

# 豆乳风味物质的研究进展

施小迪, 郭顺堂\*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 豆乳风味是由多种组分构成的复杂而不稳定的平衡体系, 近年来随着豆乳健康价值的提升而逐渐受到研究者的关注。豆乳风味成分主要是通过酶促反应、非酶促反应等形成的醛醇酮类挥发性小分子物质, 生成后又会与大豆蛋白作用, 从而形成豆乳的整体风味。大豆脂肪氧化酶是影响豆乳风味的主要因素, 其活性受到温度、pH、无机盐、有机电解质等影响。目前, 国外改善豆乳风味的方法主要集中在去除或钝化大豆脂肪氧化酶活方面, 包括品种选育、热处理法和化学法, 近年来还应用了一些现代非热处理技术, 这些方法显著降低了豆乳风味, 较为符合西方消费者的饮食习惯。相比之下, 东亚地区的消费者偏爱风味丰富的大豆产品, 因而研究侧重点应在部分钝化大豆脂肪氧化酶而使风味充分呈现方面。

**关键词:** 豆乳风味; 主要成分; 形成机理; 影响因素; 改善方法

## Research developments of soymilk flavor compounds

SHI Xiao-Di, GUO Shun-Tang\*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** Soymilk flavor is a complicated, unstable and balanced system, which is formed by a large number of micromolecular compounds, and researchers have paid a lot of attention on it in the past few years as the healthy benefits of soymilk are enhanced. Volatile aldehydes, ketones and alcohols are essential soymilk flavor compounds, which are catalyzed by enzymatic reaction and non-enzymatic reaction, and subsequently interact with soybean protein, and then entire soymilk profile will be formed. Soybean lipoxygenase is the main factor affecting soymilk flavor, the activity of which is affected by temperature, pH, inorganic salts and organic electrolytes. At present, removal and inactivation of soybean lipoxygenase are the main methods to improve soymilk flavor in Western countries, including cultivar breeding, thermal treatment and chemical methods, and some modern non-thermal technique recently referred as well. These methods significantly reduced soymilk flavor, and the products conform with the dietary habits of Western consumers; in comparison, the consumers in Asian countries have preference for flavor-rich soy products, thus the research emphasis should be put on the partial inactivation of soybean lipoxygenase.

**KEY WORDS:** soymilk flavor; main components; formation mechanism; influential factors; improvement methods

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD34B03)

**Fund:** Supported by the National Key Technologies Research and Development Program (2012BAD34B03)

\*通讯作者: 郭顺堂, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品科学。E-mail: shuntang@cau.edu.cn

\*Corresponding author: GUO Shun-Tang, Professor, China Agricultural University, No. 17, Qinghua Donglu, Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: shuntang@cau.edu.cn

## 1 引言

食品风味的定义主要有香气、香味、滋味三种表示方法: (1)人们在鼻腔中能够直接闻到的称作香气; (2)食物进入口腔后, 通过吞咽再进入鼻腔感受到的称作香味; (3)通过口腔咀嚼感受到的称作滋味。有关豆乳风味的研究主要侧重于嗅觉感受到的挥发性物质。

豆乳风味是衡量豆乳品质好坏的重要指标, 从某种程度上来说, 也是决定消费者接受水平的关键因素<sup>[1]</sup>。随着人们消费意识的不断提高, 在豆乳的营养和健康价值受到越来越多关注的同时, 豆乳的风味品质也日益受到消费者的重视<sup>[2]</sup>。

豆乳的整体风味是由众多挥发性的微量风味物质共同作用而达到相对平衡状态的结果, 此体系具有高度的复杂性和极大的不稳定性。尽管此方面已有许多相关的研究报告, 但人们对豆乳风味物质的了解仍较为有限。另一方面, 不同地区的人们对豆乳风味的要求也不同, 西方消费者对豆乳中的不良风味十分敏感<sup>[3]</sup>, 而亚洲消费者则更倾向于风味较为多元化的豆乳产品<sup>[4]</sup>, 因而其加工方法和研究重点也存在一定的差异性。

本文整理了近年来关于豆乳风味的一些研究成果, 包括影响豆乳风味的主要成分、形成机制以及影响因素, 并阐述了国内外学者在豆乳风味改善方法方面的研究, 旨在为解决长期以来存在的豆乳风味问题提供一些理论基础。

