

分类号: TS221

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220530113

过热蒸汽预处理在玉米胚芽加工中的应用研究

STUDY ON THE APPLICATION OF SUPERHEATED
STEAM PRETREATMENT IN CORN GERM
PROCESSING

学生姓名: 朱淼淼

指导老师: 郑立友 (讲师)

专 业: 食品科学与工程

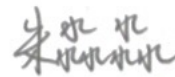
研究方向: 油脂与植物蛋白工程

论文答辩日期: 2025 年 5 月 15 日

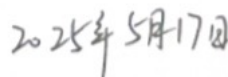
安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期：



安徽工程大学学位论文版权使用授权书

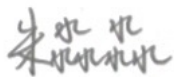
学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

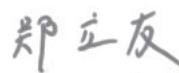
本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：



指导教师签名：



日期：2025.5.17

日期：2025.5.17

过热蒸汽预处理在玉米胚芽加工中的应用研究

摘 要

玉米胚芽油富含维生素 E、植物甾醇及亚油酸等活性成分，是膳食脂肪的优质来源。然而其原料玉米胚芽在运输和储藏过程中易发生脂质劣变，进而影响其加工品质及随后的工业化应用。针对该问题，本研究拟用过热蒸汽（Superheated steam, SHS）预处理玉米胚芽，系统研究了 SHS 预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响；进而前推至储藏阶段研究 SHS 预处理对玉米胚芽储藏品质的影响；并探究了 SHS 预处理对玉米胚芽毛油精炼加工的影响。具体研究内容如下：

首先，采用过热蒸汽（温度：120~210 °C；时间：30~120 s）预处理玉米胚芽，系统研究了 SHS 预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响。结果表明，SHS 预处理显著改变了玉米胚芽的微观结构，促进了油体的破裂和聚集，提高了出油率。与此同时，SHS 预处理显著降低了玉米毛油的红值、酸价、过氧化值、茴香胺值、共轭二烯值和共轭三烯值等指标（ $P < 0.05$ ）。尽管 SHS 预处理后毛油中生育酚、植物甾醇和 β -胡萝卜素含量有所降低，但其总酚含量和氧化稳定性分别得到显著提升（ $P < 0.05$ ）。经方差分析，SHS 预处理时温度的选择对毛油品质的影响更大。通过相关性分析与主成分分析，筛选出 150 °C-60 s、180 °C-120 s、210 °C-120 s 为较适宜的 SHS 预处理条件。

其次，利用 SHS（150 °C-60 s、180 °C-120 s、210 °C-210 s）预处

理玉米胚芽后，将其置于恒温恒湿（ $25\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $75\pm 3\%$ ）条件下，储藏 8 周，对该储藏过程中玉米胚芽的理化性质、脂肪伴随物含量及抗氧化活性等进行系统研究。结果表明，SHS 预处理可显著降低玉米胚芽储藏期间的酸价、过氧化值、共轭二烯值、共轭三烯值、茴香胺值及全氧化值等理化指标（ $P < 0.05$ ）。同时储藏期间 SHS 预处理组的玉米胚芽中总酚、生育酚等脂肪伴随物的保留率较未处理组得到了显著提高（ $P < 0.05$ ），而 β -胡萝卜素含量无显著差异。此外，抗氧化活性实验结果显示 SHS 预处理组样品的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力分别达 $122.04\sim 186.74\text{ }\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ 和 $152.62\sim 206.11\text{ }\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ ，显著优于未处理组（ $P < 0.05$ ）。综上，SHS 预处理（尤其 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 120 s ）显著提升了玉米胚芽的储藏品质（ $P < 0.05$ ）。

最后，采用 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 120 s 的 SHS 预处理玉米胚芽后，制取玉米胚芽毛油，探究其对玉米胚芽毛油精炼（脱胶、脱酸与脱色）过程的影响。结果表明，SHS 预处理并未提高脱胶效率，但显著提高了油脂精炼的脱酸效率（ $P < 0.05$ ），降低了过氧化值，更好地保留了 β -胡萝卜素，改善了油脂的色泽稳定性。此外，SHS 预处理后的成品油 DPPH 自由基清除能力显著优于未处理成品油（ $P < 0.05$ ）。

综上，本文研究表明 SHS 预处理在玉米胚芽加工应用具有一定的优势，可显著提升玉米胚芽的储藏品质、玉米毛油的氧化稳定性和玉米成品油的品质，为其在玉米胚芽加工中的应用提供了理论依据和技术支持，同时为其他植物油料的预处理工艺优化提供了参考和借鉴。

关键词：过热蒸汽预处理，玉米胚芽，氧化稳定性，储藏品质，油脂
精炼

STUDY ON THE APPLICATION OF SUPERHEATED STEAM PRETREATMENT IN CORN GERM PROCESSING

ABSTRACT

Corn germ oil is rich in active ingredients such as vitamin E, phytosterols and linoleic acid, and is a high-quality source of dietary fat. However, its raw material corn germ is prone to lipid deterioration during transportation and storage, which affects its processing quality and subsequent industrial application. In order to solve this problem, this study intends to use superheated steam (SHS) to pretreat corn germ, and systematically study the effect of SHS pretreatment on the quality of corn germ and its crude oil. Furthermore, the effect of SHS pretreatment on the storage quality of corn germ was studied in the storage stage. The effect of SHS pretreatment on the refining of corn germ crude oil was also investigated. The specific research contents are as follows :

Firstly, superheated steam (temperature : 120 ~ 210 °C ;time : 30 ~ 120 s) was used to pretreat corn germ , and the effects of SHS pretreatment on the quality of corn germ and its oil were systematically studied. The

results showed that SHS pretreatment significantly changed the microstructure of corn germ, promoted the rupture and aggregation of oil bodies, and increased the oil yield. At the same time, SHS pretreatment significantly reduced the red value, acid value, peroxide value, anisidine value, conjugated diene value and conjugated triene value of corn crude oil ($P < 0.05$). Although the contents of tocopherol, phytosterol and β -carotene in crude oil decreased after SHS pretreatment, the total phenolic content and oxidation stability were significantly improved, respectively($P < 0.05$). According to the analysis of variance, the choice of temperature during SHS pretreatment has a greater impact on the quality of crude oil. Through principal component analysis, 150 °C-60 s, 180 °C-120 s and 210 °C-120 s were selected as the suitable SHS pretreatment conditions.

Secondly, corn germs were pretreated by SHS (150 °C-60 s, 180 °C-120 s, 210 °C-120 s), and then stored at constant temperature and humidity (25 ± 3 °C, relative humidity $75 \pm 3\%$) for 8 weeks. The physical and chemical properties, fat content and antioxidant activity of corn germs during storage were systematically studied. The results showed that SHS pretreatment could significantly reduce the acid value, peroxide value, conjugated diene, conjugated triene, anisidine value and total oxidation value of corn germ during storage ($P < 0.05$). At the same time, the retention rate of total phenols, tocopherols and other fat concomitants in

the corn germ of the SHS treatment group during storage was significantly higher than that of the untreated group ($P < 0.05$), while there was no significant difference in β -carotene content. In addition, the results of antioxidant activity experiments showed that the DPPH and ABTS free radical scavenging abilities of the SHS-treated samples were 122.04 ~ 186.74 $\mu\text{mol TE} / 100 \text{ g}$ and 152.62 ~ 206.11 $\mu\text{mol TE} / 100 \text{ g}$, respectively, which were significantly better than those of the untreated group ($P < 0.05$). In summary, SHS pretreatment (especially 180 °C-120 s) significantly improved the storage quality of corn germ($P < 0.05$).

Finally, corn germ crude oil was prepared by SHS pretreatment of corn germ at 180 °C -120 s, and its effect on the refining (degumming, deacidification and decolorization) process of corn germ crude oil was investigated. The results showed that SHS pretreatment did not improve the degumming efficiency, but significantly improved the deacidification efficiency of oil refining ($P < 0.05$), reduced the peroxide value, better retained β -carotene, and improved the color stability of oil. In addition, the DPPH free radical scavenging ability of SHS pretreated refined oil was significantly better than that of untreated refined oil.

In summary, this study shows that SHS pretreatment has certain advantages in the application of corn germ processing, which can significantly improve the storage quality of corn germ, the oxidation stability of corn crude oil and the quality of corn refined oil. It provides

theoretical basis and technical support for its application in corn germ processing, and provides reference and reference for the optimization of pretreatment process of other plant oil plants.

ZHU Miaomiao (Food Science and Engineering)

Supervised by ZHENG Liyou

KEY WORDS: Superheated Steam Pretreatment, Corn Germ, Oxidation Stability, Storage Quality, Oil Refining

目 录

摘 要	III
ABSTRACT	VI
第 1 章 绪论	1
1.1 玉米胚芽及玉米胚芽油的简介	1
1.1.1 玉米	1
1.1.2 玉米胚芽	1
1.1.3 玉米胚芽油	2
1.2 过热蒸汽预处理技术在油脂加工中的研究进展	2
1.2.1 油料预处理技术的研究进展	2
1.2.2 过热蒸汽预处理技术原理	4
1.2.3 过热蒸汽预处理技术特点	5
1.2.4 过热蒸汽预处理在油料加工中的应用	6
1.2.5 过热蒸汽预处理对油料及油脂理化性质的影响	8
1.3 油脂精炼工艺	20
1.4 研究背景与意义	21
1.5 主要研究内容	22
第 2 章 过热蒸汽预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响	24
2.1 引言	24
2.2 实验材料与设备	24
2.2.1 实验材料	24
2.2.2 实验试剂	25
2.2.3 实验设备	26
2.3 实验方法	27
2.3.1 样品制备	27
2.3.2 玉米胚芽的测定	27
2.3.3 玉米胚芽油的测定	29
2.3.4 数据统计分析	33
2.4 结果与分析	33
2.4.1 SHS 预处理对玉米胚芽水分含量的影响	33
2.4.2 SHS 预处理对玉米胚芽微观结构的影响	34
2.4.3 SHS 预处理对玉米胚芽出油率的影响	36
2.4.4 SHS 预处理对玉米胚芽色泽的影响	37
2.4.5 SHS 预处理对玉米胚芽油脂脂肪酸组成的影响	38
2.4.6 SHS 预处理对玉米胚芽油理化指标的影响	41
2.4.7 SHS 预处理对玉米胚芽油微量脂肪伴随物的影响	46
2.4.8 SHS 预处理对玉米胚芽油氧化稳定性的影响	52
2.4.9 相关性分析与主成分分析	53
2.5 本章小结	55
第 3 章 过热蒸汽预处理对玉米胚芽储藏品质的影响	57
3.1 引言	57

3.2 实验材料与设备	58
3.2.1 实验材料	58
3.2.2 实验试剂	58
3.2.3 实验设备	58
3.3 实验方法	59
3.3.1 样品制备	59
3.3.2 玉米胚芽油的测定	59
3.3.3 数据统计分析	62
3.4 结果与分析	62
3.4.1 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂脂肪酸组成的影响	62
3.4.2 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂色泽的影响	66
3.4.3 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂酸价的影响	66
3.4.4 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂过氧化值的影响	67
3.4.5 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂共轭二烯值和共轭三烯值的影响	68
3.4.6 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂茴香胺值的影响	69
3.4.7 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂全氧化值的影响	70
3.4.8 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂总酚含量的影响	71
3.4.9 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂生育酚含量的影响	71
3.4.10 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂 β -胡萝卜素的影响	73
3.4.11 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂抗氧化活性的影响	74
3.5 本章小结	75
第 4 章 过热蒸汽预处理对玉米胚芽毛油精炼加工的影响	77
4.1 引言	77
4.2 实验材料与设备	77
4.2.1 实验材料	77
4.2.2 实验试剂	78
4.2.3 实验设备	78
4.3 实验方法	79
4.3.1 样品制备	79
4.3.2 油脂精炼	79
4.3.3 玉米胚芽油的测定	80
4.3.4 油脂回色试验	82
4.3.5 数据统计分析	82
4.4 结果与分析	83
4.4.1 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油磷脂含量的影响	83
4.4.2 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油酸价的影响	83
4.4.3 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油色泽的影响	84
4.4.4 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油过氧化值的影响	85
4.4.5 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油茴香胺值的影响	86
4.4.6 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油全氧化值的影响	87
4.4.7 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油生育酚含量的影响	88
4.4.8 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油 β -胡萝卜素的影响	90
4.4.9 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油抗氧化活性的影响	90

4.4.10 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油色泽稳定性的影响	91
4.5 本章小结	92
第 5 章 结论与展望	93
5.1 结论	93
5.2 展望	94
5.3 创新点	94
攻读硕士学位期间学术论文发表情况	95
参考文献	96
致谢	111

第1章 绪论

1.1 玉米胚芽及玉米胚芽油的简介

1.1.1 玉米

玉米是世界三大粮食作物之一，又名玉蜀黍（学名：*Zea mays* L.），属于禾本科玉蜀黍属植物^[1]。中国是全球第二大玉米生产国，其产量仅次于美国。据国家统计局的最新数据显示，2024 年中国粮食产量迈上新台阶，其中玉米播种面积、单产和总产量均创历史新高。如图 1-1 为 2006 年至 2024 年我国玉米产量的变化^[2]。具体而言，玉米产量达到了 29491.5 万吨，较上一年增长了 2.1%^[2]。这一数据不仅反映了中国玉米产量的强劲势头，也凸显了玉米作为重要粮食作物的高产潜力。与此同时，丰富的玉米胚芽资源也为进一步开发和利用提供了广阔的空间。

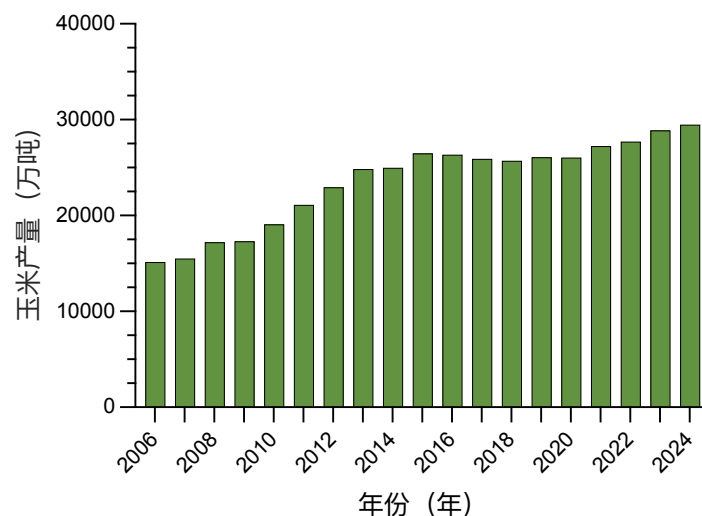


图 1-1 2006 年至 2024 年期间中国玉米产量

Fig. 1-1 Corn production in China between 2006 and 2024

1.1.2 玉米胚芽

玉米籽粒结构主要由种皮、胚乳和胚三部分组成。尽管玉米胚芽仅占籽粒总质量的 10%~14%，但它在玉米的生长与发育过程中扮演着至关重要的角色^[3]。此外，玉米胚芽富含多种营养成分，包括不饱和脂肪酸、膳食纤维、蛋白质、维生素 E、B 族维生素以及锌、铁等矿物质^[4]。值得注意的是，由于玉米胚芽的高

含油量，目前其主要用途是作为油料，用于生产玉米胚芽油^[5]。这一应用不仅充分利用了玉米胚芽的营养价值，也为油脂工业和健康产业提供了重要原料。

1.1.3 玉米胚芽油

随着消费者对健康食用油需求的日益增长，玉米胚芽油作为一种高营养价值的食用油，其产量持续提升。根据国家粮油信息中心的数据，中国粮油学会首席专家王瑞元指出，2022 年玉米胚芽油在榨油方面的出油量已达到 150 万吨^[2]，尽管近两年未发布官方产量数据，但其产量仍呈上升趋势。玉米胚芽油产量的增加不仅有助于优化食用油消费结构，还对提升居民健康水平具有积极意义。

在提取工艺方面，玉米胚芽油的生产方式多样，主要包括压榨法、溶剂浸出法、水酶法以及超临界 CO₂ 萃取法等^[4]，这些方法各具特点，能够满足不同生产需求，为玉米胚芽油的高效提取提供了技术支持。

作为优质的食用植物油，玉米胚芽油以其色泽金黄、口味清淡、易被人体吸收以及营养价值高而备受青睐。研究表明，玉米胚芽油富含人体必需脂肪酸、生育酚、植物甾醇及其他多种生物活性成分，这些成分赋予了其独特的营养和健康价值^[6]。从脂肪酸组成来看，玉米胚芽油主要由亚油酸、油酸和棕榈酸构成，其中亚油酸含量高达 51.92%，占总脂肪酸含量的 50% 以上^[7,8]。亚油酸作为人体自身无法合成的必需脂肪酸，在调节血脂、维护心血管健康、促进脂肪分解与代谢等方面具有重要作用^[4, 7, 8]。这些生理功能使得玉米胚芽在功能性食品和健康领域具有广泛的应用前景。正因如此，玉米胚芽油常被誉为“黄金液体”，不仅体现了其经济价值，也凸显了其在营养与健康领域的重要地位。

1.2 过热蒸汽预处理技术在油脂加工中的研究进展

1.2.1 油料预处理技术的研究进展

油料热预处理是油脂制取（热榨法、低温压榨法和溶剂浸出法）中不可或缺的一环，对油脂的质量和风味有着重要影响^[9]。适当的油料热预处理方法不仅能够有效提高油料的出油率和提升油脂的氧化稳定性，还能促进油脂中风味物质的生成以及微量脂肪伴随物的溶出，从而提升油脂的整体品质^[10-12]。反之，不当的热预处理方法则会对油料及油脂产生负面影响，例如营养素降解（生育酚、类胡萝卜素等）、有毒有害化合物的生成（多环芳烃、丙烯酰胺和反式脂肪酸等），以及脂质氧化等问题^[13, 14]。目前，在油料加工中常用的油料热预处理技术主要包括

烘烤预处理、微波预处理、挤压膨化预处理以及红外线预处理等，上述方法各具优劣（见表 1-1），对油料及油脂的影响也有所不同。

表 1-1 油料热预处理技术的优缺点

Table 1-1 Advantages and disadvantages of oilseeds thermal pretreatment technology

热处理方式	烘烤预处理	微波预处理	挤压膨化预处理	红外线预处理
优点	操作简单、成本低、处理量大、可持续干燥等 ^[15-18]	升温速度快、热惯性小、灭酶时间短等 ^[17, 19-21]	钝酶效果佳、通用性强、生产成本低、无污染等 ^[22]	能效高、受热均匀、无需媒质传播等 ^[17, 23, 24]
缺点	速度慢、产品品质低、色泽变化及营养物质的损失等 ^[15, 17]	营养成分的损失、受热不均匀、成本高等 ^[22]	热敏性营养成分受到严重的破坏等 ^[22]	耗时长、处理量小、营养活性成分的损失等 ^[22]

近年来，过热蒸汽（Superheated steam, SHS）技术作为一种前沿高新技术，因其高效、环保和安全等特性而受到广泛关注^[25]。利用 SHS 技术进行食品加工，具有能够使食品受热均匀、迅速提高加热速度并防止营养素流失等显著优点。目前，SHS 技术已被广泛应用于食品的干燥、烘焙、杀菌、稳定化处理以及改性等多个食品加工研究领域^[11, 26]，如图 1-2 是关于 SHS 技术的优势及在食品加工领域中的应用。目前，现已发表 SHS 预处理技术在食品加工领域方面的综述，主要集中于各类食品的干燥技术^[26]及营养特性、理化特性和安全性的影响^[11, 25, 27]，如聚焦于 SHS 预处理对某一单类食品类型的影响（例如谷物及谷物制品、蔬菜水果类及副产品等）^[26]或进一步专注于 SHS 预处理对该类食品的微观结构及理化性质的影响^[17]等。



图 1-2 SHS 技术的优势及在食品加工领域中的应用

Fig. 1-2 The advantages of SHS technology and its application in the field of food processing

SHS 技术作为一种新兴的短时高温热预处理方式，在油脂加工领域引起广

泛关注，并已在花生^[28-30]、大豆^[31]、山茶籽^[32]、油茶籽^[33]、紫苏籽^[34]、芝麻^[35]以及可可豆^[36]等部分油脂加工行业中得到广泛应用。

1.2.2 过热蒸汽预处理技术原理

20 世纪初，德国科学家 Hausbrand 首先提出了有关于“过热蒸汽”的概念^[37]。然而，直至 20 世纪 80 年代，SHS 技术才开始在食品工业中得到应用^[26]。如图 1-3 展示了 SHS 技术的系统原理简图，通过在特定压力条件下，在蒸汽发生器中加热液态水以产生湿饱和蒸汽；保持该压力和温度，待湿饱和蒸汽中水分全部蒸发后，湿饱和蒸汽转变为干饱和蒸汽；随后，干饱和蒸汽被引入蒸汽过热器内进行二次加热，从而生成 SHS^[27, 38]。当 SHS 被引入处理室后，以气态水的形式存在，且其温度高于饱和蒸汽温度，并且作为物料加热过程中的介质，直接与物料表面接触，进行热交换，最终达到热处理效果^[17, 26, 39, 40]。

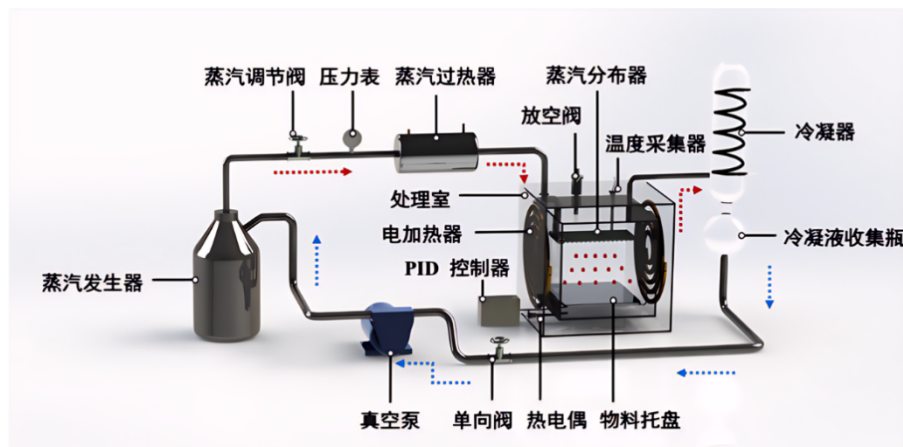


图 1-3 SHS 技术系统原理简图

Fig. 1-3 Schematic diagram of SHS technology system principle

根据操作压力的不同，SHS 系统可分为常压、低压和高压三种类型^[11, 41]。其中，常压作为传统的 SHS 预处理，在大气压环境下产生 SHS，通常适用于油料和谷物等种类食品的加热预处理过程。而高压 SHS 系统在预处理时的压力高于大气压，通常在 500~2500 kPa 下进行，且温度明显高于常压 SHS 系统^[42]。相较于常压 SHS 预处理，虽然高压 SHS 预处理的干燥速率得到显著提升，但由于过高的温度会造成产品营养成分的严重损失，降低产品品质。因此，高压 SHS 预处理较少应用于食品的加工之中，尤其是热敏性食品。通常情况下，在常压或高压下利用 SHS 预处理物料时，可能会发生融化、热损伤、玻璃态转化等现象，然而低压 SHS 能够解决这一问题^[43]。低压 SHS 产生的原理是在密闭的环境下，通过降低压力和降低饱和蒸汽的温度而产生的 SHS 即为低压 SHS，此时的 SHS

拥有良好干燥热敏性物料的能力^[44]。

1.2.3 过热蒸汽预处理技术特点

1.2.3.1 优势

SHS 技术与其他传统热处理方法相比，具有显著优势（如图 1-2 所示）：

（1）优异的节能环保性：SHS 技术系统的介质是水蒸汽，排出的废气同样为水蒸汽，这些蒸汽可通过冷凝器回收并再次利用，从而实现显著的节能效果^[11]。相较于热空气处理方法，SHS 技术能够节约高达 50%~80% 的能源消耗^[11, 42]，充分展示了其在节能和环保方面的双重优势。此外，这种高效的能源利用方式也为企业大幅度降低了成本^[45]。

