

外源挥发性化合物改善大豆拉丝蛋白风味的研究

袁静瑶 王召君 秦 昉 何志勇 曾茂茂 陈 洁*

(江南大学食品学院, 江苏 无锡, 214122)

摘要: 以大豆浓缩蛋白为原料, 在挤压过程中分别添加 2 种牛肉中的特征性风味化合物(4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮、2,5-二甲基吡嗪)及 3 种香辛料中的特征性风味化合物(香叶醇、芳樟醇、柠檬醛), 以改善大豆拉丝蛋白的风味。采用顶空固相微萃取及气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)、喜好度感官评价法评价拉丝蛋白风味变化。结果表明, 加入外源挥发性化合物使拉丝蛋白中风味化合物种类和质量分数发生了显著变化。大豆拉丝蛋白中分别添加 2,5-二甲基吡嗪、呋喃酮和香樟醇后, 拉丝蛋白中不良风味化合物与良好风味化合物的质量分数比例从空白组的 87:13 分别下降到 83:57、57:43 和 80:20; 消费者对拉丝蛋白的喜好度从 3.25 分别上升到 7.65、6.34 和 5.62。通过挤压过程中水分的蒸发, 可使拉丝蛋白中 3 种呋喃类化合物质量分数下降 67%~100%, 2 种醛类化合物质量分数下降 15%~83%, 其他沸点较高的化合物质量分数未减少。

关键词: 拉丝蛋白; 顶空固相微萃取; 风味化合物; 风味改善

Study on Flavor-Improvement of Soy Protein Based Extrudates by Adding Exogenous Volatile Compounds

YUAN Jingyao WANG Zhaojun QIN Fang HE Zhiyong ZENG Maomao CHEN Jie*

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Soy protein concentrate was used as raw material, and two characteristic flavor compounds from beef (4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone and 2,5-dimethyl-pyrazine) and three characteristic flavor compounds from spices (geraniol, linalool, and citral) were added during the extrusion process to improve the flavor of soy protein extrudates. Headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and a sensory preference evaluation method were used to evaluate the flavor changes of extrudates. The results showed that the addition of exogenous volatile compounds caused significant changes in the types and concentrations of flavor compounds in the extrudates. After the addition of 2,5-dimethyl-pyrazine, furaneol, and linalool, the mass fraction ratio of off-flavor compounds to pleasant-flavor compounds in the soy protein extrudates decreased from 87:13 in the control group to 83:17, 57:43, and 80:20, respectively. Consumer preferences scores for the extrudates increased from 3.25 in the control group to 7.65, 6.34 and 5.62, respectively. Additionally, the evaporation of water during extrusion reduced the concentrations of three furan compounds in the extrudates by 67%~100% and two aldehyde compounds by 15%~83%, while the concentrations of other higher-boiling-point compounds remained unchanged.

Keywords: extruded protein; headspace solid-phase microextraction; flavor compounds; flavor improvement

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172317)。

通信作者: 陈洁(1969—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品蛋白质研究。E-mail: chenjie@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2023-02-20 修回日期: 2023-03-16

随着人们越来越注重低卡路里、低脂肪的健康饮食方式,以及环境保护和动物福利意识提高,对植物肉产品的需求显著增加。大豆浓缩蛋白因其高蛋白质、丰富的不可溶膳食纤维以及合理的氨基酸组成,成为生产拉丝蛋白的主要原料^[1-2]。大豆浓缩蛋白在挤压过程中的强剪切力和高温加热的作用下,蛋白质结构展开并重新排列形成丝状结构,因此常被用于生产与真实肉类质构及口感相似的拉丝蛋白^[3]。然而,大豆拉丝蛋白存在豆腥味等不良风味影响了消费者对植物肉产品的接受度。

目前,使用不良风味较少的大豆蛋白为原料是解决拉丝蛋白豆腥味问题的主要方法之一。其中,使用不含脂肪氧合酶(LOX)的大豆、微生物发酵法、 β -环糊精包埋法常被用于生产大豆蛋白^[4-8]。此外,对拉丝蛋白进行发酵,或添加香精、香辛料以减少或掩盖拉丝蛋白不良风味等也可以改善产品的风味。Li等^[9]的研究表明,添加大蒜、罗勒等香辛料可提高产品的感官特性及消费者对植物肉产品的接受度。Yuan等^[10]的研究表明,对植物肉香肠进行发酵后,产品中可检出与动物肉发酵香肠相似的香气物质。然而,在挤压过程中直接改善拉丝蛋白风味的相关研究却鲜有报道。

作者在大豆浓缩蛋白挤压过程中添加牛肉的特征性风味化合物 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮、2,5-二甲基吡嗪,及黑胡椒、洋葱等香辛料的特征性风味化合物香叶醇、芳樟醇、柠檬醛,采用 HS-SPME-GC-MS 对所得拉丝蛋白的挥发性风味化合物进行分析,并对其进行喜好度感官评价。通过分析拉丝蛋白中对风味影响较大的活性风味化合物的变化及其原因,进一步探讨了减少拉丝蛋白不良风味化合物的途径,为在挤压过程中直接改善拉丝蛋白风味提供一定的理论基础和依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆浓缩蛋白(SST-04):益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;耐高温真空袋:石家庄喜之龙有限公司。

