DOI:10.12441/spyswjs.20240330001 [文章编号] 1673-1689(2025)05-0063-09

豆浆酸沉后挥发性醛类成分的变化及其影响因素

楼马培展[1] 张彩猛[1] 孔祥珍[1] 李兴飞[1] 陈业明[1] 冯笑笑[2] 华欲飞[1*]

(1. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 2. 上海交通大学农业与生物学院,上海 200240)

摘要:【目的】酸沉是植物蛋白加工中常用的手段,可以实现蛋白质富集与非蛋白质(包括异味物质)成分的高效、大规模的分离去除。该研究的目的是探讨导致豆浆酸沉后醛类物质反常增加的原因。【方法】采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术分析豆浆酸沉处理前后的挥发性成分变化。通过离心分级豆浆组分,探究不同组分对醛类物质增加的贡献。测定酸沉前后脂质氢过氧化物质量摩尔浓度的变化;建立其与醛类物质变化量之间的摩尔比关系。在此基础上,系统考察了脂质氢过氧化物分解的关键因素(酸种类、酸沉温度、Fe^{2+}浓度)对酸沉后己醛质量分数的影响。【结果】研究表明,酸沉后豆浆中醇类、酸类、酮类及呋喃类物质的质量分数变化符合预期,而醛类物质(己醛、壬醛和反-2-庚烯醛等)的质量分数上升,与之相伴随的是脂质氢过氧化物的质量摩尔浓度明显降低。离心分级结果显示,醛类物质质量分数升高主要来源于上浮层油相组分。进一步分析表明,豆浆酸处理后,脂质氢过氧化物降低的物质的量与醛类物质升高的物质的量比值为5∶1,表明前者只有部分分解为醛类物质,这与已有的文献报道相符。影响因素研究表明,与盐酸相比,采用柠檬酸或苹果酸进行酸沉,可减少脂质氢过氧化物的分解和己醛的生成。而较高酸沉温度及体系中较高Fe^{2+}浓度会促进脂质氢过氧化物的分解和己醛的增加。【结论】豆浆酸沉过程中醛类物质异常增加,其分布规律不同于其他类型异味物质。通过柠檬酸或苹果酸替代盐酸,降低酸沉温度以及控制体系Fe^{2+}浓度,可有效抑制脂质氢过氧化物的分解,减少醛类物质的生成。

关键词:大豆蛋白;豆浆;酸沉;豆腥味;脂质氢过氧化物

Changes in Volatile Aldehydes of Soymilk After Acid-precipitation and Its Influencing Factors

LOU Mapeizhan[1] *ZHANG Caimeng*[1] *KONG Xiangzhen*[1] *LI Xingfei*[1] *CHEN Yeming*[1] *FENG Xiaoxiao*[2] *HUA Yufei*[1*]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Agriculture & Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: [**Objective**] Acid precipitation, a common method in plant protein processing, can efficiently achieve protein enrichment and removal of non-protein components (including off-flavor substances) on a large scale. This study aims to explore the causes for the abnormal increases in aldehydes of soymilk after acid precipitation. [**Method**] Changes in volatile compounds of soymilk before and after acid precipitation were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GS-MS). Soymilk components were fractionated by centrifugation, and the contributions of different fractions to the increases in aldehydes were investigated. The changes in the molar concentrations of lipid hydroperoxides before and after acid precipitation were determined, and a molar ratio between these changes and the alterations in aldehyde content was established. Subsequently, the effects of

基金项目:国家自然科学基金项目(32272243);中国博士后科学基金面上项目(2023M742280)。

通信作者:华欲飞(1962—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事植物蛋白研究。E-mail: yfhua@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2024-03-30 **修回日期:**2024-05-12

critical factors (acids, acid precipitation temperature, and Fe^{2+} concentration) influencing lipid hydroperoxide decomposition on the mass fraction of hexanal in the product after acid precipitation were systematically examined. [**Result**] The changes in the mass fractions of alcohols, acids, ketones, and furans in soymilk after acid precipitation were as anticipated. The mass fractions of aldehydes (including hexanal, nonanal, and *trans*-2-heptenal) increased, while the mass molar concentration of lipid hydroperoxides demonstrated a remarkable decrease. The centrifugation results showed that the oil phase in the upper layer was the main source for the increases in the mass fractions of aldehydes, with the largest contribution. The subsequent analysis revealed that the ratio of lipid hydroperoxide molar concentration decrease to aldehyde molar concentration increase was 5∶1 following acid treatment, indicating partial decomposition of the former into aldehydes, which is consistent with previous findings. The analysis of influencing factors showed that compared with hydrochloric acid, citric acid or malic acid for acid precipitation reduced the decomposition of lipid hydroperoxides and increased the formation of hexanal. However, higher acid precipitation temperature and higher Fe^{2+} concentration promoted the decomposition of lipid hydroperoxides and the increase of hexanal accumulation. [**Conclusion**] During acid precipitation, the abnormal increases in aldehydes exhibited a distinct distribution pattern compared with other off-flavor substances. Replacing hydrochloric acid with citric acid or malic acid, lowering the precipitation temperature, and controlling the Fe^{2+} concentration within the system can effectively inhibit the decomposition of lipid hydroperoxides, thereby reducing the formation of aldehydes.