## 2 豆乳中的风味物质

豆乳风味是由脂肪、蛋白质以及碳水化合物等形成的风味前体物质, 经豆乳加工过程诱导发生一系列变化而产生的各种挥发性成分共同形成的, 没有哪种物质能够代表豆乳的整体风味。至今, 在豆乳中发现的挥发性风味物质大约有 70 种以上<sup>[4-10]</sup>, 主要包括醛类、醇类、酮类、酯类、酸类等。以下列出了豆乳中主要的风味化合物。

(1)醛类: 甲硫基丙醛、2-甲基-丁醛、3-甲基-丁醛、戊醛、己醛、苯甲醛、庚醛、辛醛、壬醛、反-2-戊烯醛、反-2-己烯醛、反-2-庚烯醛、反-4-庚烯醛、反-2-辛烯醛、反-2-壬烯醛、反-2-癸烯醛、反,反-2,4-庚二烯醛、反,反-2,4-壬二烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛、反,顺-2,4-癸二烯醛。

(2)醇类: 甲硫醇、戊醇、2-戊醇、己醇、2-己醇、庚醇、1-辛烯-3-醇、癸醇、麦芽糖醇。

(3)酮类: 2,3-乙酰基丙酮、3-羟基-2-丁酮、2,3-丁二酮、2,3-戊二酮、1-戊烯-3-酮、2-庚酮、1-辛烯-3-酮、3-羟基-2-甲基-4-吡喃酮、2'-氨基苯乙酮。

(4)酯类: 丁酸乙酯、己酸乙酯、庚酸乙酯、4-壬内酯。

(5)呋喃类: 2-乙基-呋喃、2-戊基-呋喃。

(6)吡啶类: 2-戊基-吡啶。

(7)酸类: 冰乙酸、丙酸、丁酸、己酸、辛酸。

(8)其他: D-柠檬烯、2-乙酰基-1-吡咯啉、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、2-乙酰基噻唑、2-乙酰基-2-噻唑啉、愈创木酚、乙酰基愈创木酚、2-甲氧基-4-乙烯基苯酚、n-丁基-苯、二甲基硫化物、二甲基三硫化物。

Lv 等<sup>[11]</sup>采用动态顶空稀释分析(DHDA)和气谱-质谱-嗅探联用(GC-O-MS)的方法确定了影响豆乳风味的 12 种关键性成分, 其中己醛对豆乳风味的贡献最大, 然后依次是 3-甲基丁醛、反-2-己烯醛、1-辛烯-3-醇、反-2-辛烯醛、己醇、戊醇、壬醛、冰乙酸、反-2-壬烯醛、苯甲醛以及反,反-2,4-癸二烯醛。Lozano 等<sup>[8]</sup>也曾同样的方法分析了豆乳风味物质, 虽然制备豆乳的方法有差异, 但研究结果证实, 己醛、反-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇以及反,反-2,4-癸二烯醛对豆乳风味有重要贡献。此外, Kaneko 等<sup>[7]</sup>在研究不同品种大豆制备的豆乳风味时得到了类似的结论; 他们还认为反,反-2,4-壬二烯醛也是影响豆乳风味的关键物质, 而不同风味物质在不同品种大豆制备的豆乳中也存在一定的差异。

## 3 豆乳中风味物质的形成机制

### 3.1 酶促反应

一般来说, 豆乳的风味物质, 尤其是不良风味物质, 主要是由大豆脂肪氧化酶(LOX)专一催化具有顺,顺-1,4-戊二烯结构的多元不饱和脂肪酸(包括亚油酸、亚麻酸等), 氧化后生成具有共轭双键的脂肪酸氢过氧化物中间体, 再经脂肪酸氢过氧化物裂解酶分解而生成的短链化合物<sup>[12]</sup>。作为豆乳中不良风味的主要成分, 己醛正是通过此种途径生成, 其主要的前体物质为亚油酸, 而亚麻酸则是己烯醛、己烯醇等成分的前体物质<sup>[6]</sup>。

