空间位阻, 这些都阻碍 C-S 键断裂, 阻碍含硫化合物

生成。2,5-二羟基-1,4-二噻烷的 MRPs 挥发成分组成多以噻吩类化合物为主 (17 种), 占其挥发物成分总数的 62.96%, 其中噻吩并 [3,2-b] 噻吩是第一挥发物成分, 推测上述产物的形成与 2,5-二羟基-1,4-二噻烷结构有关, 2,5-二羟基-1,4-二噻烷易开环、重排、脱水、环化生成噻吩^[16]。

感官评价 5 种硫化物的 MRPs 发现, L-Cys 的 MRPs 的风味贴近肉味食品, 其肉香味浓郁, 且伴有煮熟土豆味与葱蒜味, 几乎无异味, 整体风味和谐丰富。VB₁ 的 MRPs 虽然肉香味突出, 但有异味, 且整体风味较为单调、层次少, 故逊于 L-Cys 的 MRPs。剩余三种硫化物均不适宜同芝麻饼粕蛋白酶解物制作肉味香精 (表 2)。

分析感官评价得分与 GC-MS 检测挥发性成分间相关性发现, 肉香味与肉香味成分 (相关系数 0.84)、花果味成分 (相关系数 0.95)、异味成分 (相关系数 0.78) 呈现强正相关, 与脂肪味成分 (相关系数 0.61)、坚果味成分 (相关系数 0.58) 呈现中等相关 (图 3)。肉香味与花果味成分、异味成分强相关, 可能是因为归属花果味成分的 2-庚酮兼具甜椒味^[17], 归属异味成分的己酸还有膻味^[18], 上述味道有助肉香味的呈现。葱蒜味与葱蒜味成分呈现强负相关 (相关

表 2 不同硫化物的 MRPs 的感官评价得分

Table 2 Sensory evaluation of MRPs produced by various sulfur-containing substance

硫化物	肉香味	甜香味	烘烤坚果味	葱蒜味	纯正性	饱满性	总分
L-Cys	75.80±2.59 ^a	43.00±2.12 ^c	72.00±3.24 ^a	46.60±3.85 ^a	75.00±3.61 ^a	77.60±3.36 ^a	69.32±1.34 ^a
L-Met	49.80±2.86 ^b	47.60±3.85 ^b	49.80±3.70 ^c	33.80±2.28 ^b	43.00±4.47 ^d	55.60±3.78 ^b	47.88±1.88 ^c
VB ₁	73.40±3.21 ^a	57.00±2.12 ^a	62.80±3.03 ^b	50.00±3.54 ^a	64.20±1.92 ^b	45.60±3.78 ^c	64.66±1.69 ^b
硫脲	28.80±2.68 ^d	54.20±2.59 ^a	71.40±4.16 ^a	47.80±3.35 ^a	52.40±2.19 ^c	42.80±2.59 ^e	41.16±1.28 ^d
2,5-二羟基-1,4-二噻烷	38.80±3.56 ^c	31.20±2.28 ^d	44.00±2.35 ^d	22.20±2.28 ^c	38.20±2.95 ^d	23.40±3.44 ^d	35.30±1.98 ^e

注: 不同小写字母表示同列数据差异显著, $P<0.05$; 表 3 同。

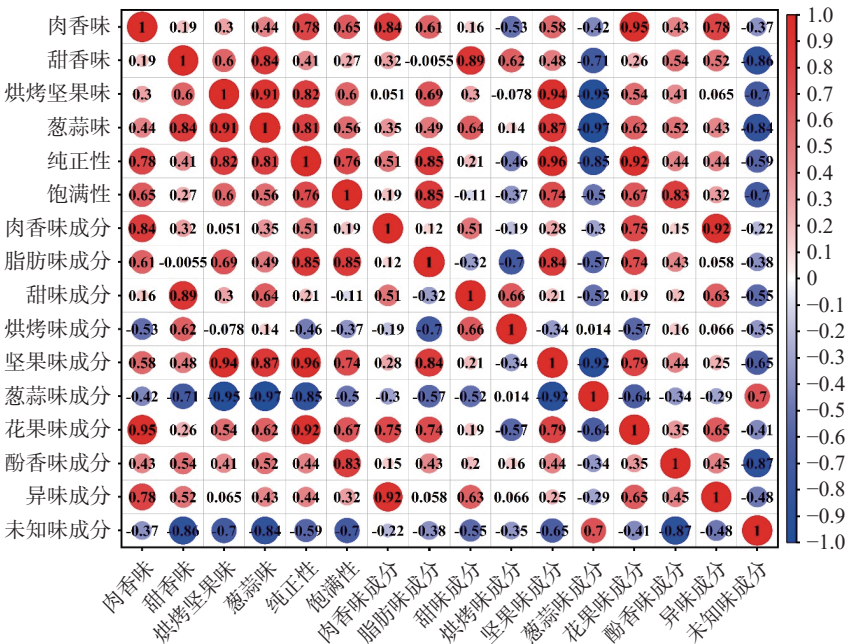


图 3 感官评价得分与 GC-MS 检测挥发性组分相关系数图

Fig.3 Correlation coefficients between sensory evaluation score and volatile compounds detected by GC-MS

系数-0.97)可能是因为葱蒜味成分的阈值低,当MRPs体系内葱蒜味成分浓度高时,极易体现出强烈葱蒜味,甚至变现出刺激性,给人体带来消极感受。肉香味成分、脂肪味成分、坚果味成分、花果味成分与纯正性呈现正相关,而葱蒜味成分与未知味成分对纯正性负相关,产生上述现象的原因可能是高浓度葱蒜味成分呈现刺激味,如化学味、硫臭味、烂萝卜味。另外,样品中某些未知成分也呈现异味,从而削弱纯正性。综上所述,MRPs中有高浓度肉香味成分、脂肪味成分、坚果味成分、花果味成分与酚香味成分,并有较低浓度葱蒜味成分,有助于获得高品质肉味香精。

