

大豆油脂体稳定性与大豆走油研究进展

张玉荣¹, 王 奕¹, 张咚咚¹, 赵金凤²

(1. 河南工业大学 粮食和物资储备学院, 郑州 450001; 2. 杭州市粮食收储有限公司, 杭州 311100)

摘要:大豆在储藏期间,其油脂体的稳定性容易因外界环境的改变而发生变化,进而引起大豆走油现象,导致大豆出油率降低,造成经济损失。为给大豆科学储藏及大豆油脂体的进一步加工利用提供理论参考,综述了大豆油脂体的组成与结构、影响大豆油脂体稳定性的因素、提高大豆油脂体稳定性的方法、走油对大豆品质的影响以及大豆走油的防控措施。大豆油脂体是储存脂质的亚细胞器,主要由磷脂、嵌在磷脂上的碱性蛋白质及由磷脂-蛋白质组成的半单位膜包围的三酰基甘油组成。大豆种类、温度、pH、提取方法等均会影响大豆油脂体的稳定性,通过控制温度、添加多酚和多糖可以提高大豆油脂体稳定性。此外,走油会使大豆的色泽加深、营养品质和加工制品品质下降,通过适时收获大豆、减少大豆运输过程中的机械损伤、降低大豆水分、控制大豆储藏温度以及采用气调技术可以防控大豆走油。未来可重点从大豆油脂体结构变化方向入手,探讨大豆走油机制。

关键词:大豆;油脂体;稳定性;走油

中图分类号:TS221;TS222+.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)04-0103-08

Research progress on soybean oil body stability and soybean oil migration

ZHANG Yurong¹, WANG Yan¹, ZHANG Dongdong¹, ZHAO Jinfeng²

(1. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Hangzhou Grain Storage Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: During the storage period of soybean, when the external environment changes, the stability of soybean oil body is easy to change, which leads to the phenomenon of soybean oil migration, resulting in the decrease of soybean oil yield and economic loss. In order to provide theoretical reference for the scientific storage of soybean and the further processing and utilization of soybean oil body, the composition and structure of soybean oil body, the factors affecting the stability of soybean oil body, the methods for improving the stability of soybean oil body, the influence of oil migration on soybean quality and the prevention and control measures of soybean oil migration were reviewed. Soybean oil bodies are suborganelles for storing lipid, and they are mainly composed of phospholipids, alkaline proteins embedded in phospholipids and triacylglycerol surrounded by a half-unit membrane composed of phospholipids-proteins. Soybean species, temperature, pH and extraction method all affect the stability of soybean oil body. The stability of soybean oil body can be improved by controlling temperature, adding polyphenols and polysaccharides. In addition, oil migration will deepen the color of soybean and reduce the nutrition of soybean and quality of processed products. Soybean oil migration can be prevented and

收稿日期:2023-10-09;修回日期:2024-10-30

基金项目:财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-03);中国科协第五届青年人才托举工程项目(2019QNRC001)

作者简介:张玉荣(1967),女,教授,硕士生导师,研究方向为粮油品质检验与控制(E-mail)yurongzh@163.com。

通信作者:张咚咚,副教授(E-mail)medong@126.com。

controlled by timely harvesting of soybean, reducing mechanical damage during soybean transportation, reducing soybean moisture, controlling soybean storage temperature and adopting air conditioning technology. In the future, the mechanism of soybean oil migration can be explored from the perspective of changes in the structure of soybean

oil body.

Key words: soybean; oil body; stability; oil migration

大豆是我国消费最广泛的油料之一,其含有约20%的脂肪^[1]。根据大豆来源可分为国产大豆与进口大豆,国产大豆主要用于直接食用、加工豆制品及制备大豆蛋白,进口大豆则主要用于加工食用油^[2]。大豆种皮薄、发芽孔大、吸水性强,在储藏过程中极易发生局部发热,进而出现走油赤变现象,导致大豆的营养品质与出油率降低,带来经济损失^[3]。当前广泛认为大豆走油赤变的原因是高温使蛋白质凝固聚集,破坏了蛋白质与脂肪稳定共存的乳化状态,油脂以油滴形式析出籽粒表面,析出的脂肪进一步氧化、色素沉积导致大豆赤变^[4]。有研究发现碧根果油脂体完整性与稳定性的状态被破坏是造成碧根果油氧化的主要原因^[5]。

油脂体是一种广泛存在于大豆、花生等植物种子中储存脂质的亚细胞器,主要由三酰基甘油(TAG)、磷脂与碱性蛋白质组成^[6]。由于其磷脂-蛋白质组成的半单位膜提供的静电斥力与空间阻力,大豆油脂体具有良好的稳定性。作为一种天然的预乳化水包油乳液,大豆油脂体在食品工业中有较好的应用前景^[7],但食品加工体系的不断变化会导致大豆油脂体间发生不同的聚集、破裂、渗漏与氧化,大大降低其营养品质。先前研究多为单独研究大豆储藏期间走油、劣变或大豆油脂体在不同体系中稳定性的变化,将二者结合的研究鲜有报道。

本文综述了大豆油脂体的组成与结构、影响大豆油脂体稳定性的因素及提高稳定性的方法,同时介绍了走油对大豆品质的影响,以及预防大豆走油的措施,以期为大豆油脂体的高效应用及大豆的稳定储藏提供依据。