（2）优质的产品品质：与传统空气介质处理方法不同，SHS 预处理技术采用过热水蒸气作为加热介质，为处理过程营造了一个无氧微环境。这种无氧微环境有效减少了物料在处理过程中因氧化而导致的品质下降，从而有助于保障产品的优良品质^[22, 27]。

（3）高效的传热性能：在 SHS 预处理过程中，过热水蒸汽在物料表面迅速凝结，迅速提高物料温度，大幅度提高了热处理速率，这表明 SHS 技术具有高传热系数的特点^[17]。

（4）卓越的安全性能：与传统的热预处理方法相比，SHS 预处理显著降低了火灾和爆炸等安全风险，这主要归功于 SHS 处理室内所营造的无氧条件，该处理环境有助于防止或减轻燃烧反应的发生^[11, 46]，确保了处理过程的安全性。同时，SHS 预处理技术的节能环保特性也进一步增强了其安全性能，减少了因能源过度使用或环境污染带来的潜在风险。

1.2.3.2 局限性

SHS 技术虽然具有很多方面的优势，但也存在一些局限性。首先，与其他热处理技术相比，SHS 技术的设备设计更为复杂，这导致维护成本相对较高^[11]。这种复杂性不仅增加了企业的日常运营成本，还可能对经济效益产生不利影响。其次，过度使用 SHS 预处理可能会对物料品质产生轻微的不利影响，如蛋白质变性和营养素的损失等^[26]。因此，为了保障产品的品质和营养价值，迫切需要针对不同物料进行深入研究，以确定最佳的 SHS 预处理条件，从而更有效地利用 SHS 技术的优势。

1.2.4 过热蒸汽预处理在油料加工中的应用

作为油料预处理的一种手段, SHS 技术能够有效进行杀菌、稳定化和烘焙等处理步骤(见表 1-2)。相较于传统热预处理方法, SHS 预处理在降低油料水分含量, 改变其微观结构以及提高其出油率方面表现出更高的效率^[30, 34, 47]; 同时, SHS 预处理还具有显著的除菌和钝酶作用, 有效提升了油料的安全性, 并显著降低了脂质的氧化酸败程度^[32, 48]。此外, SHS 预处理有助于增加油脂风味, 并最大限度地保留其营养成分, 从而全面提升了油脂的品质^[22, 31, 33, 34]。尽管 SHS 预处理技术在油脂加工领域的应用尚未普及, 但它已成为国内外学者研究的热点领域。

表 1-2 SHS 预处理技术在油料加工中的处理条件及其应用实例

Table 1-2 Processing conditions and application examples of SHS pretreatment technology in oil processing

应用	油料	处理条件	结果
杀菌	杏仁	SHS 预处理温度: 115 °C; SHS 预处理时间: 20~120 s; 蒸汽流速: 10 kg/h; 再进行 70 s 的红外热处理	115 °C 的 SHS 处理 70 s 后再进行红外热处理 70 s, 可高效杀菌且能保持杏仁的良好品质 ^[48]
	花生	SHS 预处理温度: 125、175、225、250 °C	SHS 预处理对花生酱中的粪肠球菌具有显著杀菌效果, 且其杀菌效果随温度升高愈加显著 ^[49]
	小麦麸皮	SHS 预处理温度: 180、200、220、240、260 °C; SHS 预处理时间: 2、4、6、8、10 min; 蒸汽流速: 1、2、3、4、5 m ³ /s; 水分相对含量为 10%	当蒸汽流速为 3 m ³ /s 和麸皮水分相对含量为 10%时, 240 °C 的 SHS 预处理 10 min 呕吐毒素降解率达到最高值 (91.12%) ^[50]
	山茶籽	SHS 预处理 105 °C、6 min; 水分含量在 6%以下(常温储存 8 个月)	SHS 预处理能够有效延缓山茶籽在贮藏过程中的霉菌指数增长, 能够有效维持其在贮藏过程中的品质 ^[32]
稳定化	米糠	SHS 预处理温度: 120、130、140、150、160 °C; SHS 预处理时间: 1、2、3、4、5 min; 蒸汽流速: 1.0 m ³ /s	SHS 预处理不仅显著提高了米糠的稳定性, 还有效延长了其储藏期。130 °C 的 SHS 处理 4 min, 米糠的品质达到最佳状态 ^[22]

续表 1-2

应用	油料	处理条件	结果
稳定化	大豆	SHS 预处理温度：120、135、150 °C； SHS 预处理时间：2、5、7、10、15 min	120 °C 的 SHS 预处理 9.5 min 可显著降低脂肪氧合酶活性，并明显减弱豆奶中的豆腥味，同时提高粗蛋白含量 ($3.0\pm0.1\%$) ^[31]
	小麦胚芽	SHS 预处理温度：200、210、220 °C； SHS 预处理时间：10、20、30 s 蒸汽流量档位：Flow>Steam>Sh (28 天加速贮藏实验)	220 °C 的 SHS 预处理 30 s (Steam 档位) 的最佳工艺条件下，可有效灭活脂肪酶 (82.74%) 和脂肪氧化酶 (87.03%)，并抑制贮藏过程中脂肪酸值增加，提高其稳定性，延长储藏期 ^[51]
	油茶籽	SHS 预处理温度：120、150、180、210 °C； SHS 预处理时间：5、10、15、20、30 min	180 °C 的 SHS 预处理 15 min 的最佳条件下可使油茶籽油理化性质均发生显著变化，并显著增强其抗氧化性能 ^[33]
	山茶籽	SHS 预处理：105 °C、6 min；水分含量控制在 6% 以下 (常温储存 8 个月)	SHS 预处理显著降低脂肪酶和脂肪氧化酶活性，保持其在储藏过程中的品质，延长储藏期 ^[32]
烘焙	花生	SHS 预处理与对流烘烤温度：150、200、250 °C； 预处理时间：5~40 min	SHS 预处理展现出了高效的烘焙效果，不仅改善了花生产品的品质，还显著提高了其出油量 ^[30]
	可可豆	SHS 预处理与对流烘烤温度：150、200、250 °C； 预处理时间：5~35 min SHS 预处理温度：150、200、250 °C； SHS 预处理时间：10、20、30、40、50 min	与对流烘烤相比，在相同温度与时间下 SHS 预处理更有助于保持可可豆的良好色泽、脆性和营养价值 ^[52] SHS 预处理能够快速实现最佳烘焙特性，并在色泽和质构方面保留可可豆的理想特征 ^[53]
		SHS 预处理温度：150、200、250 °C； SHS 预处理时间：10、30、50 min	SHS 预处理可改善可可豆的品质，能够快速实现最佳烘焙特性，同时保持抗氧化活性 ^[54]
	海米糠	SHS 预处理温度：100、110、120、130 °C； SHS 预处理时间：10、20、30、40 min	SHS 预处理能够保持海米糠的较低的水合能力、适当的气味还能弱化其苦味 ^[55]
	紫苏籽	SHS 预处理温度：130、150、200 °C； SHS 预处理时间：1、3、5、10、20 min； 蒸汽流速：7.8 m ³ /h	SHS 预处理能够提高紫苏籽的出油率，降低挥发物相对强度，增加总酚含量和抗氧化活性，降低脂肪酶活性，进而有助于提高油脂品质 ^[34]
	黑籽	SHS 预处理与对流烘烤温度：150、200、250 °C； 预处理时间：10、15、20 min	与对流烘烤相比，SHS 预处理更有效地提高黑籽产品品质，同时保持其营养价值 ^[47]

1.2.5 过热蒸汽预处理对油料及油脂理化性质的影响

SHS 预处理技术在油料及其油脂加工中表现出显著的优势，不仅能改变油料的微观结构，提高出油率，而且还具有除菌和抑制酶活性的功能（图 1-4）。此外，SHS 预处理的油料，能够有效保持或改善油脂的色泽，并显著降低酸价（Acid value, AV）、过氧化值（Peroxide value, PV）、茴香胺值（*p*-anisidine value, *p*-AV）以及共轭二烯值（Conjugated diene, K_{232} ）和共轭三烯值（Conjugated triene, K_{270} ）等指标，这一处理还能减缓这些指标在储藏期间的上升速度，从而提升油脂的氧化稳定性，并保留其营养成分。表 1-3 详细展示了 SHS 预处理对油料及油脂理化指标和营养成分变化的具体影响。



图 1-4 SHS 预处理对油料及油脂的影响概况

Fig. 1-4 Overview of the impact of SHS pretreatment on oilseeds and oil

表 1-3 SHS 预处理对油料及油脂理化指标及营养成分变化的具体影响

Table 1-3 The specific effects of SHS pretreatment on the physicochemical properties and nutritional composition changes of oilseeds and oils

油料	处理条件	理化性质	营养成分	氧化模型	研究结果
可可豆	SHS 预处理与对流烘烤温度: 150、200、250 °C; 预处理时间: 5~35 min	①含水量↓②色泽 (a^* ↑, b^* ↑, L^* ↓, WI↓) ③质地 (硬度↓, 易脆性↓)	/	/	与对流烘烤相比, SHS 预处理可可豆的含水量更低, 内部升温更快, 能够保持良好色泽和脆性, 并保留其营养价值 ^[52]
	SHS 预处理温度: 150、200、250 °C; SHS 预处理时间: 10、20、30、40、50 min	①含水量↓②色泽 (a^* ↑, b^* ↑, L^* ↑↓, BI↑) ③质地 (硬度↓, 易脆性↓)	/	/	随着时间和温度的延长, 可可豆的含水量降低可可豆的色泽和质地受 200 °C 和 250 °C 的影响大于 150 °C ^[53]
花生	SHS 预处理与正常无蒸汽处理温度: 150、200、250 °C; 预处理时间: 5~40 min	①出油率↑②色泽 (a^* ↓, b^* ↑, L^* ↑↓) ③AV↑④PV↑ ⑤p-AV↑⑥FFA↑⑦ K_{232} ↓ ⑧ K_{270} ↓⑨碘值↓	/	/	与高温 (250 °C) 的正常无蒸汽处理相比, SHS 预处理出油率更高, 且花生油的色泽变浅, 其 FFA、PV、p-AV、 K_{232} 、 K_{270} 均显著低于正常无蒸汽处理, 并得到高碘值和油粘度 ^[29]
	SHS 预处理温度: 140、160、180、215 °C; SHS 预处理时间: 1、2、4 min; 蒸汽流速: 15.0 m ³ /h (储藏 70 天)	①水分含量↑↓②色泽→ ③AV→④PV→⑤LA↓ ⑥POD↓⑦AFs↓⑧AFB1↓	/	/	在 215 °C 下 SHS 预处理 2 min, 可降低 70% 的 LA 和 90% 的 POD 活性; 处理 1 min 时, 可减少花生碎中 77.6% AFs 和 75.7% AFB1。在储存 70 天后, SHS 预处理组的 AV 和 PV 显著低于未处理组 ^[28]
麦麸	SHS 预处理与热风处理温度: 170 °C; 预处理时间: 1~20 min; 蒸汽流速: 15.0 m ³ /h	①色泽 (a^* ↑, b^* ↑, L^* ↑) ②FFA↑③PV↑	/	抗氧化性↑	与热风处理相比, SHS 预处理的麦麸色泽更鲜艳, 酚类物质含量更高, 抗氧化能力更强, PV 更低, 不饱和脂肪酸含量更高 ^[56]
紫苏籽	SHS 预处理温度: 120、130、140、150、160 °C; SHS 预处理时间: 1、2、3、4、5 min; 蒸汽流速: 1.0 m ³ /s	①出油率↑②色泽 (a^* ↑↓, b^* ↑↓, L^* ↑↓) ③AV↓↑④PV↓↑⑤LA↓⑥不利的挥发性化合物↓	TPC↑	DPPH 自由基清除能力↑	SHS 预处理显著增加了出油率。此外, SHS 预处理使 TPC 和抗氧化活性增加约 5 倍, LA 活性急剧下降, 还可减少或消除不利的挥发性化合物 ^[34]

续表 1-3

油料	处理条件	理化性质	营养成分	氧化模型	研究结果
米糠	SHS 预处理温度: 120、130、140、150、160 °C; SHS 预处理时间: 1、2、3、4、5 min; 蒸汽流速: 1.0 m ³ /s (储存 26 周)	LA↓	①TPC↑ ②总酚酸↑ ③α-生育酚→ ④γ-谷维素→	总抗氧化性↑ (PV↓、羰基 值↓、脂肪酸 值↓)	SHS预处理可显著降低米糠LA活性。最佳钝酶点米糠的TPC和总抗氧化性显著提高;总酚酸含量提高10.31%~2.31%。储存第25周时,最佳钝酶点米糠的脂肪酸值、PV、羰基值与对照组相比均有显著下降。SHS预处理米糠的最佳处理条件是: 130 °C、4 min ^[57]
麦麸	①SHS 预处理温度: 160、190、220、250、280 °C, SHS 预处理时间: 90 s; ②SHS 预处理温度: 220 °C; SHS 预处理时间: 30、60、90、120、150 s	/	TPC TFC	DPPH 自由基 清除能力	当温度为 280 °C时, TPC 最高; 250 °C时, TFC 及总酚 DPPH 自由基清除能力最高。处理 90 s 时, TPC 最高; 处理 60 s 时, TFC 最高。SHS 预处理麦麸的最佳处理条件是 250 °C、60 s ^[58]
小麦胚芽	SHS 预处理温度: 200、210、220 °C; SHS 预处理时间: 10、20、30 s; (正交试验) 蒸汽流量档位: Flow>Steam>Sh 28 天加速贮藏试验	①色泽 (a^* ↑, b^* ↑, L^* ↓) ②LA↓③LOX↓ ④脂肪酸值↓	/	/	28天加速贮藏试验显示其脂肪酸值增加量显著低于未处理组;并有效降低LA活性,抑制贮藏过程中脂肪酸值增加。经正交试验优化后,最佳条件为220 °C、Steam档位处理30 s ^[51]
海米糠	SHS 预处理温度: 100、110、120、130 °C; SHS 预处理时间: 10、20、30、40 min	色泽 (a^* ↑, b^* ↑↓, L^* ↓)	/	/	SHS预处理保持了海米糠的较低的水合能力、适当的气味并减少苦味,其最佳工艺条件为100~120 °C、10~30 min ^[55]

续表 1-3

油料	处理条件	理化性质	营养成分	氧化模型	研究结果
山茶籽	SHS 预处理 105 °C, 6 min; 水分含量控制在 6%以下 (常温储存 8 个月)	①水分含量↓ ②含油量↑ ③LA↓④LOX↓	/	/	在 8 个月的贮藏期间, 与对照组相比, 经 SHS 预处理的油茶籽油的 AV 和 PV 的上升速度更慢, 含油量的下降速度更慢 ^[32]
油茶籽	SHS 预处理温度: 120、150、180、210 °C; SHS 预处理时间: 5、10、15、20、30 min	①出油率↑↓ ②水分含量↑↓	FP↑	①DPPH 自由基清除能力↑ ②ABTS 阳离子自由基清除能力↑ ③FRAP↑	SHS 预处理对油茶籽粉的含水量、出油率、微观结构以及酚类物质和抗氧化性均有影响。在特定温度下, SHS 预处理可提高油茶籽油中游离酚的含量, 并可提高其抗氧化性能。其最佳处理条件是 180 °C、15 min ^[33]
黑籽	SHS 预处理与对流烘烤温度: 150、200、250 °C; 预处理时间: 10、15、20 min	①水分含量↓ ②含油量↑③色泽 (a^* ↑, b^* ↓↑, L^* ↑)④PV↓ ⑤p-AV↑↓⑥FFA↓	TPC↑	抗氧化性↓	SHS 预处理在多个方面明显优于对流焙烤 (DPPH 自由基清除能力、色泽、出油率、PV、p-AV 等)。但在 250 °C预处理黑籽时, 弊大于利, 会造成自由基清除能力的显著下降、加剧脂质氧化等 ^[47]

注: ↑, 数值或含量的增加 (与未经处理的油籽相比); ↓, 数值或含量的减少; →, 数值或含量保持不变; ↑↓, 数值或含量先上升后下降; ↓↑, 数值或含量先下降后上升; 无箭头, 没有与未处理样品相比较; a^* , 红绿值; b^* , 黄蓝值; L^* , 亮度; WI, 白度指数 (Whiteness index); BI, 褐变指数 (Browning index); FFA, 游离脂肪酸 (Free fatty acids); TPC, 总酚含量 (Total phenol content); TFC, 总黄酮含量 (Total flavonoid content); DPPH, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl); ABTS, 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)); FRAP, 铁离子还原能力 (Ferric ion reducing antioxidant power); LA, 脂肪酶活性 (Lipase); POD, 过氧化物酶 (Peroxidase); LOX, 脂肪氧合酶活性 (Lipoxygenase); AFs, 黄曲霉毒素 (Aflatoxins); AFB1, 黄曲霉毒素 B1 (Aflatoxin B1)。

1.2.5.1 过热蒸汽预处理对油料理化指标的影响

(1) 水分含量

通常情况下,热预处理对油料中的水分含量具有显著影响,处理时间的延长和温度的增加会导致油料水分含量的降低^[26]。Wang 等^[33]研究表明,SHS 预处理过程中,温度越高、时间越长,油茶籽粉水分相对含量下降速度就越快、越显著。Harivaindaran 等^[47]在对黑籽进行 SHS 预处理时也发现了类似现象,当在 150 °C SHS 预处理 10 min 后,黑籽的水分含量显著降低,水分损失约达 66%^[59]。

(2) 色泽

美拉德反应可能是引起油料色泽变化的主要机制,这是一种在食品加工中普遍存在的非酶促褐变现象,涉及氨基酸与还原糖之间的相互作用,从而产生一系列具有特定风味和色泽的化合物^[26, 60-62]。在相同处理温度与时间条件下,SHS 预处理对油料色泽的影响显著高于其他传统热处理技术^[30, 52]。鉴于 SHS 预处理通常在无氧微环境下进行,油料色泽的变化在加工中后期不由氧化褐变引起^[26]。研究表明,Idrus 等^[30]发现,随着烘烤温度和时间的增加,花生样品的 L^* 和 WI 降低,而 a^* 和 b^* 则随烘烤时间的延长而上升;相较于传统对流烘烤,SHS 预处理后的花生样品在所有颜色值上的变化更为显著。此外,Zzaman 等^[52, 53]的研究结果指出,在相同温度和时间条件下,经 SHS 预处理的可可豆褐变程度低于对流烘烤处理,表明 SHS 预处理能够赋予可可豆更优质的色泽品质。

(3) 微观结构

目前,前期研究主要采用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观察 SHS 预处理前后油料的微观结构变化。研究表明,SHS 预处理会破坏油料细胞结构(细胞壁和细胞膜)的完整性,导致细胞内部包裹油体的磷脂-内源性蛋白膜被破坏,致使油滴更容易聚集和溶出,进而影响到油料的出油率^[10, 30, 33]。例如,Wang 等^[33]利用 SEM 观察到未经处理的山茶籽结构完整,边缘清晰;而经过 SHS 预处理后,山茶籽的内部结构变得模糊,细胞间距明显缩小,且边缘不再清晰,这可能是由于 SHS 预处理对山茶籽的蛋白质和油体结构造成的破坏,从而提高了出油率。同样,Lee 等^[34]对紫苏籽进行 SHS 预处理后发现,未处理的紫苏籽种皮完整,呈均匀的球形颗粒,而经 SHS 预处理后的紫苏籽出现破裂与分离现象,且随着时间和温度的增加,这种破裂与分离程度加剧,这可能是 SHS 预

处理破坏了紫苏籽的细胞壁和细胞膜。相比于对流烘烤, Idrus 等^[30]发现 SHS 预处理会导致花生的细胞器和细胞质网络结构受到更为严重的破裂。在对 SHS 预处理米糠的研究中, 胡迪^[22]发现未处理的米糠呈现块状, 中间孔洞较少, 表面较为平坦光滑, 而 SHS 预处理后, 其结构变为球状, 表面更为粗糙, 并出现不同程度的凸起, 这可能是由于淀粉糊化和蛋白质变性所导致的。

(4) 出油率

热预处理是提升油料出油率的一种有效方法, 而 SHS 预处理技术作为一种新兴的热预处理手段, 在适宜的条件下能显著增加油料的出油率^[29]。Harivaindaran 等^[47]研究发现, 在 250 °C 下 SHS 处理 20 min, 可以使得黑籽的出油率达到最高, 显著高于未处理的状态。这一效果可归因于 SHS 预处理对油料细胞结构的影响, 即油料在 SHS 预处理过程中细胞壁的破裂, 有助于油料中油体的聚集和溶出, 从而提高黑籽的整体出油率^[61]。然而, Idrus 等^[29]的研究发现 150 °C 下处理 5 min 时, SHS 预处理的花生出油率 (16.25%) 低于传统对流烘烤的花生 (19.96%)。但是, 当处理温度提高到 250 °C 时, 情况发生了逆转, SHS 预处理的花生出油率 (26.84%) 超过了对流烘烤的花生 (24.85%), 这一结果说明合理的 SHS 预处理温度对提高油料出油率至关重要。Wang 等^[33]研究进一步证实了 SHS 预处理温度与时间相互作用对油料出油率有显著影响。研究显示, 山茶籽的最佳 SHS 预处理条件为 120 °C 或 180 °C 下处理 15 min, 在此条件下, 山茶籽的出油率较未处理时 (21.09%) 提高了 6.21%。这些研究结果不仅揭示了 SHS 预处理在油料加工中的潜力, 也为优化预处理条件以最大化出油率提供了科学依据。

(5) 酶活性

酶活性在油料储藏稳定性中扮演着关键角色, 它直接影响着油料的风味、色泽和品质。多数油料在储藏过程中, LA 促使脂质水解, 产生游离脂肪酸和甘油^[34, 63], 而 LOX 则催化多不饱和脂肪酸发生加氧反应, 生成共轭不饱和脂肪酸氢过氧化物^[64, 65], 这些氢过氧化物随后在 POD 的作用下进一步氧化降解, 或通过非酶反应生成异味挥发性化合物, 最终导致油料的品质与营养价值下降。

SHS 技术因其高效的酶钝化能力, 已在小麦胚芽^[51, 56]、山茶籽^[32]、紫苏籽^[34]、米糠^[22]等多种油料的研究中得到应用。张楠等^[51]发现, SHS 预处理 (220 °C、

30 s)能有效灭活麦胚中的 LA (82.74%) 和 LOX (87.03%); 在储藏第 28 天时, 对照组 LA 的活性仍保持 50.80%, 而经 SHS 预处理的 LA 活性仅从 7.50 mg/g 降至 6.51 mg/g, 整个储藏期间的活性均显著低于对照组, 表明 SHS 预处理能有效抑制脂质氧化酸败, 提高储藏稳定性。戴嘉晖等^[32]也发现, SHS 预处理显著降低了山茶籽中 LA 和 LOX 活性, 展现出良好的酶钝化效果, 这不仅有助于保持山茶籽在储藏过程中的品质, 还能延长其储藏期。同样, Lee 等^[34]在研究 SHS 预处理对紫苏籽中 LA 活性的影响时发现, LA 活性会随着 SHS 预处理时间和温度的增加而显著降低。此外, 胡月明^[66]在研究不同 SHS 预处理条件对麦麸中 POD 活性的影响时发现, SHS 预处理 7 min 的灭酶效率显著高于热风处理 16 min, 且经 SHS 预处理的麦麸保质期显著延长, 即使在常温条件下, 其储藏品质也优于未处理麦麸在低温 (4 °C) 条件下的储藏品质^[56]。

除了 LA、LOX 和 POD 之外, SHS 技术对其他酶的活性也具有显著的钝化作用。例如, 大豆尿素酶对大豆蛋白的影响较大, 因此, 为了保持大豆蛋白中的有益成分, 通常需要检测大豆制品中的尿素酶活性。Prachyawarakorn 等^[67]比较了 SHS 预处理与热风处理效果, 发现 SHS 预处理能够更快地钝化大豆中的尿素酶, 从而更好地保持大豆的营养品质^[68]。