### 3.2 非酶促反应

豆乳中的某些风味成分并非由酶促反应生成。Lee 等<sup>[13]</sup>认为, 2-戊基-呋喃只存在于光照条件下储藏的大豆粉中, 由于豆乳中的核黄素有助于单线态氧的生成, 此种物质很可能形成于亚油酸和单线态氧诱导的特殊光氧化反应。Frankel 等<sup>[14]</sup>研究认为 1-辛烯-3-醇和反-2-壬烯醛也是通过类似的途径生成的。另外, Kaneko 等<sup>[7]</sup>结合文献报道认为, 2-乙酰基-1-吡咯啉、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、甲硫基丙醛以及 2'-氨基苯乙酮可能是氨基酸或生大豆的代谢产物, 3-羟基-2-甲基-4-吡喃酮可能来源于糖胺化合物或还原糖。而加热过程能够促进豆乳中低聚糖、氨基酸或是脂肪酸的进一步降解反应, 从而生成更多的风味物质<sup>[15]</sup>, 如 2-甲氧基-4-乙烯基苯酚就是阿魏酸的热降解产物<sup>[16]</sup>。美拉德反应产物中也包含一些醛类、醇类和呋喃类物质<sup>[17]</sup>。

### 3.3 豆乳成分与风味物质的相互作用

豆乳风味物质生成以后, 会与豆乳中的其他成分(主要是蛋白质、氨基酸)发生相互作用, 对豆乳风味轮廓的呈

现有一定的影响。Gremli<sup>[18]</sup>在研究风味化合物与大豆蛋白的相互作用时证实, 醇类物质几乎不与大豆蛋白发生作用, 而醛类、酮类物质与大豆蛋白存在显著的相互作用, 其中有一部分风味成分通过不可逆反应与大豆蛋白永久结合, 而更多的则以可逆形式与蛋白结合, 从而抑制了此类物质风味的发挥, 相对于饱和醛类, 不饱和醛类具有更强的滞留作用。酚类物质也与蛋白质作用, 但在含有一个咪啉环的酮类物质中, 分子量小的风味成分不与蛋白质发生作用。另外, 在与蛋白质结合的风味成分与自由风味成分之间存在一个平衡, 此平衡不受添加到体系中的风味成分含量的影响。Rackis<sup>[19]</sup>研究发现, 有些不良风味的小分子化合物能与大豆蛋白中的末端氨基和羧基牢固结合, 形成较为复杂的化合物, 使得不良风味不易除去。Damodaran 和 Kinsella<sup>[20,21]</sup>通过平衡透析实验证实, 风味小分子与大豆蛋白通过疏水作用结合, 从而导致风味成分的挥发性降低, 其中, 7S 与 11S 的结合能力不同, 相比之下, 11S 几乎没有结合能力, 而 7S 相当于大豆蛋白的结合能力。与许多植物蛋白或动物蛋白相比, 大豆蛋白与风味成分的结合位点较少, 疏水性不强, 因此结合能力较差且可逆, 通过合适的条件去除不良风味是可行的<sup>[22]</sup>。

#### 4 豆乳风味的影响因素

豆乳风味受到脂肪、脂肪酸、LOX 以及蛋白质等多种组分的影响, 其中, LOX 的活性及组成是影响豆乳风味最为重要的因素。大豆的 LOX 活性与豆乳风味的相关性高达 0.82<sup>[23]</sup>。在 LOX 的三种同工酶(LOX1、LOX2、LOX3)中, LOX2 在豆乳挥发性风味物质的形成中起主要作用, LOX1 次之, LOX3 作用最小。

##### 4.1 LOX 对豆乳风味的影响

Hildebrand 等<sup>[24]</sup>在探讨大豆 LOX 与己醛含量的关系时, 证明大豆 LOX 的活性与己醛的生成量密切相关, 同时发现大豆在生长和储存期间就有己醛生成, 以 LOX 引起的酶促氧化为主; 若干法破碎豆粒成粉, 不管酶的活性如何, 己醛的含量都不会明显增加, 但若用水浸泡大豆, 则酶活越高, 己醛含量就越高, 这说明水对加重大豆的不良风味起着重要的作用, 而大豆遇水后己醛强度增强可能与蛋白质的分散及脂肪酶的活性加强有关。另外, LOX 对游离脂肪酸的作用活性远远大于对脂肪的活性。

Wang 等<sup>[25]</sup>在研究大豆 LOX 酶活与风味物质的关系时发现, 无论是己醛还是己醇, 其含量与 LOX 的活性并没有显著的线性关系, 因为在 NADH 或 NADPH 存在时, 乙醇脱氢酶会催化己醛转变为己醇。然而, 己醛与己醇的总量与 LOX 酶活存在较为显著的相关性。