Keywords: soybean protein; soymilk; acid precipitation; beany flavor; lipid hydroperoxide

酸沉（又称等电点沉淀），是植物蛋白加工过程中去除非蛋白质杂质，从而提高产品蛋白质质量分数的重要步骤，该方法具有蛋白质提取率高、纯度高、操作简单和花费较少等优点[1]。目前酸沉广泛应用于各类植物蛋白提取工艺中，例如豆科类[2-3]、油料类[4]、坚果类[5]、谷物类[6-7]和植物茎叶类[8]等。有学者采用酸沉法提高产品中蛋白质的质量分数，降低低胀气因子[9]；在以豆浆为原料制备植物基代乳粉过程中，研究人员开发了新型的豆浆酸沉装置，实现了豆浆酸沉生产的连续操作，提高了豆浆蛋白质的酸沉效果[10]。在豆浆粉加工中，用酸沉替代多效蒸发浓缩，可以减少设备投资并降低能耗。此外，酸沉离心运行稳定，而多效蒸发浓缩则可能出现黏壁、真空跑料等不稳定情况。由此可见，在豆浆粉加工中用酸沉取代真空浓缩具有较高的可行性。

植物蛋白的异味是影响其产品品质的重要因素[11]，而产生异味的主要原因是存在挥发性异味成分[12]，很多学者对豆浆异味成分进行了研究[13-15]，如田怀香等[16]对豆浆中豆腥味的来源、产生和消除进行了详细报道。此外，Lv等[17]利用动态顶空稀释分析（DHDA）和气相色谱-嗅觉-质谱联用（GC-O-MS）技术鉴定出8种对豆腥味有贡献的物质，包括正己醛、反-2-己烯醛、1-辛烯-3-醇、正己醇、正戊醇、乙酸、苯甲醛、反，反-2，4-癸二烯醛等，其中醛类物质中的己醛对豆浆豆腥味的贡献最大[18]。Feng等[19]发现豆浆中的异味成分的产生机理不同，包括通过多不饱和脂肪酸-脂肪氧合酶（LOX）-氢过氧化物裂解酶（HPL）途径形成己醛、己烯醛等醛类[20]；通过1-辛烯-3-醇-6-*O*-*β*-*D*-吡喃木糖基-*β*-*D*-吡喃葡萄糖苷-樱草糖苷水解酶途径产生1-辛烯-3-醇。此外，通过1-棕榈酰-2-（12-氢过氧十八碳二烯酰）-sn-甘油-3-磷脂酰乙醇胺（12-PEOOH）化学降解途径形成反-2-庚烯醛。

目前有关酸沉对异味成分变化影响的相关研究较少。作者研究发现豆浆酸沉后凝乳中挥发性醛类成分总量不仅没有降低，反而呈增加态势。对其机理和影响因素进行了研究，通过对挥发性醛类成分以及脂质氢过氧化物分析，明确两者之间的定量关系；考察不同酸处理条件下挥发性醛类和脂质氢过氧化物的变化规律，从而了解其影响因素，为植物蛋白产品的异味控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

东北大豆：无锡本地市场；盐酸、磷酸、硫酸

钾、无水硫酸铜、氯化钠、氢氧化钠、异辛烷、2-丙醇、甲醇、1-丁醇、硫氰酸铵、七水硫酸亚铁、二水合氯化钡、过氧化氢：均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；2-甲基-3-庚酮标准物：西格玛-奥德里齐公司；柠檬酸、苹果酸：正宏生物科技公司。

磨浆装置：DS100型，南通富莱克流体装备有限公司；脱氧纯水系统：Laywit-P-0.5型，无锡海思瑞科技有限公司；电子天平AB104-N型、数显pH计PHS-3TC型：梅特勒-托利多仪器有限公司；紫外可见分光光度计：721N型，乐沃达仪器有限公司；凯氏定氮仪：K9840型，济南海能仪器股份有限公司；冷冻离心机：Himac CR-21G II型，日本HITACHI公司；电热鼓风干燥箱：DHG-9070A型，济南鑫露生物技术有限公司；气相-高通量飞行时间质谱仪：Pegasus BT型，美国力可公司。

1.2 试验方法

1.2.1 豆浆的制备

原料大豆→清洗除杂→去离子水浸泡10 h→清洗→研磨、过滤除渣→杀菌（95 ℃，10 min）→冷却→4 ℃冷藏保存。大豆的研磨采用无氧磨浆设备进行，过程中研磨装置充满脱氧水以达到隔绝氧气的目的，并利用分离器进行浆渣分离，生豆浆通过蒸汽喷射加热，经过持温管保温一定时间后进入真空罐闪蒸冷却。在豆浆进一步处理前将其蛋白质质量分数标准化至3.5%。

1.2.2 基本成分测定

蛋白质的测定：参考GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》，采用凯氏定氮法测定，大豆蛋白换算系数为6.25。

1.2.3 豆浆酸处理

为了避免酸沉以及离心分离导致的成分分析复杂化，作者只进行酸处理，而不进行酸沉和离心分离。酸处理是在室温下豆浆加入HCl溶液（2.0 mol/L）调节至pH 4.5，搅拌30 min。

1.2.4 挥发性成分测定

样品中挥发性风味物质测定参考郭向阳[21]的方法并稍加修改。准确称取样品30 g，用质量分数16.0%的NaCl溶液定容至100 g。取适量样品置于顶空瓶中，加入20 μg/mL的2-甲基-3-庚酮标准溶液作为内标物，混匀，用带有橡胶隔垫的瓶盖密封。测试样品先置于设定好温度（60 ℃）的水浴锅中，将老化的固相微萃取针插入样品瓶，边搅拌边进行顶空吸附，搅拌速度设定为200 r/min。