(6) 危害物

油料本身含有多种营养物质, 然而, 在生产、处理和运输过程中, 可能会受到多种不确定因素的影响, 这些因素可能导致细菌和真菌在油料中的生长繁殖, 这些潜在危害物与油料及其产品的食用安全性密切相关。现有研究表明, 适当的 SHS 预处理能够有效消除油料中的大部分危害物 (包括细菌和真菌), 从而提升油料的稳定性, 并延长贮藏期。

沙门氏菌是一种常见的食源性致病菌, 对人体健康可能造成多种危害, 包括腹泻、腹痛、呕吐等症状, 甚至可能引发肺炎、败血症、脑膜炎等感染^[69]。Bari 等^[48]报道, 在 115 °C 下对杏仁进行 70 s 的 SHS 预处理, 随后再进行 70 s 的红外热处理, 能够彻底灭活杏仁表面的沙门氏菌, 同时保持杏仁的整体品质不受影响。此外, Ban 等^[70]对 SHS 预处理在黑胡椒、山核桃和杏仁中对鼠伤寒沙门氏菌和肠炎沙门氏菌混合物的灭活效果进行了研究, 发现 180 °C 的 SHS 预处理在极短的时间内 (分别为 3、13 和 8 s) 即可完全灭活沙门氏菌, 且对产品品质没有造

成不利影响。在 Wang 等^[28]的研究中, SHS 预处理显著降低了花生的总细菌和芽孢杆菌浓度, 分别达到了 99.26%和 98.57%的灭活率, 这些数据表明, SHS 预处理对总细菌和芽孢杆菌具有显著的灭活作用。

在油料的处理与储藏过程中, 霉菌污染是一个极易发生的问题, 因此, 对油料进行及时的真菌灭活处理显得尤为关键。特别是对于磨碎花生而言, 霉菌能够产生耐热的霉菌毒素, 如 AFs 和 AFB1, 这些毒素会对人和动物造成严重且慢性的威胁, 并对食用安全性和储藏稳定性产生不利影响。针对这一难题, Wang 等^[28]的研究表明, 通过 140 °C 的 SHS 预处理 4 min 或者 160 °C 处理 1 min, 能够使磨碎花生中的霉菌灭活率达到 100%。证实了短时 SHS 预处理对霉菌的完全灭活效果。此外, 研究还发现, 在 215 °C 下进行 1 min 的 SHS 预处理, 能够使 AFs 和 AFB1 的含量分别减少 77.6%和 75.7%, 表明 SHS 预处理是一种新兴且有效的手段, 能够有效去除磨碎花生中的霉菌及其毒素^[28]。

脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (Deoxynivalenol, DON), 又称为呕吐毒素, 是小麦中常见的一种有害物质, 容易污染谷物类食品^[50, 71]。刘海波等^[50]的研究发现在 SHS 预处理温度为 240 °C、时间为 10 min、蒸汽流速 3 m³/s, 并且小麦麸皮水分含量为 10%的条件下, DON 降解率达到最高值 91.12%。说明 SHS 预处理能够显著降低受赤霉病影响的小麦麸皮中 DON 的含量。在其他除菌研究中, 戴嘉晖等^[32]发现, 经过 SHS 预处理的山茶籽在储存 30 天后几乎未发生霉变现象, 而对照组则出现一定程度的霉变, 这一差异归功于 SHS 技术的瞬间杀菌以及低水分相对含量对霉菌的生长与繁殖的抑制作用; 在储存 240 天后, 经 SHS 预处理的山茶籽霉变指数为 33.3%, 远低于对照组的 53.9%。

1.2.5.2 过热蒸汽预处理对油脂理化品质的影响

(1) 色泽

油脂色泽是衡量其精炼程度和品质的重要质量指标之一, 它直接影响到消费者的购买选择^[26, 52, 72]。传统的热处理方法, 如焙炒预处理、挤压膨化预处理和微波预处理等, 常常会引起美拉德褐变、焦糖化反应以及油脂的氧化聚合反应, 导致油脂色泽加深, 这种色泽变化对油脂的生产和销售极为不利^[73-75]。相比之下, SHS 预处理能够显著改善油脂的色泽^[34], 进而提升油脂产品的整体品质和市场竞争力^[47]。Lee 等^[34]研究发现, SHS 预处理能够保持紫苏籽油的天然色泽, 这主

要得益于整个处理过程在无氧微环境中进行，减少了氧化褐变反应的发生概率；此外，在 200 °C、20 min 的最佳 SHS 预处理条件下，对油脂色泽的积极影响最为突出。

（2）酸价

AV 是衡量油脂中游离脂肪酸含量的关键指标，对于评估油脂品质具有决定性作用^[76]。研究表明，SHS 预处理能够降低油脂中的 LA 的活性，甚至使其失活，从而缓解油脂分解速度，进一步延缓油脂中游离脂肪酸的生成，最终减缓 AV 的增长，保持油脂原有品质^[32]。Idrus 等^[29]发现，SHS 预处理后提取的花生油的 AV 低于常规无蒸汽烘烤，这表明 SHS 预处理减少了游离脂肪酸的生成，更好地保持了花生油的优良品质。戴嘉晖等^[32]的研究也发现类似的结果，即经过 SHS 预处理提取的山茶籽油在储存过程中的 AV 始终低于未处理组，这表明 SHS 预处理能够有效维持山茶籽在储藏过程中的品质，并延长其储存期限。

（3）过氧化值

PV 是衡量油脂初级氧化产物形成的指标^[29]，一般而言，油脂的 PV 会随着热处理时间和温度的升高而增加，因为在加热过程中过氧化氢的生成会导致 PV 上升^[77]。然而，Harivaindaran 等^[47]研究的结果却呈现相反的趋势，他们发现经过烘烤提取的黑籽油的 PV 低于未烘烤提取的黑籽油；在 150 °C 和 200 °C 的 SHS 预处理条件下，黑籽油 PV 明显低于传统对流烘焙处理，这种可能是由于油脂的初级氧化产物已转化成二次氧化产物，从而导致 PV 降低。在另一项研究中，戴嘉晖等^[32]发现，经过 SHS 预处理提取的山茶籽油在储藏过程中，其 PV 低于未处理的山茶籽油，可能是因为 SHS 的无氧微环境避免在预处理过程中的氧化反应^[25]；同时 SHS 预处理的高温抑制了酶的活性，减少了脂质氧化，从而减缓了 PV 的增长。

（4）茴香胺值

p-AV 通常用于表示油脂氧化过程中产生的小分子醛、酮、醌等二级氧化产物的含量^[29]。尽管关于 SHS 预处理对油料 *p*-AV 的研究较少，但已有研究表明，与其他热预处理方式（如对流烘烤）相比，SHS 预处理能够更好地降低油脂中 *p*-AV^[47]。此外，Idrus 等^[29]的研究发现，经 150 °C 的 SHS 预处理 5 min 后，得到的花生油中 *p*-AV 达到了最低值（1.66）；而当处理时间延长至 40 min 时，其 *p*-AV

则升至最高值(4.59),这表明焙烤花生所提取油脂的 p -AV 会随焙烤时间的延长而增加,可能是由于过度的加热处理加剧了二级氧化产物的形成,从而增加了有害化合物的含量,对油脂的氧化稳定性产生不利影响。

(5) 共轭二烯值和共轭三烯值

油脂自动氧化过程中,初级产物通常具有共轭二烯结构,而次级氧化产物则具有共轭三烯结构^[78, 79], K_{232} 和 K_{270} 用于测定油脂在 232 nm 和 270 nm 处的吸光度,能够反映油脂氧化劣变程度^[80]。Idrus 等^[29]研究发现,经过 SHS 预处理的花生油的 K_{232} 和 K_{270} 均显著低于常规无蒸汽烘烤花生油^[29],这一结果进一步证实了 SHS 预处理在稳定油脂品质方面的优势。在 Idrus 等^[29]进一步研究中,观察到随着预处理温度的升高,SHS 预处理提取的花生油 K_{232} 和 K_{270} 也会相应增加,这可能是由于延长加热时间促进了甘油三酯分子中共轭二烯和三烯的形成^[81, 82]。

(6) 抗氧化性

目前的研究表明,SHS 预处理对于维持或提高油料的抗氧化活性具有显著效果。Hu 等^[56]发现,相较于未处理和热风处理的麦麸,经过 SHS 预处理的麦麸具有最高的抗氧化活性,这充分证实了 SHS 技术在提升氧化稳定性方面的有效性。叶国栋等^[58]的研究也得到相似的结论,当 SHS 预处理 90 s 时,麸皮的 DPPH、ABTS 自由基清除能力分别在 250 °C 和 220 °C 时达到峰值。综上,短时的 SHS 预处理可有效提高麸皮的抗氧化活性。另外, Lee 等^[34]的研究显示,与未处理的紫苏籽油(6.35%)相比,SHS 预处理过的紫苏籽油(150 °C 和 200 °C)显示出约 5 倍的 DPPH 自由基清除活性(32%),从而使经过 SHS 预处理提取的紫苏籽油具有更高的抗氧化活性,这进一步证实了 SHS 预处理在提升油料抗氧化活性方面的积极作用。

(7) 风味化合物

风味化合物是评估油脂品质的关键指标之一,同时也是消费者选购食用油的重要考量因素^[83]。在加热过程中,油料会生成多样的风味物质,这主要归因于美拉德反应、焦糖化反应以及脂质氧化等复杂的内部化学反应,这些反应赋予不同油脂其独特的风味和品质特征^[83-85]。当前,在植物油脂中,关键风味化合物包括醛类、醇类、酸类、酯类和酮类等,以及杂环化合物如呋喃、吡嗪和吡咯等,这些化合物共同构成了油脂特有的风味特征^[86]。

可可豆的风味与香气对其食用品质至关重要^[87]。研究发现 SHS 热预处理可在短时间内（200 °C、10 min）赋予可可豆理想的风味特征，显著提升可可豆的食用品质^[36]。如 Zzaman 等^[36]研究表明 SHS 预处理（150、200、250 °C）50 min 后，可可豆中吡嗪类风味化合物的含量由 0.21 mg/kg 分别显著增加至 10.2、29.6 和 23.9 mg/kg。与此同时，该研究发现 SHS 预处理可显著降低油料中还原糖（如葡萄糖和果糖）和游离氨基酸的含量，进一步佐证了上述吡嗪类化合物的含量增加主要源于油料中还原糖和游离氨基酸参与的美拉德反应。Lee 等^[34]探究了 SHS 预处理对紫苏籽油挥发性化合物的影响，并发现 SHS 预处理显著降低了 3-甲基戊烷、3-（4-甲基-3-戊烯基）呋喃紫苏烯、2,4-庚二烯醛等多数挥发性化合物的含量，可能源于 SHS 预处理引发紫苏籽细胞外壳的破裂，导致结合态化合物在榨油之前已挥发；经 SHS 预处理的紫苏籽中酶活性降低和抗氧化能力增加会延缓生化反应或氧化降解，从而也会导致挥发物含量降低。然而，值得注意的是 SHS 预处理紫苏籽也可促进一些新的挥发性化合物的生成，如可赋予甜味、坚果味和焦糖味的糠基化合物（如糠醇）、烘焙咖啡味的 3-呋喃甲醛等，一定程度上可提高消费者的接受度^[34]。综上所述，SHS 热预处理对油脂风味特性具有重要影响。

1.2.5.3 过热蒸汽预处理对油脂营养成分的影响

（1）生育酚

维生素是人体必需的重要营养素，在物质代谢中发挥着关键作用。特别是维生素 E，作为一种脂溶性维生素，广泛存在于自然界中，是一种天然抗氧化剂，对维持人体健康和促进新陈代谢等方面具有重要作用^[88, 89]。罗舜菁等^[57]指出，SHS 预处理不仅可以有效避免或抑制高温下活性成分的氧化反应，还能最大限度地保留 α -生育酚，有助于提升米糠的营养价值。

（2）酚类化合物

天然酚类化合物是植物组织的次生代谢产物^[90]，在植物油脂中含量丰富，是其重要的来源之一。这些酚类化合物因其卓越的抗氧化特性，能够有效清除自由基、延缓油脂的自氧化过程，并且能抑制氧化产物的生成^[33, 91]。然而，酚类化合物在高温环境下极易降解，这可能会对油脂的营养价值和储藏稳定性造成不利影响。SHS 预处理技术被公认为是一种新兴的食品加工技术，其优势在于能够在加工过程中显著保留食品中的酚类物质，包括总酚和黄酮等活性成分^[34, 42]。

总酚是指植物组织中所有含有一个或多个酚羟基的化合物的总和,具有清除自由基、抗氧化活性等功能,这些功能对于提高油脂的氧化稳定性至关重要,从而有助于显著延长油脂的货架期^[90]。研究表明,SHS 预处理温度的提高和时间的延长会促进油料中 TPC 增加。例如,Harivaindaran 等^[47]发现,随着 SHS 预处理温度的提高和时间的延长,黑籽油中 TPC 也随之增加,特别是在加热至 250 °C 时效果最为显著 ($P<0.05$)。同样, Lee 等^[34]也观察到了类似的现象,经过 SHS 预处理提取的紫苏籽油中 TPC 是未处理提取的紫苏籽油的 3 倍;在 200 °C 时,TPC 达到了最高值 (12.8 mg/100 g 样品),显著高于 150 °C (8.82 mg/100 g 样品) 和 130 °C (6.10 mg/100 g 样品) 处理时的 TPC。

尽管上述研究中均表明 TPC 与 SHS 预处理的温度和时间呈正相关,但 SHS 预处理对不同油料的影响存在显著差异,每种油料都有其最佳的处理工艺参数。罗舜菁等^[57]深入探讨了 SHS 预处理对米糠中酚类化合物的影响。结果显示,适当的 SHS 预处理温度与时间有助于保留米糠中的 TPC,特别是在 130 °C 条件下处理 4 min 时,米糠的营养价值和理化特性显著改善,这意味着 SHS 预处理不仅使米糠在储藏期间能够维持良好品质,还能有效延长其储藏期。Wang 等^[33]发现在 SHS 预处理 5 min 后,各温度条件下油茶籽油的 TPC 均略有下降;然而,在处理时间较长 (20、30 min) 的情况下,随着 SHS 预处理温度的升高,其 TPC 会增加。最终得出其最佳处理条件为 180 °C 处理 15 min,这一研究成果为油茶籽的加工提供了重要工艺参数;此外,该研究还发现酚类物质与其抗氧化活性呈显著相关。因此,未来的研究应当进一步探索酚类物质如何经过 SHS 预处理的油脂中发挥其抗氧化作用^[43]。

黄酮类化合物,也称为类黄酮,是一类重要的植物次级代谢产物,它们广泛存在于植物界,包括果蔬、茶叶等,以自由态或结合态的形式存在^[92]。适当的 SHS 预处理条件有助于提高油料中的黄酮含量,并对其营养品质产生积极影响,该观点得到了相关研究的支持。叶国栋等^[58]在 SHS 预处理对麸皮中黄酮含量影响的研究中,发现当 250 °C 时, TFC (614.82 mg/100 g) 显著高于 160、190、220 °C;此外,处理 60 s 时, TFC (575.64 mg/100 g) 达到峰值。因此,适当的 SHS 预处理温度与时间可有效提高油料中的黄酮含量。

酚类化合物的存在对于改善油脂的氧化稳定性具有重要作用^[13],这一观点

在先前的研究中得到了证实。然而,SHS 预处理如何影响油脂氧化稳定性的具体机制尚未完全明确,需要进一步的研究来揭示。

1.2.5.4 过热蒸汽预处理对油脂安全品质的影响

油料在高温蒸炒过程中可能会产生对人体健康有害的化合物,如丙烯酰胺、多环芳烃等。SHS 技术作为一种新型的热预处理技术,因其无氧微环境和高传热系数而受到广泛关注。现有研究表明,适当的 SHS 预处理能够有效降低油脂在加工过程中危害物的生成(丙烯酰胺和多环芳烃),以提高油脂安全品质。

研究发现,不同烘焙度的咖啡豆在 SHS 预处理后其丙烯酰胺生成规律有所不同。浅度烘焙咖啡豆中丙烯酰胺的含量随着 SHS 预处理温度的增加而显著增加,增幅约为 106%,主要源于随着处理温度的升高,碳水化合物热降解程度增加,促进了降解产物(尤其葡萄糖)与游离天冬酰胺经美拉德反应生成丙烯酰胺;中度烘焙和深度烘焙咖啡豆样品经 SHS 预处理后,丙烯酰胺的含量显著下降,降幅达 96%,主要源于中度和深度烘焙咖啡豆生产中所需的长时间高温处理(210、230、250 °C)对丙烯酰胺热降解的促进作用^[93]。另一方面,相较于对流烘烤预处理,SHS 预处理可显著降低烘焙咖啡豆中丙烯酰胺的含量,这种现象主要源于 SHS 的无氧微环境对咖啡豆烘焙过程中脂质(尤其亚油酸)氧化的抑制作用,降低了不饱和醛(如丙烯醛)等脂质氧化产物的生成,从而减少了经由蔗糖降解和油脂氧化途径生成的丙烯酰胺^[94]。此外,SHS 预处理技术可显著降低深度烘焙咖啡豆中的多环芳烃(萘烯、菲、芴和蒽)含量,这一现象主要源于长时间高温热处理对多环芳烃热降解的诱导或者促进作用^[93]。然而,目前关于 SHS 预处理对油脂的潜在危害物的研究仍较为有限。亟需进一步深入研究 SHS 预处理对油脂加工中潜在危害物的影响,明确其对相关危害物的生成规律的影响,进而采用合适的 SHS 预处理条件处理油料,以提升油脂产品的安全品质。

1.3 油脂精炼工艺

油脂精炼是通过一系列工序去除毛油中的杂质,旨在提升油脂的储藏稳定性与食用安全性。典型的油脂精炼过程包括脱胶、脱酸、脱色等工序^[95],各工序具有协同作用。油脂脱胶作为油脂精炼的初始环节,其核心功能在于清除毛油中所含的磷脂复合物、金属离子及蛋白质等胶溶性杂质。该工序不仅能够抑制油脂产品贮藏过程中的回色现象,同时提高氧化稳定性,并为后续精炼工序创造有利条

件^[96]。目前常用的脱胶方法包括酸法脱胶、水化脱胶、酶法脱胶、膜法脱胶等。油脂脱酸工序的主要目的是去除游离脂肪酸，同时可协同脱除残留的微量胶质和金属离子^[97]。现行的脱酸方法主要包括碱炼脱酸、超临界萃取脱酸、物理蒸馏法脱酸。油脂中的呈色物质主要来源于油料本身所带的天然有机色素（叶绿素、类胡萝卜素及其它色素）、油料在储运和加工过程形成的加工色素以及由霉变及蛋白质与糖类的分解产物发生美拉德反应而产生的色素（金属离子、油脂及其他类脂物氧化和异构化产生的色素）^[98]。脱色处理可有效改善油脂色泽，延缓油脂的回色，并提升产品品质^[99]，常用方法包括吸附脱色（活性白土、活性炭等^[100]）、加热脱色、氧化脱色等技术。

1.4 研究背景与意义

随着我国食用油消费结构向健康化转型，消费者对高营养价值的玉米胚芽油的需求量持续增长，进而推动了对玉米胚芽需求量的提升。然而，玉米胚芽在加工、运输和储藏过程中极易发生脂质氧化酸败，导致其品质和营养成分显著下降，这不仅影响油脂产品的风味、色泽、品质及食用安全性，还对消费者健康构成潜在威胁。因此，提高玉米胚芽的氧化稳定性成为其深加工领域的关键科学问题。

为提高油料的储藏品质、延长贮藏期并最大程度保留油料的营养成分，需对玉米胚芽进行稳态化处理。热预处理作为油脂加工中的重要方法，是目前应用最为广泛且能有效改善油料品质及稳态化的预处理技术之一。研究表明，适当的热预处理可显著提高出油率、增强油脂氧化稳定性，同时促进风味物质生成和微量脂肪伴随物的溶出，从而全面提升油脂品质。此外，适度的油脂精炼同样也有助于提升油脂产品品质。

SHS 预处理技术作为一种高效、环保、安全且无氧的前沿技术，近年来，在食品加工领域获得了广泛关注^[25]，该技术已在小麦胚芽、青稞、米糠等谷物加工中得到广泛应用。然而，针对 SHS 预处理在玉米胚芽加工中的应用研究尚显不足。基于此，本研究系统探讨了 SHS 预处理技术对玉米胚芽的微观结构、理化性质、营养品质及储藏品质的影响，并分析其对玉米胚芽油在精炼加工过程的作用。

1.5 主要研究内容

本课题利用 SHS 预处理技术代替传统热预处理方式，以玉米胚芽为研究对象，研究在不同处理条件下探究 SHS 预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响，并通过储藏实验以深入探究 SHS 预处理对玉米胚芽储藏品质的影响，最后研究 SHS 预处理对玉米胚芽毛油精炼加工的影响。旨在为提高玉米胚芽在实际生产生活中的氧化稳定性，延长货架期，提高储藏品质，并为玉米胚芽的深加工及应用提供理论科学依据和技术支持。

本文的研究内容主要包括三个部分：

- （1）研究 SHS 预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响；
- （2）研究 SHS 预处理对玉米胚芽储藏品质的影响；
- （3）探究 SHS 预处理对玉米胚芽毛油精炼加工的影响。

本课题的研究技术图如图 1-5 所示：

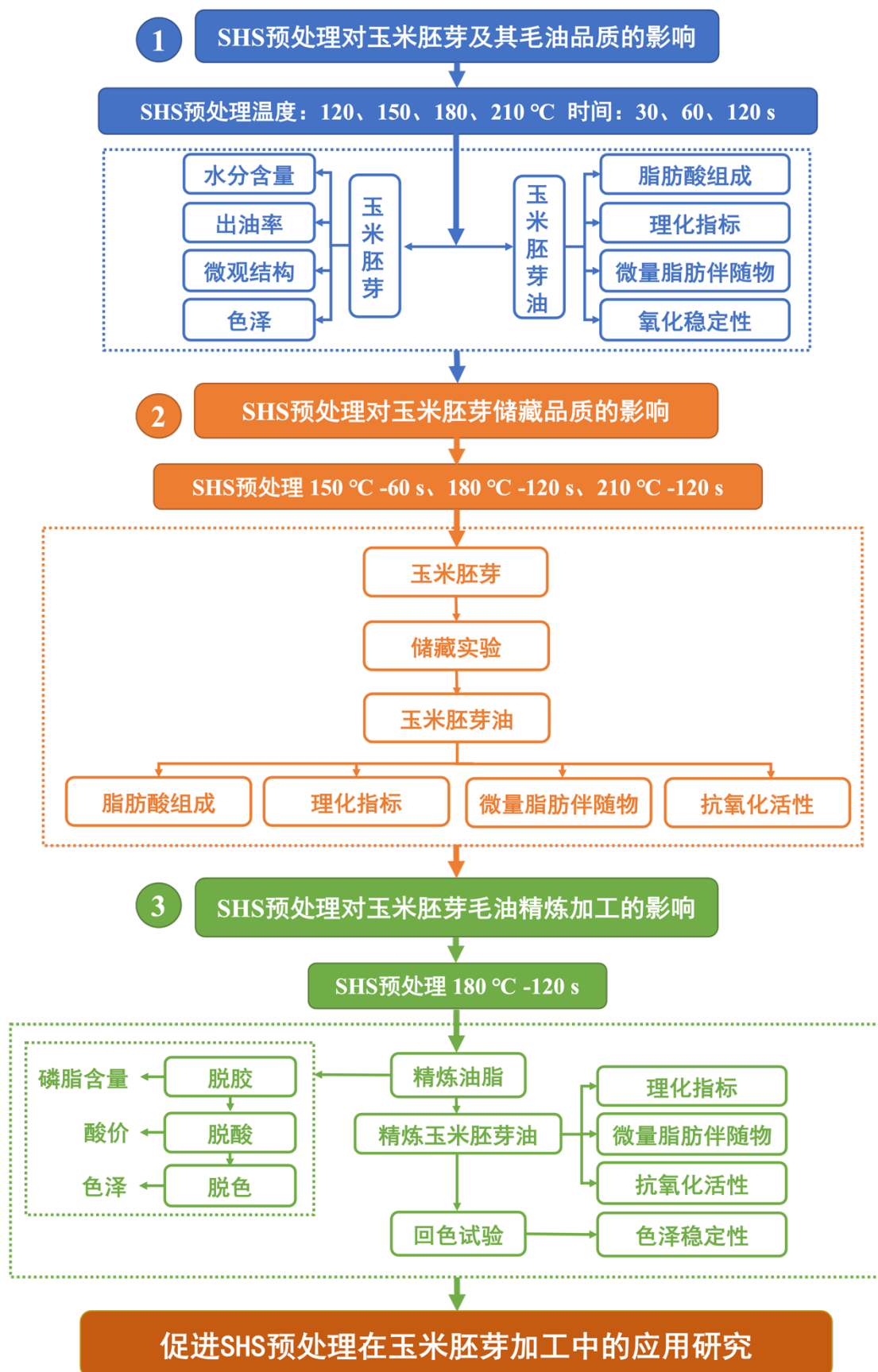


图 1-5 技术路线图

Fig.1-5 Technology roadmap

第2章 过热蒸汽预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响

2.1 引言

玉米胚芽作为玉米加工工业中的副产品，是提取玉米胚芽油的重要油料^[101]。玉米胚芽油具有较高营养价值，并富含多种生物活性化合物。然而，玉米胚芽在加工、运输、储藏过程中极不稳定，从而引起油脂氧化酸败，这对玉米胚芽后期的深加工极其不利，因此，对玉米胚芽进行必要的热预处理尤为重要。油料热预处理是油脂制取中不可或缺的关键环节，其处理条件（如处理方法、操作参数等）对油脂的品质和风味有着重要影响^[33, 84, 102]。适度的油料热预处理方法不仅能够有效提高油料的出油率和提升油脂的氧化稳定性，还能促进油脂中风味物质的生成以及微量脂肪伴随物的溶出，从而提升油脂的整体品质和食用价值。