##### 4.2 LOX 活性的影响因素

(1)温度是影响 LOX 活性的重要因素。酶活在低温下

能保持较高水平, 高于 40℃就会急剧下降。温度越高, 热处理时间越长, 酶活下降的幅度就越大。有研究报道, 当温度大于 80℃时, LOX 大部分失去活力; 大于 84℃时, 则彻底失活<sup>[26]</sup>。

(2)pH 对 LOX 酶活的影响并非由酸碱作用于整个酶分子而影响其解离状态, 而是通过改变酶的活性中心或与之相关基团的解离状态, 从而导致酶的活性状态发生改变<sup>[27]</sup>。LOX 在 pH7-9 范围内的活性最高, 因此可看作 LOX 的最适 pH 作用范围。

(3)无机盐对大豆 LOX 的活性有一定的稳定作用, 但其对酶液体系稳定性的影响并非阴离子或阳离子的单独作用<sup>[28]</sup>。一般来说, 在阴离子相同的情况下, 二价阳离子的稳定作用高于一价阳离子; 而在一价阳离子中, 钠盐的稳定作用高于钾盐, 但若改变阴离子, 两者的稳定作用也会发生变化<sup>[29]</sup>。另外, 无机盐的碱性越强, 酶活的稳定性就越弱。

(4)有机电解质与大豆 LOX 的结合能够阻碍外界对酶的破坏作用, 从而有效提高 LOX 的稳定性。而糖类、多元醇等有机非电解质对 LOX 的稳定性也有一定的作用, 其作用可能是通过提高蛋白质展开过程的活化能, 增加了体系的自由能, 从而阻止了酶的失活<sup>[28]</sup>。

因此, 上述因素在影响 LOX 活性的同时, 也会导致豆乳整体风味的呈现发生变化。

#### 5 国内外豆乳风味改善方法的研究

##### 5.1 国外豆乳风味改善方法的研究

尽管豆乳的营养价值很高, 许多西方国家的消费者却难以接受其不良风味<sup>[4,30]</sup>。所谓豆乳的不良风味, 主要是指一些特定的风味物质单独或结合作用所产生的令人不愉快的感官体验, 诸如豆腥味、青草味、苦涩味、生味、油漆味、收敛味、金属味、油脂氧化味等<sup>[31-33]</sup>。

为了消除豆乳中的不良风味, 国外已有大量的文献报道, 其研究主要集中在消除或钝化大豆 LOX 的活性方面。LOX 主要分布在大豆子叶中, 一旦细胞破裂就会迅速激活活性<sup>[32]</sup>, 在水和氧气存在的条件下氧化油脂, 是导致豆乳不良风味的重要因素。

###### 5.1.1 LOX 缺失品种的选育

近年来, 一些育种专家针对性地选育了一些 LOX 缺失品种<sup>[34]</sup>。目前, 已有几个 LOX 缺失体品种应用于实际生产中, 如 L-Star, IA2032, Kyushu No.111 和 Yumeyutaka, 通过对这些品种大豆制得的豆乳中风味化合物含量的检测可知, 其中的关键性风味物质如己醛、己醇等的浓度明显低于常规豆乳<sup>[4,35]</sup>。

###### 5.1.2 钝化 LOX 酶活的方法

钝化大豆 LOX 酶活也是一种较为有效的手段, 主要包括热处理法和化学法。

热处理法是一种常见的钝化 LOX、降低豆乳不良风

味的方法<sup>[36]</sup>。有研究报道,用60℃的热水浸泡大豆,并添加乙醇和NaHCO<sub>3</sub>(NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)时,豆乳中的油漆味会发生变化;用50℃浸泡处理能促进挥发物的形成,而沸水和NaHCO<sub>3</sub>处理却抑制其产生<sup>[37]</sup>。在豆乳碾磨过程中用80~100℃的热水代替传统方法使用的冷水,可以有效钝化LOX,去除豆乳中大量的不良风味物质。碾磨温度不同,己醛等关键性风味物质的含量变化也不同。因此,选择合适的碾磨温度也能调节豆乳风味<sup>[30,38]</sup>。Yuan等<sup>[39]</sup>采用直火和蒸汽加热两种方式加热豆乳时发现,与传统的直火加热相比,蒸汽加热制备的豆乳中己醛、己醇、1-辛烯-3-醇和反-2-壬烯醛等含量都有所降低,而反,反-2,4-癸二烯醛的含量却是升高的。此外,采用不同的杀菌方式,如高温杀菌、UHT杀菌等工艺时,豆乳中的甜香味会随杀菌温度的升高而增加<sup>[8,40-42]</sup>。尽管热处理可使一些豆腥成分挥发,但加热时间过长、温度过高又会使蛋白质不溶,且不易为人体吸收,豆乳的口感品质也会下降<sup>[32]</sup>。