1 大豆油脂体的组成与结构

1.1 大豆油脂体的组成

大豆油脂体主要由 TAG、磷脂与碱性蛋白质组成,其中最主要的成分为 TAG^[8]。

大豆油脂体内源性蛋白主要包括油体蛋白(Oleosin)、油体钙蛋白(Caleosin)及油体固醇蛋白(Steroleosin)。油体蛋白是油脂体中最重要的蛋白质之一^[9]。油体钙蛋白具有与油体蛋白相似的结构,不同的是油体钙蛋白可以覆盖更大的油脂体表面,因此油体钙蛋白含量高的油脂体具有较好的稳定性^[10]。油体固醇蛋白是油脂体膜结合的一种微量的固醇结合脱氢还原酶,根据其相对分子质量分

为固醇蛋白 A 和固醇蛋白 B^[11]。除了内源性蛋白外,大豆油脂体表面还可以通过二硫键、分子间作用力等作用结合脂肪氧合酶、蛋白酶等外源性蛋白^[12]。

大豆油脂体中存在多种磷脂,其中最主要的为磷脂酰胆碱(PC)和磷脂酰丝氨酸(PS)^[13]。磷脂形成的分子层将 TAG 包裹于膜内,避免 TAG 与外环境接触,此外磷脂分子层还为油体蛋白提供嵌入位点^[14]。除了 TAG、蛋白质和磷脂外,大豆油脂体中还存在少量的生育酚、植物甾醇、黄酮类化合物及碳水化合物等微量成分。

1.2 大豆油脂体的结构

油脂体是由磷脂-蛋白质构成的半单位膜及膜内 TAG 组成的球体,粒径一般在 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ^[15]。TAG 表面约 80% 的区域被磷脂覆盖,其余 20% 的区域被油体蛋白、油体钙蛋白及油体固醇蛋白覆盖,蛋白质的亲水端伸向细胞质,疏水端则嵌入 TAG 中^[16]。油体蛋白与油体钙蛋白在中性条件下通过提供静电斥力与空间位阻维持油脂体的稳定性(图 1)^[8]。相较于其他油料,大豆油脂体具有更小的粒径与更高的油脂体膜蛋白含量,因此具有更高的结构稳定性^[13]。

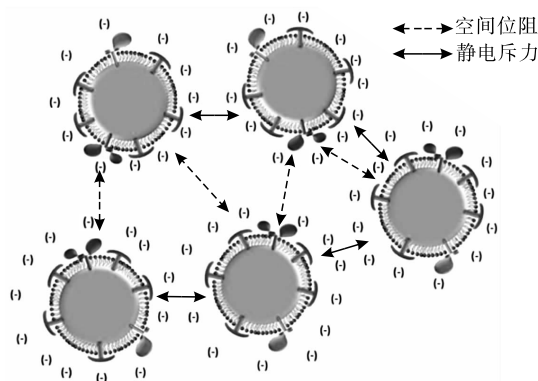


图 1 中性条件下大豆油脂体间的相互作用

Fig. 1 Interaction between soybean oil bodies under neutral condition

2 影响大豆油脂体稳定性的因素

2.1 大豆种类

不同种类的大豆其油脂体组成不同,高油大豆油脂体中不饱和脂肪酸、DL- α -生育酚和 γ -生育酚含量显著高于低油大豆油脂体,而高蛋白大豆油脂体中矿物质与活性肽含量高于低蛋白大豆油脂体,油脂体组成上的差异在一定程度上会影响油脂

体的稳定性^[17-18]。有研究探究了高油大豆油脂体与低油大豆油脂体上结构蛋白的差异,发现高油大豆油脂体的 α -螺旋含量高于低油大豆油脂体^[19]。Zhou等^[20]比较了3种高油大豆与3种高蛋白大豆在储藏期间油脂体组成、氧化稳定性及结构稳定性的变化,结果显示:在37℃储藏15d后,高油大豆油脂体中总生育酚的减少量显著高于高蛋白大豆油脂体($p < 0.05$);高蛋白大豆油脂体的脂质过氧化物(LPO)与硫代巴比妥酸反应物(TBARS)积累分别比高油大豆油脂体的高1.38倍与4.00倍;激光共聚焦显微镜观察发现,高蛋白大豆油脂体出现明显聚集,平均粒径显著增大。Wang等^[21]研究发现,储藏期间高油大豆油脂体与低油大豆油脂体中的不饱和脂肪酸、磷脂与生育酚含量均降低,试验结束时,高油大豆油脂体具有更高的Zeta-电位与更小的平均粒径,表明高油大豆油脂体絮凝程度更低,物理稳定性更高。