戊醛(纯度 98.5%)、壬醛(纯度 95%)、2-庚酮(纯度 99%)、2-壬酮(纯度 99%)、1-己醇(纯度 98%)、1-辛烯-3-醇(纯度 98%)、香叶醇(纯度 98%)、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮(纯度 95%)、*D*-柠檬烯(纯度 95%):上海百灵威有限公司;柠檬醛(纯度 99%)、2,5-二甲基吡嗪(纯度 99%)、2-甲基-3-庚酮(纯度 99%)、2-乙基呋喃:美国 Sigma-Aldrich 公司;己醛(纯度 95%)、2-戊基呋喃(纯度>98%)、2-丁基呋喃(纯度>98%):梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;苯甲醛(纯度 99%):上海泰坦科技股份有限公司;氮气:无锡市太湖气体有限公司。

1.2 仪器与设备

粉碎机:757型,九阳股份有限公司;双螺杆挤压机:ZE型,苏州ATS有限公司;气相色谱质谱联用仪:2030型,日本岛津公司;循环水泵:AC 150型,美国赛默飞世尔科技公司;pH计:Seven Easy型,梅特勒托利多仪器有限公司;电子分析天平:EL204型,梅特勒托利多仪器有限公司;加热磁力搅拌器:Hei-Connect型,海道尔夫仪器设备(上海)有限公司;聚乙二醇(PEG)气相色谱柱:DB-WAX型,安捷伦科技有限公司;固相微萃取萃取头:50/30 μm DVB/PDMS型,美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 外源挥发性化合物溶液配制

将 2,5-二甲基吡嗪、香叶醇、芳樟醇、柠檬醛及 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)呋喃酮(后简称呋喃酮)配制成不同质量浓度的外源挥发性化合物溶液。

1.3.2 拉丝蛋白制备

使用双螺杆挤压机对大豆浓缩蛋白进行高水分挤压(水分质量分数 50%),设置 7 个温度段分别为 25、30、70、100、130、140、130 $^{\circ}\text{C}$ 。进料物的质量比为 m (大豆浓缩蛋白): m (外源挥发性化合物溶液)=1:1,螺杆转速为 110 r/min,冷却段的温度为 55 $^{\circ}\text{C}$ 。制备不冷却拉丝蛋白时去除冷却段,其他参数同上。各温度段达到预设温度时保持 5 min 后取样,于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 保存。

1.3.3 拉丝蛋白水分质量分数测定

按照 GB 5009.3—2016 中常压干燥法测定拉丝蛋白水分质量分数。

1.3.4 挥发性风味化合物分析

1) 挥发性风味化合物的测定: 参考曾著莉等^[11]的方法并稍加修改, 利用 HS-SPME-GC-MS 测定样品中的挥发性风味化合物。将样品于粉碎机中粉碎 1 min, 称取 (2.00±0.05) g 样品置于顶空瓶中, 将 DVB/CAR/PDMS 萃取头插入顶空瓶, 在 70 °C 水浴条件下萃取 30 min。然后将萃取头插入 GC-MS 进样孔, 使用安捷伦 DB-WAX 极性毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm) 进行分析。气相色谱条件: 初始温度 40 °C 保持 3 min, 以 5 °C/min 的升温速率上升到 230 °C, 使用氦气作为载气, 流量为 1 mL/min。质谱条件: 电子轰击离子源, 电子能量为 70 eV, 离子源温度为 210 °C, 传输线温度为 250 °C, 分辨率为 25 000, amu 范围 33~450。

2) 定性分析: 对正构烷烃 (C₆—C₂₅) 进行分析, 根据化合物的保留时间, 筛选样品中与 NIST 质谱库相似度大于 800 的化合物, 并计算其保留指数。

3) 定量分析: 选择 2-甲基-3-庚酮 (质量浓度为 10 μg/L) 为内标, 根据峰面积计算样品中各挥发性风味化合物的质量浓度。

1.3.5 喜好度感官评价

采用 9 点喜好度法对样品的气味进行感官评价, 其中 1 分为非常不喜欢, 5 分为既不喜欢也不讨厌, 9 分为非常喜欢。

1.3.6 相互作用力分析

1) 相对吸附能力测定: 准确称取 50 μg 大豆浓缩蛋白溶于 4.95 mL 磷酸盐缓冲液 (10 mmol/L, pH 7.0) 中, 加入 50 μL 不同挥发性风味化合物标准液并密封, 37 °C 下搅拌溶解 2 h, 然后置于 4 °C 平衡 18 h, 使用 GC-MS 进行分析, 分析方法同 1.3.4。用各挥发性风味化合物的峰面积计算大豆浓缩蛋白对挥发性风味化合物的相对吸附能力。