在化学法中,最常用的是酸碱法,这种方法主要通过调节pH来抑制大豆LOX的活性。在pH4以下将大豆浸泡15min可显著抑制80%的LOX酶活<sup>[43]</sup>。金属螯合法是利用EDTA、磷酸盐、酒石酸、柠檬酸等螯合剂螯合Fe<sup>3+</sup>的方法来抑制LOX活性<sup>[44]</sup>,由于大豆LOX是一种非血红素铁蛋白,在其氧化脂肪酸的过程中,Fe<sup>3+</sup>作为一种电子传递体能够促进氧化还原反应的发生,若使用一定量的螯合剂作用于Fe<sup>3+</sup>,就能有效阻止氧化反应的发生,减少不良风味物质的形成。使用碘酸钾、半胱氨酸、Vc、亚硫酸盐等抗氧化剂也可钝化LOX的活性,这是因为这些抗氧化剂能够将大豆LOX中的-S-S-还原成-SH,从而破坏LOX的空间结构,使其失去活力<sup>[45]</sup>。

另外,大豆发芽法或是高压静电场、脉冲电场等技术也能有效抑制大豆LOX的活性<sup>[12,32,46]</sup>。

### 5.1.3 其他改善豆乳风味的方法

上述方法都能不同程度地钝化酶活,除此以外,还有一些方法也能有效降低豆乳中的不良风味。比如,真空冷磨法能够隔绝空气,阻止酶促氧化反应的发生,从而减少不良风味的产生,非热处理又能保证口感品质不会下降<sup>[32]</sup>。真空脱臭则是将已生成的不良风味从豆乳体系中脱除的一种办法。此外,在豆乳中添加适量的环糊精能有效减少豆腥成分的挥发,主要是因为其具有伸缩性的桶状结构,能够捕捉风味分子形成环糊精-客体分子复合物,从而达到吸附包埋的效果<sup>[1,9]</sup>。蛋白脱酰胺法能够降低大豆蛋白与豆腥物质的结合作用,从而有助于不良风味成分的去<sup>[47]</sup>。

然而,从本质上说,无论是去除或钝化酶活,阻止酶反应的发生,还是将生成的风味物质进行脱臭、包埋或释放,都并非只针对不良风味物质,这些方法对豆乳的整体风味都有影响。从研究结果看,豆乳的整体风味显著下降,甚至可以说失去了豆乳原有的特征风味,但是对于西方消

费者来说,他们更能接受这样的产品,而加工者只需根据市场需求,在豆乳中再添加一些风味掩盖剂或调节剂,就能满足不同消费者的口味喜好。

## 5.2 国内豆乳风味改善方法的研究

在东亚地区,豆乳的食用已有两千多年的历史,与欧美国家的消费者相比,东亚地区的消费者对豆乳中的“不良风味”并没有那么敏感,相反地,他们更钟爱风味较为丰富的大豆产品。可以看出,两个地区的消费者对豆乳风味的偏好有着较大的差异性,因此,有关豆乳风味的研究方向也应有一定的区别。

### 5.2.1 国内豆乳风味改善的研究方向

目前,由于国内的许多研究借鉴了国外的一些研究理念和手段,因而重点关注的仍然是不良风味的去除和相关方法的改进。事实上,在豆乳加工过程中,会产生一些令人喜爱的风味物质。例如在Lv等<sup>[11]</sup>鉴定的12种关键性成分中,3-甲基丁醛、反-2-辛烯醛、壬醇和反-2-壬烯醛分别呈现黑巧克力、青瓜、绿菜花和水果味,这些物质区别于不良风味成分,被称作“非豆腥味”物质。值得一提的是,不同风味物质的阈值和在豆乳体系中的含量都不相同,同一风味物质在不同浓度或不同环境体系中的风味呈现也很可能不同<sup>[48]</sup>,而这些风味物质带给人们的感官体验也不尽相同,因此这一方面的研究还有待完善。然而可以确认的是,不良风味在豆乳加热前有很高的强度,几乎可以作为生豆浆的主导风味,但在加热过程中其强度却逐渐减弱,取而代之的是令人喜爱的“非豆腥味”,且其强度随着温度的升高而逐渐加强并保持稳定。这就是东亚地区人们普遍接受甚至喜爱的豆乳特征风味,明显区别于生豆乳的不良风味。但如果采用LOX缺失的大豆品种或是在制作豆乳前使LOX完全失活,豆乳的整体风味则较淡。由此可知,在大豆加工过程中采用一些方法去除不良风味的同时,也会影响非豆腥风味的生成。因此,采取措施使大豆LOX适度失活可能是针对东亚地区改善豆乳风味的主要目标。