2.2 温度

温度对油脂体的影响主要包括2个方面:一方面,高温引起分子布朗运动加剧,分子间碰撞接触机会增加,导致油脂体聚集、粒径增大,促使油脂体稳定性降低;另一方面,适当的高温处理可以使脂肪氧合酶、蛋白酶等外源性蛋白变性,提升油脂体的稳定性。Ding等^[22]对大豆油脂体进行热处理,以探究大豆油脂体稳定性与油脂体蛋白的关系,结果显示:热处理使内源性蛋白发生变性,使大豆油脂体的Zeta-电位绝对值降低,降低了油脂体稳定性;通过激光扫描共聚焦显微镜观察热处理期间大豆油脂体的行为,发现随着加热温度的升高,大豆油脂体间的聚集程度明显上升,大豆油脂体粒径变大,油脂体稳定性降低。陈业明等^[23]研究发现,加热可以有效抑制内切蛋白酶P34的活性,除去大豆球蛋白、伴大豆球蛋白及过敏原Bd 30K等外源性蛋白,有利于内源性蛋白保留在油脂体上,进而提高油脂体稳定性。孙婕等^[24]采用高压蒸汽[(110±5)℃、(120±5)℃和(130±5)℃]对大豆油脂体进行灭酶处理,结果发现,随着蒸汽温度的升高,大豆油脂体粒径逐渐减小,Zeta-电位绝对值逐渐上升,表明短时间热处理可以提高油脂体稳定性。

2.3 pH

大豆油脂体的稳定性主要取决于油脂体膜上电荷间的静电斥力,在等电点时,油脂体表面净电荷为0,此时油脂体分子间相互作用减弱,油脂体间易出现絮凝、聚集,远离蛋白质等电点时,油脂体能够保

持较好的稳定性^[25]。刘子豪等^[26]分别将大豆粗油脂体与纯油脂体分散在不同pH缓冲液中,测得大豆粗油脂体与纯油脂体的等电点分别为pH 4.5和pH 5.5左右,接近等电点时2种大豆油脂体均出现失稳现象,粒径也无法准确测得,远离等电点时2种油脂体均能保持较好的稳定性。宋哈钰等^[27]探究了不同碱性提取条件(pH 8.0、pH 9.0、pH 10.0及pH 11.0)对大豆油脂体组成及氧化稳定性的影响,结果显示,随着提取pH的升高,大豆油脂体中蛋白质质量分数下降,大部分外源性蛋白被洗脱,大豆油脂体粒径与Zeta-电位绝对值减小,储藏期间大豆油脂体过氧化值(POV)和TBARS值上升被抑制,因此高pH条件下提取的大豆油脂体具有更高的氧化稳定性。

2.4 提取方法

当前油脂体的提取方法主要包括水相提取法、酶法及缓冲液法^[28-30],不同提取方法对大豆油脂体的影响主要体现在所提取大豆油脂体的组成与含量上^[31]。冯雪等^[30]探究了缓冲液法、水相提取法及酶法3种提取方法对大豆油脂体组成与氧化稳定性的影响,发现酶法提取的大豆油脂体的蛋白质、脂肪和 γ -生育酚含量显著高于缓冲液法和水相提取法,储藏期间大豆油脂体POV、酸值(AV)与TBARS值的变化均反映了酶法提取的大豆油脂体具有更好的氧化稳定性。田其英等^[32]考察了水相提取法、蔗糖辅助提取法以及酶与蔗糖辅助提取法对大豆油脂体功能性的影响,结果显示,随着提取次数的增加,大豆油脂体表面外源性蛋白含量减少,酶与蔗糖辅助提取法得到的大豆油脂体具有更高的乳液稳定性与乳化活性,蔗糖辅助提取法得到的大豆油脂体具有更高的乳化稳定性。还有研究采用水相提取法提取大豆粗油脂体与大豆纯油脂体,通过十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)分析发现,大豆粗油脂体中外源性蛋白为7S球蛋白、11S球蛋白、过敏原蛋白和胰蛋白酶抑制剂,外源性蛋白的存在导致大豆粗油脂体拥有较大的粒径,在储藏过程中更易发生聚集^[33],进而影响大豆粗油脂体的稳定性。

2.5 其他因素

除上述因素外,孙禹凡等^[34]研究了油体蛋白与PC之间的作用对重组油脂体乳液稳定性的影响,结果发现,在油体蛋白与PC质量比值为1.5时,重组油脂体乳液分布均匀,具有较小的粒径及最佳的储藏稳定性。赵路苹等^[35]将不同浓度NaCl、尿素、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)和十二烷基硫酸钠

(SDS)加入大豆油脂体中,考察其对大豆油脂体外源性蛋白的去除效果,发现 NaCl 和 EDTA - 2Na 处理不能有效去除大豆油脂体外源性蛋白,而添加浓度大于 6 mol/L 的尿素可有效去除大豆油脂体外源性蛋白,添加 SDS 不仅不能去除外源性蛋白,还会取代油体蛋白,破坏大豆油脂体的稳定结构。

3 提高大豆油脂体稳定性的方法

3.1 控制温度

温度是影响大豆油脂体稳定性的主要因素,较低温度下储藏的大豆油脂体具有更高的稳定性。崔春利等^[36]考察了温度对大豆油脂体稳定性的影响,结果发现:随着温度的升高,大豆油脂体 Zeta - 电位绝对值降低,粒径变化较小;高温条件下储藏的大豆油脂体氧化稳定性更差,POV 上升幅度较大,相比之下,在 25 °C 下储藏的大豆油脂体能够保持较高的结构稳定性和氧化稳定性。