2) 分子对接: 采用分子对接分析相互作用力及结合自由能^[12]。在 RCSB 蛋白质数据库中确定大豆蛋白结构^[13], 从 PubChem 获取风味化合物的 3D 结构^[14]。使用 Autodock1.5.6、Auto dock vina 进行分子对接, 并使用 Protein-Ligand Interaction Profiler 对结合位点及结合自由能进行分析^[15]。

1.3.7 数据分析

采用 Statistical 9 软件对数据进行单因素方差

分析, $P < 0.05$ 表示差异显著, 并采用 Origin 进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 拉丝蛋白中挥发性风味化合物分析

根据 GC-MS 对挥发性风味化合物的定性分析结果及该化合物的风味描述^[16]筛选各组拉丝蛋白中的不良风味化合物及良好风味化合物。

在空白样品中检测出了糠醛、柠檬醛等 8 种具有良好风味的化合物; 而在加入呋喃酮、2,5-二甲基吡嗪、柠檬醛、芳樟醇及香叶醇的拉丝蛋白样品中, 良好风味化合物种类分别增加到 12、12、14、15、13 种。同时, 不良风味化合物的种类也发生了变化: 空白样品中检出 19 种不良风味化合物, 而加入呋喃酮、2,5-二甲基吡嗪、柠檬醛、芳樟醇及香叶醇的拉丝蛋白中分别检出 21、19、22、23、24 种。加入外源挥发性化合物后所得拉丝蛋白中良好风味化合物及不良风味化合物质量分数均增加, 其中拉丝蛋白良好风味化合物较空白组增加了 48.89%~874.66%, 不良风味化合物较空白组增加了 34.17%~89.59%, 见表 1。

表 1 拉丝蛋白中挥发性风味化合物质量分数

Table 1 Mass fraction of volatile flavor compounds in extruded protein

组别	良好风味化合物 质量分数/(μg/kg)	不良风味化合物 质量分数/(μg/kg)
空白组	184.91±0.21 ^f	1 310.84±41.36 ^d
呋喃酮组	380.12±5.00 ^e	1 758.73±59.53 ^e
2,5-二甲基吡嗪组	275.30±8.92 ^e	2 256.68±64.52 ^b
柠檬醛组	344.53±6.99 ^d	2 222.99±33.74 ^b
芳樟醇组	1 802.25±16.89 ^a	2 497.26±72.06 ^a
香叶醇组	584.48±5.62 ^b	2 367.20±38.62 ^{ab}

注: 同列不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。

拉丝蛋白中挥发性风味化合物质量分数的增加可能源于挤压过程中加入的外源挥发性化合物。使用芳樟醇溶液进行挤压后所得拉丝蛋白中良好风味化合物质量分数为 1 802.25 μg/kg, 其中芳樟醇的质量分数为 1 440.63 μg/kg, 占拉丝蛋白中良好风味化合物质量分数的 79.93%; 使用香叶醇溶液挤压的拉丝蛋白中良好风味化合物质量分数为 584.48 μg/kg, 其中香叶醇的质量分数为 371.98 μg/kg, 占拉丝蛋白中良好风味化合物质量

分数的 63.65%。挥发性风味化合物在挤压过程中的稳定性与其挥发性、相对分子质量、基团和链长等因素有关。与蛋白质结合能力强的挥发性风味化合物优先通过疏水键、氢键等相互作用力与蛋白质结合,而未与蛋白质结合的挥发性风味化合物则仅在物料冷却固化的过程中被物理包埋或保留在拉丝蛋白的孔洞结构中^[17-18]。因此,在添加外源挥发性化合物的拉丝蛋白中检出了许多空白拉丝蛋白样品中未检出的新的挥发性风味化合物,如 *D*-柠檬烯、2-庚酮、2-己醇、糠醇。另外,空白样品中已有的挥发性风味化合物如 2-戊基呋喃、己醛、2-丁基呋喃等物质的质量分数也进一步提高。

2.2 外源挥发性化合物对拉丝蛋白风味的改善

各样品中不良风味化合物及良好风味化合物的质量分数均增加,仅通过不良风味化合物及良好风味化合物质量分数的变化无法判断其对拉丝蛋白整体风味的影响。因此,进一步计算各组拉丝蛋白中不良风味化合物与良好风味化合物的质量分数比例,并对样品的整体风味进行喜好度感官评价,以判断外源挥发性化合物改善拉丝蛋白风味的效果。

拉丝蛋白中不良风味化合物及良好风味化合物质量分数见图 1。空白样品中不良风味化合物与良好风味化合物的质量分数比为 87:13。加入不同外源挥发性化合物后,大部分拉丝蛋白中的不良风味化合物与良好风味化合物的质量分数比例发生了改变。其中,加入 2,5-二甲基吡嗪使样品中不良风味化合物与良好风味化合物的质量分数比例上升,为 89:11;加入呋喃酮、芳樟醇及香叶醇的拉丝蛋白样品中不良风味化合物与良好风味化合物的比例有所下降,分别为 83:17、57:43 及 80:20;而加入柠檬醛对拉丝蛋白中不良风味化合物与良好风味化合物的质量分数比例没有影响。