### 5.2.2 国内豆乳风味的改善的方法

吕艳春等<sup>[49]</sup>对中国传统方法、热水碾磨法和焙烤法这三种方法加工的豆乳进行研究时发现,三种豆乳的风味特点与LOX呈正相关关系。其中,中国传统法制作豆乳中的豆腥味和甜香味都很浓郁,焙烤法制作的豆乳风味最淡,其对应酶活也最低,而热水碾磨的豆乳风味和酶活介于两者之间。Lv等<sup>[11]</sup>研究时还发现,大豆热烫和磨浆温度达到80℃以上且时间在2~6min时,酶活能降低至38%~57%;同时,豆乳的不良风味迅速下降,而非豆腥味则得到了较大程度的保留<sup>[32]</sup>。另外,有研究表明,与常压条件下的煮浆方式相比,高温密闭煮浆5~10min也有类似效果<sup>[50]</sup>。

## 6 展望

目前,世界豆乳的消费量正逐年增加,欧美国家基本

建立了一套较为完善的豆乳加工生产体系, 能够较好地迎合当地消费者的口味喜好和健康需求。相比之下, 我国的豆乳生产仍停留在作坊式规模上, 豆乳风味品质参差不齐, 即使有些企业已实现了小型工业化生产, 其生产方式仍沿用传统生浆法或熟浆法, 豆乳风味品质的改善并未受到较好的重视。另一方面, 许多豆乳风味研究关注的侧重点是不良风味的去除, 研究结果与实际的市场需求有一定的差距, 因此应用于生产加工的实践性不强。据此, 如何针对国内消费者的喜好, 在原有生产方式的基础上结合国外先进研究成果, 发展新技术和新工艺, 改善豆乳风味品质的同时, 又能较好地保留豆乳的营养成分, 是今后工作的重点。