3.2 添加多酚

多酚是一种广泛存在于植物细胞内的活性物质,能够有效提高食品体系的稳定性^[37]。有研究探究了儿茶素、白藜芦醇和没食子酸对大豆油脂体稳定性的影响,发现儿茶素和白藜芦醇的添加可以显著降低大豆油脂体的粒径,白藜芦醇和没食子酸的添加可以有效提升大豆油脂体的储藏稳定性,3 种酚类物质的添加可以延缓大豆油脂体的氧化,且浓度越高延缓作用越明显^[38]。Sun 等^[39]将表没食子儿茶素 - 3 - 没食子酸酯(EGCG)共价偶联在油体蛋白上,发现 EGCG 的加入显著改善了油体蛋白结构,油体蛋白 - EGCG 稳定的重组油脂体具有更均匀的液滴分布及更高的热稳定性。

3.3 添加多糖

多糖主要从 2 个方面稳定油脂体:一方面,多糖可通过与界面蛋白产生交联及静电相互作用,提高油脂体的稳定性;另一方面,多糖可在油脂体表面形成三维网络产生空间位阻,减少油脂体聚集^[40],进而增加油脂体稳定性。Su 等^[41]将阴离子海藻酸钠(ALG)添加在大豆油脂体中,结果发现:在 pH 4.5 条件下,ALG 通过强静电相互作用吸附在大豆油脂体表面;pH 为 4 ~ 8 时,ALG 包覆的大豆油脂体比未包覆的大豆油脂体的粒径更小且分布更加均匀;pH 为 7.0 时,添加 ALG 的大豆油脂体在面对 NaCl 胁迫时仍能保持较好的稳定性,而未包覆的大豆油脂体随着 NaCl 浓度的增加逐渐聚集。何胜华等^[42]考察了不同外界环境(pH、离子浓度和热处理)胁迫下添加大豆多糖(SSPS)和魔芋葡甘聚糖(KGM)对油菜籽油脂体稳定性的影响,发现添加 SSPS 和

KGM 的油脂体在外界环境改变时仍能保持较小的粒径,并且 SSPS 对提高油菜籽油脂体稳定性效果更好。

4 走油对大豆品质的影响

4.1 对大豆外观品质的影响

大豆发生走油时,脂肪呈游离状态溢出,进而发生脂肪氧化和色素沉积,导致大豆表面色泽变暗,俗称赤变^[43]。卢方圆^[44]对影响大豆走油的因素进行探究,结果显示,温度、水分及气体环境均会造成大豆走油,其中温度影响最显著,随着美国大豆走油程度加深,大豆的 L^* 值(亮度)和 b^* 值(黄蓝色)均呈下降趋势,籽粒色泽变暗,发生赤变走油现象。同样现象还出现在中药材中,吴翠等^[45]探究了党参色泽、水分和 5 - 羟甲基糠醛含量与走油的相关性,发现党参走油后色泽由黄白色变为棕褐色,同时高水分加速了美拉德反应中 5 - 羟甲基糠醛的生成,该物质与党参 L^* 值呈极显著负相关。拱健婷等^[46]也发现苦杏仁发生走油后其种皮颜色从黄棕色变为深棕色,子叶从乳白色变为黄褐色。综上,走油会使大豆赤变,色泽加深。

4.2 对大豆营养品质的影响

大豆中 α - 亚麻酸含量高于常见的葵花籽油、玉米油、花生油等, α - 亚麻酸能够调节人体脂代谢,降低胆固醇水平和血压、血糖以及预防冠心病等^[47],大豆发生走油时会降低脂肪酸不饱和度,同时还会产生脂质过氧化物,从而影响大豆营养品质。孙淑华等^[48]研究了走油大豆粒含量与粗脂肪含量的关系,结果表明,随着大豆走油粒含量的上升,大豆干基粗脂肪含量从 20.22% 降低至 18.39%,出油率从 16.10% 降至 14.64%。张玉荣等^[49]研究发现,随着储藏温度的升高,高油大豆发生走油现象,粗脂肪 AV 显著上升,亚油酸和亚麻酸含量减少,硬脂酸与油酸含量增加,水溶性蛋白质含量降低,大豆营养品质下降。卢方圆等^[50]研究了走油率与大豆品质的关系,发现随着走油率的上升,大豆粗脂肪含量下降,粗脂肪 AV 与 POV 上升,粗蛋白质含量与蛋白质溶解比率降低,表明大豆营养品质与走油程度呈负相关关系。综上,走油会减少大豆营养成分含量,进而降低大豆的营养品质。

4.3 对大豆加工制品品质的影响

大豆是我国居民重要的优质植物蛋白来源,在日常生活中常用于制作豆浆、豆腐、发酵豆制品及植物基蛋白肉等产品^[51-54]。黄留敏^[55]研究发现,热损大豆中叶绿素和 β - 胡萝卜素含量上升,叶黄素含量下降,此外生育酚发生氧化生成 5,6 - 邻醌 -

γ -生育酚,使大豆油色泽变暗,增加了油脂精炼的成本。寇含笑^[56]将高温、高水分条件下储藏的进口大豆加工制得豆腐,结果显示,随储藏时间延长豆腐得率、品尝得分下降,豆腐的硬度、咀嚼性和胶着性上升,适口性较差。此外,使用走油大豆加工的豆浆pH下降,颜色发红^[43]。综上,使用出现走油现象的大豆所加工的产品在外观、口感及风味方面均会变差。