GC-MS分析条件：采用Stabilwax-MS色谱柱（0.25 μm×30 mm×0.25 mm）；在60 ℃下，萃取维持30 min，萃取结束后，于250 ℃下解吸5 min。挥发性化合物通过配备的色谱柱进行分离。色谱柱的温度设置程序如下：初始温度在40 ℃维持3 min，以10 ℃/min的升温速度增加至230 ℃并维持6 min，载气为氦气，流量为1.0 mL/min。MS条件：m/z在电子碰撞（EI）模式（电离能70 eV）和采集范围为33~400的全扫描模式下进行。挥发性物质通过与MS数据库（NIST 2017质谱数据库）、线性保留指数（LRIs）和质谱解卷积对气味性质进行比较来定性和定量，最终结果以每千克豆浆中的挥发性成分计。

1.2.5 脂质氢过氧化物测定

参考Yuan等[22]的方法并略加修改，取3 mL样品加入6 mL去离子水混匀后进行酸处理，取酸处理后样品1 mL再加1 mL去离子水进行稀释，混合后取0.4 mL加入1.5 mL异辛烷与2-丙醇混合液（体积比为3∶1），旋涡振荡（10 s，3次）混合以提取氢过氧化物，然后1 000 g离心2 min，取200 μL有机溶剂相并加入2.8 mL甲醇与1-丁醇混合液（体积比2∶1），再分别加入15 μL的3.94 mol/L硫氰酸铵和15 μL亚铁溶液（将0.132 mol/L的$BaCl_2$溶液和0.144 mol/L的$FeSO_4$溶液以1∶1混合，1 000 g离心2 min，取上清液备用）。孵育反应20 min后，在510 nm处测量吸光度。用不同浓度（0.10、0.25、0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 μmol/L）过氧化氢溶液绘制标准曲线，其拟合线性回归方程为y=723.92x−0.053 6，R^2=0.992。

1.3 数据处理

所有试验均重复3次，采用Origin 2024软件对试验数据进行绘图，并通过SPSS Statistic 26对结果进行差异性分析，结果采用“平均值±标准差”表示。

2 结果与讨论

2.1 酸处理前后豆浆中挥发性风味物质质量分数及脂质氢过氧化物质量摩尔浓度变化

如表1所示，豆浆酸处理前后的醇类、酸类、酮类以及呋喃类物质的质量分数都无明显变化。另一方面，除反-2-己烯醛和苯甲醛外，酸处理后其他

表 1　豆浆酸沉前后挥发性风味物质质量分数

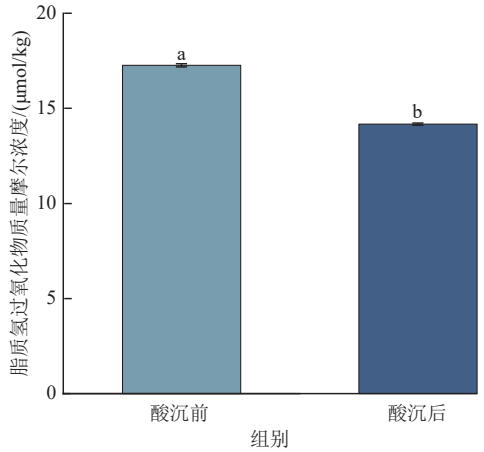
Table 1　Mass fractions of volatile flavor substances in soymilk before and after acid precipitation

挥发性风味物质	质量分数/(μg/kg)	
	酸处理前	酸处理后
戊醛	0.50±0.01[b]	1.70±0.12[a]
己醛	93.04±4.04[b]	141.36±5.57[a]
壬醛	25.97±0.75[b]	36.35±1.20[a]
反-2-己烯醛	0.34±0.01[a]	0.34±0.01[a]
反-2-庚烯醛	4.44±0.03[b]	6.72±0.13[a]
反-2-辛烯醛	3.64±0.03[b]	4.19±0.08[a]
苯甲醛	7.30±0.42[a]	7.31±0.29[a]
反,反-2,4-庚二烯醛	1.26±0.02[b]	1.85±0.21[a]
反,反-2,4-壬二烯醛	1.24±0.05[b]	2.28±0.13[a]
苯甲酸	1.37±0.09[a]	1.34±0.18[a]
甲酸	13.67±1.74[a]	14.27±1.75[a]
乙酸	11.61±0.43[a]	11.57±0.52[a]
戊酸	0.36±0.03[a]	0.34±0.01[a]
己酸	2.01±0.06[a]	2.04±0.02[a]
庚酸	0.53±0.09[a]	0.47±0.03[a]
辛酸	1.32±0.11[a]	1.40±0.12[a]
肉豆蔻酸	3.01±0.04[a]	2.97±0.13[a]
棕榈酸	8.18±0.33[a]	8.23±0.31[a]
乙醇	8.86±0.29[a]	8.73±0.27[a]
己醇	2.17±0.02[a]	2.13±0.08[a]
辛醇	1.17±0.06[a]	1.20±0.04[a]
壬醇	1.19±0.01[a]	1.18±0.04[a]
麦芽醇	8.95±0.4[a]	9.07±0.39[a]
1-辛烯-3-醇	95.6±1.45[a]	96.00±1.64[a]
1-辛烯-3-酮	2.32±0.04[a]	2.30±0.07[a]
苯乙酮	0.23±0.07[a]	0.21±0.04[a]
4-辛酮	1.65±0.14[a]	1.74±0.08[a]
2-戊基呋喃	9.07±0.68[a]	8.89±0.18[a]