SHS 技术作为一种新兴热预处理技术，具有节能环保、热效率高、安全性高、无氧特性等显著优点而受到广泛关注^[11, 26, 103]。目前，SHS 技术已应用于较多油料的预处理中，包括：花生^[28]、山茶籽^[32]、紫苏籽^[34]、小麦麸皮^[50]、咖啡豆^[94]、可可豆^[36]等。适度的油料预处理可提高油脂的氧化稳定性以及抗氧化能力，因此本章利用不同温度（120℃~210℃）、不同时间（30 s~120 s）的 SHS 预处理玉米胚芽，通过对玉米胚芽的理化特性（如含水量、出油率和微观结构等）以及玉米胚芽毛油的理化指标（如色泽、氧化指标等）、营养指标（如总酚、生育酚、植物甾醇等微量脂肪伴随物）的测定，并进行相关性分析与主成分分析，研究 SHS 预处理对玉米胚芽油品质的影响，以探究适合玉米胚芽的 SHS 预处理条件。

2.2 实验材料及设备

2.2.1 实验材料

本实验以玉米胚芽为实验材料，由中粮集团提供。

2.2.2 实验试剂

表 2-1 实验试剂
Table 2-1 Experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
无水碳酸钠	≥99.8%	国药集团化学试剂有限公司
正己烷	≥99.9% (HPLC)	国药集团化学试剂有限公司
石油醚	60 °C~90 °C	国药集团化学试剂有限公司
冰醋酸	≥99.5%	国药集团化学试剂有限公司
三氯甲烷	≥99.0%	国药集团化学试剂有限公司
异辛烷	≥99.0%	国药集团化学试剂有限公司
异丙醇	≥99.7% (HPLC)	国药集团化学试剂有限公司
乙醚	≥99.5%	国药集团化学试剂有限公司
甲醇	≥99.5%	国药集团化学试剂有限公司
没食子酸	≥99.0%	国药集团化学试剂有限公司
福林酚试剂	1 mol/L	国药集团化学试剂有限公司
对甲氧基苯胺	≥99.0%	阿拉丁生化科技股份有限公司
尼罗红	≥95.0%	上海生工生物工程股份有限公司
异硫氰酸荧光素, 异构体 I	≥90.0%	上海生工生物工程股份有限公司
37 种脂肪酸甲酯混合标准品	10 mg/mL	美国西格玛奥德里奇公司
α-、β-、γ-和 δ-生育酚标准品	≥98.0%	美国西格玛奥德里奇公司
5α-胆甾烷标准品	≥97.0%	美国西格玛奥德里奇公司

2.2.3 实验设备

表 2-2 实验设备
Table 2-2 Experimental equipment

设备名称	型号	厂家
电子天平	HZK-FA110	美国康州 HZ 电子有限公司
过热蒸汽烤箱	ER-TD7001CN	日本东芝公司
色差计	CR-10 Plus	日本柯尼卡美能达公司
研磨粉碎机	A10 basic	德国艾卡公司
FreeZone 台式冷冻干燥机	03336-31	美国 Labconco 公司
场发射扫描电子显微镜	S-4800	日本日立公司
冷冻切片器	CM1950	德国徕卡公司
激光扫描共聚焦显微镜	LSM 900	德国卡尔·蔡司公司
索氏提取仪	SOX606	海能未来技术集团股份有限公司
恒温振荡器	SHA-B	上海力辰邦西仪器科技有限公司
高速冷冻离心机	Centrifuge 5810 R	德国艾本德公司
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9101.3A	上海三发科学仪器有限公司
旋转蒸发仪	R-1001VN	郑州长城科工贸有限公司
循环水式多用真空泵	SHB-III	郑州长城科工贸有限公司
色度仪	Lavibond Model Fx	英国罗维朋公司
液晶超声波清洗器	KS-3200DW	昆山洁力美超声仪器有限公司
紫外分光光度计	UV-5500PC	上海元析仪器有限公司
涡漩混合器	M6	山东百欧医疗科技有限公司
磁力搅拌器	LC-MSB-HD	上海力辰邦西仪器科技有限公司
高效液相色谱仪	Waters 2695	美国沃特世有限公司
气相色谱仪	GC-7280A	美国安捷伦公司
气相色谱质谱联用仪	TRACE ISQ	美国赛默飞世尔科技公司

2.3 实验方法

2.3.1 样品制备

2.3.1.1 原料筛选

将玉米胚芽进行除杂后，筛选出颜色较浅，大小均一，颗粒饱满的纯净玉米胚芽，进行后续试验。

2.3.1.2 SHS 预处理玉米胚芽

首先对 SHS 设备进行预热，直至达到所需的温度并稳定后再对玉米胚芽样品进行 SHS 预处理。通过前期的预实验发现，当 SHS 预处理温度低于 120 °C、时间少于 30 s 时对玉米胚芽的影响不显著；当预处理温度高于 210 °C、时间超过 120 s 时，会导致玉米胚芽过度加热而出现表面焦黑现象。因此，筛选出以下较为适宜的处理温度与处理时间进行本课题的研究。

处理温度：120 °C、150 °C、180 °C、210 °C；

处理时间：30 s、60 s、120 s；

对照组：未处理的玉米胚芽；

取 100 g 玉米胚芽（共 12 份，每份 100 g）单层放置于烤盘中。处理后，立即将样品从加热室中取出，待样品在室温下冷却后，储存于-20 °C 的环境中，直至进行下一步实验。

2.3.1.3 玉米胚芽毛油的制备

玉米胚芽粉：将玉米胚芽经粉碎机磨碎后，过 80 目筛；

玉米胚芽毛油：玉米胚芽粉与正己烷按照 1:10 的比例混合，在 60 °C 水浴条件下以 150 r/min 的速度振荡 4 h，以 3500 r/min 离心 15 min 取上清液，将上清液抽滤后使用旋转蒸发仪在 50 °C 水浴条件下以 120 r/min 的速度除去正己烷，制得油样，并将其置于棕色玻璃瓶中在-20 °C 条件下保存。

2.3.2 玉米胚芽的测定

2.3.2.1 水分含量的测定

玉米胚芽粉的水分含量参照 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》中的直接干燥法，测量三次取平均值。

2.3.2.2 脂肪含量的测定

将 2.0 g (m_2) 玉米胚芽粉末样品装进滤纸包后，将滤纸包插入滤纸筒中，

再将其放入萃取杯内。对溶剂杯进行恒重，并记录杯重为 m_0 ，再量取 120 mL 石油醚加入已恒重的溶剂杯中，打开冷却循环水及索氏提取仪电源，选择索氏标准萃取方式进行加热萃取。萃取结束后，再次对溶剂杯进行恒重，并记录杯重为 m_1 。计算公式：

$$X = \frac{m_1 - m_0}{m_2} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中：X：样品的脂肪含量，g/100 g；

m_0 ：恒重后溶剂杯的质量，g；

m_1 ：恒重后溶剂杯和脂肪的质量，g；

m_2 ：样品质量，g；

100%：换算系数。

2.3.2.3 微观结构的测定

(1) 玉米胚芽横截面微观结构的观察

观察玉米胚芽横截面微观结构参考 Wang 等^[33]的方法并稍作修改。将玉米胚芽进行切片后，使用真空冷冻干燥器在 $-84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行 24 h 的真空冷冻干燥使其含水量降至零，将处理好的样品横截面向上均匀地平铺在贴有导电胶的样品台上，然后进行喷金处理，将电压加至 5.0 kV，使用 SEM 对玉米胚芽横截面的微观形貌进行观察，并对其成像拍照。

(2) 玉米胚芽细胞形态的观察

观察玉米胚芽细胞形态参考 Liu 等^[104]、Wang 等^[105]和冯梦迪^[6]的方法，并稍作修改。将玉米胚芽在去离子水中浸泡 2 h，使用冷冻切片机将其切成 $16\text{ }\mu\text{m}$ 的薄片，并放置于载玻片上。将 0.1% (w/v) 的尼罗红染液和 0.02% (w/v) 的异硫氰酸荧光素染液均匀滴在玉米胚芽薄片上，水洗后将其避光染色 20 min。待染色结束后，通过激光扫描共聚焦显微镜 (Confocal laser scanning microscope, CLEM) 中两个光电倍增管在 500~536 nm 和 595~648 nm 的波长范围内分别检测染料发射的荧光，进行观察玉米胚芽细胞中脂质及蛋白质的微观结构。

2.3.2.4 出油率的测定

玉米胚芽出油率的量化参考 Wang 等^[33]的方法。计算公式：

$$\text{出油率\% (以干基计)} = \text{油料脂肪含量\%} - \text{饼粕脂肪含量\%} \quad (2-2)$$

2.3.2.5 色差的测定

玉米胚芽色差的测定参考师萱等^[106]方法，使用色差仪分别对未处理玉米胚芽与经 SHS 不同处理的玉米胚芽的颜色进行客观综合评价，每份样品取 60 g，重复测量 10 次，以 10 次测量结果平均值为最终结果。颜色用 Hunter 系统的 L^* 、 a^* 、 b^* 值表示；其中 L^* 值表示亮度， a^* 值表示红绿度， b^* 值表示黄蓝度^[106, 107]。 ΔE 表示总色差， ΔE 越小表示 SHS 预处理过程对玉米胚芽色泽的影响越小。计算公式：

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2} \quad (2-3)$$

2.3.3 玉米胚芽油的测定

2.3.3.1 脂肪酸组成的测定

脂肪酸组成的测定参考王俏君^[108]的方法。按照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准：食品中脂肪酸的测定》进行测定。采用快速甲酯化方法对样品进行前处理。

色谱条件：进样口温度为 250 °C；检测器温度为 250 °C；进样量 1 μ L，分流比 100:1； N_2 流速 25 mL/min， H_2 流速 30 mL/min，空气流速 400 mL/min；升温程序：初始柱温 60 °C 保持 3 min，以 5 °C/min 的速度升温至 175 °C 保持 15 min，再以 2 °C/min 升温至 220 °C 并保持 10 min。采用 37 种脂肪酸甲酯混合标准品定性，面积归一化法定量。

2.3.3.2 色泽的测定

玉米胚芽油色泽的测定参考 AOCS RY & Chlorophyll，使用 Lavibond Model Fx 色度仪进行测定，使用 25.4 mm（1 英寸）的石英比色皿，采样温度为 30 °C，对红值（Red, R）和黄值（Yellow, Y）进行测定。

2.3.3.3 酸价的测定

AV 的测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准食品中酸价的测定》，以 mg KOH/g 表示。

2.3.3.4 过氧化值的测定

PV 的测定参照 GB 5009.227—2023《食品安全国家标准食品中过氧化值的测定》，以 mmol/kg 表示。

2.3.3.5 共轭二烯值与共轭三烯值的测定

K_{232} 和 K_{270} 的测定参考 AOCS Official Method Ch 5-91, Reapproved 2009 测定

油脂紫外分光光度。

精确称取约 0.25 g 油样置于 25 mL 容量瓶中，使用异辛烷溶解样品并定容至刻度线。使用 1 cm 的石英比色皿，以异辛烷作为空白对照组，分别在 232 nm（共轭二烯特征吸收峰）和 270 nm（共轭三烯特征吸收峰）处测定样品吸光度（吸光度值在 0.1~0.8 之间）。计算公式：

$$K_{\lambda} = \frac{A_{\lambda}}{c \times d} \quad (2-4)$$

式中： K_{λ} ： K_{232} 或 K_{270} ，即共轭二烯值和共轭三烯值；

A_{λ} ：测得试样在波长 λ (nm) 处的吸光度；

C：溶液浓度，g/100 mL；

d：比色皿的长度，cm。

2.3.3.6 茴香胺值的测定

p-AV 的测定参考 AOCS Official Method Cd 18-90, Revised 2011。

(1) 茴香胺试剂的制备（现用现配）

称取 0.125 g 对甲氧基苯胺于 50 mL 容量瓶中，使用冰醋酸溶解并稀释定容至刻度线，避免强光直射。使用之前用异辛烷作为空白对照检查吸光度，如上升至 0.2 以上不能使用，需要精制后才可使用。

(2) 测试溶液的制备

称取 0.5 g 油样于 25 mL 容量瓶中，使用异辛烷溶解并稀释定容至刻度线。

(3) *p*-AV 的测量

反应溶液：取 5 mL 测试溶液至 10 mL 试管中，加入 1 mL 茴香胺试剂，将混合溶液震荡后在暗处反应 10 min，以 5 mL 异辛烷加入 1 mL 茴香胺试剂后的混合溶液为空白对照组，使用 1 cm 的石英比色皿，在 350 nm 处测量吸光度 (A_s)（吸光度值在 0.1~0.8 之间）。

空白溶液：另取 5 mL 测试溶液至 10 mL 试管中，以异辛烷为空白对照组，使用 1 cm 的石英比色皿，测量其吸光度 (A_b)（吸光度值在 0.1~0.8 之间）。计算公式：

$$p-AV = \frac{25 \times (1.2 \times A_s - A_b)}{m} \quad (2-5)$$

式中：*p*-AV：茴香胺值；

A_s ：反应溶液的吸光度；

Ab: 空白溶液的吸光度;

m: 油样质量, g。

2.3.3.7 全氧化值的测定

全氧化值 (Totox value, TV) 为 2 倍 PV 与 *p*-AV 的总和。计算公式:

$$TV = (2 \times PV) + p-AV \quad (2-6)$$

式中: TV: 全氧化值;

PV: 样品的过氧化值, mmol/kg;

p-AV: 样品的茴香胺值。

2.3.3.8 总酚含量的测定

(1) 酚类化合物的提取^[109, 110]

精确称取 2.00 g 油样加入到 2 mL 正己烷和甲醇/水 (80/20) 溶液至 10 mL 离心管中, 剧烈混合 2 min 后, 以 3900 r/min 离心 15 min, 收集下层液, 并将上层液重复以上步骤萃取两次。合并收集的下层液 (总酚提取物), 使用 2 mL 正己烷洗涤残油后, 用甲醇定容至 10 mL。

(2) 总酚的测定^[111]

移取 1 mL 样品提取物与 0.5 mL 福林酚显色剂 (0.1 mol/L) 避光反应 6 min 后, 向混合物中加入 2 mL 7.5% Na₂CO₃ 溶液和 6.5 mL 去离子水, 待混合溶液避光反应 90 min 后, 以不含样品的混合溶液为空白对照组, 使用 1 cm 的石英比色皿, 使用紫外分光光度计在 765 nm 处测量吸光度值。

(3) 标准曲线的绘制

按总酚测定方法, 绘制没食子酸标准曲线: 分别配置 5、25、100、250、500、1000 μg/mL 系列浓度的没食子酸溶液, TPC 表示没食子酸当量 (GAE)/100g 油料干重。

2.3.3.9 生育酚含量的测定

生育酚含量的测定参考郑立友^[72]的方法, 采用高效液相色谱法 (HPLC) 进行测定。

(1) 样品制备

称取 1 g (精确至 0.001 g) 油样于 10 mL 棕色容量瓶中, 使用色谱纯正己烷定容, 取 1 mL 上层清液过有机滤膜 (0.22 μm), 再取 20 μL 进样后, 进行 HPLC

分析。

(2) 色谱条件

色谱柱为正相硅胶柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 柱温为 30 °C; 流动相比比例为正己烷:异丙醇 (98.5:1.5, v/v); 流速为 1.0 mL/min; 紫外全波长检测器, 检测波长为 295 nm。采用标准品保留时间定性外标法定量。

(3) 标准曲线的绘制

配制 1 mg/mL 的混合生育酚标品的正己烷溶液, 根据标准曲线定量计算油样中生育酚含量。

2.3.3.10 植物甾醇含量的测定

植物甾醇含量的测定参考张飞^[112]的方法, 采用气相色谱-质谱联用法 (GC-MS) 进行测定。

(1) 样品制备

称取 0.2~0.3 g (精确至 0.001 g) 油样于容器中, 加入 0.5 mL 的 0.1 mg/mL 内标 (5α-胆甾烷醇) 与 3 mL 浓度为 2 mol/L KOH-乙醇溶液 (5.6 g KOH 溶于 50 mL 95%乙醇), 85 °C 水浴皂化 1 h, 待冷却后, 加入 2 mL 去离子水和 5 mL 正己烷, 离心后收集上层液, 下层液用 3 mL 正己烷重复提取两次, 合并收集的所有上清液后, 再加入 2 mL 去离子水进行振荡, 再次进行离心后取上清液, 氮气吹至干。加入 200 μL 的 BSTFA:TMCS (99:1) 硅烷化试剂, 并以 75 °C 持续水浴 30 min。待冷却后, 过有机滤膜 (0.22 μm), 取 1 μL 进样后, 随后进行 GC-MS 分析。

(2) 色谱条件

色谱柱为 DB-5 柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 升温程序为 200 °C 保持 0.5 min, 再以 10 °C/min 升温至 300 °C 保持 18 min, 检测器与进样口温度为 280 °C; 分流比为 100:1; 载气为 99.99% 氦气; 载气流速为 1.2 mL/min; 程序时间为 28.5 min。

2.3.3.11 β-胡萝卜素含量的测定

β-胡萝卜素含量的测定方法采用罗维朋比色计 (Lavibond Model Fx, Tintometer Group, Amesbury, UK) 中的 AOCS RY & β-carotene 色标, 取适量油倒入光程为 25.4 mm 的石英比色槽中进行测定, 采样温度为 30 °C。

2.3.3.12 氧化稳定性的测定

氧化稳定性 (Oxidative stability, OSI) 的测定参考郑立友^[72]的方法, 采用 Rancimat 法进行测定。

2.3.4 数据统计分析

本实验数据利用 SPSS 27.0 以及 EXCEL 2019 进行显著性分析。采用独立样本 t 检验法进行两组独立样本均值的差异性分析, 单因素方差分析法 (ANOVA) 实施多组样本间差异的显著性检验, 当组间差异在 0.05 水平上时被认为有显著性差异 ($P < 0.05$), 每个指标均进行 3 次重复测定, 结果取平均值 $\pm$ 标准差。图采用 Prism 9 进行绘制。

2.4 结果与分析

2.4.1 SHS 预处理对玉米胚芽水分含量的影响

通过对图 2-1 分析可知, 玉米胚芽的水分含量总体呈现显著的下降趋势 ($P < 0.05$), 这种变化与 SHS 预处理时间和温度呈现明显的依赖关系。这种变化规律主要归因于 SHS 预处理过程中过热蒸汽与玉米胚芽直接接触, 使过热蒸汽将热量传递给玉米胚芽, 使其温度迅速升高, 从而加速了内部水分的蒸发过程。与未处理玉米胚芽相比, 在 30 s~60 s 的较短预处理时间内, 水分含量呈现缓慢降低的趋势。然而, 当 SHS 预处理时间延长到 120 s 时, 水分含量出现急剧下降。特别是在 210 °C 下 SHS 预处理 120 s 时达到了水分含量的最低点 (1.79 g/100 g), 仅为未处理样品 (3.23 g/100 g) 的 50% 左右, 这可能是因为 SHS 预处理处于较高温度 (高于 180 °C) 时, 水分蒸发动力学显著增强, 导致玉米胚芽细胞结构发生改变, 促进了水分的扩散和迁移。这一发现与 Harivaindaran 等^[47]在对黑籽进行 SHS 预处理时的研究结果相似, 当在 150 °C 下对黑籽进行 10 min SHS 预处理时发现黑籽的水分损失高达 66%。

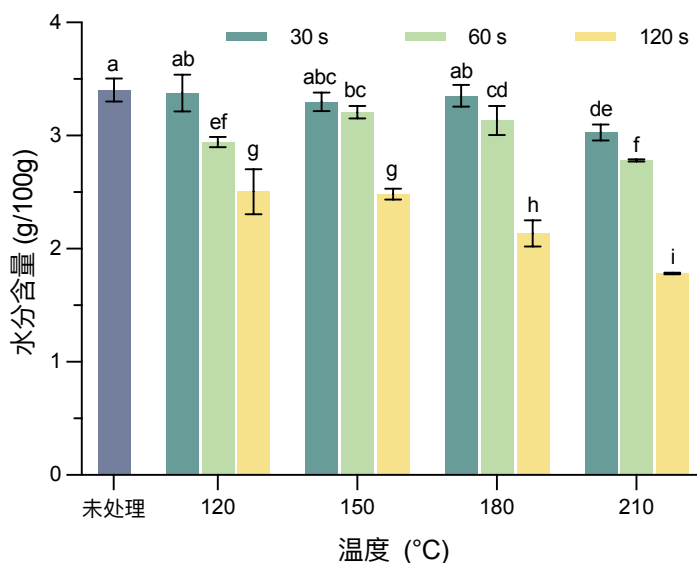


图 2-1 SHS 预处理对玉米胚芽水分含量的影响

Fig. 2-1 Effect of SHS pretreatment on moisture content of corn germ

2.4.2 SHS 预处理对玉米胚芽微观结构的影响

植物油体作为典型的亚细胞结构，其组成和形态特征对油脂品质具有重要影响。从结构组成来看，油体主要由三酰甘油（91%~98%）构成核心，外层由磷脂（0.6%~2%）和锚定蛋白质（0.6%~3.0%）组成的单层膜结构包裹^[113]。通过 CLEM 对玉米胚芽进行 2D 和 3D 微观结构表征（图 2-2 中（A）和（B））。可以清晰观察到油体呈现出近似圆形或椭圆形形态，并显示出红色荧光；而蛋白质则呈现不规则形态，并显示出绿色荧光。值得注意的是，未处理玉米胚芽中的油体呈现出不规则的空间分布特征，这可能归因于细胞内油体与大型蛋白质体之间的拥挤效应。具体而言，在细胞基质中，油体和蛋白质体共同竞争有限的胞内空间，导致油体无法维持其典型的球形结构。