2.2 糖类对 HTSPH 的 MRPs 的挥发性成分与感官特性的影响

如图4所示,不同糖类、HTSPH、L-Cys的MRPs pH有显著差别($P<0.05$)。除半乳糖外,戊糖的MRPs的pH均显著低于已糖与双糖的MRPs的pH($P<0.05$),这符合戊糖比已糖更易参加美拉德反应的规律^[19];半乳糖具有高美拉德反应活性,在乳制品研究中也有类似报道^[20]。由294 nm吸光值与420 nm分别代表美拉德反应中间产物与末期产物的生成量可知^[21],戊糖的美拉德反应中间产物与末期产物均处于前列,这也证实戊糖利于美拉德反应。麦芽糖体系有高吸光度可能是麦芽糖加热分解为2个葡萄糖,其糖浓度高于其他糖类,促进美拉德反应。

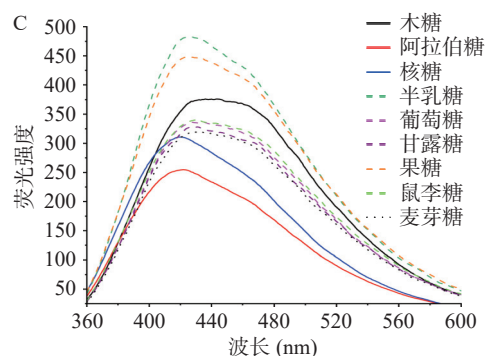
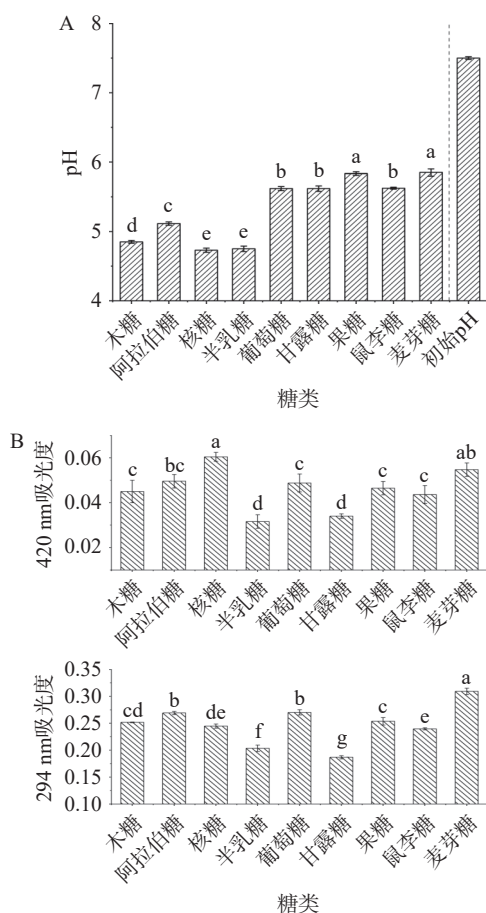


图4 不同糖类的MRPs的pH(A)、褐变程度(B)与糖基化程度(C)结果

Fig.4 pH (A), brown intensity (B) and glycosylation degree (C) of MRPs produced by various saccharides

由各种糖类的峰值处于420~440 nm间且峰值均250以上可知,蛋白、多肽与各种糖类发生美拉德反应,荧光曲线形状不同则与美拉德反应产物的组成有关^[22]。

9种糖与HTSPH、L-Cys的MRPs中共检测出86种挥发性成分,其中肉香味成分15种,脂肪味成分9种,甜味成分7种,烘烤味成分9种,坚果味成分15种,葱蒜味成分8种,花果味成分3种,酚香味成分3种,异味成分6种,未知味成分11种(图5)。戊糖与其他糖类的MRPs在挥发性成分的最大区别是肉香味成分与脂肪味成分,木糖、阿拉伯糖与核糖的MRPs中肉香味成分与脂肪味成分浓度和分别为 (69.38 ± 2.75) 、 (61.59 ± 3.17) 、 (61.39 ± 2.53) $\mu\text{g/mL}$,远高于其他糖。推测由于戊糖形成呋喃糖是环状半缩醛,而已糖形成吡喃糖或者呋喃糖(本质为环状半缩酮,且在1位有羟甲基形成的空间位阻),环状半缩醛更易开环反应,因此,戊糖具有更高的反应活性^[23]。另外,己糖6位碳原子结构也会影响MRPs组成,之所以鼠李糖的MRPs与其他己糖有较大差异,在于除鼠李糖为L型糖外,由于6位脱氧从羟甲基变成甲基,减少了空间位阻,尤其 α -L-鼠李糖,有利于氨基化合物的亲核攻击,提升反应活性。对上述糖类的MRPs进行感官分析发现,木糖、阿拉伯糖、核糖的MRPs具有浓郁的肉香味,且风味异味较少、整体层次丰富协调,故感官评价得分高(表3)。结合GC-MS挥发性成分与感官评价得分,木糖适宜与HTSPH、L-Cys经美拉德反应制作肉味香精。

2.3 HTSPH、L-Cys与木糖三者比例对MRPs挥发性成分与感官特性的影响

不同比例的HTSPH、L-Cys与木糖生成MRPs的挥发性成分分布见图6。虽然美拉德反应原料与反应条件相同,但受原料比例的影响,MRPs挥发性成分有明显差异。聚类分析发现,11种原料组合形成MRPs可分成5类:第一类S1、S6、S7,其中S6与S7的MRPs组成差异更小,特征表现为:原料中木糖含量接近L-Cys的2倍的同时,S1、S7、S6