注：不同的上标小写字母表示豆浆酸沉前后挥发性风味物质有显著性差异（P<0.05）。

醛类物质的质量分数都呈增加趋势，其中己醛最显著，增加了 51.93%，其次为壬醛，增加了 35.97%。同时，酸处理后脂质氢过氧化物的质量摩尔浓度从（17.26±0.08）μmol/kg 降低至（14.17±0.05）μmol/kg，见图 1。

研究发现，大豆中的氢过氧化物是在大豆贮藏过程中形成的[23]。在大豆贮藏早期，随着时间延长，脂质氧化形成氢过氧化物，并进一步分解为游离基，会破坏细胞膜并降低发芽率。Hildebrand 等[24]发现，LOX1（一种脂肪氧合酶同工酶）在形成氢过氧化物方面比 LOX2 和 LOX3 的活性更高。因此，豆浆中的氢过氧化物很有可能在原料大豆中就已经存在。



不同的小写字母表示豆浆酸沉前后物质的质量摩尔浓度有显著性差异(P<0.05)。

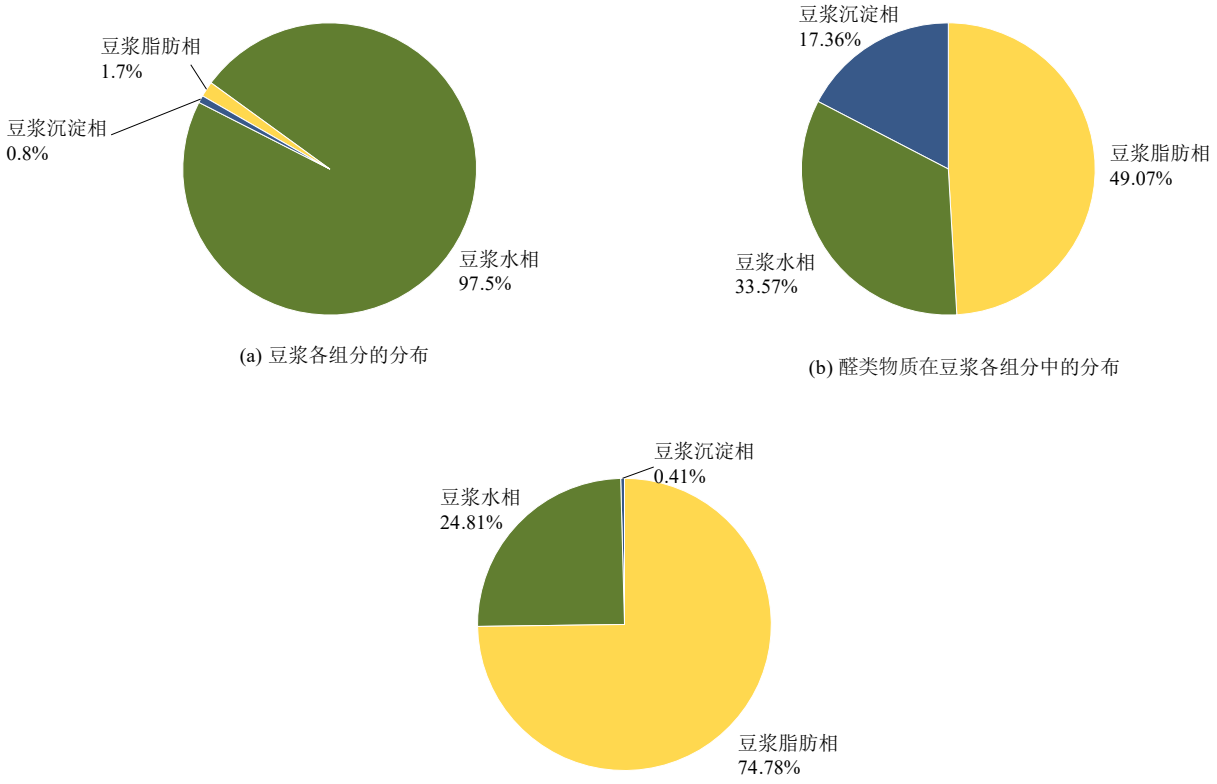
图 1　豆浆酸沉前后脂质氢过氧化物质量摩尔浓度

Fig. 1　Mass molar concentration of lipid hydroperoxides in soymilk before and after acid precipitation

另一方面，从上述测定数据可知，酸处理后氢过氧化物质量摩尔浓度降低了 3.09 μmol/kg，而醛类物质仅增加了 0.61 μmol/kg，明显低于前者。Feng 等[19]报道了 12-PEOOH 的化学降解机理，发现 12-PEOOH 的降解速率随 pH 降低而增大，但是在酸性条件下 12-PEOOH 更容易降解为过氧脂质自由基（LOO·），因而醛类物质（反-2-庚烯醛）的摩尔转化率降低。由此推测，存在于豆浆中的氢过氧化物只有部分转化为醛类物质。