空白拉丝蛋白的喜好度得分为 3.25,加入呋喃酮、芳樟醇及香叶醇的拉丝蛋白样品得分均高于空白组,分别为 7.65、6.34、5.62。而加入 2,5-二甲基吡嗪后样品的喜好度得分(2.80)却低于空白样品,见图 2。

综合分析各组拉丝蛋白中挥发性风味化合物

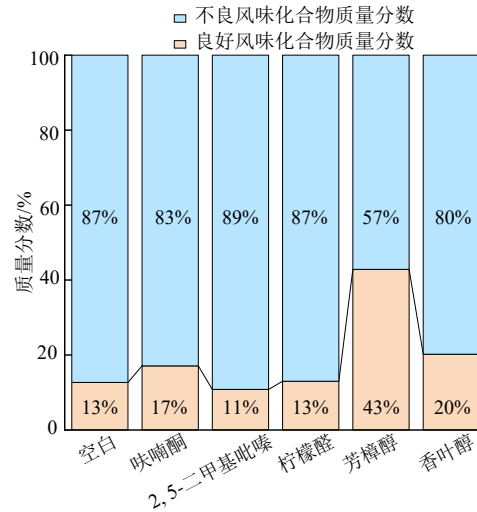


图 1 拉丝蛋白中不良风味化合物与良好风味化合物的质量分数

Fig. 1 Ratio of mass fractions of off-flavor compounds to pleasant-flavor compounds in extruded protein

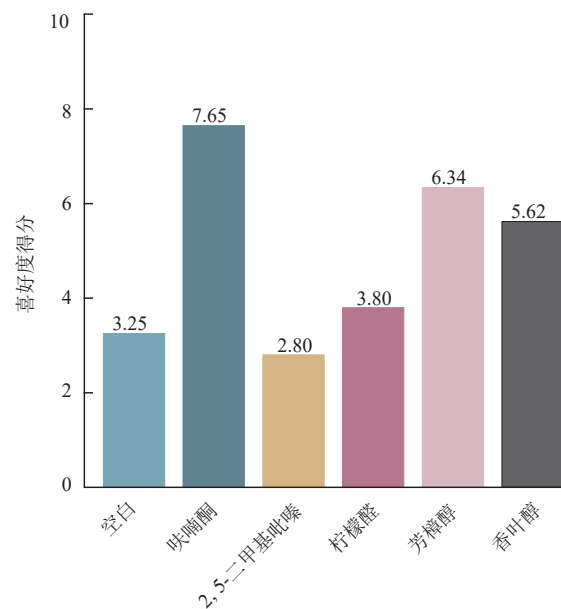


图 2 拉丝蛋白喜好度分析

Fig. 2 Hedonic preference analysis of extruded protein

的种类、不良风味化合物与良好化合物的质量分数比例及喜好度得分可以发现,加入柠檬醛、芳樟醇及香叶醇的拉丝蛋白中不良风味化合物及良好风味化合物的种类和数量都发生了显著变化,不良风味化合物及良好风味化合物的质量分数比例下降,喜好度评分提高。尽管在挤压过程中加入呋喃酮、柠檬醛、芳樟醇及香叶醇使拉丝蛋白中不良风味化合物的质量分数显著增加,但由于不良

风味化合物与良好风味化合物质量分数比例下降,同时产生了具有花香和薰衣草味的芳樟醇、具有甜香和果香的2-癸酮、具有柑橘和柠檬香的D-柠檬烯等风味较好且阈值较低的新化合物,使拉丝蛋白的风味得到了改善,消费者对拉丝蛋白喜好度也相应提高。

2.3 拉丝蛋白中的活性风味化合物

用气味活度值(odorant activity value, OAV)来评估挥发性风味化合物对样品整体风味的贡献。当OVA>1时,认为该挥发性风味化合物是拉丝蛋白的活性风味化合物。拉丝蛋白样品中共检测到12种OVA>1的挥发性风味化合物,其中包括6种醛类物质(戊醛、己醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛、辛醛、苯甲醛)、2种醇类物质(1-己醇、1-辛烯-3-醇)、3种呋喃类物质(2-乙基呋喃、2-丁基呋喃、2-戊基呋喃)、1种酮类物质(2-壬酮)。部分拉丝蛋白的活性风味化合物在各种大豆制品中均有检出,并且是导致大豆产品“豆腥味”的主要

挥发性风味化合物。有研究表明,己醛和戊醛是大豆分离蛋白中常见的不良风味化合物^[19-20];己醛、壬醛、(E)-2-辛烯醛是大豆中主要的不良风味化合物^[21];己醛、己醇、2-戊基呋喃和1-辛烯-3-醇等是导致豆奶中不良风味的主要化合物^[22-23]。