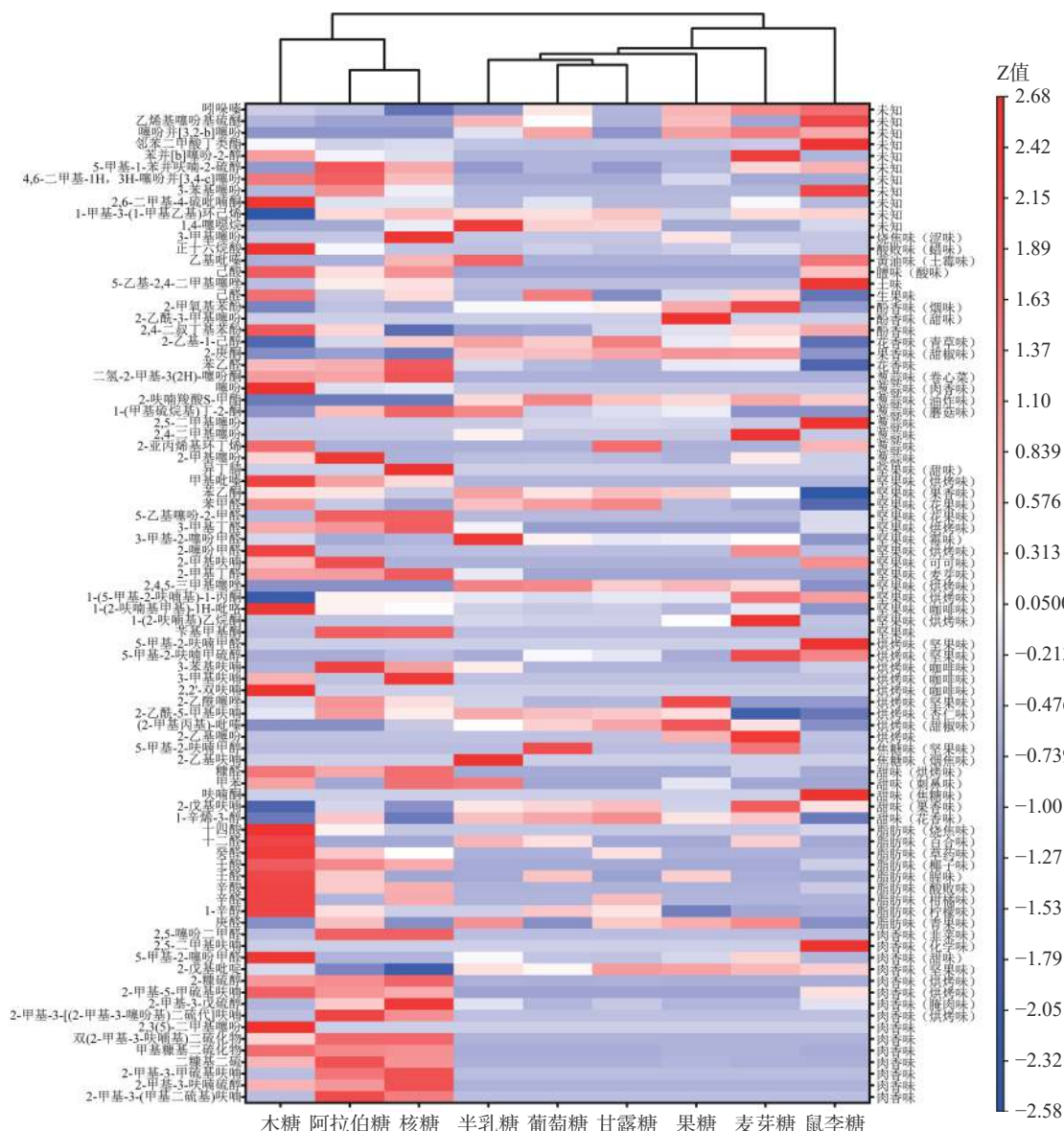


图5 9种糖与芝麻蛋白酶解物、L-Cys 的MRPs中挥发物成分聚类热图

Fig.5 Heat map with dendrogram of volatile compounds in MRPs produced by reacting 9 types of saccharides with HTSPH and L-Cys

表3 不同糖类的MRPs的感官评价

Table 3 Sensory evaluation of MRPs produced by various saccharides

项目	肉香味	甜香味	烘烤坚果味	葱蒜味	纯正性	饱满性	总分
木糖	75.80±2.59 ^a	43.00±2.12 ^{bc}	72.00±3.24 ^b	46.60±3.85 ^a	75.00±3.61 ^{abc}	77.60±3.36 ^a	69.32±1.34 ^a
阿拉伯糖	70.40±2.97 ^b	44.40±1.95 ^{abc}	57.20±1.92 ^{ef}	40.20±3.35 ^{bc}	77.60±2.88 ^{ab}	76.20±3.90 ^a	64.76±1.79 ^c
核糖	73.00±2.12 ^{ab}	45.20±1.92 ^{abc}	59.00±2.65 ^{de}	41.80±2.17 ^b	78.80±2.39 ^a	79.20±3.19 ^a	66.90±1.51 ^b
半乳糖	19.60±3.65 ^e	44.20±2.59 ^{abc}	80.40±1.82 ^a	38.20±3.27 ^{bc}	73.40±3.21 ^{bc}	62.40±3.91 ^c	39.66±2.13 ^f
葡萄糖	18.80±1.64 ^e	41.60±3.71 ^c	65.60±2.30 ^c	36.40±4.16 ^{cd}	77.80±3.56 ^{ab}	55.20±3.56 ^e	37.06±0.96 ^g
甘露糖	19.00±1.58 ^e	42.40±3.91 ^c	62.20±3.11 ^{cd}	22.60±3.71 ^e	66.40±2.61 ^e	50.80±3.96 ^f	33.94±1.30 ^h
果糖	18.40±2.70 ^e	37.60±2.61 ^d	55.20±3.70 ^f	33.60±2.97 ^d	71.20±4.44 ^{cd}	57.60±2.51 ^{de}	34.72±1.75 ^h
鼠李糖	45.80±1.64 ^c	47.20±2.39 ^a	41.80±2.49 ^g	32.20±2.28 ^d	75.60±3.78 ^{abc}	68.00±2.12 ^b	49.38±1.11 ^b
麦芽糖	23.80±2.95 ^d	46.40±1.95 ^{ab}	70.60±2.97 ^b	49.00±2.65 ^a	68.40±2.70 ^{de}	60.60±3.78 ^{cd}	45.99±1.06 ^e

的 L-Cys 的含量从 30% 下降到 14.2%，而 HTSPH 含量从 20% 增加到 59.40%，伴随原料组成变化，MRPs 中呈肉香味的硫醇类化合物浓度降低(2-糠硫醇、2-甲基-3-呋喃硫醇)，醛、酮、酸与杂环类化合物浓度增加(如辛酸、壬酸、5-乙基噻吩-2-甲醛)，这与

体系内原料组成变化有关，L-Cys 裂解产生 H₂S，它与木糖脱水产物 2-酮基戊二醛反应生成 2-甲基-3-呋喃硫醇类化合物^[24]，当体系内 L-Cys 浓度降低时，硫醇类物质相应下降，醛、酮、酸类化合物增加与参与脱羧、脱氨的多肽增加有关^[25]；第二类是 S3 和 S9，