2.2　豆浆中醛类成分与脂质氢过氧化物在豆浆各组分中的分布

为了进一步研究豆浆中醛类成分的产生机理，考察了挥发性成分和脂质氢过氧化物在不同豆浆组分中的分布。首先，豆浆（蛋白质质量分数为 3.5%）在 9 000 g 条件下离心 30 min，收集上浮油相、中层水相及下层沉淀，分别进行酸处理并测定挥发性物质和脂质氢过氧化物。从图 2（a）可知，豆浆中水相的质量分数占绝对多数（97.5%）。从图 2（b）可知，醛类成分在三相中的分布分别为 49.07%、33.57%、17.36%，而脂质氢过氧化物在三相中的分布分别为 74.78%、24.80%、0.41%，见图 2（c）。由于脂肪相质量占比仅为 1.7%，说明脂质氢过氧化物在该相中高度富集，成为酸化时醛类物质产生的主要来源。



(a) 豆浆各组分的分布

(b) 醛类物质在豆浆各组分中的分布

(c) 脂质氢过氧化物在豆浆各组分中的分布

图 2　豆浆离心后各组分的质量分数以及醛类物质和脂质氢过氧化物在各离心组分中的分布

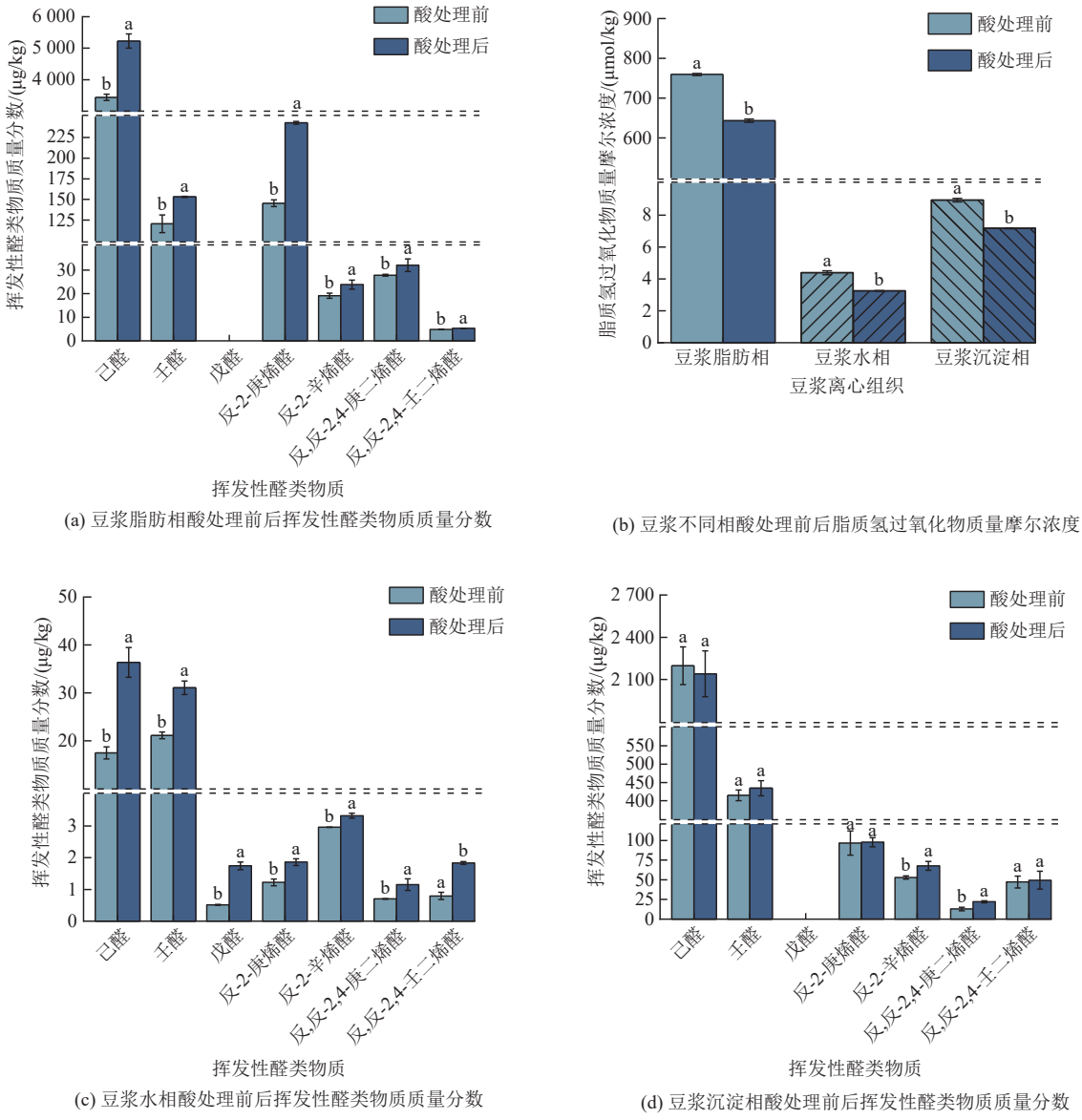
Fig. 2　Mass distribution of centrifugal phases of soymilk and the distribution of aldehydes and lipid hydroperoxides in centrifugal phases