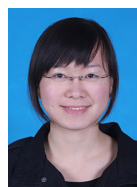
#### 参考文献

- [1] Damodaran S, Arora A. Off-flavor precursors in soy protein isolate and novel strategies for their removal [J]. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2013, 4: 327–346.
- [2] Rosenthal A, Deliza R, Cabral LMC, *et al.* Effect of enzymatic treatment and filtration on sensory characteristics and physical stability of soymilk [J]. *Food Control*, 2003, 14: 187–192.
- [3] Min S, Yu Y, Yoo S, *et al.* Effect of soybean varieties and growing locations on the flavor of soybean milk [J]. *J Food Sci*, 2005, 70: 1–7.
- [4] Yuan SH, Chang SKC. Selected odor compounds in soybean milk as affected by chemical composition and lipoxygenases in five soybean materials [J]. *J Agric Food Chem*, 2007a, 55(2): 426–431.
- [5] Zhang Y, Guo ST, Liu ZS, *et al.* Off-flavor related volatiles in soymilk as affected by soybean variety, grinding, and heat-processing methods [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60: 7457–7462.
- [6] Achouri A, Boye JI, Zamani Y. Identification of volatile compounds in soymilk using solid-phase microextraction-gas chromatography [J]. *Food Chem*, 2006, 99: 760.
- [7] Kaneko S, Kumazawa K, Nishimura O. Studies on the key aroma compounds in soy milk made from three different soybean cultivars [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59: 12204–12209.
- [8] Lozano PR, Drake M, Benitez D, *et al.* Instrumental and sensory characterization of heat-induced odorants in aseptically packaged soy milk [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55: 3018–3026.
- [9] Suratman LLI, Jeon IJ, Schmidt KA. Ability of cyclodextrins to entrap volatile beany flavor compounds in soymilk [J]. *J Food Sci*, 2004, 69(2):109–113.
- [10] Zhou A, Boatright WL, Johnson LA, *et al.* Binding properties of 2-pentyl pyridine to soy protein as measured by solid phase microextraction [J]. *J Food Sci*, 2002, 67(1):1142–1145.
- [11] Lv YC, Song HL, Li X, *et al.* Influence of blanching and grinding process with hot water on beany and non-beany flavor in soymilk [J]. *J Food Sci*, 2011, 76(1): S20–S25.
- [12] Li YQ, Chen Q, Liu XH, *et al.* Inactivation of soybean lipoxygenase in soymilk by pulsed electric fields [J]. *Food Chem*, 2008, 109: 408–414.
- [13] Lee JY, Min S, Lee EO, *et al.* Volatile compounds formation in soy flour during light storage by singlet oxygen oxidation [J]. *J Food Sci*, 2003, 68:1933–1937.
- [14] Frankel EN, Neff WE, Selke E. Analysis of autoxidized fats by gas chromatography-mass spectrometry: VII. volatile thermal decomposition products of pure hydroperoxides from autoxidized and photosensitized oxidized methyl oleate, linoleate and linolenate [J]. *Lipids*, 1981, 16: 279–285.
- [15] 丁耐克. 食品风味化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1996.  
Ding NK. *Food flavor chemistry* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1996.
- [16] Fiddler W, Parker WE, Wasserman AE, *et al.* Thermal decomposition of ferulic acid [J]. *J Agric Food Chem*, 1967, 15: 757–761.
- [17] Kwok KC, Niranjana K. Review: Effect of thermal processing on soymilk [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1995, 30:263–295.
- [18] Gremli HA. Interaction of flavor compounds with soy protein [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1974, 51:95–97.
- [19] Rackis JJ. Spectrophotometric method for determination of lipoxygenase activity [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1979, 56:262–268.
- [20] Damodaran S, Kinsella JE. Interaction of carbonyls with soy protein: thermodynamic effects [J]. *J Agric Food Chem*, 1981a, 29: 1249–1253.
- [21] Damodaran S, Kinsella JE. Interaction of carbonyls with soy protein: conformational effects [J]. *J Agric Food Chem*, 1981b, 29: 1253–1257.
- [22] Wang K, Arntfield SD. Binding of carbonyl flavours to canola, pea and wheat proteins using GC/MS approach [J]. *Food Chem*, 2014, 157: 364–372.
- [23] Achouri A, Boye JI, Zamani Y. Soybean variety and storage effects on soymilk flavor and quality [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2008, 43:82–90.
- [24] Hildebrand DF, Kito MJ. The relationship between lipoxygenase and n-hexanol level in soybean [J]. *J Agric Food Chem*, 1984,32:815.
- [25] Wang ZH, Dou J, Macura D, *et al.* Solid phase extraction for GC analysis of beany flavours in soymilk [J]. *Food Res Int*, 1998, 30:503–511.
- [26] 刘志强, 王珍辉. 酶法脱除豆乳腥味因子研究 [J]. *食品工业科技*, 2003, 24:17.  
Liu ZQ, Wang ZH. Study on beany flavor in the soymilk removed by enzymolysis [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2003, 24:17.
- [27] Alobaidy HM, Siddiqi AM. Properties of broad bean lipoxygenase [J]. *J Food Sci*, 1981, 46(7):622–629.
- [28] Axelrod B, Cheesbrough TM, Laakso S. Lipoxygenase from soybeans [J]. *Methods Enzymol*, 1981, 71:441–451.
- [29] Baker EC, Mustakas GC. Heat inactivation of trypsin inhibitor, lipoxygenase and urease in soybeans: effect of acid and base additives [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1972, 50: 137–141.
- [30] Mizutani T, Hashimoto H. Effect of grinding temperature on hydroperoxide and off-flavor contents during soymilk manufacturing process [J]. *J Food Sci*, 2004, 69(3): SNQ112–SNQ116.
- [31] Whetstone MEC, Cadwallader KR, Drake MA. Characterization of aroma compounds responsible for the rosy/floral flavor in cheddar cheese [J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53: 3126–3132.
- [32] Giri SK, Mangaraj S. Processing influences on composition and quality attributes of soymilk and its powder [J]. *Food Eng Rev*, 2012, 4: 149–164.
- [33] Torres-Penaranda AV, Reitmeier CA. Sensory descriptive analysis of soymilk [J]. *J Food Sci*, 2001, 66(2): 352–356.
- [34] Torres-Penaranda AV, Reitmeier CA, Wilson LA. Sensory characteristics of soymilk and tofu made from lipoxygenase-free and normal soybeans [J]. *J Food Sci*, 1998, 63(6): 1084–1087.