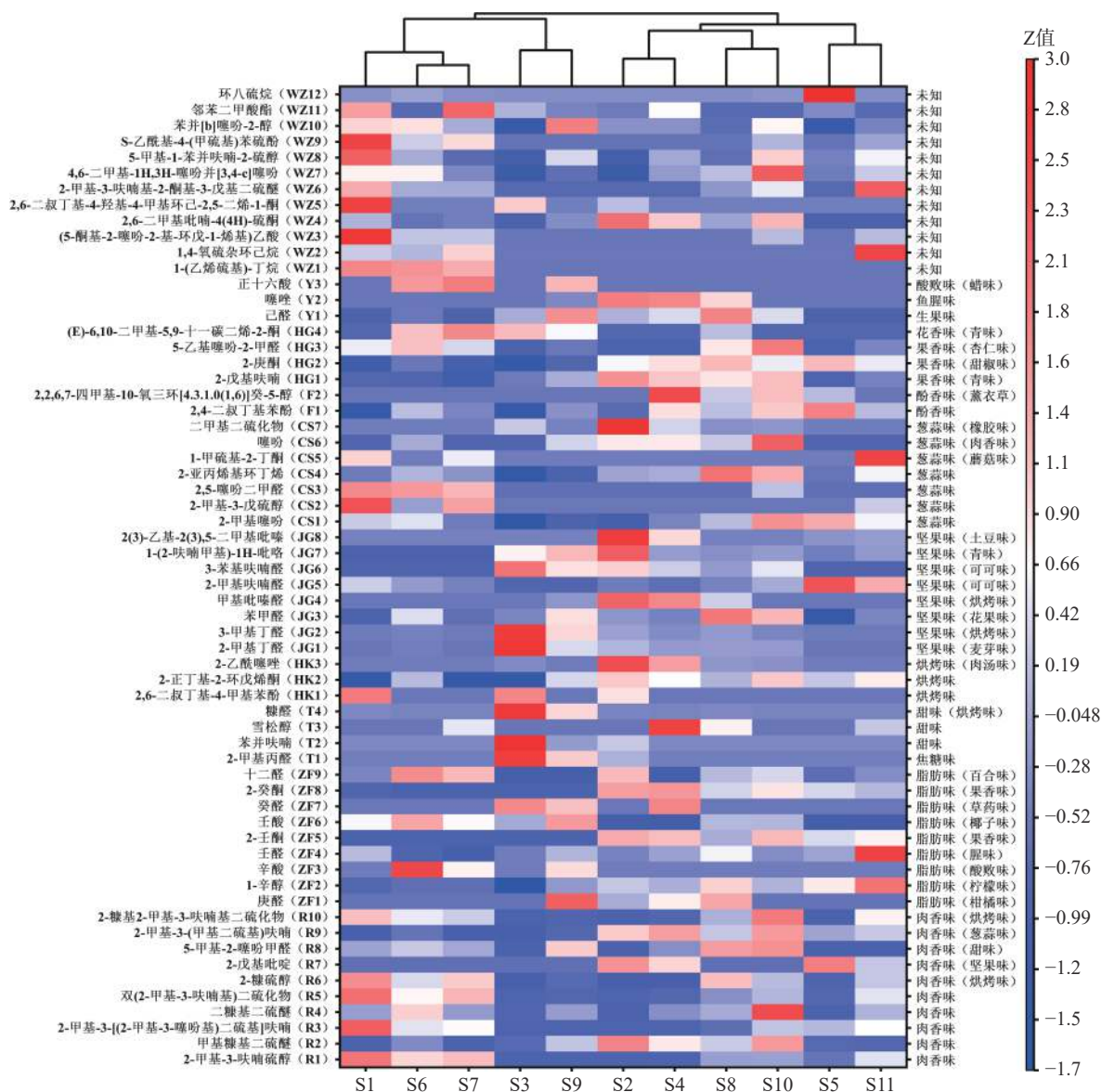


图6 混料试验样品的MRPs中挥发性成分聚类热图

Fig.6 Heat map with dendrogram of volatile compounds in the MRPs of mixture design samples

注: 图中左侧括号内文字代表化学物编码。

特征表现为: 原料以 HTSPH 与木糖为主, MRPs 挥发性成分中糠醛、脂肪醛(2-甲基丙醛、2-甲基丁醛等)远高于其他各组, 糠醛是木糖经焦糖化反应生成^[26], 这表明由于原料中木糖比例偏高, 过量的木糖进行焦糖化反应, 从而影响挥发性成分组成; 第三类包括 S2 和 S4, 特征表现为: 原料以 HTSPH 为主(占 85%), MRPs 中有 2-壬酮、2-癸酮、癸醛等长链脂肪醛酮类化合物, 推测上述产物与过量多肽在加热下的脱氨、脱羧反应有关^[25]; 这与 Eric 等^[27]发现未添加 L-Cys 的葵花籽蛋白酶解物与木糖的 MRPs 中辛醛、壬醛含量高于添加 L-Cys 的反应体系的结果相符; 第四类由 S8 与 S10 组成, 特征表现为: 原料中 HTSPH 与木糖、硫化物的比例约 7:2:1, MRPs 中有高浓度的肉香味成分且以二硫醚类为主外, 还有多种芳香族与杂环类化合物, 如苯甲醛、2-戊基呋喃、5-乙基噻吩-2-甲醛, 由于苯甲醛既可以通过苯丙氨

酸热解产生^[28], 也可以通过与木糖的美拉德反应产生^[29], 因此苯甲醛的大量产生表明体系中 HTSPH 与木糖相对过量; 第五类是 S5 和 S11, 其原料中 L-Cys 含量高于木糖, 尤其 S5 中 L-Cys 是木糖含量的 3 倍, 造成硫元素过剩, 形成环八硫烷。