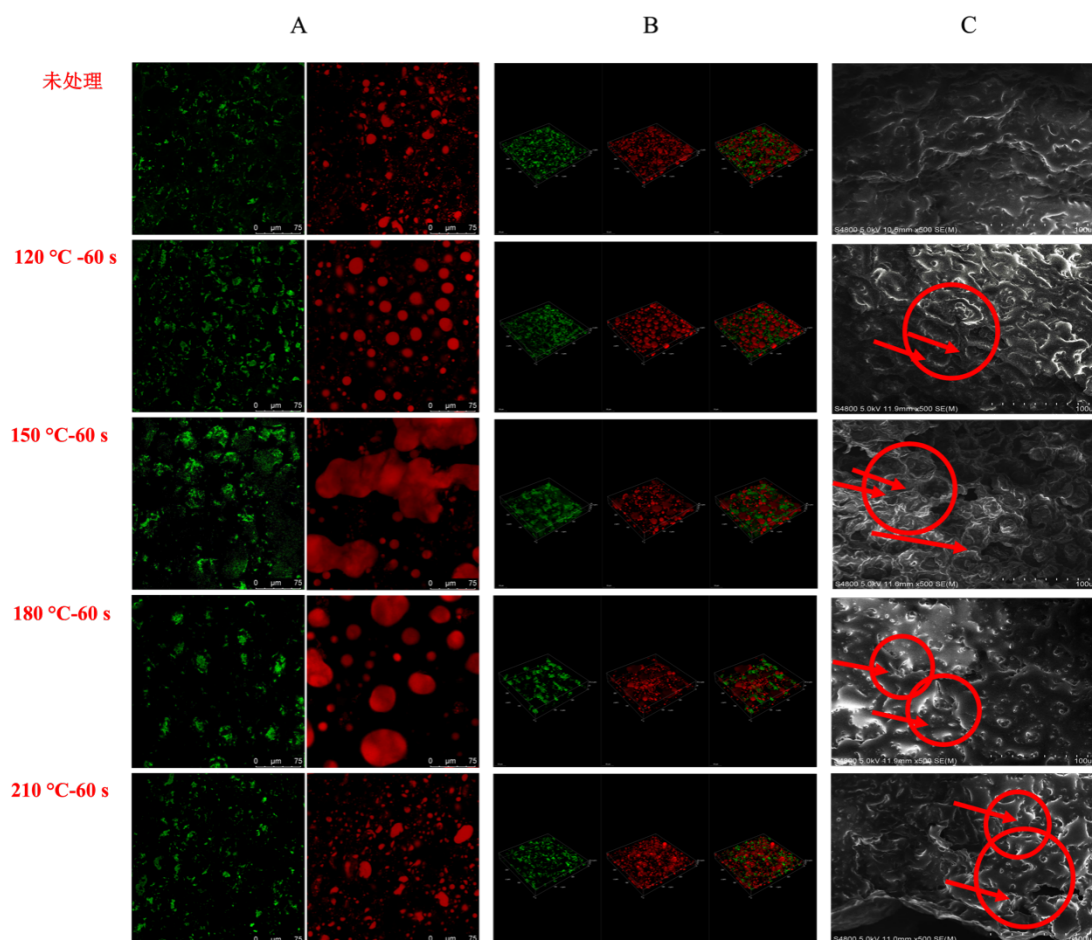


图 2-2 SHS 预处理对玉米胚芽微观结构的影响 ((A) 玉米胚芽内部油体与蛋白的 CLSM 2D 微观结构的分析; (B) 玉米胚芽内部油体与蛋白的 CLSM 3D 微观结构的分析; (C) 玉米胚芽 SEM 微观结构的分析)

Fig. 2-2 Effect of SHS pretreatment on microstructure of corn germ ((A) Analysis of CLSM 2D microstructure of oil body and protein in corn germ ; (B) Analysis of CLSM 3D microstructure of oil body and protein in maize germ ; (C) Analysis of SEM microstructure of corn germ)

SHS 预处理对玉米胚芽油体的形态和结构产生了显著影响 (图 2-2 (A))。在 150 °C 下 SHS 预处理 60 s 的条件下, 油体出现明显破裂、絮凝和聚集现象。这种变化与 Altan 等^[114]在杏仁中观察到的现象相似。随着处理温度从 180 °C 升高到 210 °C 时, 由于热不稳定性, 较大的油体进一步破裂形成较小的油体。这种微观结构的改变有利于游离油体的释放和提取, 从而显著提高出油率 ($P < 0.05$)。此外, 通过 3D 的 CLEM 分析 (图 2-2 (B)) 进一步证实了油体的破裂和聚集过程。总体而言, 上层较小的油滴数量逐渐增加, 而在 150 °C~210 °C 时则迅速减少; 此外, 在 150 °C~210 °C 处理范围内, 下层较小油滴数量显著增加。

SEM 分析结果 (图 2-2 (C)) 显示, 未处理玉米胚芽具有完整的微观结构,

然而，经 SHS 预处理后，玉米胚芽微观结构显示出聚集现象，表面出现不规则的颗粒状。这些发现与先前的研究结果一致^[33]。此外，与未处理玉米胚芽相比较，SHS 预处理的玉米胚芽表面出现了较多孔隙（图 2-2（C）），这与 SHS 预处理瓜尔豆粉^[115]中观察到的多孔结构相似。

2.4.3 SHS 预处理对玉米胚芽出油率的影响

图 2-3 展示了未处理与 SHS 预处理玉米胚芽的出油率对比结果。统计分析表明，与未处理样品相比，SHS 预处理样品的出油率显著提高（ $P < 0.05$ ）。具体而言，随着预处理温度升高和处理时间延长至 180 °C 处理 60 s 时，出油率呈现持续上升趋势，达到 46.52%，较未处理样品显著增加 26.9%（ $P < 0.05$ ）。此后，出油率略有下降并稳定在 43.76% 左右。这一变化规律与 Harivaindaran 等^[47]的研究结果基本一致，他们发现除 200 °C 下 20 min SHS 预处理的黑籽之外，其他处理组的黑籽出油率均高于未处理组。这可能归因于玉米胚芽微观结构的变化，结合 SEM 分析（图 2-2（C））所示，孔隙结构的形成不仅增加了比表面积，还可能促进了细胞内油脂的迁移和释放，从而提高了油脂提取率。Suri 等人^[116]在红外和干空气烤制黑孜然籽研究中观察到了类似现象。此外，SHS 预处理的紫苏籽和花生也报道了类似结果，出油率分别从 33.1% 增加到 78.8% 和从 15.9% 增加到 26.84%^[29, 34]。然而，值得注意的是，油茶籽在 SHS 预处理过程中表现出了不同规律，其出油率随温度升高而下降，这可能与水分的过度损失有关^[33]。类似地，Yodkaew 等人^[117]在糙米进行 SHS 烤制过程中也观察到油脂含量下降的现象，这可能是由于高温导致油脂热降解所致。

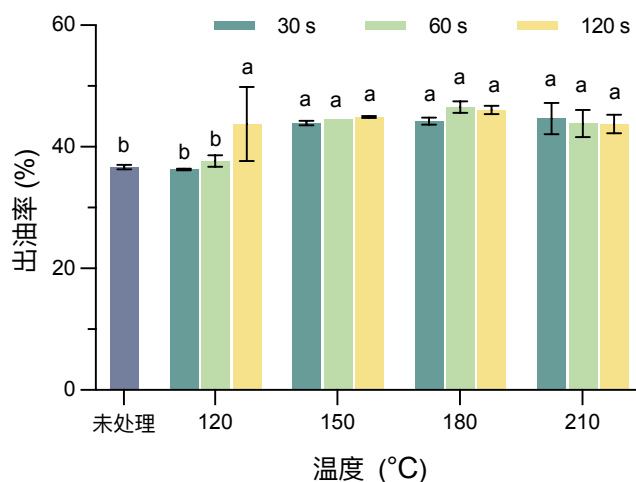


图 2-3 SHS 预处理对玉米胚芽出油率的影响

Fig. 2-3 Effect of SHS pretreatment on oil yield of corn germ

2.4.4 SHS 预处理对玉米胚芽色泽的影响

色泽作为食品品质的重要感官指标,直接影响消费者的接受程度。表 2-3 展示了 SHS 预处理前后玉米胚芽的色泽参数变化。结果表明,SHS 预处理显著影响了玉米胚芽的色泽特征 ($P < 0.05$): L^* 值、 a^* 值、 b^* 值均呈现先下降后上升的非线性趋势。具体而言,所有处理组的 L^* 值 (58.39~62.38) 均显著低于未处理样品 (62.62 ± 0.58) ($P < 0.05$),表明 SHS 预处理降低了玉米胚芽的亮度;在 a^* 值方面,180 °C 处理 60 s~120 s 和 210 °C 处理 30 s~120 s 的样品 (10.20~11.67) 显著高于未处理样品 (10.15 ± 0.46),显示出更明显的红色色调 ($P < 0.05$)。除 120 °C 处理 30 s~120 s 和 150 °C 处理 30 s~60 s 外,其余 SHS 预处理样品的 b^* 值 (37.14~38.57) 均显著高于未处理样品 (36.79 ± 0.62) ($P < 0.05$),表明黄色色调增强。这些变化规律说明,在较高温度和较长时间的 SHS 预处理条件下,玉米胚芽的色泽发生显著改变 ($P < 0.05$),表现为亮度降低和色泽加深,这可能是由于 SHS 预处理过程中色素降解所导致的。

ΔE 值作为综合反映 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值变化的色差指标,能够有效表征玉米胚芽的色泽变化程度,其数值越低表明预处理对样品的影响越小。分析结果表明,除 120 °C-30 s (4.28 ± 1.20) 和 150 °C-30 s (4.34 ± 1.22) SHS 预处理样品外,其余样品的 ΔE 值均维持在较低水平且变化幅度较小,这说明 SHS 预处理对玉米胚芽色泽的影响相对有限。这种现象可能归因于在 SHS 预处理过程中形成的无氧微环境,有效抑制了美拉德反应等褐变反应的发生。这一发现与 Liu 等^[118]在青稞 SHS 预处理研究中的结果一致。然而,值得注意的是,Ling 等^[35]在芝麻籽 SHS 预处理研究中观察到不同的色泽变化规律,其 a^* 值与 b^* 值均呈现先上升后下降的趋势,这可能是由于磷脂在热处理过程中的降解有关。

表 2-3 SHS 预处理对玉米胚芽色泽的影响

Table 2-3 Effect of SHS pretreatment on red value of corn germ

处理 方式	温度 (°C)	时间 (s)	L^*	a^*	b^*	ΔE
未处理	/	/	62.62±0.58 ^a	10.15±0.46 ^c	36.79±0.62 ^e	/
SHS 预处理	120	30	60.71±1.81 ^d	7.86±0.56 ^f	34.11±0.57 ^h	4.28±1.20 ^a
		60	60.86±1.52 ^{cd}	9.19±0.36 ^e	35.25±0.86 ^g	2.84±1.15 ^{bcd}
		120	61.35±0.65 ^{bcd}	9.83±0.50 ^{cd}	36.71±0.25 ^{ef}	1.46±0.53 ^{fg}
	150	30	58.39±1.22 ^e	9.74±0.31 ^{cd}	36.18±0.58 ^f	4.34±1.22 ^a
		60	60.94±0.86 ^{cd}	9.97±0.49 ^{cd}	36.73±0.44 ^{ef}	1.87±0.70 ^{efg}
		120	62.38±0.55 ^{ab}	9.61±0.36 ^{de}	37.14±0.56 ^{de}	1.02±0.36 ^g
	180	30	58.91±1.41 ^e	9.90±0.68 ^{cd}	37.44±0.53 ^{cd}	3.88±1.36 ^a
		60	59.24±0.90 ^e	10.78±0.61 ^b	37.01±0.62 ^{de}	3.57±0.78 ^{ab}
		120	61.92±1.20 ^{abc}	10.98±0.40 ^b	38.05±0.62 ^{ab}	2.08±0.53 ^{def}
	210	30	61.58±0.90 ^{abcd}	10.20±0.58 ^c	37.85±0.58 ^{bc}	1.80±0.59 ^{efg}
		60	60.79±0.82 ^d	11.04±0.51 ^b	37.94±0.78 ^{bc}	2.46±0.93 ^{cde}
		120	60.98±0.88 ^{cd}	11.67±0.68 ^a	38.57±0.61 ^a	3.02±0.75 ^{bc}

注：同一列中不同上标字母的值存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.4.5 SHS 预处理对玉米胚芽脂肪酸组成的影响

表 2-4 详细列出了从未处理和经 SHS 预处理的玉米胚芽样品中所提取的油脂脂肪酸组成，共检测到 11 种饱和脂肪酸 (Saturated fatty acid, SFAs) 和不饱和脂肪酸 (Unsaturated fatty acid, UFAs)。分析结果表明，亚油酸 (56.92%~57.19%)、油酸 (27.10%~27.35%) 和棕榈酸 (11.98%~12.13%) 是主要的脂肪酸组成，三者合计约占总脂肪酸含量的 95% 以上。

由表 2-4 可知，尽管各实验组间存在轻微波动，但统计学分析显示脂肪酸组成差异无显著性 ($P > 0.05$)，这种稳定性可能归因于 SHS 预处理过程中玉米胚芽发生氧化情况的减少。这一发现与先前关于 SHS 预处理麦麸的研究结果相一致^[56]。值得注意的是，与传统热空气预处理相比，SHS 预处理表现出明显的优势，热空气预处理导致 SFA 总量显著增加 ($P < 0.05$) 和 UFA 总量减少^[56]。而本研究中 SHS 预处理作为无氧加热介质，有效避免了 UFA 的氧化降解，保持了脂肪酸组成的稳定性。这些结果不仅证实了 SHS 预处理在保护油脂脂肪酸组成方面的有效性，也为不同热处理方法对油脂品质的影响提供了重要参考。

表 2-4 SHS 预处理对玉米胚芽油脂肪酸组成的影响(占总脂肪酸的百分比)

Table 2-4 Effect of SHS pretreatment on fatty acid composition of corn germ oil(percentage of total fatty acids)

脂肪酸组成/ (%)	未处理	120 °C			150 °C			180 °C			210 °C		
		30 s	60 s	120 s	30 s	60 s	120 s	30 s	60 s	120 s	30 s	60 s	120 s
C16:0	12.01±	12.05±	12.00±	12.02±	12.12±	12.04±	12.03±	12.07±	12.09±	12.03±	12.06±	12.06±	12.00±
(棕榈酸)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.00
C16:1	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±	0.08±
(棕榈油酸)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C17:0	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±	0.07±
(十七烷酸)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C18:0	1.81±	1.79±	1.84±	1.82±	1.81±	1.80±	1.81±	1.82±	1.80±	1.84±	1.75±	1.75±	1.81±
(硬脂酸)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.07	0.08	0.06	0.00
C18:1n9c	27.22±	27.14±	27.26±	27.13±	27.16±	27.18±	27.27±	27.19±	27.19±	27.13±	27.18±	27.21±	27.24±
(油酸)	0.00	0.07	0.14	0.03	0.02	0.07	0.11	0.05	0.10	0.04	0.04	0.02	0.07
C18:2n6c	57.08±	57.14±	57.05±	57.15±	57.05±	57.11±	57.02±	57.05±	57.04±	57.12±	57.13±	57.10±	57.09±
(亚油酸)	0.00	0.07	0.07	0.02	0.00	0.10	0.14	0.07	0.08	0.00	0.07	0.13	0.07
C20:0	0.42±	0.42±	0.42±	0.42±	0.42±	0.42±	0.42±	0.42±	0.42±	0.42±	0.44±	0.43±	0.41±
(花生酸)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
C20:1	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±	0.25±
(二十碳酸)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C18:3n3	0.81±	0.81±	0.80±	0.82±	0.80±	0.81±	0.81±	0.81±	0.81±	0.81±	0.80±	0.81±	0.81±
(α -亚麻酸)	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

续表 2-4

脂肪酸组成/ (%)	未处理	120 °C			150 °C			180 °C			210 °C		
		30 s	60 s	120 s	30 s	60 s	120 s	30 s	60 s	120 s	30 s	60 s	120 s
C22:0	0.13±	0.13±	0.11±	0.12±	0.12±	0.12±	0.12±	0.12±	0.12±	0.12±	0.12±	0.12±	0.12±
(二十二碳酸)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C24:0	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±	0.13±
(二十四碳酸)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ SFA	14.44±	14.46±	14.44±	14.44±	14.53±	14.45±	14.44±	14.49±	14.49±	14.48±	14.44±	14.43±	14.41±
	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.11	0.01
Σ MUFA	27.55±	27.47±	27.58±	27.45±	27.49±	27.50±	27.60±	27.52±	27.52±	27.46±	27.51±	27.53±	27.56±
	0.00	0.07	0.04	0.03	0.02	0.07	0.10	0.05	0.10	0.03	0.03	0.02	0.07
Σ PUFA	57.89±	57.94±	57.85±	57.97±	57.85±	57.92±	57.83±	57.87±	57.85±	57.93±	57.93±	57.91±	57.90±
	0.01	0.07	0.07	0.03	0.00	0.10	0.14	0.07	0.08	0.00	0.07	0.13	0.07

注：各样品之间无显著性差异。

2.4.6 SHS 预处理对玉米胚芽油理化指标的影响

2.4.6.1 色泽

食物在热处理过程中，美拉德反应和焦糖化反应的发生往往导致其色泽发生改变。图 2-4 展示了不同 SHS 预处理条件下玉米胚芽油样品 R 值的变化。SHS 预处理后的 R 值为 2.50~4.85，而对照组的 R 值为 6.80 ± 0.14 ，实验结果表明，SHS 预处理显著降低 R 值 ($P < 0.05$)，最大降幅高达 63.2%。其中 180 °C SHS 预处理 60 s 条件下获得最低 R 值 (2.50 ± 0.00)。这种显著的 R 值降低现象可能归因于两个机制：(1) β -胡萝卜素等油溶性色素在 SHS 预处理过程中的热降解（见图 2-11）；(2) 无氧环境抑制了氧化褐变反应和磷脂降解^[34]。这一发现与 SHS 预处理紫苏籽后的研究结果相一致，后者在处理过程中也保持了稳定的色泽特征^[34]。

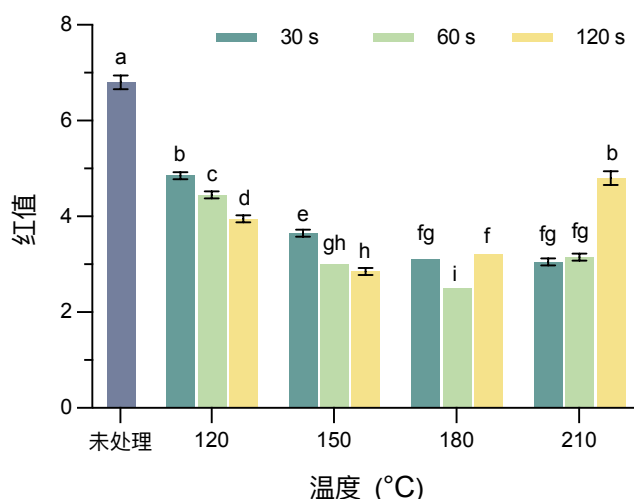


图 2-4 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油红值的影响

Fig. 2-4 Effect of SHS pretreatment on red value of the extracted corn germ oil

值得注意的是，SHS 预处理与传统热处理（如微波辐射和热空气处理）对油脂色泽的影响存在显著差异：传统热处理方法通常导致 R 值升高和油脂色泽加深，这主要是由于美拉德反应、焦糖化反应和氧化聚合反应^[34, 102, 116]。这些对比结果表明，SHS 预处理在保持油脂色泽稳定性方面具有独特优势。

2.4.6.2 酸价

AV 是衡量油脂中游离脂肪酸含量的重要指标，在评估油脂品质变化及精炼程度方面具有关键作用^[103]。如图 2-5 所示，经 SHS 预处理的样品中，AV 介于 2.30~3.39 mg KOH/g 之间，显著低于未处理样品的 AV (3.24 ± 0.23 mg KOH/g)

($P < 0.05$)。然而,当处理条件为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 60 s ($3.84 \pm 0.24\text{ mg KOH/g}$) 和 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 30 s ($4.28 \pm 0.25\text{ mg KOH/g}$) 时, AV 却高于未处理样品。类似的现象在 SHS 预处理的黑豆中也有报道,其 AV 同样呈现下降趋势^[119]。本研究观察到 AV 降低的现象,可能归因于美拉德反应以及酚类、草酸、植酸的挥发^[103]。此外,在 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理不足 30 s 时, AV 较高,这可能是由于三酰基甘油发生水解反应,导致游离脂肪酸含量增加。相比之下,SHS 预处理后提取的花生油的 AV 虽低于常规无蒸汽烘烤样品,但仍高于未经处理的花生油^[29]。Wang 等^[28]的研究也表明,SHS 预处理对花生油的 AV 无显著影响 ($P > 0.05$)。不同种类的油料和 SHS 参数为我们提供了各种现象的见解。进一步的方差分析发现,温度 ($P = 0.376$) 和延长时间 ($P = 0.555$) 对 AV 值 ($P > 0.05$) 没有显著影响。

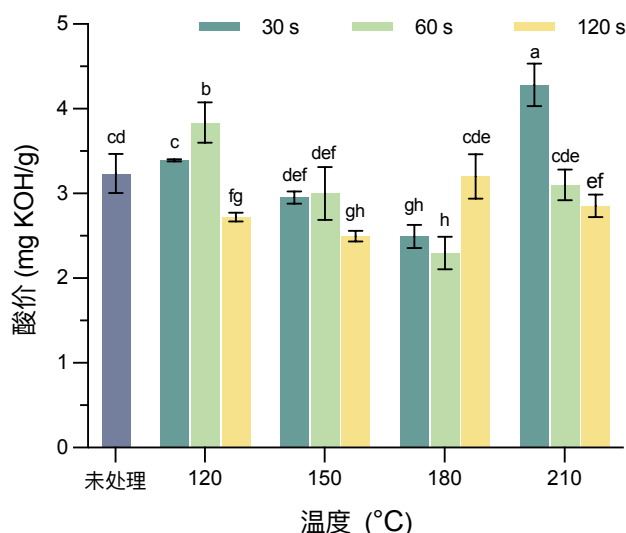


图 2-5 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油酸价的影响

Fig. 2-5 Effect of SHS pretreatment on acid value of the extracted corn germ oil

2.4.6.3 过氧化值

图 2-6 展示了不同 SHS 预处理条件下的玉米胚芽油样品和未处理样品的 PV 比较结果。从图中可以看出,未处理玉米胚芽油的 PV 为 $7.17 \pm 0.65\text{ mmol/kg}$ 。随着 SHS 预处理温度从 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$, 处理时间从 30 s 延长至 120 s , 玉米胚芽油的 PV 呈现逐渐下降的趋势, 从 7.02 mmol/kg 降至 4.62 mmol/kg 。其中, 在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 60 s 时, 样品的 PV 达到最低值 ($4.40 \pm 0.44\text{ mmol/kg}$)。这些结果表明, SHS 预处理显著降低了玉米胚芽油的 PV ($P < 0.05$)。此外, 还发现温度对 PV 值 ($P < 0.01$) 的影响显著, 而延长对 PV 值 ($P = 0.36$) 的影响并不显著。这一现象可能归因于 SHS 预处理技术的无氧特性, 能够有效抑制脂质