2.4 外源挥发性化合物质量浓度与活性风味化合物质量分数的相关性分析

对不同外源挥发性化合物质量浓度及拉丝蛋白中的活性风味化合物质量分数进行相关性分析,见图3。在添加2,5-二甲基吡嗪的拉丝蛋白中,苯甲醛质量分数与外源挥发性化合物质量浓度具有极其显著负相关性(P<0.001),苯甲醛具有坚果香气,对拉丝蛋白的风味有正向作用。在添加呋喃酮的样品中,2-乙基呋喃、戊醛、1-己醇质量分数与外源挥发性化合物质量浓度具有极其显著负相关性(P<0.001),己醛质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈显著负相关(P<0.05),己醛也是导致大豆“豆腥味”的主要化合

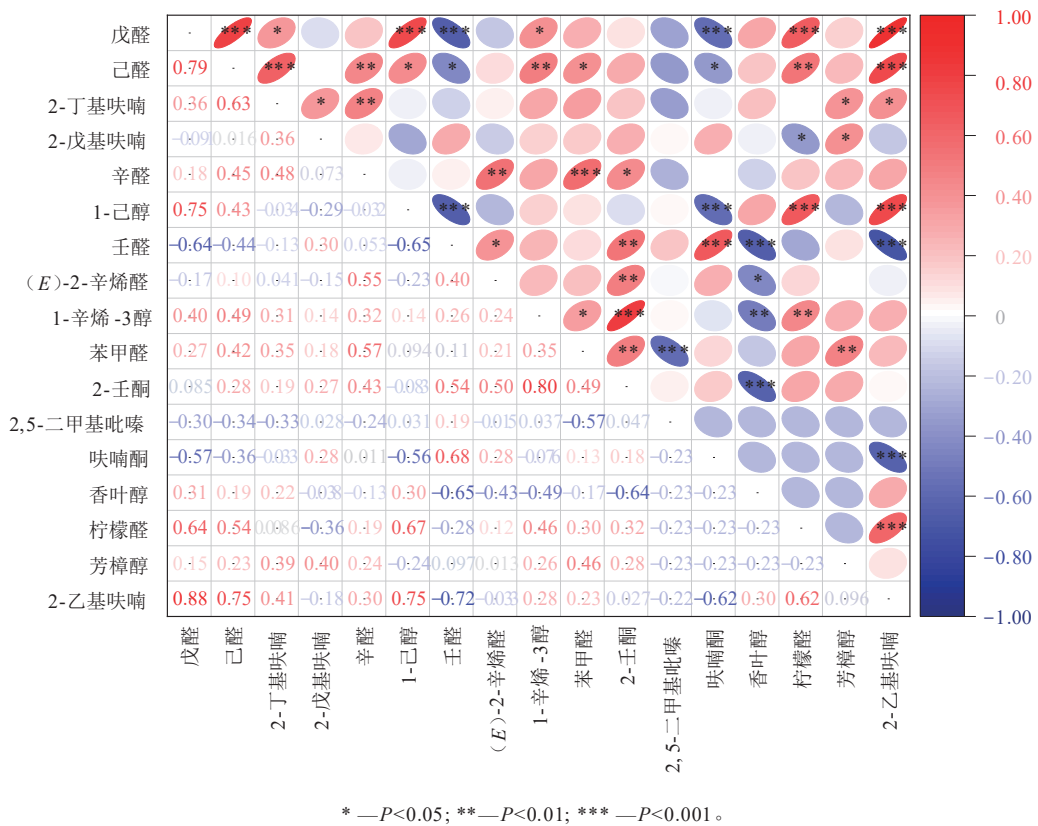


图3 相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis

物。而壬醛质量分数与呋喃酮的质量浓度有极其显著正相关性($P<0.001$)。在添加香叶醇的样品中,壬醛、2-壬酮质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈极其显著负相关($P<0.001$),1-辛烯-3-醇质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈极显著负相关性($P<0.01$),(*E*)-2-辛烯醛质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈显著负相关($P<0.05$)。在添加柠檬醛的样品中,2-乙基呋喃、戊醛、1-己醇质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈极其显著正相关($P<0.001$),己醛、1-辛烯-3-醇质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈极显著正相关($P<0.01$),而2-戊基呋喃质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈显著负相关($P<0.05$)。在添加芳樟醇的样品中,苯甲醛质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈极显著正相关($P<0.01$),2-丁基呋喃、2-戊基呋喃质量分数与外源挥发性化合物质量浓度呈显著负相关($P<0.05$)。

相关性分析结果表明,在挤压过程中加入外源挥发性化合物显著影响了拉丝蛋白中各活性风味化合物的质量分数,且部分拉丝蛋白中活性化

合物的质量分数与外源挥发性化合物的质量浓度有一定的相关性。然而,不同外源挥发性化合物的质量浓度与活性风味化合物之间未发现普遍变化规律。因此,在实际使用外源挥发性化合物改善拉丝蛋白风味时,需要进一步确定各外源挥发性化合物的最佳质量浓度,以达到更好的拉丝蛋白风味提升效果。

2.5 大豆蛋白与活性风味化合物的相互作用分析

加入外源挥发性化合物对拉丝蛋白整体风味有一定改善效果,但外源挥发性化合物也导致了大多数活性风味化合物质量分数发生变化,尤其是与豆腥味相关的1-己醇、2-戊基呋喃、己醛、1-辛烯-3-醇等化合物。由于活性风味化合物对整体风味影响显著,采用分子对接并测定相对结合率,探究活性风味化合物质量分数变化的原因。