5 大豆走油的防控措施

5.1 适时收获

适时收获是保障大豆安全、稳定储藏的第一道防线。收获过早,大豆还未完全成熟,水分高、呼吸代谢旺盛,在储藏期间易发生局部发热;收获过晚,大豆过度成熟使得入库时破损粒率较高,种子失去保护,易受霉菌和储藏害虫的侵害。以上情况均会增大大豆发生走油的概率。Idaryani等^[57]研究发现,半熟期收获的大豆初始水分较高,而水分较高的大豆在运输储藏过程中较干燥的大豆更易出现走油现象。Zuffo等^[58]研究发现,完熟期后延迟15 d收获的大豆所受物理损伤增加,在储藏期间其苹果酸脱氢酶、超氧化物歧化酶活力降低,导致大豆抵御外界不良环境的能力变差,在储藏过程中易发生走油。过早或过晚收获都会造成大豆储藏稳定性降低,可能会导致大豆储藏期间发生走油赤变,因此需选择最佳的收获时机,确保大豆在收获时处于适宜的成熟度和水分,可最大限度地降低储藏期间的损失。

5.2 减少运输过程中机械损伤

2022年我国大豆进口总量为9 108万t,主要进口来源国为巴西、美国及阿根廷^[59]。进口大豆运输期一般在30~50 d,远洋运输过程中船体晃动导致大豆在货仓内被挤压,籽粒完整性被破坏,同时受温度、湿度等因素影响,粮堆易出现结露、霉变甚至部分进口大豆到港时就出现走油赤变现象^[60]。同时,在运输、出入库装卸过程中,大豆易受到碰撞挤压而发生机械损伤,且入库季节的高温天气也会造成粮堆表层热损伤粒率升高。陈萍等^[61]研究表明,相较于完整粒大豆,去皮半粒大豆在储藏期间更容易发生热损伤,且在储藏过程中巴西大豆比美国大豆、阿根廷大豆热损伤程度更高,热损伤程度高的大豆其蛋白质在储藏期间易发生凝固变性,从而破坏油脂体的稳定状态,导致内部的脂肪游离析出而发生走油。Neve等^[62]研究发现,机械损伤会破坏大豆细胞膜完整性,造成储藏期间大豆细胞膜脂氧化程度加剧,电导率升高,进而出现走油现象。因此,在进口大豆运输过程中降低大豆破损粒率,及时关注粮

堆温度和水分情况对提升大豆储藏安全性和稳定性,避免大豆出现走油赤变现象同样重要。

5.3 降低水分

水分是大豆储藏期间各种生理生化反应的媒介,高水分条件下,大豆的呼吸作用增强且微生物的生命代谢旺盛,在储藏过程中稳定性较差,易发生走油。张玉荣等^[49]研究发现,25℃下大豆初始水分对高油大豆的粗脂肪AV、水溶性蛋白质含量及氮溶解指数有极显著的影响,因此需保持更低的水分以防止大豆发生走油现象。Ziegler等^[63]将大豆水分分别调至13%和15%,经一段时间储藏后发现高水分(15%)大豆在储藏期间的稳定性更低,更易出现走油劣变。Pohndorf等^[64]发现水分为12%的大豆其脂肪氧化活化能为21.07 kJ/mol,而水分为16%的大豆其脂肪氧化活化能仅为6.25 kJ/mol,表明高水分大豆在储存期间脂肪氧化稳定性差,更易发生走油赤变。

综上,储藏期间应时刻关注粮堆水分情况,一旦出现局部结露等异常粮情应及时采取通风降水措施,以防止大豆霉变发热,出现走油现象。

5.4 控制温度

大豆脂肪的比热容大、导热性差,储藏期间大豆由于呼吸代谢作用会释放热量,容易造成粮堆局部温度升高,进而造成大豆油脂体稳定性下降,发生走油现象。Czaikoski等^[65]研究发现,低温条件下储藏可以减缓菜用大豆中维生素C的分解,提高其储藏期间的氧化稳定性,提示低温储藏可降低大豆走油现象发生概率。卢方圆^[44]研究了不同储藏环境下美国大豆的走油情况,结果显示:当温度超过45℃、水分超过13.5%时,美国大豆最快10 d发生轻度走油;随着走油程度的加深,大豆粗脂肪含量、蛋白质溶解比率不断下降,粗脂肪AV和POV不断上升,大豆由易存变为重度不宜存。当前在实际仓储作业时,常采取“内环流+控温”控制仓房内部温度在25℃以下,以防止大豆走油,提高大豆储藏稳定性。

5.5 调节储藏环境的气体组成

大豆储藏环境中的气体组成对大豆走油同样有重要影响,低氧的储粮环境可以有效杀死仓内害虫、降低粮食呼吸作用和抑制微生物生长繁殖,从而降低走油现象发生概率,减少大豆储藏损失^[66]。Coradi等^[67]研究发现,充入CO₂储藏的大豆在密封储藏225 d后仍能保持较高的生理活性,并且大豆种子细胞膜脂氧化受到抑制,大豆发生走油的概率降低。Ludwig等^[68]通过调整大豆储藏期间的气体