过氧化物和氢过氧化物的形成,从而降低 PV^[103]。此外,SHS 预处理降低了脂肪酶的活性,这也可能是导致 PV 较低的原因。

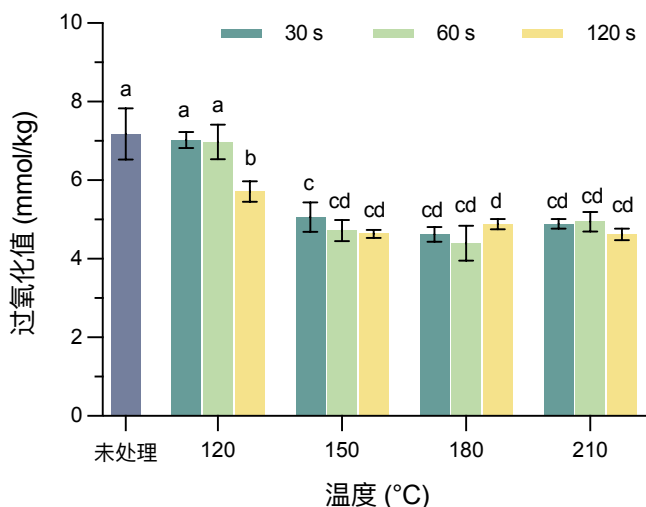


图 2-6 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油过氧化值的影响

Fig. 2-6 Effect of SHS pretreatment on peroxide value of the extracted corn germ oil

然而,值得注意的是,SHS 预处理对紫苏籽油和花生油的 PV 并未表现出显著影响^[28, 34]。类似的结果在青稞的研究中也有报道^[120]。相反,另有研究表明,花生油的 PV 会随着 SHS 预处理温度的升高而增加。

2.4.6.4 共轭二烯值与共轭三烯值

如图 2-7 (A) 所示,反映油脂中初级氧化产物的 K_{232} 总体上呈现下降趋势。在 120 °C 下经过 SHS 预处理的样品, K_{232} (从 4.33 升至 4.54) 与未处理样品 (4.49 ± 0.71) 相比并未表现出显著差异 ($P < 0.05$)。值得注意的是,除 210 °C 下 SHS 预处理 60 s 的样品 (4.24 ± 0.10) 外,当预处理温度从 150 °C 升高至 210 °C 时, K_{232} 值显著低于未处理样品 ($P < 0.05$)。这一结果表明,较高的处理温度对降低初级氧化产物的生成具有积极作用。

图 2-7 (B) 展示了所有样品的 K_{270} 变化情况。在低温 (120 °C) 下, K_{270} 从 0.84 升至 0.91,与未处理样品 (0.95 ± 0.27) 相近。然而,当处理温度升高至 150 °C、180 °C 和 210 °C 时, K_{270} 在 0.49~0.63 之间波动,且在 150 °C 和 180 °C 之间并未表现出显著差异 ($P > 0.05$); 但与未处理样品及 120 °C 下处理的样品相比显著降低 ($P < 0.05$)。进一步的方差分析表明,SHS 温度对 K_{232} 和 K_{270} ($P < 0.01$) 的影响显著,而时间的影响不显著。此外,另有研究表明,经过 SHS 预处理的花生油的 K_{232} 和 K_{270} 均低于常规烘烤花生油和未处理花生油^[29]。这一结果表明,SHS 预处

理在抑制油脂氧化过程中次级产物的生成方面具有显著效果。

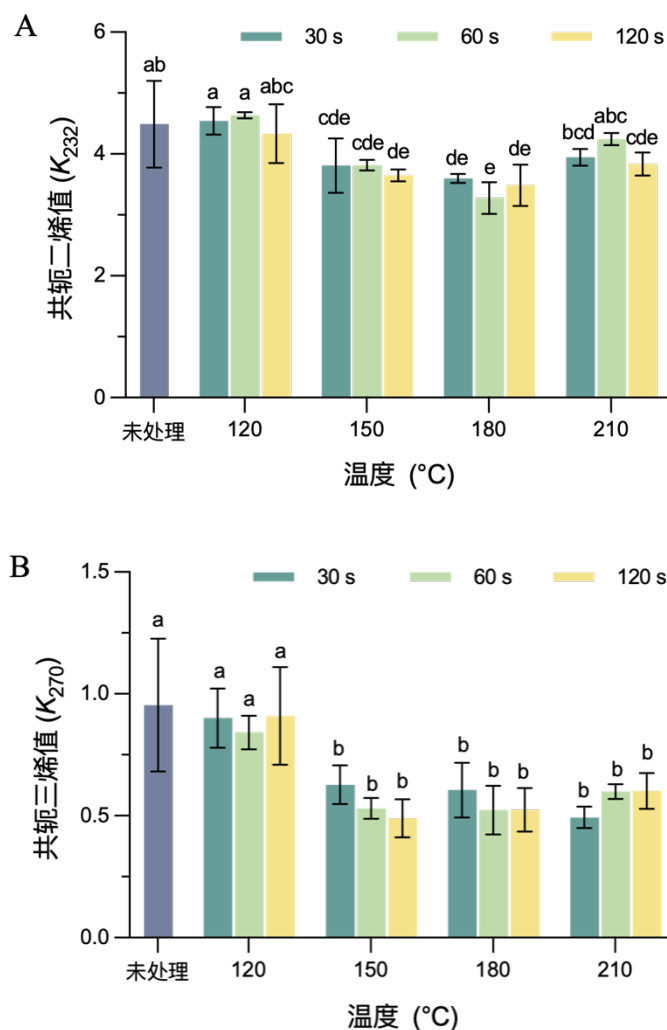


图 2-7 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油的共轭二烯值 (A) 与共轭三烯值 (B) 的影响
Fig. 2-7 Effect of SHS pretreatment on conjugated diene value (A) and conjugated triene value (B) of the extracted corn germ oil

然而, 其他热预处理方式通常会导致 K_{232} 和 K_{270} 升高。例如, 与未处理样品相比, 黑孜然种子经过热空气处理和红外预热处理后, 其 K_{232} 和 K_{270} 均显著增加^[116]。Demnati 等^[121]进一步指出, 高温热空气烘烤过程中, 随着温度的升高和时间的延长, 油脂中的初级和次级氧化产物的含量显著增加, 从而导致其在 232 nm 和 270 nm 处的吸收值升高。相比之下, 本研究的实验结果与传统热处理研究的结果存在显著差异 ($P < 0.05$), 这可能是由于 SHS 预处理技术的无氧特性发挥了关键作用。在无氧环境下, SHS 预处理能够有效抑制氧化反应的发生, 从而避免触及和刺激氧化产物的生成, 进而降低 K_{232} 和 K_{270} 。这一发现凸显了 SHS 预处理技术在改善油脂氧化稳定性方面的独特优势。

2.4.6.5 茴香胺值

p -AV 作为表征脂质过氧化反应次级产物生成水平的关键评估参数之一。如图 2-8 所示,经过 SHS 预处理所提取的玉米胚芽油的 p -AV 显著降低($P < 0.05$)。未处理的玉米胚芽油的 p -AV 为 13.55 ± 0.59 , 显著高于 SHS 预处理样品的 p -AV 范围 (7.56~11.77) ($P < 0.05$)。这一结果进一步表明, SHS 预处理能够有效延缓过氧化物的分解, 从而抑制次级氧化产物的生成。

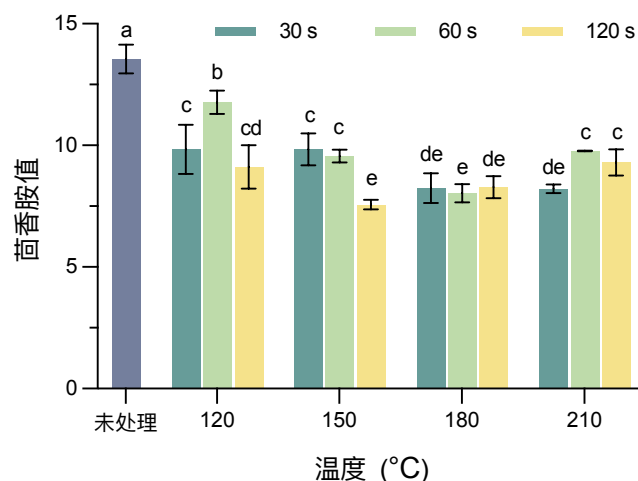


图 2-8 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油茴香胺值的影响

Fig. 2-8 Effect of SHS pretreatment on p -anisidine value of the extracted corn germ oil

然而, 与本研究结果不同的是, 先前的研究表明, 未处理花生油中的 p -AV 低于经过 SHS 预处理的花生油^[29]。此外, 有研究指出, 在高温 (150~250 °C) 下长时间 (10~20 min) 进行 SHS 预处理会导致 p -AV 升高^[47]。

2.4.6.6 全氧化值

图 2-9 展示了未处理及 SHS 预处理样品所提取玉米胚芽油 TV 的变化情况。在所有测试样品中, 未处理样品的 TV 最高, 为 42.24 ± 3.16 。经过 SHS 预处理后, TV 显著降低, 其中在 180 °C 下处理 60 s 的样品 TV 达到最低值 (25.62 ± 1.67)。这一结果表明, SHS 预处理能够有效抑制玉米胚芽油的总氧化程度。结合油脂样品的氧化状态分析, 可以推断在 180 °C 下 60 s 的 SHS 预处理条件相较于其他处理条件, 更适合用于玉米胚芽的加工。这些结果进一步强调了 SHS 预处理对油脂氧化稳定性的复杂影响。

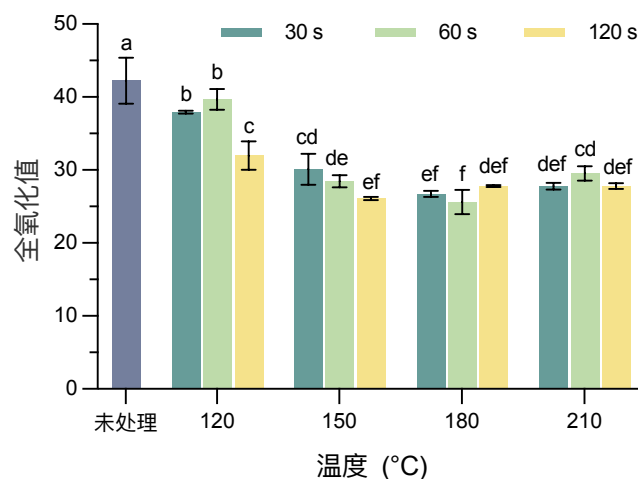


图 2-9 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油全氧化值的影响

Fig. 2-9 Effect of SHS pretreatment on total oxidation value of extracted corn germ oil

2.4.7 SHS 预处理对玉米胚芽油微量脂肪伴随物的影响

2.4.7.1 总酚含量

SHS 预处理对 TPC 具有显著影响 ($P < 0.05$), 其中高温处理会导致 TPC 显著增加 (图 2-10)。未处理样品的 TPC 为 $261.94 \pm 19.90 \text{ mg (GAE) / 100 g}$, 而经过 SHS 预处理的样品 TPC 范围在 161.33 至 678.56 mg (GAE) / 100 g 之间。类似的现象在瓜尔豆粉^[115]和紫苏籽^[34]的研究中也有报道。TPC 的增加可能归因于高温处理破坏了细胞壁结构, 从而促进了酚类化合物的释放^[33]。

此外, 结合酚类化合物向游离酚类化合物的转化以及非可提取酚类化合物向可提取酚类化合物的转化, 也可能对于 TPC 的增加起到积极作用^[122]。进一步的方差分析表明, SHS 预处理温度显著影响 ($P < 0.05$) 的 TPC, 而不是时间。然而, 值得注意的是, 在油茶籽油的研究中, 由于酚类化合物的挥发、聚合和热降解, TPC 呈现下降趋势。

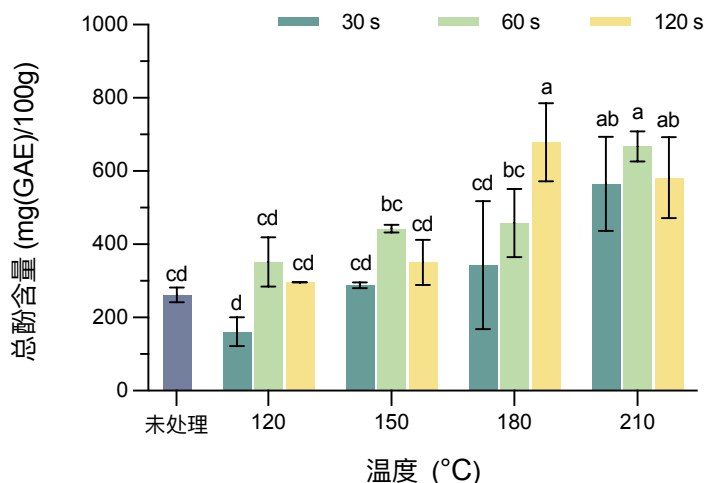


图 2-10 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油中总酚含量的影响

Fig. 2-10 Effect of SHS pretreatment on the content of total phenols in the extracted corn germ oil

2.4.7.2 生育酚含量

玉米胚芽油长期以来被认为是生育酚的丰富来源,其中 γ -生育酚含量最为丰富,其次是 β -生育酚、 α -生育酚和 δ -生育酚^[88]。根据表 2-5 的数据, γ -生育酚的含量范围为 458.58 至 767.50 mg/kg, 占总生育酚含量的 76.4%至 78.8%。

与未处理的样品相比, SHS 预处理显著降低了 ($P < 0.05$) 个体生育酚及总生育酚含量。未处理样品的总生育酚含量为 1000.97 ± 22.65 mg/kg, 而 SHS 预处理样品的总生育酚含量范围为 613.09~962.91 mg/kg, 其中 210 °C下处理 120 s 的样品总生育酚含量最低。类似的结果在烤制小麦胚芽^[123]和米糠红外线处理的研究^[124]中也有报道。表明生育酚含量在高温下显著降低。这种下降可能归因于 SHS 预处理过程中高温导致的热降解。然而, 值得注意的是, SHS 预处理对黑豆的总生育酚含量并未产生显著影响 ($P > 0.05$)。

相比之下, 其他热预处理方法, 如芝麻籽的烤箱烘烤处理^[125]、玉米胚芽的微波处理^[102]以及黑豆面条的挤压处理^[119], 均显著提高了生育酚含量 ($P < 0.05$)。这一现象可能与热预处理改变了植物细胞的结构完整性, 以及脂质、淀粉和其他物质的形态和状态有关。这些结果表明, 不同热预处理方法对生育酚含量的影响存在显著差异 ($P < 0.05$), 其具体机制可能与处理条件、原料特性及生育酚的热稳定性密切相关。

表 2-5 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油中生育酚含量的影响

Table 2-5 Effect of SHS pretreatment on tocopherol content in extracted corn germ oil

温度 (°C)	时间 (s)	α -生育酚 mg/kg	β -生育酚 mg/kg	γ -生育酚 mg/kg	δ -生育酚 mg/kg	总生育酚 mg/kg
未处理	/	73.42±1.05 ^{ab}	126.01±6.86 ^a	767.50±18.91 ^a	34.03±4.17 ^b	1000.97±22.65 ^a
120	30	82.73±3.63 ^a	108.42±7.65 ^{bc}	735.99±14.14 ^b	35.77±0.71 ^b	962.91±18.87 ^{ab}
	60	78.38±3.54 ^a	112.63±11.31 ^{ab}	712.31±6.81 ^c	33.16±4.47 ^b	936.48±17.18 ^b
	120	66.57±4.86 ^{bcd}	95.97±6.86 ^{cd}	637.78±21.21 ^{de}	31.47±0.71 ^b	831.79±32.22 ^c
150	30	61.68±1.61 ^{cde}	87.29±9.90 ^{de}	625.44±6.48 ^{de}	32.58±0.60 ^b	806.99±4.44 ^c
	60	61.49±4.75 ^{cde}	96.73±2.12 ^{cd}	621.66±7.07 ^{de}	32.23±0.35 ^b	812.10±9.35 ^c
	120	64.44±5.21 ^{bcd}	93.41±2.26 ^{cd}	631.05±7.00 ^{de}	31.81±1.33 ^b	820.71±13.14 ^c
180	30	63.01±2.91 ^{bcd}	94.51±0.67 ^{cd}	619.14±2.61 ^{de}	31.30±0.78 ^b	807.97±1.15 ^c
	60	62.49±4.96 ^{cde}	94.15±5.44 ^{cd}	621.12±13.96 ^{de}	31.57±0.85 ^b	809.33±13.59 ^c
	120	67.63±0.4 ^{bc}	91.02±2.83 ^d	645.45±4.95 ^d	30.93±1.41 ^b	835.03±0.31 ^c
210	30	67.92±5.94 ^{bc}	91.48±1.41 ^d	612.10±2.83 ^{de}	30.92±0.71 ^b	802.43±0.99 ^c
	60	56.65±8.49 ^{de}	99.78±7.50 ^{bcd}	629.45±7.71 ^c	32.63±0.42 ^b	818.51±8.28 ^c
	120	53.43±2.83 ^e	73.68±9.05 ^e	458.58±7.65 ^f	49.41±3.66 ^a	613.09±54.31 ^d

注：同一列中不同上标字母的值存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.4.7.3 植物甾醇含量

植物甾醇是植物油脂中不皂化组分的主要成分。本研究对未处理和 SHS 预处理所提取的玉米胚芽油中单个植物甾醇及总植物甾醇含量进行了分析（表 2-6）。在玉米胚芽油中共鉴定出 10 种植物甾醇，其中 β -谷甾醇（4869.58~6025.57 mg/kg）、菜籽甾醇（1927.57~2325.86 mg/kg）、 Δ^5 -燕麦甾醇（871.30~1122.16 mg/kg）和豆甾醇（555.26~685.663 mg/kg）为主要成分，占总植物甾醇的 92%（8912.53~10978.35 mg/kg）。其余植物甾醇包括菜油甾醇、菜油甾烷醇、豆甾醇、赤桐甾醇、豆甾烷醇、豆甾二烯醇和 Δ^7 -燕麦甾醇，均属于 4-无甲基甾醇类别。

经过 SHS 预处理后，单个植物甾醇及总植物甾醇含量均发生了显著变化（ $P < 0.05$ ）。未处理样品的总植物甾醇含量为 11004.56 ± 46.23 mg/kg，显著高于 SHS 预处理样品（ $P < 0.05$ ）。

SHS 预处理后提取的玉米胚芽油中总植物甾醇含量变化显著，其中在 180 °C 下处理 60 s 时，总植物甾醇含量显著降低至 8934.53 ± 30.24 mg/kg（ $P < 0.05$ ），而在 210 °C 下处理 120 s 时，其含量急剧增加至 10040.07 ± 12.66 mg/kg。类似的现象在先前的研究中也有报道，例如使用烤箱烘烤油菜籽时，单个植物甾醇及总植物甾醇含量均显著降低（ $P < 0.05$ ）^[126]。然而，与之相反的是，核桃仁经过烘烤后其植物甾醇含量显著增加^[127]。这些差异可能主要归因于 SHS 预处理的条件，特别是处理温度与时间的综合作用。方差分析发现，与时间参数相比，SHS 温度对单个和总植物甾醇含量的影响更大，但对两个参数（ $P > 0.05$ ）的影响均不显著。这些结果揭示了 SHS 预处理对植物甾醇稳定性的潜在影响。

表 2-6 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油中植物甾醇含量的影响

Table 2-6 Effect of SHS pretreatment on phytosterol content in extracted corn germ oil

温度 (°C)	时间 (s)	菜籽甾醇	菜油甾醇	菜油甾烷醇	豆甾醇	赤桐甾醇	β -谷甾醇	Δ^5 -燕麦甾醇	豆甾二烯醇	豆甾烷醇	Δ^7 -燕麦甾醇	总植物甾醇
未处理	/	67.48±	2325.86±	77.18±	685.63±	65.56±	6025.57±	1122.16±	193.04±	224.95±	162.91±	10978.35±
		0.50 ^a	35.33 ^a	1.17 ^b	7.57 ^a	1.88 ^a	34.75 ^a	5.30 ^a	5.61 ^a	4.38 ^b	4.10 ^a	9.16 ^a
120	30	66.81±	2268.39±	77.21±	660.45±	64.37±	5824.12±	1056.98±	186.64±	250.58±	155.94±	10637.98±
		0.97 ^{ab}	6.54 ^b	0.32 ^b	0.77 ^b	0.91 ^a	14.14 ^b	2.86 ^b	3.25 ^a	2.26 ^a	2.97 ^{ab}	65.35 ^b
	60	66.25±	2203.97±	82.10±	642.54±	61.31±	5736.01±	1028.87±	177.72±	212.53±	152.57±	10388.86±
		0.41 ^{ab}	4.31 ^c	1.56 ^a	3.54 ^c	0.98 ^b	2.95 ^c	6.90 ^c	2.47 ^b	3.46 ^c	0.61 ^b	40.67 ^c
	120	68.14±	2007.05±	72.24±	590.91±	57.37±	5160.69±	951.52±	166.27±	183.09±	143.89±	9424.06±
		0.61 ^a	5.58 ^{ef}	1.09 ^c	5.78 ^e	0.90 ^{cd}	8.04 ^f	7.71 ^{ef}	2.40 ^{cd}	2.69 ^g	3.11 ^c	54.19 ^f
150	30	67.30±	1986.68±	67.44±	576.95±	56.04±	5071.99±	951.90±	162.03±	194.52±	139.30±	9295.72±
		0.71 ^a	2.62 ^{fg}	0.77 ^d	4.10 ^{fg}	0.13 ^{de}	2.81 ^g	2.69 ^{ef}	2.62 ^{def}	2.05 ^{ef}	4.67 ^{cd}	26.68 ^g
	60	66.89±	1974.28±	67.49±	569.41±	57.60±	5072.80±	901.03±	152.88±	220.03±	127.36±	9231.26±
		2.65 ^{ab}	2.42 ^g	0.74 ^d	4.82 ^g	1.41 ^{cd}	19.51 ^g	1.34 ^g	3.11 ^f	2.97 ^b	2.12 ^c	6.09 ^h
	120	64.36±	1968.74±	65.48±	565.67±	57.33±	5016.99±	906.06±	171.48±	191.49±	131.83±	9160.92±
		0.31 ^b	0.35 ^g	0.86 ^d	6.62 ^{gh}	0.95 ^{cd}	9.88 ^h	7.21 ^g	6.29 ^{bcd}	0.69 ^f	1.20 ^{de}	12.94 ⁱ

续表 2-6

温度 (°C)	时间 (s)	菜籽甾 醇	菜油甾醇	菜油甾烷 醇	豆甾醇	赤桐甾醇	β -谷甾醇	Δ^5 -燕麦甾 醇	豆甾二烯 醇	豆甾烷 醇	Δ^7 -燕麦 甾醇	总植物甾 醇
180	30	67.71±	1960.50±	71.87±	576.90±	57.17±	5130.27±	914.62±	162.75±	207.20±	134.66±	9305.14±
		1.03 ^a	28.99 ^g	2.63 ^e	1.26 ^{fg}	1.82 ^{cd}	10.28 ^f	5.12 ^g	4.59 ^{de}	6.8 ^{cd}	1.84 ^{de}	7.49 ^g
	60	68.04±	1927.57±	65.46±	555.26±	53.53±	4869.98±	871.30±	156.35±	205.79±	117.74±	8912.53±
		0.08 ^a	10.52 ^h	2.16 ^d	8.09 ^h	0.42 ^e	14.18 ⁱ	14.72 ^h	4.95 ^{ef}	1.70 ^{cd}	4.60 ^f	61.36 ^j
	120	66.79±	2032.17±	68.35±	592.47±	55.68±	5224.90±	965.2±	161.86±	201.82±	134.23±	9525.47±
		0.5 ^{ab}	10.14 ^e	0.50 ^d	3.49 ^e	0.57 ^{de}	8.49 ^e	8.20 ^e	1.20 ^{def}	2.55 ^{de}	4.95 ^{de}	25.04 ^e
210	30	66.88±	2008.30±	71.92±	576.15±	55.90±	5158.87±	950.19±	164.05±	193.19±	134.55±	9403.01±
		2.66 ^{ab}	6.66 ^{ef}	1.31 ^e	0.21 ^{fg}	1.56 ^{de}	1.61 ^f	6.93 ^{ef}	1.41 ^{de}	3.10 ^f	2.05 ^{de}	45.48 ^f
	60	68.99±	2014.69±	73.68±	585.00±	59.66±	5208.54±	934.42±	162.61±	208.18±	136.66±	9475.37±
		0.02 ^a	6.36 ^{ef}	1.87 ^e	5.66 ^{ef}	1.41 ^{bc}	10.67 ^e	4.85 ^f	6.15 ^{de}	3.98 ^{cd}	4.73 ^{cd}	20.24 ^e
	120	67.52±	2124.06±	77.11±	618.96±	61.30±	5509.01±	1010.60±	174.15±	196.88±	153.05±	10015.65±
		1.16 ^a	4.33 ^d	1.18 ^b	7.03 ^d	0.42 ^b	11.46 ^d	14.69 ^d	4.67 ^{bc}	3.11 ^e	2.91 ^b	21.87 ^d