2.5.1 分子对接

2,5-二甲基吡嗪、呋喃酮、柠檬醛、香叶醇与大豆蛋白的结合能低于拉丝蛋白中苯甲醛外的活性风味化合物,见表2,表明这几种化合物更容易与大豆蛋白结合。分子对接的结果验证了2.1中关于蛋白质-风味相互作用差异导致拉丝蛋白挥发性风味

表2 大豆蛋白与风味化合物分子相互作用力

Table 2 Interaction between soy protein concentration and flavor compounds

化合物	名称	7S 亚基			11S 亚基		
		疏水相互作用数量/个	氢键数量/个	结合自由能/(kJ/mol)	疏水相互作用数量/个	氢键数量/个	结合自由能/(kJ/mol)
拉丝蛋白活性风味化合物	1-辛烯-3-醇	3	3	-19.646	4	0	-19.646
	2-丁基呋喃	2	1	-21.318	4	0	-21.318
	2-乙基呋喃	2	0	-18.392	5	0	-19.646
	2-壬酮	4	1	-18.392	6	1	-17.974
	(<i>E</i>)-2-辛烯醛	5	0	-20.064	7	3	-19.646
	2-戊基呋喃	1	0	-21.318	6	0	-19.646
	苯甲醛	2	3	-22.990	8	1	-25.916
	己醛	4	1	-16.720	8	1	-20.482
	1-己醇	5	2	-17.138	4	2	-17.138
	壬醛	5	2	-19.646	5	1	-17.556
	辛醛	5	2	-17.974	6	1	-17.556
	戊醛	3	4	-15.466	5	1	-18.810
	外源挥发性化合物	2,5-二甲基吡嗪	2	4	-22.154	1	4
呋喃酮		3	5	-23.826	5	1	-22.990
柠檬醛		3	2	-22.572	4	2	-21.318
香叶醇		2	0	-24.244	4	4	-23.408
芳樟醇		5	1	-20.482	2	2	-19.646

化合物变化的推测,即在挤压过程中高温及剪切作用使蛋白质结构展开,与蛋白质结合或被包埋在蛋白质内部的化合物被释放,与蛋白质结合能力强的挥发性风味化合物会优先与蛋白质结合,而其他未结合的挥发性风味化合物质量分数则相应升高。

尽管分子对接结果显示2,5-二甲基吡嗪、柠檬醛和芳樟醇的结合能高于苯甲醛,但测定结果显示苯甲醛质量分数较高,这可能是由蛋白质-风味结合位点数量变化导致的。醛类物质一般通过疏水相互作用或共价键与蛋白质结合,而大豆蛋白在挤压机加热段的高温中严重变性并进一步聚集,导致蛋白质表面疏水结合位点减少,从而降低了结合苯甲醛的能力,使顶空气相色谱中检出的苯甲醛质量分数升高^[24]。

研究结果表明,具有不同亚基的大豆蛋白与各活性风味化合物的结合能、氢键数量和疏水相互作用均不同。

2.5.2 相对结合率分析

大豆浓缩蛋白对拉丝蛋白中活性风味化合物及外源挥发性化合物吸附能力见图4。当相对结合率 >0 时,说明大豆浓缩蛋白对该风味化合物有吸附作用;当相对结合率 <0 时,说明大豆浓缩蛋白对该风味化合物有释放作用。

大豆浓缩蛋白对己醛、(E)-2-辛烯醛等风味化合物有吸附能力,外源挥发性化合物与蛋白质

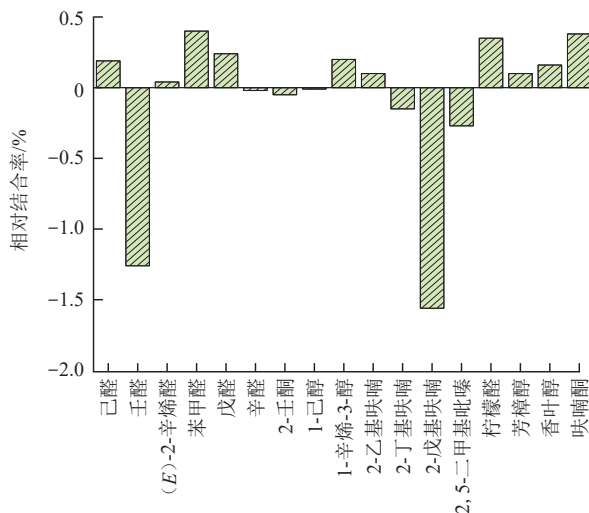


图4 大豆浓缩蛋白对风味化合物的吸附能力

Fig. 4 Adsorption capacity of soy protein concentrate for flavor compounds

相对结合率为呋喃酮 $>$ 柠檬醛 $>$ 香叶醇 $>$ 芳樟醇。风味化合物与蛋白质结合率的差异可能由风味化合物结合位点数量或相互作用力差异所致。

相反,大豆浓缩蛋白对壬醛、辛醛等风味化合物有促进释放的效果。这可能是由于风味化合物与蛋白质相互作用力小,或者溶液中的蛋白质成分使分散液的表面张力下降,从而弱化了缓冲液对风味化合物的溶解能力^[25]。同时,水分子也会与风味化合物竞争蛋白质表面的结合位点,水的强极性使其易与蛋白质表面形成氢键,导致蛋白质与风味化合物的结合位点减少^[26]。