- [35] Kobayashi A, Tsuda Y, Hirata N, *et al.* Aroma constituents of soybean [glycine max (L.) Merrill] milk lacking lipoxygenase isozymes [J]. *J Agric Food Chem*, 1995, 43(9):2449–2452.
- [36] Vishwanathan KH, Singh V, Subramanian R. Wet grinding characteristics of soybean for soymilk extraction [J]. *J Food Eng*, 2011, 106: 28–34.
- [37] Ashraf HRL, Snyder HE. Influence of ethanolic soaking of soybeans on flavor and lipoxygenase activity of soymilk [J]. *J Food Sci*, 1981, 46(4): 1201–1204.
- [38] Sun CX, Cadwallader KR, Kim H. Comparison of key aroma components between soymilks prepared by cold and hot grinding methods [J]. *ACS Symposium Series*, 2010, 1059: 361–373.
- [39] Yuan SH, Chang SKC. Selected odor compounds in cooked soymilk as affected by soybean materials and direct steam injection [J]. *J Food Sci*, 2007b, 72(7): 481–486.
- [40] Yuan SH, Chang SKC, Liu ZS, *et al.* Elimination of trypsin inhibitor activity and beany flavor in soy milk by consecutive blanching and ultra-high-temperature (UHT) processing [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56:7957–7963.
- [41] Polisel-Scopel FH, Hernández-Herrero M, Guamis B, *et al.* Comparison of ultra high pressure homogenization and conventional thermal treatments on the microbiological, physical and chemical quality of soymilk [J]. *Food Sci Technol*, 2012, 46: 42–48.
- [42] Polisel-Scopel FH, Gallardo-Chacón JJ, Juan B, *et al.* Characterisation of volatile profile in soymilk treated by ultra high pressure homogenization [J]. *Food Chem*, 2013, 141: 2541–2548.
- [43] Korde VV, Ingle UM. Effect of different chemicals on beany flavor of soybean [J]. *Indian Botan Rep*, 1993, 11:1–2.
- [44] 代养勇, 曹健, 董海洲, 等. 大豆食品豆腥味研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2007, 22:50–52.  
Dai YY, Cao J, Dong HZ, *et al.* Review of research on beany flavor of soy foods [J]. *J Chin Cereal Oil Assoc*, 2007, 22: 50–52.
- [45] 吴玉莹, 钟芳, 王璋. 无腥味豆乳加工条件的确定[J]. *无锡轻工业大学学报*, 2003, 22:5–10.  
Wu YY, Zhong F, Wang Z. Optimization of processing parameters of beany-free soymilk production [J]. *J Wuxi Univ Light Ind*, 2003, 22: 5–10.
- [46] Jiang SS, Cai WX, Xu BJ. Food quality improvement of soy milk made from short-time germinated soybeans [J]. *Food*, 2013, 2(2): 198–212.
- [47] Suppavarasatit I, Lee SY, Cadwallader KR. Effect of enzymatic protein deamidation on protein solubility and flavor binding properties of soymilk [J]. *J Food Sci*, 2013, 78(1): C1–C7.
- [48] Simian H, Robert F, Blank I. Identification and synthesis of 2-heptanethiol, a new flavor compound found in bell peppers [J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52: 306–310.
- [49] 吕艳春, 郭顺堂. 三种方法加工的豆乳的风味特点[J]. *大豆科学*, 2010, 29(3): 494–497.  
Lv YC, Guo ST. Flavor Characteristic of soymilk made by three different processing methods [J]. *Soy Sci*, 2010, 29(3): 494–497.
- [50] 施小迪. 微波处理、高温煮浆对豆乳风味的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.  
Shi XD. The effect of microwave treatment and high-temperature heating on the soymilk flavor [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.

(责任编辑: 杨翠娜)

## 作者简介



施小迪, 博士研究生, 主要研究方向为食品科学。  
E-mail: s11070783@163.com



郭顺堂, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品科学。  
E-mail: shuntang@cau.edu.cn