组成发现, O₂浓度较低时, 是否充入 CO₂对大豆油脂的 AV 与 POV 无显著影响, 当 O₂浓度较高时, CO₂的加入可以有效延缓大豆走油劣变, 此外, 通过气相色谱质谱联用(GC-MS)筛选出大豆籽粒潜在脂肪氧化标志物为(*E*)-2-己烯醛和己醛。

6 结束语

大豆是我国重要的油料之一, 当储藏条件不当时其油脂体稳定性下降, 进而出现大豆走油、赤变现象。油脂体广泛存在于植物细胞中, 主要由 TAG、磷脂与油脂体膜蛋白组成, 由于该层膜提供的静电斥力与空间位阻, 油脂体具有良好的稳定性, 但当外界环境发生剧烈变化时, 油脂体的稳定性也发生相应变化。大豆种类、温度、pH、提取方法等都会显著影响大豆油脂体稳定性, 通过控制温度、添加多酚及多糖可以有效提高大豆油脂体稳定性; 走油会引起大豆品质发生劣变, 包括色泽发暗赤变, 营养品质和加工制品品质降低, 通过适时收获、减少运输过程中机械损伤、降低大豆入库水分、控制仓内温度及采用气调技术可以有效避免大豆走油现象发生。

尽管现有研究分别对大豆油脂体稳定性和大豆走油劣变进行了分析, 但对大豆走油微观机制解释仍鲜有报道, 未来研究可重点从大豆油脂体结构变化方向入手, 探讨大豆走油机制, 为大豆走油“真因”提供更多支撑。

参考文献:

- [1] SEAL C E, KRANNER I, PRITCHARD H W. Quantification of seed oil from species with varying oil content using supercritical fluid extraction[J]. *Phytochem Anal*, 2008, 19(6): 493-498.
- [2] 吴琼, 李岩, 张来林. 浅谈大豆的储藏(一)[J]. *粮食加工*, 2021, 46(3): 65-69.
- [3] 王岩, 李俊飞. 进口储备大豆安全储藏技术探析[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2022, 38(1): 45-47.
- [4] 王佳. 大豆种子贮藏技术[J]. *农民致富之友*, 2019(11): 142.
- [5] TIAN T, ZAABOUL F, YIN S, et al. Studies on the lipid oxidation and oleosomes behavior in raw pecan kernels during storage[J/OL]. *Food Chem*, 2023, 405(Pt B): 134867[2023-10-09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134867>.
- [6] MURPHY D J, CUMMINS I. Seed oil-bodies: Isolation, composition and role of oil-body apolipoproteins[J]. *Phytochemistry*, 1989, 28(8): 2063-2069.
- [7] 钟佳慧, 陈蓓蕾, 王倩, 等. 基于天然大豆油脂体-海藻酸钠的沙拉汁工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(11): 7-14, 20.
- [8] ZAABOUL F, ZHAO Q, XU Y, et al. Soybean oil bodies: A review on composition, properties, food applications, and future research aspects[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 124: 107296[2023-10-09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107296>.
- [9] ZHAO L, CHEN Y, CAO Y, et al. The integral and extrinsic bioactive proteins in the aqueous extracted soybean oil bodies[J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(40): 9727-9733.
- [10] FRANSEN G I, MUNDY J, TZEN J T C. Oil bodies and their associated proteins, oleosin and caleosin[J]. *Physiol Plant*, 2001, 112(3): 301-307.
- [11] LIN L J, TZEN J T C. Two distinct steroleosins are present in seed oil bodies[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2004, 42(7/8): 601-608.
- [12] CHEN Y, ONO T. Simple extraction method of non-allergenic intact soybean oil bodies that are thermally stable in an aqueous medium[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(12): 7402-7407.
- [13] TZEN J, CAO Y, LAURENT P, et al. Lipids, proteins, and structure of seed oil bodies from diverse species[J]. *Plant Physiol*, 1993, 101(1): 267-276.
- [14] TZEN J T, LIE G C, HUANG A H. Characterization of the charged components and their topology on the surface of plant seed oil bodies[J]. *J Biol Chem*, 1992, 267(22): 15626-15634.
- [15] 单子明, 彭郁, 秦琛强, 等. 植物油脂体提取及稳定性评价研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(19): 251-262.
- [16] HU M, DU X, LIU G, et al. Investigation of structure-stability correlations of reconstructed oil bodies[J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2022, 165: 113740[2023-10-09]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113740>.
- [17] 梁新婷, 江连洲, 侯俊财, 等. 高油大豆与低油大豆油脂体组成及其稳定性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(10): 11-17.
- [18] PAUCAR - MENACHO L M, AMAYA - FARFÁN J, BERHOW M A, et al. A high-protein soybean cultivar contains lower isoflavones and saponins but higher minerals and bioactive peptides than a low-protein cultivar[J]. *Food Chem*, 2010, 120(1): 15-21.
- [19] 刘悦, 王秋岭, 孙亚婷, 等. 高油大豆与低油大豆油脂体结构蛋白的研究[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(5): 263-269.
- [20] ZHOU X, ZHAO J, ZHAO X, et al. Oil bodies extracted from high-oil soybeans (*Glycine max*) exhibited higher oxidative and physical stability than oil bodies from high-protein soybeans[J]. *Food Funct*, 2022, 13(6): 3271-3282.