2.3　酸处理对豆浆离心组分中挥发性醛类物质及脂质氢过氧化物的影响

将收集到的豆浆三相进行酸处理，并测定酸处理前后醛类的质量分数及脂质氢过氧化物的质量摩尔浓度。从图3(a)可知，在豆浆脂肪相中，酸处理后己醛质量分数增加最为显著，增加了52.00%，壬醛增加了26.91%，变化规律与此前在豆浆中所测数据相似。测得脂肪相中脂质氢过氧化物的质量摩尔浓度从(759.45±2.55) μmol/kg降低至(643.28±4.19) μmol/kg，减少量远大于另外两相的脂质氢过氧化物质量摩尔浓度的变化量，见图3(b)。值得注意的是，脂肪相中未检测到戊醛，说明此相中不存在戊醛的脂质氢过氧化物前体。可能该脂质氢过氧化物的相对分子质量较小，在水中溶解度较大，因而主要存在于水相中，图3(c)也证明了这一点。戊醛的质量分数由(0.51±0.01) μg/kg增加至(1.74±0.12) μg/kg。其他醛类物质在酸处理后也都有增加，说明其他脂质氢过氧化物也有一定的水溶性。从图3(d)可知，在沉淀层中，酸处理后质量摩尔浓度增加的都是相对分子质量较大的醛类，如反-2-辛烯醛和反，反-2-4-庚二烯醛，说明存在于沉淀中的主要是相对分子质量较大的脂质氢过氧化物。Guo等[25]报道未加热豆浆中脂质都存在于离心沉淀中，但是加热后大部分脂质都被释放出来进入上浮层。

2.4　酸处理对豆浆中己醛质量分数及脂质氢过氧化物质量摩尔浓度的影响

从上述分析可知，脂质氢过氧化物化学降解是醛类成分增加的原因，因此，考察了不同降解反应条件对醛类质量分数及脂质氢过氧化物质量摩尔浓度变化的影响。由图4(a)~(b)可知，用柠檬酸和苹果酸进行酸沉后己醛增加量较小，分别为31.56%和33.28%，显著小于盐酸组(51.93%)，并且，采用柠檬酸的组别中脂质氢过氧化物质量摩尔浓度减小幅度最小，仅为12.66%。已有研究表明，通过添加酸性物质(柠檬汁和醋等)能够起到降低豆腥味的



(a) 豆浆脂肪相酸处理前后挥发性醛类物质质量分数

(b) 豆浆不同相酸处理前后脂质氢过氧化物质量摩尔浓度

(c) 豆浆水相酸处理前后挥发性醛类物质质量分数

(d) 豆浆沉淀相酸处理前后挥发性醛类物质质量分数

图中不同小写字母表示酸处理前后差异显著(P<0.05)。

图 3 豆浆不同组分层酸处理前后醛类质量分数及脂质氢过氧化物摩尔质量浓度

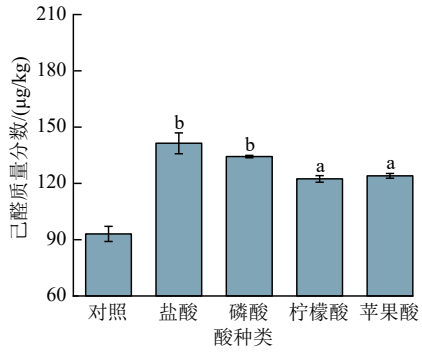
Fig. 3 Mass fractions of aldehydes and molar mass concentration of lipid hydroperoxides in different phases of soymilk before and after acid treatment

目的[26]。另外,柠檬酸、抗坏血酸和EDTA这类金属螯合剂的添加同样可以减少油脂的氧化[27],从而减少异味物质。由于柠檬酸和苹果酸都属有机酸且都有一定的抗氧化活性和金属螯合作用,在一定程度上抑制了酸化过程中脂质氢过氧化物的减少,使得转化产生的己醛也相应减少。根据测定数据计算己醛质量分数的增加量与脂质氢过氧化物的转化率发现,相较于盐酸的15.59%转化率,采用柠檬酸与苹果酸使转化率分别降低至13.42%与12.10%。

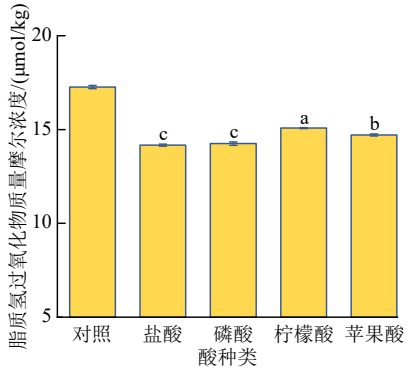
图4(c)~(d)显示,酸处理温度增加,脂质氢过氧化物呈现减少的趋势,相应地,己醛质量分数呈增加趋势,在60 ℃时脂质氢过氧化物的质量摩尔浓度表现出最高的减少量(24.60%),己醛的质量分数表现出最高的增加量(78.07%)。与其他温度相比,4 ℃下脂质氢过氧化物的质量摩尔浓度和己醛的质量分数变化更小,且己醛的增加量与脂质氢过氧化物减少量的转化率仅为14.87%,而60 ℃时转化率增加至17.08%。有研

究报道，氢过氧化物的分解随着温度的升高而增加[28]，表明提高酸沉温度在一定程度上促进了脂质氢过氧化物向己醛的转化。另外，Xu等[29]发现65 ℃处理后的大豆分离蛋白产生了较多的异味物质。