综上所述,在挤压过程中加入外源挥发性化合物时,升温会使蛋白质构象发生变化导致风味结合位点数量减少。由于不同风味化合物与蛋白质结合能力差异等原因,导致了拉丝蛋白中挥发性风味化合物种类及质量分数发生变化。

2.5.3 不良风味去除途径初探

挤压过程中挥发性风味化合物在拉丝蛋白中是否保留与其自身性质有关,同系挥发性风味化合物的链长越长,其与蛋白质的结合能力越强^[27]。沸点高、饱和蒸汽压低的化合物容易在物料中扩散,并在拉丝蛋白中保留;而沸点低、饱和蒸气压高的化合物更易随水蒸气挥发而损失^[28-29]。若不使用冷却段,拉丝蛋白在出料口发生膨化,水分质量分数从55%下降至48%。为了验证是否可以通过物料膨化时水蒸气的挥发来降低拉丝蛋白活性风味化合物的质量分数,作者去除了冷却段进行对比。

在未使用冷却段的样品中,3种呋喃类化合物、戊醛及己醛的质量分数显著下降,而1-己醇、辛醛、苯甲醛、1-辛烯-3-醇等高沸点化合物并未因水蒸气的挥发而减少。有研究者发现,沸点高、饱和蒸汽压低的化合物更易在挤压过程中保留在玉米渣中^[28-29],这与作者的研究结果一致。当物料经过冷却段时,部分挥发性风味化合物会通过共价键、非共价键等方式与蛋白质结合。在不使用冷却段的情况下,挥发性风味化合物无法与蛋白质结合,只能被物理包埋或者吸附在拉丝蛋白表面或空洞结构中,因此未使用冷却段的拉丝蛋白中检出的挥发性风味化合物质量分数较高。

综上所述,在挤压过程中利用水蒸气的挥发可以降低所得拉丝蛋白中 2-戊基呋喃、己醛等部分不良风味化合物的质量分数。但如果仅通过去除冷却段来实现水蒸气的挥发,也会使 1-己醇、辛醛等不良风味化合物的质量分数高于冷却后的样品,表明去除冷却段并不能减少或去除拉丝蛋白中所有不良风味化合物,拉丝蛋白的不良风味去除途径仍需进一步研究。

3 结论

在挤压过程中加入外源挥发性化合物后,拉丝蛋白中的挥发性风味化合物种类和数量会发生显著变化。在挤压时加入呋喃酮、香叶醇及芳樟醇对拉丝蛋白风味改善效果较好,并可显著提高消费者对拉丝蛋白的喜好度。拉丝蛋白中活性风味化合物的变化与外源挥发性化合物质量浓度有一定的相关性,因此在生产过程中需要探索外源挥发性化合物的最佳质量浓度,以获得风味更佳的拉丝蛋白。另外,拉丝蛋白中部分不良风味化合物质量分数随物料膨化时水蒸气的挥发而下降,但其余化合物质量分数无显著变化。因此,在未来的研究及实际生产中,仍需探索既能通过添加外源挥发性化合物改善拉丝蛋白风味轮廓,又能减少新的不良风味化合物生成的拉丝蛋白生产新工艺。