不同比例的 HTSPH、L-Cys 与木糖生成 MRPs 的感官评价总分见表 4, 经混料实验分析, 模型高度显著且 R^2 接近于 1, 故回归模型成立, 能客观反映实际情况(表 5)。HTSPH、L-Cys、木糖及二者组合与三者组合均能显著影响 MRPs 的感官特性。获得回归模型如下:

$$Y = -4.88 \times X_1 - 706.25 \times X_2 - 412.61 \times X_3 + 1135.46 \times X_1 \times X_2 + 1003.07 \times X_1 \times X_3 + 2575.78 \times X_2 \times X_3 - 2472.35 \times X_1 \times X_2 \times X_3$$

如图 7A 所示, 感官评价的高分区域出现在木糖含量在 50%~70%、L-Cys 含量在 3%~20%、木糖含

表 4 混料设计实验结果

Table 4 Experimental conditions of mixture design

样品	X ₁ : HTSPH(%)	X ₂ : L-Cys(%)	X ₃ : Xylose(%)	感官评价总分
S1	20.00	30.00	50.00	61.42±1.31
S2	85.00	3.00	12.00	58.18±0.54
S3	47.00	3.00	50.00	43.20±1.63
S4	85.00	5.00	10.00	54.92±1.56
S5	60.00	30.00	10.00	41.24±1.67
S6	59.40	14.20	26.40	81.88±0.82
S7	39.70	22.10	38.20	70.96±1.49
S8	72.20	8.60	19.20	79.12±1.53
S9	53.20	8.60	38.20	76.14±1.05
S10	72.20	9.60	18.20	78.52±0.65
S11	59.70	22.10	18.20	68.98±1.06

表 5 混料试验方差分析结果

Table 5 Variance analysis of mixture design

项目	自由度	平方和	调整平方和	调整均方	F值	P值
模型	6	2042.38	2042.384	340.397	1561.13	<0.01
线性项	2	20.47	881.852	440.926	2022.17	<0.01
二次项	3	1893.14	624.483	208.161	954.67	<0.01
X ₁ ×X ₂	1	0.01	51.677	51.677	237.00	<0.01
X ₁ ×X ₃	1	1665.18	214.972	214.972	985.90	<0.01
X ₂ ×X ₃	1	227.95	323.383	323.383	1483.10	<0.01
特殊立方项 (X ₁ ×X ₂ ×X ₃)	1	128.77	128.769	128.769	590.56	<0.01
残差误差	4	0.87	0.872	0.218		
合计	10	2043.26				

注: $R^2=99.96\%$, 调整 $R^2=99.89\%$, 预测 $R^2=98.09\%$ 。

量在 20%~30% 之间, 图 7B 更直观表示三种原料比例变化对感官评价得分影响, 参照样品(HTSPH:L-Cys:Xylose 为 0.594:0.142:0.264)相比, 增加 HTSPH 比率并相应减少其他两种原料, 感官得分基本无变化, 随后感官得分降低; 反之减少 HTSPH, 得分呈现

下降趋势, 产生上述变化的原因: 当 HTSPH 含量过高时, 体系内木糖与 L-Cys 含量过低, 削弱美拉德反应(见样品 S2 与 S4), 反之, HTSPH 含量过低, 会减少肉味香味成分形成(见样品 S3)。增加木糖的比率并相应减少另外两种原料, 得分稍有上升, 随后得分迅速下降; 反之, 减少木糖含量, 得分迅速下降, 这是

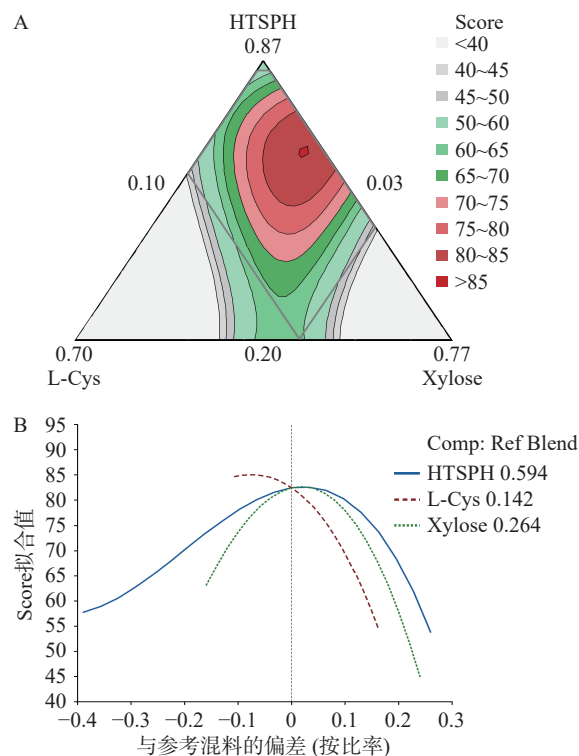


图 7 HTSPH、L-Cys 与木糖的 MRPs 感官评价分响应面(A)与跟踪图(B)

Fig.7 Response surface (A) and tracking diagrams (B) of sensory evaluation scores of MRPs prepared by HTSPH, L-Cys and xylose