注：同一列中不同上标字母的值存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.4.7.4 β -胡萝卜素含量

β -胡萝卜素是一种天然存在于油脂中的亮橙红色色素。如图 2-11 所示, 经过 SHS 预处理的样品中, β -胡萝卜素含量在 24331~26524 $\mu\text{g/kg}$ 之间波动, 显著低于未处理样品的含量 (30000 $\mu\text{g/kg}$) ($P < 0.05$)。此外, 随着处理温度的升高和处理时间的延长, β -胡萝卜素含量进一步降低。具体来说, 在 210 $^{\circ}\text{C}$ 下处理 120 s 后, β -胡萝卜素含量降至最低值 (24331 $\pm$ 420 $\mu\text{g/kg}$)。这一结果与先前研究^[123]中关于烤制对小麦胚芽中 β -胡萝卜素含量影响的报道一致。研究表明, 当类胡萝卜素受热时, 可能发生热降解或聚合反应, 从而导致 β -胡萝卜素含量下降。进一步的方差分析表明, SHS 温度显著影响 ($P < 0.05$) 的 β -胡萝卜素含量, 而不是时间。

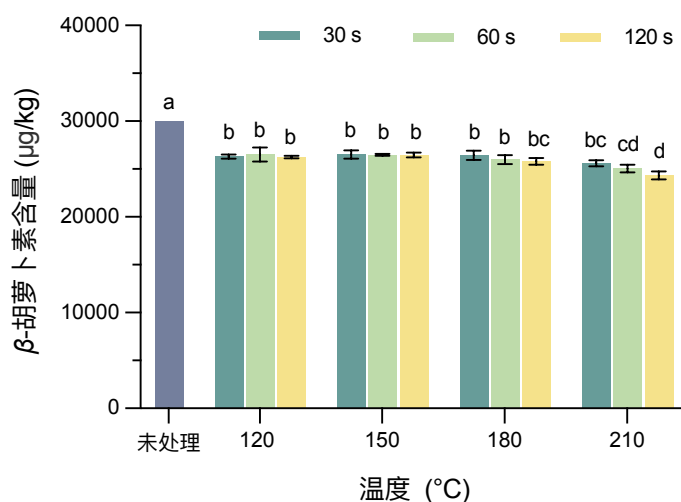


图 2-11 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油中 β -胡萝卜素含量的影响

Fig. 2-11 Effect of SHS pretreatment on content of β -carotene in the extracted corn germ oil

2.4.8 SHS 预处理对玉米胚芽油氧化稳定性的影响

OSI 方法是评估油脂抗氧化能力的重要指标。未处理样品的 OSI 值为 8.39 $\pm$ 0.10 h, 而经过 SHS 预处理的样品 OSI 值显著增加 ($P < 0.05$)。其中, 在 150 $^{\circ}\text{C}$ 下 SHS 预处理 60 s 的样品中, OSI 值最大增加了 17.8% (图 2-12)。这一结果表明, SHS 预处理能够显著提升玉米胚芽油的氧化稳定性 ($P < 0.05$)。类似的现象在其他研究中也有报道, 例如微波处理亚麻籽^[84]以及红外线处理和热空气烘烤黑孜然籽的研究中也观察到 OSI 值的显著提升 ($P < 0.05$)。方差分析表明, SHS 温度比时间更重要, 但这两个参数对 OSI 值 ($P > 0.05$) 没有显著影响。

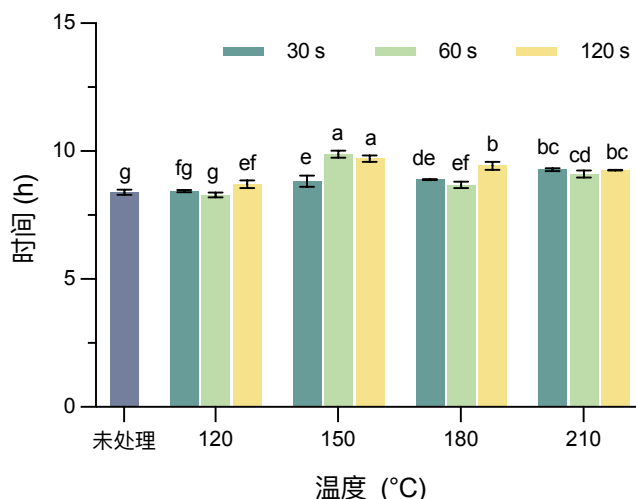


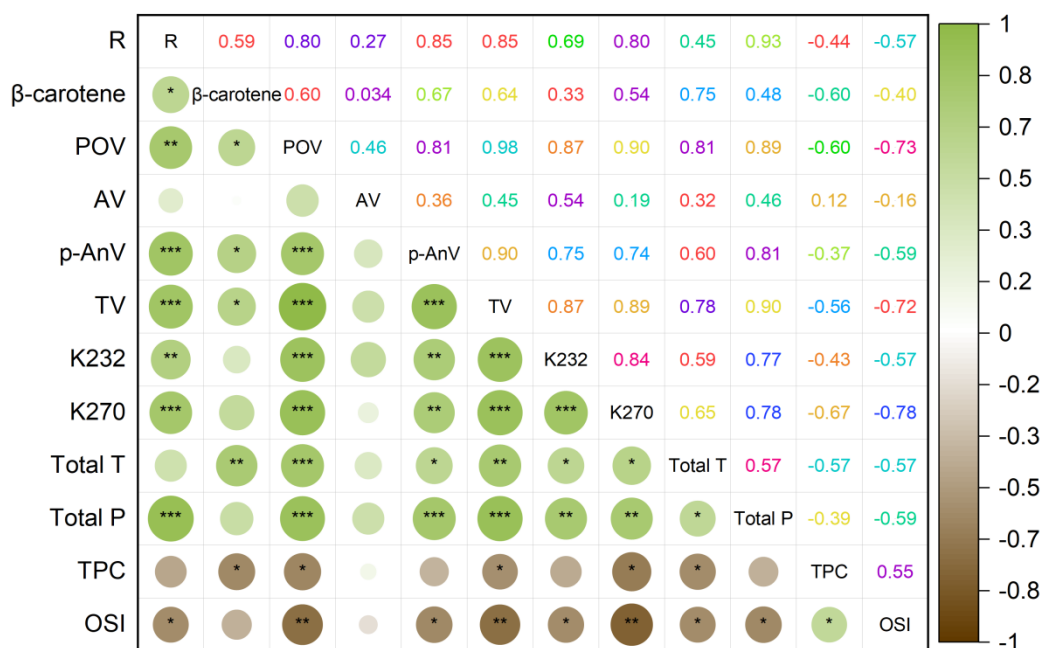
图 2-12 SHS 预处理对所提取玉米胚芽油氧化稳定性的影响

Fig. 2-12 Effect of SHS pretreatment on oxidation stability of corn germ oil

2.4.9 相关性分析与主成分分析

通过皮尔逊积矩相关系数分析,并将其结果以热图形式呈现(图 2-13),相关系数显示在上三角形部分。分析结果表明,TPC 与氧化稳定性之间呈显著正相关($P < 0.05$),这表明酚类化合物可能在玉米胚芽油的抗氧化特性中起关键作用。TPC 对氧化稳定性和抗氧化能力的重要性已在多项研究中得到证实^[128]。然而,相对较低的相关系数($r = 0.55$)表明,氧化稳定性可能更依赖于单个酚类化合物的特性,而非总酚含量,这一发现与先前的研究结果一致^[129]。因此,尽管 TPC 对氧化稳定性有一定贡献,但其影响可能受到单个酚类化合物种类和含量的调控,有必要进一步研究 SHS 预处理对单个酚类化合物的影响。

此外,生育酚($r = -0.57$)和植物甾醇($r = -0.59$)与 OSI 呈显著负相关($P < 0.05$)。尽管生育酚和植物甾醇是油脂中的内源性抗氧化剂,但在本研究中,它们的含量因 SHS 预处理而显著降低($P < 0.05$)。然而,SHS 预处理总体上提高了 OSI 值,这一现象可能部分解释了生育酚和植物甾醇与 OSI 之间的负相关性。此外,这些指标(K_{232} 、 K_{270} 、 p -AV)与 PV 之间显著正相关,这与 Zheng 等^[130]的研究结果一致,在油脂氧化过程中,醛类物质作为氢过氧化物逐渐分解而产生。这些相关性进一步表明,油脂的氧化稳定性受多种因素共同影响,而 SHS 预处理通过抑制氧化产物的生成,显著改善了油脂的整体氧化稳定性。



* $p \leq 0.05$ ** $p \leq 0.01$ *** $p \leq 0.001$

图 2-13 对 SHS 预处理前后的玉米胚芽皮尔逊相关分析

Fig. 2-13 Pearson correlation analysis of corn germ before and after SHS pretreatment

主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 被用于全面评价 SHS 预处理对玉米胚芽油理化性质的影响。如图 2-14 所示, 载荷图和得分图展示了主成分分析的结果, 其中大于 1 的方差值用于确定主成分 (PCs) 对总体数据变化的相对贡献^[84]。前两个主成分 (PC1 和 PC2) 共同解释了 79.1% 的变化性。其中 PC1 和 PC2 分别解释总变化性的 67.1% 和 12.0%。PC1 主要包括 R (0.327)、p-AV (0.333)、TV (0.371)、K₂₃₂ (0.320)、K₂₇₀ (0.346)、生育酚 (0.292)、植物甾醇 (0.335) 和 OSI (-0.283)。而 PC2 则主要由 β-胡萝卜素 (-0.364)、AV (0.648) 和 TPC (0.508) 占主导地位。这些结果表明, PC1 和 PC2 分别反映了玉米胚芽油在不同理化性质上的变异性。

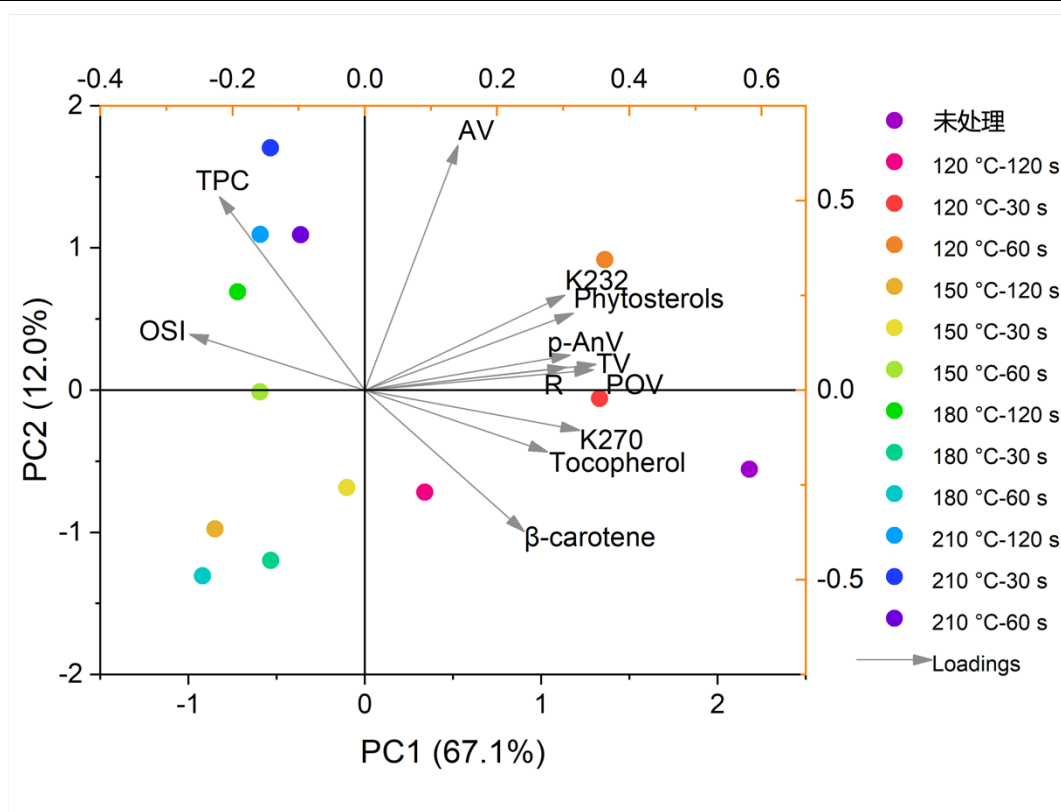


图 2-14 对 SHS 预处理前后的玉米胚芽主成分分析

Fig. 2-14 Principal component analysis of corn germ before and after SHS pretreatment

载荷图直观地展示了各变量之间的关系，其中角度小于 90° 的向量表示正相关，而角度大于 90° 的向量则表示负相关，这些相关性与皮尔逊积矩相关系数的结果一致（图 2-13）。图 2-14 还展示了 PC1 和 PC2 之间的得分分布，性质相似的油样被聚集在一起。具体而言，在 120°C 下处理 30 s 和 60 s 的样品与未处理样品聚集在一起，表明较低的 SHS 预处理温度（ 120°C ）不足以引起玉米胚芽油性质的显著变化（ $P < 0.05$ ）。这一发现与先前学者关于 SHS 预处理对瓜尔豆粉影响的研究结果一致^[115]。此外，如图 2-14 所示，与其他条件相比，在 180°C 下处理 120 s 的 SHS 预处理显著增强了油脂的氧化态和 TPC，同时保持了相对较高的生育酚含量和植物甾醇含量。这些结果表明，适当的 SHS 预处理条件能够在改善油脂氧化稳定性和功能特性的同时，最大限度地保留其营养成分。

2.5 本章小结

本章节系统探究了 SHS 预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响机制。通过多维度表征和综合分析，为后续研究 SHS 预处理对玉米胚芽储藏品质的影响奠定了基础。主要结论如下：

(1) SHS 预处理改善了玉米胚芽的加工特性,使含水量降低(2.60%~44.59%)、出油率提高(2.81%~26.93%),同时改善了玉米胚芽的微观结构和色泽;

(2) SHS 预处理有效提升了玉米胚芽毛油品质,使其氧化稳定性指标(R值、AV、PV、 p -AV、 K_{232} 和 K_{270} 等)显著降低($P < 0.05$);并有效增强了玉米胚芽油的抗氧化活性,使TPC提高(9.99%~159.06%)、OSI值提高(0.60%~17.76%),且TPC与OSI正相关;

(3) SHS 预处理对玉米胚芽油脂中的生育酚、植物甾醇和 β -胡萝卜素等微量脂肪伴随物表现出降低的趋势,具体原因还需进一步探索;

(4) 根据相关性分析与PCA分析表明,低温短时SHS预处理(120℃下处理30 s、60 s)不足以引起玉米胚芽特性显著变化。从而筛选得出三个较适宜玉米胚芽的SHS预处理条件:150℃-60 s、180℃-120 s、210℃-120 s。

第3章 过热蒸汽预处理对玉米胚芽储藏品质的影响

3.1 引言

油料的储藏品质是保证其油脂安全性与维持其营养成分的关键因素。脂质氧化酸败不仅会产生有害的氧化产物，威胁人体健康；还会导致营养成分流失，从而降低油脂产品品质^[131]。为提升油料储藏品质、延长贮藏期并最大限度保留营养成分，热预处理技术被广泛应用于减少脂质氧化酸败。目前常用的热处理方法包括热风处理、红外热处理、挤压处理和微波处理等，然而这些传统方法在应用过程中均存在一定的局限性，导致油料及油脂的储藏品质存在显著差异。

近年来，SHS 预处理技术因其独特的优势而备受关注。该技术具备无氧特性、高效传热、快速钝酶、均匀受热以及营养成分损失最小化等特点。研究表明，SHS 预处理技术在提高油料储藏品质方面具有显著效果。例如胡迪等^[22]证实 SHS 预处理技术可显著提升米糠的储藏稳定性。戴嘉晖等^[32]研究发现 SHS 预处理对山茶籽具有优异的除菌和抑酶效果，可有效维持山茶籽贮藏品质，并延长贮藏期。此外，Wang 等^[33]的研究表明，SHS 预处理油茶籽粉可显著提高油茶籽油的生物活性成分。

基于第二章的研究结果，本研究选取了三个 SHS 预处理条件，分别是 150 °C-60 s、180 °C-120 s、210 °C-120 s，以进行后续实验。本章节继续以玉米胚芽为研究对象，先进行不同条件的 SHS 预处理，之后在模拟自然环境条件下（温度：25±3 °C；相对湿度：75±3%）进行为期 8 周的储藏实验。实验采用定期取样策略，每周采集样品，系统研究 SHS 预处理对玉米胚芽储藏品质的影响机制。首先，考察不同储藏时间下，不同 SHS 预处理条件对玉米胚芽理化特性与脂肪伴随物等多角度的影响规律，进一步评估 SHS 预处理对玉米胚芽油抗氧化能力的提升效果。通过综合分析，确定适宜的 SHS 预处理条件，旨在为玉米胚芽稳态化处理提供理论依据和技术支持。

3.2 实验材料与设备

3.2.1 实验材料

同 2.2.1 中的实验材料。

3.2.2 实验试剂

本章所使用的主要实验试剂见表 3-1，其他重复实验试剂见表 2-1。

表 3-1 主要实验试剂

Table 3-1 Main experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
氢氧化钠	≥96.0%	罗恩试剂有限公司
过硫酸钾	≥99.5%	国药集团化学试剂有限公司
DPPH	/	德国达姆施塔特默克集团
ABTS	/	德国达姆施塔特默克集团
Trolox 标准品	/	美国陶术生物公司

3.2.3 实验设备

本章所使用的主要实验设备见表 3-2，其他重复实验设备见表 2-2。

表 3-2 主要实验设备

Table 3-2 Main experimental equipment

设备名称	型号	厂家
电子天平	HZK-FA110	美国康州 HZ 电子有限公司
过热蒸汽烤箱	ER-TD7001CN	日本东芝公司
高速冷冻离心机	Centrifuge 5810 R	德国艾本德公司
紫外分光光度计	UV-5500PC	上海元析仪器有限公司
色度仪	Lavibond Model Fx	英国罗维朋公司
高效液相色谱仪	Waters 2695	美国沃特世有限公司
气相色谱仪	GC-7280A	美国安捷伦公司

3.3 实验方法

3.3.1 样品制备

3.3.1.1 原料的筛选

同 2.3.1.1 中的筛选方法。

3.3.1.2 SHS 预处理玉米胚芽

对 SHS 设备进行预热，直至达到所需的温度并稳定。

处理条件：150 °C-60 s、180 °C-120 s、210 °C-120 s；

对照组：未处理的玉米胚芽；

将每份玉米胚芽样品分别（共 32 份，每份 100 g）单层放置于烤盘中。处理后，立即将样品从加热室中取出，待样品在室温下冷却后，储存于-20 °C的环境中，直至进行下一步实验。

3.3.1.3 储藏实验

将 32 份质量为 100 g 玉米胚芽样品分别置于透气的无纺布袋中，放置于 25±3 °C 的恒温恒湿培养箱中，保持湿度为 75±3%，储藏期为 8 周，每隔 1 周在相同的时间点进行取样，并提取油样。

3.3.1.4 玉米胚芽油的制备

同 2.3.1.3 中玉米胚芽油的制备方法。

3.3.2 玉米胚芽油的测定

3.3.2.1 脂肪酸组成的测定

同 2.3.3.1 中脂肪酸组成的测定方法。

3.3.2.2 色泽的测定

同 2.3.3.2 中玉米胚芽油色泽的测定方法。

3.3.2.3 酸价的测定

同 2.3.3.3 中酸价的测定方法。

3.3.2.4 过氧化值的测定

同 2.3.3.4 中过氧化值的测定方法。

3.3.2.5 共轭二烯值和共轭三烯值的测定

同 2.3.3.5 中共轭二烯值和共轭三烯值的测定方法。

3.3.2.6 茴香胺值的测定

同 2.3.3.6 中茴香胺值的测定方法。

3.3.2.7 全氧化值的测定

同 2.3.3.7 中全氧化值的测定方法。

3.3.2.8 总酚含量的测定

同 2.3.3.8 中总酚含量的测定方法。

3.3.2.9 生育酚含量的测定

同 2.3.3.9 中生育酚含量的测定方法。

3.3.2.10 β -胡萝卜素含量的测定

同 2.3.3.11 中 β -胡萝卜素含量的测定方法。

3.3.2.11 抗氧化活性的测定

抗氧化活性评价方法采用化学分析法中自由基清除法进行测定^[132-134]。

(1) 样品制备

取 4 mL 油样与 5 mL 甲醇混合，于避光条件下震荡 20 min，以 3900 r/min 离心 5 min 制得样品。取上清液至棕色小瓶中，并用 5 mL 甲醇重复提取三次，收集所有甲醇样品提取物，储存于-20 °C 的条件下，直至进行下一步分析。

绘制 Trolox 标准曲线：分别配置 15.625、31.5、62.5、125、250、500 $\mu\text{mol/L}$ 系列浓度的 Trolox 甲醇溶液。使用 Trolox 作为参考标准，将记录的吸光度转化为抗氧化活性，最终结果为 TEAC(相当于 Trolox 抗氧化剂)含量，即 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g 油}$ 。

(2) DPPH 自由基清除能力的测定

精确称取 0.0039 g DPPH 试剂，用甲醇溶解并定容至 100 mL，现用现配，置于棕色小瓶中。取 2 mL 经 1:1 (v/v) 甲醇稀释的样品提取物与 3 mL 上述 DPPH 甲醇溶液 (0.1 mmol/L) 于离心管中，将混合物震荡 1 min，避光条件下反应 2 h，以纯甲醇溶液为空白对照组，于 517 nm 处测吸光度值。以 Trolox 当量测定样品的 DPPH 自由基清除能力。如图 3-1 为 DPPH 自由基清除能力标准曲线。DPPH 抑制百分比计算公式：

$$R(\%) = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}} \right) \times 100\% \quad (3-1)$$

式中：A 样品：待测样品的吸光度 (2 mL 甲醇样品提取物+3 mL DPPH 甲醇溶

液);

A 对照: 对照组的吸光度 (2 mL 甲醇样品提取物+3 mL 纯甲醇溶液);

A 空白: 空白组的吸光度 (2 mL 纯甲醇溶液+3 mL DPPH 甲醇溶液)。

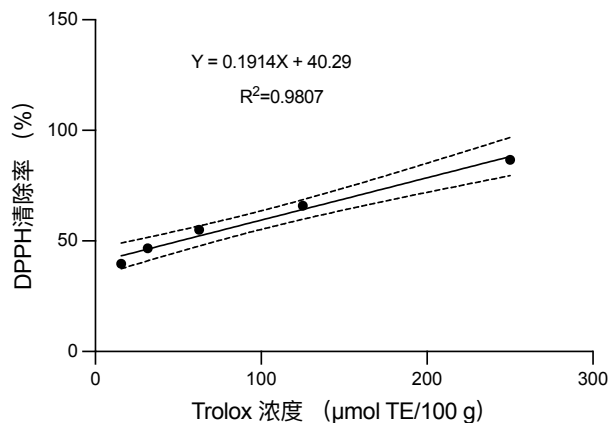


图 3-1 DPPH 自由基清除能力标准曲线

Fig. 3-1 Standard curve of DPPH radical scavenging ability

(3) ABTS 自由基清除能力的测定

ABTS 工作液制备: 将等体积的 ABTS 试剂 (7 mmol/L) 与过硫酸钾溶液 (2.45 mmol/L) 混合, 将该混合物置于室温避光条件下 12~16 h, 在使用前将甲醇稀释至 734 nm 处吸光度为 0.70 ± 0.02 。