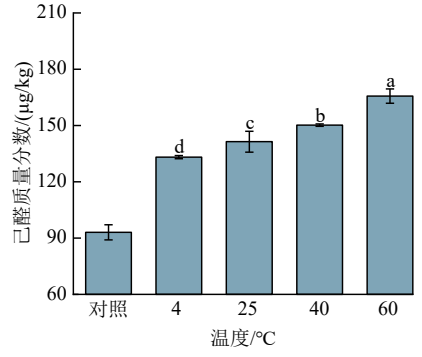
从图4(e)~(f)可知，随着豆浆中Fe^{2+}浓度的提高，酸沉后脂质氢过氧化物质量摩尔浓度减少量逐渐增加，己醛的质量分数逐渐增加，且两者间的转化率也呈增加趋势。当Fe^{2+}浓度为15 μmol/L时，脂质氢过氧化物减少了29.97%，而己醛增加了98.11%，转化率增加至17.61%。有研究表明，金属离子能够促进磷脂氧化从而诱导挥发性风味物质产生，并且12-磷脂氢过氧化物的降解速率与Fe^{2+}浓度呈正相关[19]。



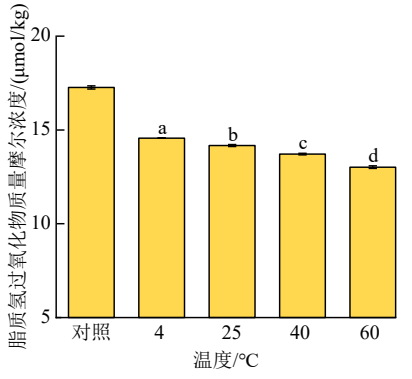
(a) 不同酸酸处理后己醛质量分数



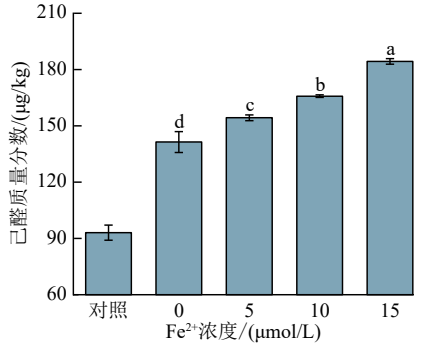
(b) 不同酸酸处理后脂质氢过氧化物质量摩尔浓度



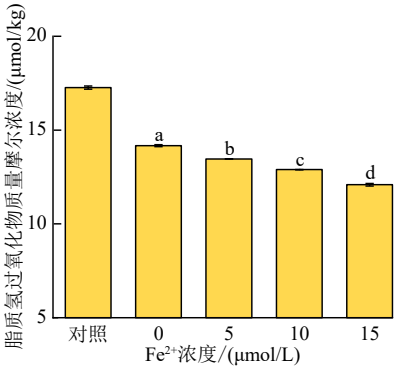
(c) 不同温度酸处理后己醛质量分数



(d) 不同温度酸处理后脂质氢过氧化物质量摩尔浓度



(e) 不同Fe^{2+}浓度酸处理后己醛质量分数



(f)不同Fe^{2+}浓度酸处理后脂质氢过氧化物质量摩尔浓度

不同的小写字母表示有显著性差异(P<0.05)。

图4　不同酸处理条件对豆浆中己醛质量分数及脂质氢过氧化物质量摩尔浓度的影响

Fig. 4　Effects of different acid treatment conditions on the mass fraction of hexanal and mass molar concentration of lipid hydroperoxides in soymilk

综上所述，豆浆酸沉时选择具有抗氧化或金属螯合能力的酸或在低温下酸沉，能够有效抑制脂质氢过氧化物的分解从而减少己醛的产生。此外，在加工过程中接触设备选用不锈钢等耐酸钢而非碳钢类材料，并对加工用水进行前处理可进一步减少加工过程中豆浆液与Fe^{2+}的接触，有助于获得异味物质更少的大豆蛋白凝乳。

3 结论

作者发现酸沉后豆浆中挥发性醛类物质质量分数显著增加，尤其是己醛。酸沉后豆浆中油相脂质氢过氧化物质量摩尔浓度也明显减少，脂质氢过氧化物的酸分解是醛类物质的最大来源。证明了酸沉温度的提高和体系中Fe^{2+}浓度增加均可促进脂质氢过氧化物向己醛的转化，而选用具有抗氧化或金属螯合能力的酸能在一定程度限制其转化。这些发现为豆浆在酸沉过程中异味物质的生成与变化提供了理论依据，其中脂质氢过氧化物与己醛的具体转化路径与关联仍有待进一步研究。

参考文献

[1] VERFAILLIE D，JANSSEN F，VAN ROYEN G，et al. A systematic study of the impact of the isoelectric precipitation process on the physical properties and protein composition of soy protein isolates[J]. Food Research International，2023，163：112177.

[2] TORREZAN R，THAM W P，BELL A E，et al. Effects of high pressure on functional properties of soy protein[J]. Food Chemistry，2007，104(1)：140-147.

[3] 张英蕾，姚鑫淼，卢淑雯，等. 碱溶酸沉法提取黑豆蛋白工艺优化[J]. 中国食品添加剂，2019，30(1)：60-68.
ZHANG Y L，YAO X M，LU S W，et al. Optimization of black soybean protein extraction process by alkali and acid precipitation[J]. China Food Additives，2019，30(1)：60-68.(in Chinese)

[4] 吕静，杨洁茹，李坤，等. 不同提取工艺对油茶籽粕蛋白质结构及功能特性的影响[J]. 食品工业科技，2023，44(14)：102-110.
LYU J，YANG J R，LI K，et al. Effects of different extraction processes on the structure and functional properties of *Camellia* seeds protein[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(14)：102-110.(in Chinese)

[5] 吕丹丹，毛晓英. 核桃多酚与蛋白质的作用方式及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技，2019，40(13)：23-28.
LYU D D，MAO X Y. Interaction between walnut polyphenols and protein and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(13)：23-28.(in Chinese)

[6] ZHU K X，SUN X H，ZHOU H M. Optimization of ultrasound-assisted extraction of defatted wheat germ proteins by reverse micelles[J]. Journal of Cereal Science，2009，50(2)：266-271.