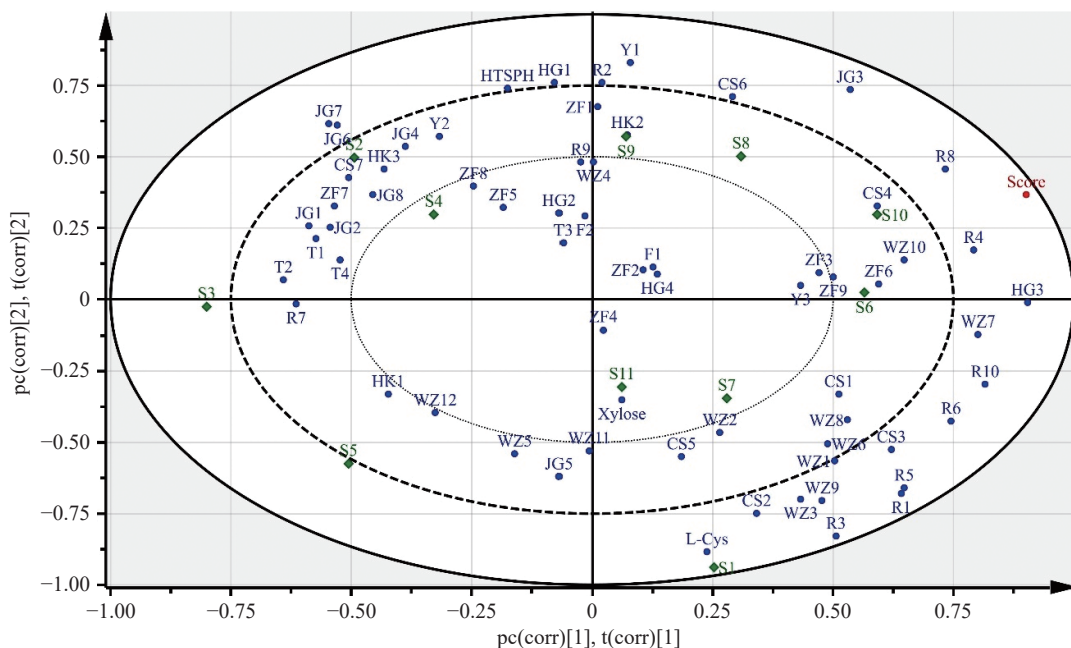


图 8 HTSPH 制作 MRPs 的感官评价得分与风味成分的 Biplot 图

Fig.8 Biplot for the sensory evaluation score and flavor compounds of MRPs produced by HTSPH

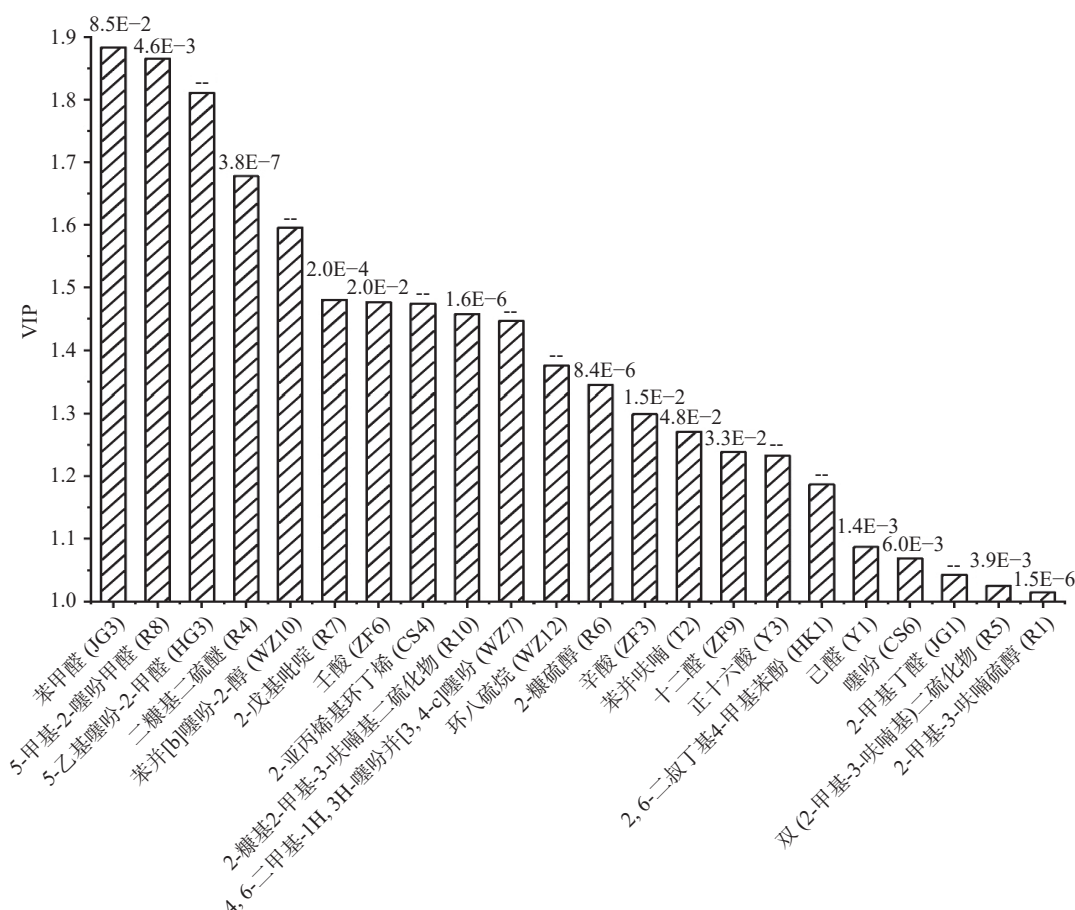


图 9 关键挥发性成分的 VIP 图

Fig.9 VIP of key volatile components

注: 每根柱上的数字为化合物的气味阈值(mg/m³)。

由于木糖浓度过高会发生焦糖化反应,产生糠醛等化合物(见样品 S3)^[30],使样品甜味掩盖肉味影响感官评价得分,而木糖浓度过低时,阻碍肉香味成分形成(见样品 S5),导致感官评价得分降低。将 L-Cys 的比例从 0.142 减少到 0.042 并增加其他两种原料,感官评价得分增加后,逐渐稳定;反之增加 L-Cys 会迅速降低感官得分,这与 MRPs 中硫化物的种类有关,当 L-Cys 浓度过低,不能形成具有肉味的二硫醚类化合物,导致得分较低,而过量的 L-Cys 会产生具有刺激味成分如 1-甲硫基-2-丁酮、2-甲基-3-戊硫醇(见样品 S1),降低感官得分。Minitab 预测最佳的原料组合为 HTSPH、L-Cys 与木糖的比例是 65.27%、6.55%、28.18%,最高得分为 85.08。按照上述原料配比,做实验验证,获得感官得分为(84.78±0.92),与预测值无显著差异。

为揭示感官评价得分与 MRPs 挥发性成分的关系,以挥发性成分为自变量,感官评价得分为因变量进行 PLS 分析。由于模型 $R^2_X=0.718$, $R^2_Y=1.000$, $Q^2=0.831$,均高于 0.5,说明该模型具有良好的稳定性与预测能力^[31],能客观分析风味成分对感官评价得分的贡献。由图 8 可知,接近 80% 的风味组分位于 50%~100% 的解析方差区间,说明模型具有良好的解释性^[32-33]。根据组分的变量重要性投影(VIP)大