- [21] WANG Q L, CHUN L C, JIANG L Z, et al. Oil bodies extracted from high-fat and low-fat soybeans: Stability and composition during storage[J]. *J Food Sci*, 2017, 82(6): 1319-1325.
- [22] DING J, XU Z, QI B, et al. Thermally treated soya bean oleosomes: The changes in their stability and associated proteins[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2020, 55(1): 229-238.
- [23] 陈业明, 赵路苹, 熊小辉, 等. 热处理对大豆油体表面的油体蛋白和外源性蛋白影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(22): 106-109, 113.
- [24] 孙婕, 刘亦菲, 尹国友. 不同灭酶条件下油体得率、成分的变化及油体性质分析[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(10): 146-154.
- [25] GAO Y, ZHOU L, YAO F, et al. Effects of pH on the composition and physical stability of peanut oil bodies from aqueous enzymatic extraction [J/OL]. *J Chem*, 2021(5): 2441385 [2023-10-09]. <https://doi.org/10.1155/2021/2441385>.
- [26] 刘子豪, 梅雅欣, 彭郁, 等. 外源蛋白对大豆油脂体稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(22): 1-9.
- [27] 宋晗钰, 钟明明, 康梦雪, 等. 碱性 pH 值提取对大豆油脂体稳定性及消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 57-63.
- [28] CAMPBELL K A, GLATZ C E. Mechanisms of aqueous extraction of soybean oil[J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(22): 10904-10912.
- [29] DE MOURA J M L N, CAMPBELL K, MAHFUZ A, et al. Enzyme-assisted aqueous extraction of oil and protein from soybeans and cream de-emulsification[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85(10): 985-995.
- [30] 冯雪, 钱珊珊, 于彤, 等. 提取方法对大豆油脂体组成及氧化稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 148-156.
- [31] 徐泽健, 章绍兵. 花生粗油体制备工艺研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(7): 5-9.
- [32] 田其英, 华欲飞, 孔祥珍, 等. 大豆油体的提取及其功能性质[J]. *食品工业*, 2019, 40(3): 13-16.
- [33] ISHII T, MATSUMIYA K, NAMBU Y, et al. Interfacial and emulsifying properties of crude and purified soybean oil bodies[J]. *Food Struct*, 2017, 12: 64-72.
- [34] 孙禹凡, 谢凤英, 钟明明, 等. Oleosin 蛋白和磷脂酰胆碱相互作用对重组油体乳液稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(14): 42-49.
- [35] 赵路苹, 陈业明, 张彩猛, 等. 提取条件对大豆油体表面蛋白质去除效果的研究[J]. *大豆科学*, 2013, 32(6): 835-839.
- [36] 崔春利, 张鸿超, 王秋岭, 等. 温度对不同油料作物油脂体理化稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 1-6.
- [37] 聂梓洮, 张雪怡, 郭怡雯, 等. 复配天然抗氧化剂协同提升人造奶油稳定性[J/OL]. *中国油脂*: 1-14 [2024-10-30]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240518>.
- [38] 官梦姝, 冯雪, 刘月, 等. 3 种天然酚类物质对大豆油脂体稳定性及体外消化性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 10-18.
- [39] SUN Y, ZHANG S, XIE F, et al. Effects of covalent modification with epigallocatechin-3-gallate on oleosin structure and ability to stabilize artificial oil body emulsions [J/OL]. *Food Chem*, 2021, 341 (pt 2): 128272 [2023-10-09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128272>.
- [40] SHAO P, FENG J, SUN P, et al. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides [J/OL]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109376 [2023-10-09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109376>.
- [41] SU C, FENG Y, YE J, et al. Effect of sodium alginate on the stability of natural soybean oil body emulsions [J]. *RSC Adv*, 2018, 8(9): 4731-4741.
- [42] 何胜华, 周三九, 王永辉, 等. 两种不同多糖对油菜籽油体乳液稳定性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(1): 37-45.
- [43] 徐玉敏. 探析大豆种子贮藏技术要点[J]. *农民致富之友*, 2015(13): 88.
- [44] 卢方圆. 进口美国大豆“走油”的环境条件及其品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [45] 吴翠, 徐靛, 马玉翠, 等. 党参走油与色泽、水分、5-羟甲基糠醛的相关性研究[J]. *中药材*, 2019, 42(4): 782-784.
- [46] 拱健婷, 赵丽莹, 徐东, 等. 苦杏仁走油过程中外观性状、活性成分和酸败度的变化规律及其相关性分析[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(13): 3155-3160.
- [47] 田光晶, 马丛丛, 陈萌, 等. 亚麻籽油抗动脉粥样硬化作用的研究进展[J]. *中国油脂*, 2017, 42(10): 87-92.
- [48] 孙淑华, 孙淑玲, 白秋荣. 赤变大豆粗脂肪含量变化的实验测定[J]. *黑龙江粮油科技*, 1995(1): 26-27.
- [49] 张玉荣, 寇含笑, 吴琼, 等. 高油大豆储藏过程中的营养品质变化研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(2): 207-214.
- [50] 卢方圆, 王若兰, 黄亚伟, 等. 储藏环境对美国大豆浸油的影响研究[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(10): 22-26.
- [51] MU Q, SU H, ZHOU Q, et al. Effect of ultrasound on functional properties, flavor characteristics, and storage stability of soybean milk [J/OL]. *Food Chem*, 2022,