[7] 周立，颜丹云，赵祎瑾，等. 燕麦蛋白的提取及功能特性研究进展[J]. 食品研究与开发，2022，43(17)：210-217.
ZHOU L，YAN D Y，ZHAO Y J，et al. Extraction and functional properties of oat protein：a review[J]. Food Research and Development，2022，43(17)：210-217.(in Chinese)

[8] 李猛政，李荣华，夏岩石，等. 烟草叶蛋白提取技术研究进展[J]. 中国烟草科学，2021，42(4)：85-91.
LI M Z，LI R H，XIA Y S，et al. Research progress on extraction technology of tobacco leaf proteins[J]. Chinese Tobacco Science，2021，42(4)：85-91.(in Chinese)

[9] 江连洲，朱建宇，齐宝坤，等. 一种低寡糖高蛋白豆奶的制备方法：CN110692733A[P]. 2020-01-17.

[10] 华欲飞，朱枫，刘晓明. 一种豆浆酸沉处理设备：CN204589043U[P]. 2015-08-26.

[11] 岳杨，汪超，陈亚淑，等. 植物乳的香气、异味及其影响因素研究进展[J]. 食品科学，2023，44(21)：330-340.
YUE Y，WANG C，CHEN Y S，et al. Research progress on the aroma and off-odor of plant milk and their influential factors[J]. Food Science，2023，44(21)：330-340.(in Chinese)

[12] STEENSON D F，LEE J H，MIN D B. Solid phase microextraction of volatile soybean oil and corn oil compounds[J]. Journal of Food Science，2002，67(1)：71-76.

[13] WILKENS W F，LIN F M. Gas chromatographic and mass spectral analyses of soybean milk volatiles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，1970，18(3)：333-336.

[14] MIN S，YU Y，YOO S，et al. Effect of soybean varieties and growing locations on the flavor of soymilk[J]. Journal of Food Science，2005，70(1)：C1-C11.

[15] FENG X X，HUA Y F，ZHANG C M，et al. Effect of soaking conditions on the formation of lipid derived free radicals in soymilk[J]. Food Chemistry，2020，315：126237.

[16] 田怀香，何晓葳，李立，等. 豆浆中豆腥味影响因素及消除方法的研究进展[J]. 现代食品科技，2021，37(10)：340-347.
TIAN H X，HE X W，LI L，et al. Research progress

about the affecting factors and eliminating methods of beany flavor in soymilk[J]. Modern Food Science and Technology,2021,37(10):340-347.(in Chinese)

[17] LV Y C,SONG H L,LI X,et al. Influence of blanching and grinding process with hot water on beany and non-beany flavor in soymilk[J]. Journal of Food Science,2011,76(1):S20-S25.

[18] LEY J P. Masking bitter taste by molecules[J]. Chemosensory Perception,2008,1(1):58-77.

[19] FENG X X,HUA Y F,LI X F,et al.(*E*)-2-heptenal in soymilk:a nonenzymatic formation route and the impact on the flavor profile[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2020,68(50):14961-14969.

[20] GARDNER H W,WEISLEDER D,PLATTNER R D. Hydroperoxide lyase and other hydroperoxide-metabolizing activity in tissues of soybean,*Glycine max*[J]. Plant Physiology,1991,97(3):1059-1072.

[21] 郭向阳. 6种食用芳香植物挥发性成分的GC-MS/GC-O分析[J]. 农业工程学报,2019,35(18):299-307.
GUO X Y. Analysis of volatile compositions in six edible fragrant plants by GC-MS/GC-O technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(18):299-307.(in Chinese)

[22] YUAN Y,KONG Z Y,SUN Y G,et al. Complex coacervation of soy protein with chitosan:Constructing antioxidant microcapsule for algal oil delivery[J]. LWT-Food Science and Technology,2017,75:171-179.

[23] SUNG J M,CHIU C C. Lipid peroxidation and peroxide-scavenging enzymes of naturally aged soybean seed[J]. Plant Science,1995,110(1):45-52.

[24] HILDEBRAND D F,KITO M. Role of lipoxygenases in soybean seed protein quality[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1984,32(4):815-819.

[25] GUO S T,ONO T,MIKAMI M. Interaction between protein and lipid in soybean milk at elevated temperature[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1997,45(12):4601-4605.

[26] 杨杨,葛爱媛,任丽琨,等. 豆浆豆腥味形成机理及其去除方法的研究进展[J]. 食品工业科技,2024,45(10):401-411.
YANG Y,GE A Y,REN L K,et al. Research progress on formation mechanisms and removal methods of soybean milk and bean odor[J]. Science and Technology of Food Industry,2024,45(10):401-411.(in Chinese)

[27] HALLIWELL B,MURCIA M A,CHIRICO S,et al. Free radicals and antioxidants in food and *in vivo*:What they do and how they work[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,1995,35(1/2):7-20.

[28] ANGELO A J,VERCELLOTTI J,JACKS T,et al. Lipid oxidation in foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,1996,36(3):175-224.

[29] XU J,CHEN Q M,ZENG M M,et al. Effect of heat treatment on the release of off-flavor compounds in soy protein isolate[J]. Food Chemistry,2024,437:137924.

（责任编辑：李春丽）