于 1,即为关键挥发性成分^[31],体系内共有 22 种关键挥发性成分,其中与感官得分密切相关的组分有 5-甲基-2-噻吩甲醛(R8)、二糠基二硫醚(R4)、2-亚丙基环丁烯(CS4)、苯并 [b] 噻吩-2-醇(WZ10)、5-乙基噻吩-2-甲醛(HG3)、壬酸(ZF6)、十二醛(ZF9)、4,6-二甲基-1H,3H-噻吩并 [3,4-c] 噻吩(WZ7)、苯甲醛(JG3)、2-糠基 2-甲基-3-呋喃基二硫化物(R10)、噻吩(CS6)、2-糠硫醇(R6)。以上化合物中,肉香味成分有 4 种,葱蒜味成分 2 种,花果味成分 1 种,脂肪味成分 2 种,坚果味成分 1 种,未知味成分 2 种,这表明 HTSPH 制作肉味香精的感官特性是多种挥发成分共同作用的结果,比较上述化合物的气味阈值(图 9),推断肉香味成分中二糠基二硫醚(R4)、2-糠基 2-甲基-3-呋喃基二硫化物(R10)、2-糠硫醇(R6)对风味会有较大贡献,类似报道也见于熟牛肉、鸡肉与烤肉风味研究^[34-36]。

3 结论

通过分析原料种类与配比对 HTSPH 制作肉味香精的挥发性成分与感官特性的影响发现,当固定木糖与 HTSPH 的含量, L-Cys 的 MRPs 的感官评分高于其他 4 种硫化物的 MRPs 的感官评分,且挥发性成分中有高浓度肉香味成分,故适宜作为 HTSPH 制作肉香香精的硫化物;根据挥发性成分组成,9 种糖

与 HTSPH、L-Cys 的 MRPs 可以分为两类, 戊糖与其他糖, 其中戊糖的 MRPs 中肉香味与脂肪味成分数量多且浓度高, 适宜制作肉味香精。与阿拉伯糖、核糖相比, 木糖的 MRPs 除具有浓郁的肉香味外, 还伴有愉悦的烘烤坚果味, 因而被选定用于制作肉味香精。HTSPH、L-Cys 与木糖比例变化会影响 MRPs 的挥发性成分组成, 从而导致不同原料比例的 MRP 在感官特性上有显著差异, 经混料试验确立最佳原料比例: HTSPH、L-Cys 与木糖分别为 65.27%、6.55%、28.18%。经 PLS 分析共找出 22 种关键挥发性成分, 其中与感官得分密切相关的组分有 5-甲基-2-噻吩甲醛、二糠基二硫醚、2-亚丙烯基环丁烯、苯并 [b] 噻吩-2-醇、5-乙基噻吩-2-甲醛、壬酸、十二醛、4,6-二甲基-1H,3H-噻吩并 [3,4-c] 噻吩、苯甲醛、2-糠基-2-甲基-3-呋喃基二硫化物、噻吩、2-糠基硫醇。

© The Author(s) 2024. 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] SHEN Y, HU L T, XIA B, et al. Effects of different sulfur-containing substances on the structural and flavor properties of defatted sesame seed meal derived Maillard reaction products[J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130463.
- [2] 芦鑫, 张丽霞, 孙强, 等. 高温芝麻饼粕蛋白酶解液的 2 种美拉德反应产物组分特性差异[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(23): 156-166. [LU X, ZHANG L X, SUN Q, et al. The difference on composition and characteristic between two Maillard reaction products of hydrolysate derived from high-temperature sesame meal protein[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(23): 156-166.]
- [3] 母运龙, 柯欢, 郭添荣, 等. 肉味香精的制备及其风味形成机理的研究进展[J]. *中国调味品*, 2021, 46(10): 188-192. [MU Y L, KE H, GUO T R, et al. Research progress on preparation and flavor formation mechanism of meat flavor essence[J]. *China Condiment*, 2021, 46(10): 188-192.]
- [4] 周安玲, 贾西灵, 鲁怀强. 肉味香精加工技术研究与应用进展[J]. *保鲜与加工*, 2023, 23(1): 75-80. [ZHOU A L, JIA X L, LU H Q. Research and application progress of meat flavor processing technology[J]. *Storage and Process*, 2023, 23(1): 75-80.]
- [5] 孙艺飞, 崔文甲, 王文亮, 等. 鸡脂和美拉德反应对松蘑菌汤风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(19): 98-107. [SUN Y F, CUI W J, WANG W L, et al. Effect of chicken fat and maillard reaction on flavor of tricholoma matsutake soup[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(19): 98-107.]
- [6] 李玉真. 反应条件对葡萄糖-甘氨酸美拉德反应体系中糠醛类化合物形成的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(15): 85-92. [LI Y Z. Effects of reaction conditions on the formation of furfural compounds in maillard reaction system of glucose-glycine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(15): 85-92.]
- [7] 钱敏, 白卫东, 赵文红, 等. 半胱氨酸-还原糖模拟美拉德反应制备肉味香精的香气成分分析[J]. *中国食品添加剂*, 2015(6): 66-72. [QIAN M, BAI W D, ZHAO W H, et al. The aroma composition analysis of preparation of meat flavor by cysteine-reducing sugar simulating Maillard reaction[J]. *China Food Additives*, 2015(6): 66-72.]
- [8] SHANG Y F, CAO H, WEI C K, et al. Effect of sugar types on structural and flavor properties of peony seed derived Maillard reaction products[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(3): 14341.
- [9] 吴甜甜, 易军鹏, 董晶寅, 等. 蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白结构与功能特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(23): 194-200. [WU T T, YI J P, DONG J Y, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the structure and functional properties of sesame meal protein[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(23): 194-200.]
- [10] 王越鹏, 李平, 汪建明, 等. 模糊综合评价法在肉味香基感官评价中的应用[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(22): 155-158. [WANG Y P, LI P, WANG J M, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation to sensory quality analysis of meat flavour aroma[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(22): 155-158.]
- [11] 彭秋菊. 模块化制备非肉源烤肉香精的研究[J]. *中国调味品*, 2019, 44(2): 91-99. [PENG Q J. Study on the production of roasted meat flavor with non-meat raw materials by modularization[J]. *China Condiment*, 2019, 44(2): 91-99.]
- [12] AMES J M. Applications of the Maillard reaction in the food industry[J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 431-439.
- [13] BRANDS C M J, VAN BOEKEL M A J S. Kinetics modeling of reactions in heated monosaccharide-casein systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(23): 6725-6739.
- [14] JIN W G, DU Y N, PEI J J, et al. Characterization and antioxidant activity of Maillard reaction products from a scallop (*Patinopekten yessoensis*) gonad hydrolysates-sugar model system. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(4): 2883-2891.
- [15] LUND M N, RAY C A. Control of maillard reactions in foods: strategies and chemical mechanisms[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(23): 4537-4552.
- [16] 洪高健, 夏威锋, 翁斯悦. 四氢噻吩衍生物的应用与合成研究新进展[J]. *浙江化工*, 2023, 54(7): 30-37. [HONG G J, XIA W F, WONG S Y. Recent advances in the application and synthesis of tetrahydrothiophene derivatives[J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 2023, 54(7): 2883-2891.]
- [17] VAN RUTH S M, ROOZEN J P, COZIJSSEN J L, et al. Volatile compounds of rehydrated French beans, bell peppers and leeks. Part II. Gas chromatography/sniffing port analysis and sensory evaluation[J]. *Food Chemistry*, 1995, 54(1): 1-7.
- [18] LEE J H. Changes in flavor compounds and quality parameters of goat cream butter during extended refrigerated storage[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 306-318.
- [19] 潘丽红, 周光宏, 徐幸莲, 等. 美拉德反应在肉味香精生产中的应用[J]. *肉类工业*, 2007(8): 29-31. [PAN L H, ZHOU G H, XU X L, et al. Application of maillard reaction in meat flavor industry[J]. *Meat Industry*, 2007(8): 29-31.]
- [20] ZHANG W, RAY C, POOJARY M M, et al. Inhibition of maillard reactions by replacing galactose with galacto-oligosaccharides in casein model systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 67(3): 875-886.
- [21] 李军, 涂宗财, 沙小梅, 等. 反应条件对牛血清白蛋白-葡萄糖体系糖基化产物形成的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(5): 87-93, 100. [LI J, TU Z C, SHA X M, et al. Effects of reaction conditions on the formation of glycosylation products of bovine