- 381; 132158 [2023 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132158>.
- [52] PANYOYAI N, SILSIN M, KHONGDAN J, et al. Effect of partial replacement of soybean with chickpea to the nutritional and textural properties of tofu [J]. *Indones Food Sci Technol J*, 2021, 4(2): 27 - 31.
- [53] 高佳嘉, 李艾潼, 张彩霞, 等. 发酵豆制品加工方法与营养功能的对比分析[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(8): 156 - 161.
- [54] SUI X. Structural analysis and texture study of plant - based (meat) products [J]. *J Texture Stud*, 2023, 54(3): 349 - 350.
- [55] 黄留敏. 热损大豆的油脂成分分析及其中四种色素的稳定性及吸附脱除效果的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [56] 寇含笑. 高油大豆储藏期间的品质变化研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- [57] IDARYANI, RAUF A W, FATTAH A, et al. Effect of harvest time on soybean seed quality of detap - 1 variety [J/OL]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2021, 828(1): 12027 [2023 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/828/1/012027>.
- [58] ZUFFO A M, ZUFFO J M J, CARVALHO E R, et al. Physiological and enzymatic changes in soybean seeds submitted to harvest delay [J]. *Pesqui Agropecu Trop*, 2017, 47(4): 488 - 496.
- [59] 郑祖庭. 2022 年国内外大豆市场回顾及 2023 年展望 [J]. *黑龙江粮食*, 2023(3): 27 - 30.
- [60] 许仁杰. 浅圆仓进口大豆安全储藏管理技术[J]. *粮食科技与经济*, 2022, 47(2): 73 - 75, 116.
- [61] 陈萍, 何洪洲, 单振菊, 等. 进口大豆储运温度和含水量对大豆发生热损伤的影响[J]. *中国油脂*, 2015, 40(10): 31 - 35.
- [62] NEVE J M G, OLIVEIRA J A, DA SILVA H P, et al. Quality of soybean seeds with high mechanical damage index after processing and storage [J]. *Rev Bras Eng Agric Ambient*, 2016, 20(11): 1025 - 1030.
- [63] ZIEGLER V, FERREIRA C D, HOFFMANN J F, et al. Effects of moisture and temperature during grain storage on the functional properties and isoflavone profile of soy protein concentrate [J]. *Food Chem*, 2018, 242: 37 - 44.
- [64] POHNDORF R S, MENEGHETTI V L, PAIVA F F, et al. Kinetic evaluation of oxidative stability and physical degradation of soybean grains stored at different conditions [J/OL]. *J Food Process Preserv*, 2018, 42(10): 13717 [2023 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13717>.
- [65] CZAİKOSKI K, CARRAO - PANIZZI M C, DA SILVA J B, et al. Effects of storage time and temperature on the characteristics of vegetable - type soybean grain minimally processed [J]. *Braz Arch Biol Technol*, 2012, 55(4): 491 - 496.
- [66] 武传欣, 武传森, 程小丽. 氮气气调储粮应用研究 [J]. *粮食加工*, 2013, 38(5): 64 - 67.
- [67] CORADI P C, LIMA R E, PADIA C L, et al. Soybean seed storage: Packaging technologies and conditions of storage environments [J/OL]. *J Stored Prod Res*, 2020, 89: 101709 [2023 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101709>.
- [68] LUDWIG V, BERGHETTI M R P, RIBEIRO S R, et al. The effects of soybean storage under controlled atmosphere at different temperatures on lipid oxidation and volatile compounds profile [J/OL]. *Food Res Int*, 2021, 147: 110483 [2023 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110483>.

(上接第 87 页)

- [13] DIAO J, SONG X, GUO T, et al. Cellular engineering strategies toward sustainable *omega* - 3 long chain polyunsaturated fatty acids production: State of the art and perspectives [J/OL]. *Biotechnol Adv*, 2020, 40: 107497 [2024 - 01 - 16]. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107497>.
- [14] 丛蕾蕾, 纪晓俊, 聂志奎, 等. 花生四烯酸油脂高产菌株的选育 [J]. *生物加工过程*, 2012, 10(5): 34 - 38.
- [15] 唐鑫, 陈海琴, 姚青蔚, 等. 高产花生四烯酸高山被孢霉的诱变育种研究 [J]. *中国油脂*, 2018, 43(8): 104 - 108.
- [16] LI X, LIU R, LI J, et al. Enhanced arachidonic acid production from *Mortierella alpina* combining atmospheric and room temperature plasma (ARTP) and diethyl sulfate treatments [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 177: 134 - 140.
- [17] ZHU M, YU L J, LIU Z, et al. Isolating *Mortierella alpina* strains of high yield of arachidonic acid [J]. *Lett Appl Microbiol*, 2004, 39(4): 332 - 335.