参考文献

- [1] SHAGHAGHIAN S, MCCLEMENTS D J, KHALESI M, et al. Digestibility and bioavailability of plant-based proteins intended for use in meat analogues: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 646-656.
- [2] KUMAR P, CHATLI M K, MEHTA N, et al. Meat analogues: health promising sustainable meat substitutes [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(5): 923-932.
- [3] 杨涛, 辛建美, 徐青, 等. 双螺杆挤压技术在食品工业中的研究应用现状 [J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(6): 733-740.
YANG T, XIN J M, XU Q, et al. The research application status of in food industry [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2009, 28(6): 733-740. (in Chinese)
- [4] KUMAR V, RANI A, RAWAL R. First Indian soybean variety free from off-flavour generating *lipoxygenase-2* gene identified for release for commercial cultivation [J]. National Academy Science Letters, 2021, 44(6): 477-480.
- [5] ZHOU Y P, LI X F, HUA Y F, et al. The absence of lipoxygenase and 7S globulin of soybeans and heating temperatures on the properties of soymilks and soy yogurts [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 115: 108431.
- [6] SHI Y, SINGH A, KITTS D D, et al. Lactic acid fermentation: a novel approach to eliminate unpleasant aroma in pea protein isolates [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 111927.
- [7] DEVANTHI P V P, GKATZIONIS K. Soy sauce fermentation: microorganisms, aroma formation, and process modification [J]. Food Research International, 2019, 120: 364-374.
- [8] LEE E J, KIM H, LEE J Y, et al. β -cyclodextrin-mediated beany flavor masking and textural modification of an isolated soy protein-based yuba film [J]. Foods, 2020, 9(6): 818.
- [9] LI X Z, LIU S Q. Effect of thermal treatment on aroma compound formation in yeast fermented pork hydrolysate supplemented with xylose and cysteine [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(4): 1457-1465.
- [10] YUAN X Y, ZHU X C, SUN R H, et al. Sensory attributes and characterization of aroma profiles of fermented sausages based on fibrous-like meat substitute from soybean protein and *Coprinus comatus* [J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt B): 131537.
- [11] 曾著莉, 魏晋梅, 牛黎莉, 等. HS-SPME-GC-MS 分析马铃薯挥发性风味物质 [J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(6): 123-130.
ZENG L L, WEI J M, NIU L L, et al. Analysis of flavor potato by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(6): 123-130. (in Chinese)
- [12] 张海玲, 光翠娥, 江波, 等. 皂苷类似物与肾素的分子对接和结合能分析 [J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(10): 1056-1062.
ZHANG H L, GUANG C E, JIANG B, et al. Molecular docking of saponin analogues with renin and the analysis of binding energy [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2014, 33(10): 1056-1062. (in Chinese)
- [13] BURLEY S K, BHIKADIYA C, BI C X, et al. RCSB Protein Data Bank: powerful new tools for exploring 3D structures of biological macromolecules for basic and applied research and education in fundamental biology, biomedicine, biotechnology, bioengineering and energy

- sciences [J]. *Nucleic Acids Research*, 2021, 49 (1) : 437-451.
- [14] KIM S, CHEN J, CHENG T J, et al. PubChem in 2021: new data content and improved web interfaces [J]. *Nucleic Acids Research*, 2021, 49(1):1388-1395.
- [15] ADASME M F, LINNEMANN K L, BOLZ S N, et al. PLIP 2021: expanding the scope of the protein-ligand interaction profiler to DNA and RNA [J]. *Nucleic Acids Research*, 2021, 49(1):530-534.
- [16] COMPANY T G S. The good scents company information system [DB/OL]. (1980) [2023-1-22]. <http://www.thegoodscentcompany.com/search3.php>.
- [17] GREMLI H A. Interaction of flavor compounds with soy protein [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1974, 51(1):95-97.
- [18] ZHANG B, ZHANG J W, YU X B, et al. Evaluation of the adsorption capacity and mechanism of soy protein isolate for volatile flavor compounds: role of different oxygen-containing functional groups [J]. *Food Chemistry*, 2022, 386:132745.
- [19] BOATRIGHT W L, CRUM A D. Odor and flavor contribution of 2-pentyl pyridine to soy protein isolates [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1997, 74 (12):1575-1581.
- [20] BOATRIGHT W L, LEI Q. Compounds contributing to the "beany" odor of aqueous solutions of soy protein isolates [J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(4):667-670.
- [21] BOUÉ S M, SHIH B Y, CARTER-WIENTJES C H, et al. Identification of volatile compounds in soybean at various developmental stages using solid phase microextraction [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(17): 4873-4876.
- [22] KOBAYASHI A, TSUDA Y, HIRATA N, et al. Aroma constituents of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) milk lacking lipxygenase isoenzymes [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(9):2449-2452.
- [23] POLISELI-SCOPEL F H, GALLARDO-CHACÓN J J, JUAN B, et al. Characterisation of volatile profile in soymilk treated by ultra high pressure homogenisation [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3):2541-2548.
- [24] DUPPETI H, MANJABHATTA S N, KEMPAIAH B B. Physicochemical, structural, functional and flavor adsorption properties of white shrimp (*Penaeus vannamei*) proteins as affected by processing methods [J]. *Food Research International*, 2023, 163:112296.
- [25] TOMCZYŃSKA-MLEKO M, KAMYSZ E, SIKORSKA E, et al. Changes of secondary structure and surface tension of whey protein isolate dispersions upon pH and temperature [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2014, 32(1):82-89.
- [26] ZHOU Q X, CADWALLADER K R. Inverse gas chromatographic method for measurement of interactions between soy protein isolate and selected flavor compounds under controlled relative humidity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52 (20):6271-6277.
- [27] KIM C H, MAGA J A. Thermally generated flavors: chain length and functional group impact on flavor retention during extrusion [J]. ACS Publications, 1994, 380-384.
- [28] MENIS M E C, MILANI T M G, JORDANO A, et al. Extrusion of flavored corn grits: structural characteristics, volatile compounds retention and sensory acceptability [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 54(2):434-439.
- [29] CONTI-SILVA A C, BASTOS D H M, ARÊAS J A G. The effects of extrusion conditions and the addition of volatile compounds and flavour enhancers to corn grits on the retention of the volatile compounds and texture of the extrudates [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(9):1896-1902.

(责任编辑:刘冬梅)