- serum albumin-glucose system[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 87–93,100.]
- [22] JANG W, LIU Y, YANG X Q, et al. Antioxidant and antibacterial activities of modified crab shell bioactive peptides by Maillard reaction[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 2730–2743.
- [23] MURATA M, TOTSUKA H, ONO H. Browning of furfural and amino acids, and a novel yellow compound, furpipate, formed from lysine and furfural[J]. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 2007, 71(7): 1717–1723.
- [24] YANG C, SONG H L, CHEN F. Response surface methodology for meat-like odorants from Maillard reaction with glutathione I: The optimization analysis and the general pathway exploration[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(9): 966–974.
- [25] 郭冰. 肉类风味形成及羊肉香精的风味研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 70–74. [GUO B. Research on formation of meat flavor and flavor of mutton essence[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2011, 29(2): 70–74.]
- [26] 王丹, 况丹妮, 刘若阳, 等. 焦糖化与美拉德反应中 DDMP、HMF 及糠醛的生成研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 100–107. [WANG D, KUANG D N, LIU R Y, et al. Formation of DDMP, HMF and furfural in caramelization and maillard reaction [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(12): 100–107.]
- [27] ERIC K, RAYMOND L V, ABBAS S, et al. Temperature and cysteine addition effect on formation of sunflower hydrolysate Maillard reaction products and corresponding influence on sensory characteristics assessed by partial least square regression[J]. *Food Research International*, 2014, 57: 242–258.
- [28] CHU F L, YAYLAYAN V A. Model studies on the oxygen-induced formation of benzaldehyde from phenylacetaldehyde using pyrolysis GC-MS and FTIR[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(22): 10697–10704.
- [29] CUI H P, JIA C S, HAYAT K, et al. Controlled formation of flavor compounds by preparation and application of Maillard reaction intermediate (MRI) derived from xylose and phenylalanine[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(72): 45442–45451.
- [30] 张泽宇, 曹雁平, 朱雨辰. 缓解食品中丙烯酰胺和 5-羟甲基糠醛形成的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 324–333,347. [ZHANG Z Y, CAO Y P, ZHU Y C. Mitigation strategies on acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural in foods[J]. *Science and Technology of Food industry*, 2020, 41(12): 324–333, 347.]
- [31] 王藤, 施娅楠, 李祥, 等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计方法分析大河乌猪火腿自然发酵过程中风味特征[J]. 肉类研究, 2021, 35(5): 29–35. [WANG T, SHI Y N, LI X, et al. Analysis of flavor characteristics of dahe black pig ham during natural fermentation by gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical analysis[J]. *Meat Research*, 2021, 35(5): 29–35.]
- [32] 方超, 刘治国, 乔璐, 等. 基于感官定量描述分析法和 GC-MS 对山庄老酒 3 种香型白酒挥发性特征风味的分析[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 291–299. [FANG C, LIU Z G, QIAO L, et al. Analysis of volatile characteristic flavors of three aroma types of Shanzhuang Laojiu by sensory quantitative descriptive analysis and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2023, 44(10): 291–299.]
- [33] 滑金杰, 王华杰, 王近近, 等. 采用 PLS-DA 分析毛火方式对工夫红茶品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 260–270. [HUA J J, WANG H J, WANG J J, et al. Influences of first-drying methods on the quality of Congou black tea using partial least squares-discrimination analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8): 260–270.]
- [34] ZHANG Z Y, BLANK I, WANG B, et al. Changes in odorants and flavor profile of heat-processed beef flavor during storage[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(12): 5208–5224.
- [35] 罗湛宏. 鸡肉香精中关键香味成分的分析及其风味的分子感官研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [LUO Z H. Analysis of key flavor components in chicken flavor and investigation on molecular sensory of its flavor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.]
- [36] 魏代巍. “半胱氨酸—木糖—谷氨酸”美拉德反应体系烤肉/肉汤风味形成途径与调控[D]. 银川: 宁夏大学, 2022. [WEI D W. The formation pathway and regulation of roasted meat/broth flavor from the Maillard reaction system “cysteine-xylose-glutamic acid”[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.]