取 100 μL 甲醇样品提取物与 2 mL ABTS 工作液混合, 震荡 1 min 后, 置于室温避光条件下 20 min, 之后使用 1 cm 石英比色皿在 734 nm 处测定吸光度, 以甲醇为对照组。以 Trolox 当量测定样品的 ABTS 自由基清除能力。样品溶液对 ABTS 自由基的清除能力用抑制百分比表示。如图 3-2 为 ABTS 自由基清除能力标准曲线。ABTS 抑制百分比计算公式:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}}}{A_{\text{空白}}}\right) \times 100 \quad (3-2)$$

式中: A 样品: 待测样品的吸光度 (100 μL 甲醇样品提取物+2 mL ABTS 工作液);

A 空白: 空白组的吸光度 (100 μL 纯甲醇溶液+2 mL ABTS 工作液)。

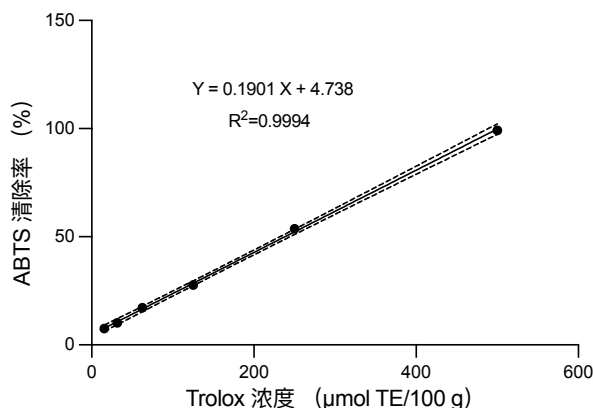


图 3-2 ABTS 自由基清除能力标准曲线

Fig. 3-2 Standard curve of ABTS radical scavenging ability

3.3.3 数据统计分析

同 2.3.4 中的数据统计分析方法。

3.4 结果与分析

3.4.1 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂脂肪酸组成的影响

表 3-3 列出了玉米胚芽储藏 8 周后, 未处理和 SHS 预处理组油样中的脂肪酸组成, 共检测到 14 种脂肪酸, 包括 7 种 SFAs、2 种单不饱和脂肪酸 (Monounsaturated fatty acid, MUFAs) 和 5 种多不饱和脂肪酸 (Polyunsaturated fatty acid, PUFAs)。根据数据分析可得, 主要脂肪酸为亚油酸 (58.98%~59.25%)、油酸 (24.82%~25.03%) 和棕榈酸 (12.00%~12.15%) 等, 这一结果跟 Shahidi^[95] 的结果相一致, 这三者约占脂肪酸总量的 95%。UFAs 虽具有更高营养价值, 但在加热过程中易发生氧化^[66]。研究发现, SHS 预处理组在储藏 8 周后, SFAs、MUFAs 和 PUFAs 含量虽存在微小波动, 但无显著差异 ($P>0.05$), 表现出较高稳定性。虽然多不饱和脂肪酸因双键结构更易发生氧化, 但储藏过程中脂质氧化主要处于初级阶段 (AV、PV 等较小, 见图 3-4 与图 3-5), 氧化初期仅形成过氧化物, 尚未断裂为短链产物 (如醛、酮), 常规气相色谱并不能有效区分脂肪酸和脂肪酸氢过氧化物, 因此脂肪酸的整体组成未显著改变^[56]。

表 3-3 玉米胚芽在储藏期间脂肪酸组成的变化(占总脂肪酸的百分比)

Table 3-3 Changes of fatty acid composition in corn germ during storage (percentage of total fatty acids)

脂肪酸组成/%		C14:0	C16:0	C16:1	C17:0	C18:0	C18:1n9c	C18:2n6c	C20:0	C20:1	C18:3n3	C20:2	C22:0	C20:4n6	C24:0
储藏时 间/周	处理条 件	(豆蔻 酸)	(棕榈 酸)	(棕榈 油酸)	(十七 碳酸)	(硬脂 酸)	(油酸)	(亚油 酸)	(花生 酸)	(花生 烯酸)	(α -亚 麻酸)	(花生 二烯 酸)	(二十 二碳 酸)	(花生 四烯 酸)	(二十 四碳 酸)
0	未处理	0.03±	12.07±	0.10±	0.08±	1.71±	24.98±	59.08±	0.40±	0.23±	0.98±	0.03±	0.14±	0.03±	0.15±
		0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	150 °C -60 s	0.04±	12.00±	0.10±	0.08±	1.71±	24.94±	59.23±	0.39±	0.23±	0.98±	0.03±	0.12±	0.03±	0.14±
		0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
	180 °C -120 s	0.04±	12.01±	0.10±	0.08±	1.71±	24.95±	59.18±	0.40±	0.23±	0.99±	0.03±	0.12±	0.03±	0.13±
		0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02
	210 °C -120 s	0.04±	12.03±	0.10±	0.08±	1.70±	24.92±	59.16±	0.42±	0.23±	0.99±	0.04±	0.13±	0.03±	0.14±
		0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
2	未处理	0.03±	12.06±	0.10±	0.08±	1.71±	24.98±	59.12±	0.39±	0.23±	0.98±	0.03±	0.13±	0.04±	0.13±
		0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00
	150 °C -60 s	0.04±	12.06±	0.10±	0.07±	1.72±	24.87±	59.19±	0.43±	0.22±	0.98±	0.03±	0.13±	0.03±	0.14±
		0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
	180 °C -120 s	0.04±	12.11±	0.09±	0.07±	1.74±	24.99±	59.04±	0.39±	0.22±	0.98±	0.03±	0.13±	0.03±	0.13±
		0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
	210 °C -120 s	0.04±	12.06±	0.09±	0.08±	1.72±	24.82±	59.25±	0.42±	0.22±	0.98±	0.04±	0.13±	0.03±	0.13±
		0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01

续表 3-3

脂肪酸组成/%		C14:0 (豆蔻酸)	C16:0 (棕榈酸)	C16:1 (棕榈油酸)	C17:0 (十七碳酸)	C18:0 (硬脂酸)	C18:1n9c (油酸)	C18:2n6c (亚油酸)	C20:0 (花生酸)	C20:1 (花生烯酸)	C18:3n3 (α -亚麻酸)	C20:2 (花生二烯酸)	C22:0 (二十二碳酸)	C20:4n6 (花生四烯酸)	C24:0 (二十四碳酸)
储藏时间/周	处理条件														
4	未处理	0.04±	12.08±	0.10±	0.08±	1.73±	24.92±	59.13±	0.40±	0.23±	0.98±	0.03±	0.13±	0.03±	0.13±
		0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	150 °C -60 s	0.04±	12.05±	0.10±	0.08±	1.71±	24.90±	59.15±	0.43±	0.23±	0.98±	0.03±	0.15±	0.03±	0.14±
		0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
	180 °C -120 s	0.04±	12.08±	0.11±	0.08±	1.71±	24.97±	59.08±	0.41±	0.23±	0.98±	0.03±	0.13±	0.03±	0.14±
		0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
	210 °C -120 s	0.04±	12.14±	0.10±	0.07±	1.71±	24.99±	59.04±	0.40±	0.22±	0.97±	0.03±	0.13±	0.03±	0.13±
		0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
6	未处理	0.04±	12.11±	0.10±	0.08±	1.72±	25.01±	58.99±	0.39±	0.23±	0.99±	0.03±	0.12±	0.04±	0.13±
		0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
	150 °C -60 s	0.04±	12.15±	0.10±	0.08±	1.72±	24.91±	59.03±	0.42±	0.23±	0.99±	0.03±	0.13±	0.03±	0.13±
		0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03
	180 °C -120 s	0.04±	12.07±	0.10±	0.08±	1.73±	24.91±	59.12±	0.40±	0.23±	0.98±	0.03±	0.14±	0.03±	0.13±
		0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	210 °C -120 s	0.04±	12.08±	0.10±	0.07±	1.74±	24.89±	59.15±	0.40±	0.23±	0.98±	0.03±	0.13±	0.03±	0.13±
		0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00

续表 3-3

脂肪酸组成/%		C14:0 (豆蔻酸)	C16:0 (棕榈酸)	C16:1 (棕榈油酸)	C17:0 (十七碳酸)	C18:0 (硬脂酸)	C18:1n9c (油酸)	C18:2n6c (亚油酸)	C20:0 (花生酸)	C20:1 (花生烯酸)	C18:3n3 (α -亚麻酸)	C20:2 (花生二烯酸)	C22:0 (二十二碳酸)	C20:4n6 (花生四烯酸)	C24:0 (二十四碳酸)
储藏时间/周	处理条件														
8	未处理	0.04± 0.00	12.08± 0.01	0.10± 0.01	0.08± 0.00	1.74± 0.00	25.02± 0.00	58.98± 0.00	0.43± 0.02	0.23± 0.00	0.98± 0.00	/	0.12± 0.00	0.03± 0.00	0.13± 0.02
	150 °C	0.04±	12.03±	0.10±	0.08±	1.72±	25.02±	59.07±	0.39±	0.23±	0.97±	0.03±	0.14±	0.03±	0.13±
	-60 s	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00
	180 °C	0.03±	12.01±	0.10±	0.07±	1.69±	25.03±	59.14±	0.38±	0.23±	0.97±	0.03±	0.13±	0.03±	0.13±
	-120 s	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	210 °C	0.04±	12.09±	0.10±	0.08±	1.72±	24.95±	59.10±	0.39±	0.23±	0.98±	0.02±	0.13±	0.03±	0.13±
	-120 s	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注：各样品之间无显著性差异。

3.4.2 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂色泽的影响

油脂色泽是消费者评价及购买食用油的重要感官指标之一^[35]。图 3-3 展示了在 $25\pm3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $75\pm3\%$ 相对湿度条件下，未处理样品与 SHS 预处理样品在 8 周储藏期内 R 值的变化情况。

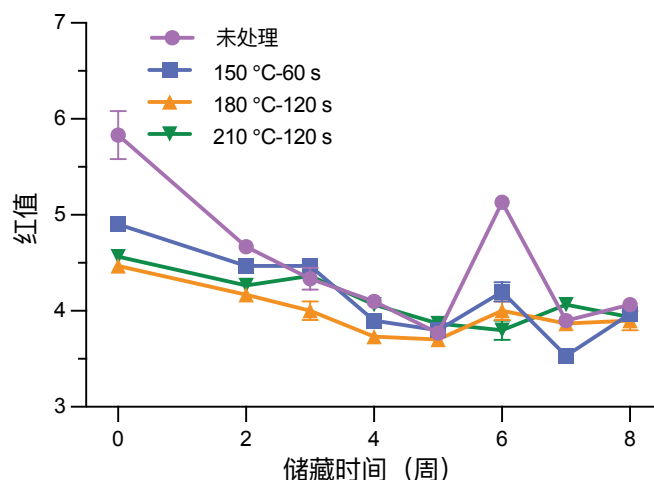


图 3-3 储藏期间玉米胚芽所提取油脂红值的变化

Fig. 3-3 Red value changes of corn germ oil during storage

罗维朋比色法测定结果显示，未处理样品的初始 R 值为 5.83，经 SHS 预处理后 R 值降至 4.47~4.85，最大降幅 34.7%，其中以 180 °C-120 s 组的表现最优，R 值降低可能源于 SHS 无氧微环境抑制了氧化褐变反应和磷脂降解等反应。而经过 SHS 预处理的油样初始 R 值均显著低于未处理样品 ($P < 0.05$)。这一发现与第一章的研究结果一致，表明 SHS 预处理可有效降低玉米胚芽油的 R 值。在 8 周的储藏期间内，所有油样的 R 值均呈现波动下降趋势，其中未处理样品的波动幅度最显著 (30.4%) ($P < 0.05$)，且 R 值始终高于 SHS 预处理样品 (10.9%~16.7%)，其中 180 °C-120 s 组降幅最低，仅为未处理组降幅的 27.7%。这种现象可能与未处理样品在储藏期间发生的自氧化反应有关，该反应可能导致油脂回色，从而引起色泽变化^[97, 135]，说明 SHS 预处理可缓解油脂在储存过程中的回色现象。值得注意的是，180 °C-120 s SHS 预处理样品的 R 值在整个储藏期间保持稳定，且始终维持在较低水平。上述结果表明，SHS 预处理能够有效维持玉米胚芽油的色泽稳定性。

3.4.3 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂酸价的影响

AV 是评价油脂初级氧化程度的重要指标，其数值与游离脂肪酸含量呈正相

关^[136]。图 3-4 展示了为在 $25\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $75\pm 3\%$ 相对湿度条件下，未处理样品与 SHS 预处理样品在 8 周储藏期内 AV 的动态变化。

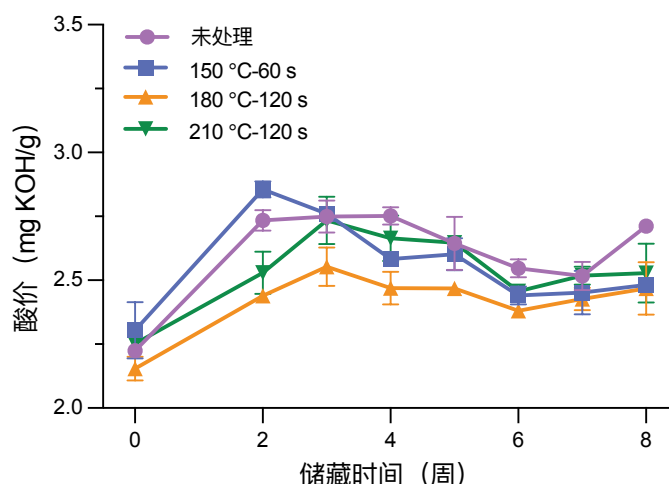


图 3-4 储藏期间玉米胚芽所提取油脂酸价的变化

Fig. 3-4 Changes of acid value of corn germ oil during storage

实验结果显示，所有样品的 AV 在储藏期间均呈现先上升后下降的非线性变化趋势 ($P < 0.05$)。这种变化规律可能与玉米胚芽脂质的氧化过程密切相关：在储藏初期(0~2 周)，水解主导的游离脂肪酸快速累积导致 AV 显著上升；储藏 2~6 周伴随氢过氧化物分解，各油样 AV 均随着储藏时间的延长而呈现出波动式降低；而在储藏末期(6~8 周)后湿热协同作用促进其油脂水解，又不断生成游离脂肪酸，最终导致 AV 再次上升。值得注意的是，未处理样品的 AV 从初始值 2.22 mg KOH/g 显著上升至第 8 周的 2.71 mg KOH/g ($P < 0.05$)，这可能归因于未处理样品中脂质更易发生氧化酸败，导致酯键断裂并产生大量游离脂肪酸。相比之下， $180\text{ }^{\circ}\text{C}-120\text{ s}$ 处理样品表现出更好的氧化稳定性，其 AV 起始值 (2.15 mg KOH/g) 和终值 (2.47 mg KOH/g)，其 AV 仅增加 0.32 mg KOH/g ，较未处理组降低 $12.3\%\sim 23.6\%$ ，且均低于国标限值 (GB2716—2018, 10 mg KOH/g)。这表明 SHS 预处理通过抑制脂肪水解酶活性与阻断氧化链式反应，有效延缓玉米胚芽油的酸败进程。这一发现与 SHS 预处理米糠^[22]、山茶籽^[32]、麦胚^[51]等原料的储藏实验结果相互印证。

3.4.4 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂过氧化值的影响

PV 是评价油脂初级氧化程度的关键指标，其数值直接反映油脂中氢过氧化物的积累量，可用于监测脂质初级氧化产物的形成过程。图 3-5 展示了玉米胚芽

样品在 8 周储藏期内 PV 的动态变化趋势。

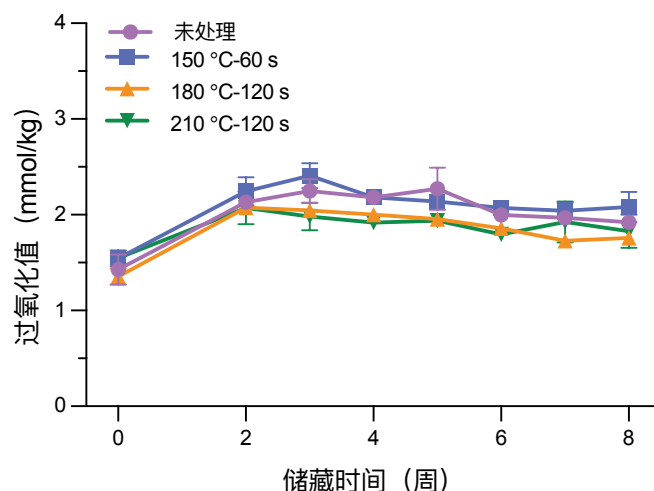


图 3-5 储藏期间玉米胚芽所提取油脂过氧化值的变化

Fig. 3-5 Changes of peroxide value of corn germ oil during storage

实验数据显示, 所有样品在储藏 0~2 周期间 PV 呈现快速上升趋势, 而在 2~8 周期间则表现为缓慢的线性下降 ($P < 0.05$)。这种变化规律可能与直至氧化过程中氢过氧化物的动态平衡有关: 随着储藏时间的延长, 初级氧化产物 (氢过氧化物) 逐渐分解生成醛类、酮类和羧酸等次级氧化产物^[136], 同时新的氢过氧化物不断生成, 形成复杂的氧化-分解平衡^[6, 22]。值得注意的是, 180 °C-120 s SHS 预处理样品在储藏 8 周时的 PV 为 1.76 mmol/kg, 较初始值仅增加约 0.29 倍, 显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。这一结果证实, 180 °C、120 s 的 SHS 预处理条件可有效抑制玉米胚芽在储藏期间内氢过氧化物的生成, 从而提高其氧化稳定性。此外, 所有样品 PV (最高值 2.21 mmol/kg) 均低于国标限值 (GB2716—2018, 9.85 mmol/kg)。

3.4.5 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂共轭二烯值和共轭三烯值的影响

K_{232} 是表征油脂初级氧化程度的关键指标, 可有效反映脂质自动氧化初期的氧化水平。 K_{270} 则主要用于评估油脂次级氧化程度, 其数值与次级氧化产物的积累量呈正相关。

如图 3-6 (A) 可知, 所有样品的 K_{232} 均随着储藏时间延长而显著上升 ($P < 0.05$), 其中未处理样品的波动幅度最为显著。储藏至第 8 周时, 未处理样品的 K_{232} 达到 6.71, 增加量约为初始值的 0.61 倍。值得注意的是, 180 °C-120 s SHS 预处理样品的 K_{232} 变化最为稳定, 其第 8 周测定值较未处理样品低约 10%。

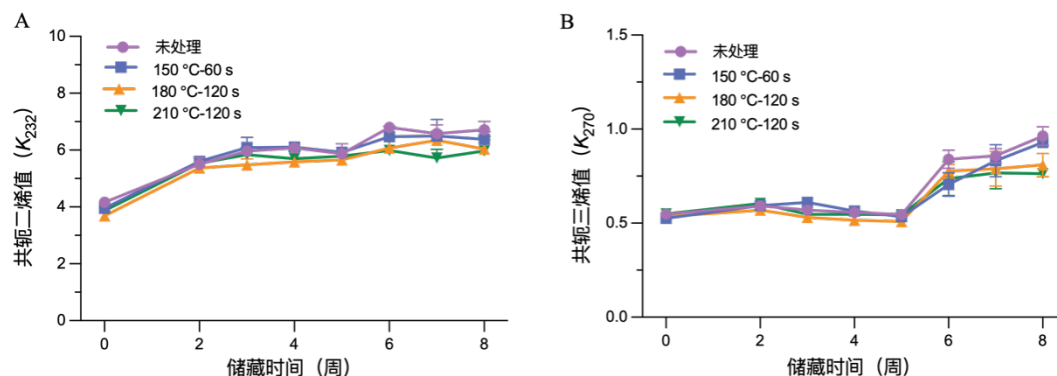


图 3-6 储藏期间玉米胚芽所提取油脂共轭二烯值 (A) 与共轭三烯值 (B) 的变化
Fig. 3-6 Changes of conjugated diene value (A) and conjugated triene value (B) of corn germ oil during storage

图 3-6 (B) 显示, 各样品 K_{270} 的变化呈现明显的两阶段特征。在储藏前期 (0~5 周) 保持相对稳定, 而在 5 周后出现显著上升。这种变化趋势可能与脂质氧化动力学过程有关, 储藏 5 周后次级氧化产物的生成速率显著高于其分解速率 ($P < 0.05$), 导致 K_{270} 快速上升。值得注意的是, SHS 预处理样品的 K_{270} 始终低于未处理样品。储藏至第 8 周时, 未处理样品的 K_{270} 达到 0.96, 增幅达 75%; 而 180 °C-120 s SHS 预处理样品的 K_{270} 仅为 0.81, 增幅为 53%, 显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。

3.4.6 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂茴香胺值的影响

p -AV 是评价食用油脂中不饱和醛类化合物含量的重要指标, 其数值与油脂劣变程度呈正相关^[137]。图 3-7 展示了不同 SHS 预处理条件下玉米胚芽在储藏期间 p -AV 的动态变化趋势。实验数据显示, 所有样品在储藏前期 (0~3 周) 呈缓慢上升趋势, 最大增幅 8.5% (未处理组); 在储藏 3~4 周期间 p -AV 呈现显著下降趋势 ($P < 0.05$); 随后 (4~8 周) 进入快速上升阶段。这种变化规律可能与油脂氧化过程的不同阶段有关: 在储藏初期 (0~4 周), 玉米胚芽油主要处于初级氧化阶段, p -AV 变化相对平稳; 而储藏 4 周后, 随着氧化进程进入次级氧化阶段, 不饱和醛类等二级氧化产物大量积累, 导致 p -AV 快速上升。值得注意的是, 未处理样品的 p -AV 从初始值 3.58 显著上升至 4.60 ($P < 0.05$), 始终维持较高水平。相比之下, SHS 预处理样品的 p -AV 普遍较低, 其中 180 °C-120 s SHS 预处理样品表现最优, 其 p -AV 从 2.76 上升至 3.89, 增幅显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。这一结果证实, 180 °C、120 s 的 SHS 预处理条件可有效缓解玉米胚芽中油脂的次级氧化进程, 从而提高其储存稳定性。

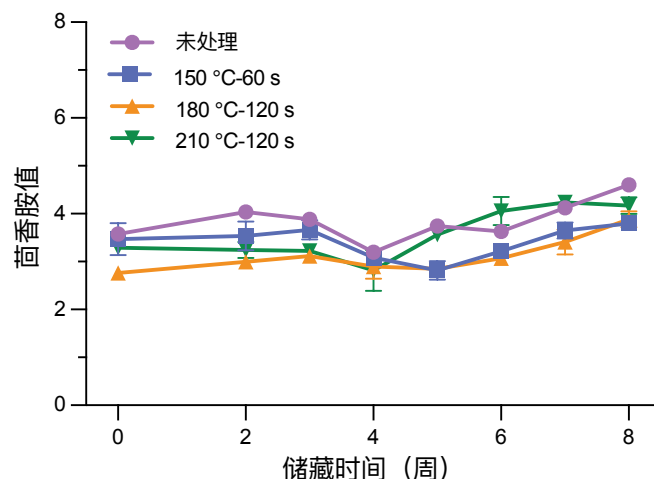


图 3-7 储藏期间玉米胚芽所提取油脂茴香胺值的变化

Fig. 3-7 Changes of *p*-anisidine value of corn germ oil during storage

3.4.7 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂全氧化值的影响

TV 是综合评估油脂氧化程度的关键指标，其通过整合 PV 和 *p*-AV 的信息，能够更全面地反映玉米胚芽脂质的氧化状态。如图 3-8 所示，各样品 TV 变化趋势与 PV 变化在储藏期间具有显著相关性 ($P < 0.05$)，这一发现与田田^[136]的研究结果一致。具体而言，未处理组 TV 自初始值大幅上升 65.2%，而 180 °C-120 s SHS 预处理组 TV 仅上升 35.1%，其终值较未处理组降低 29.8%。

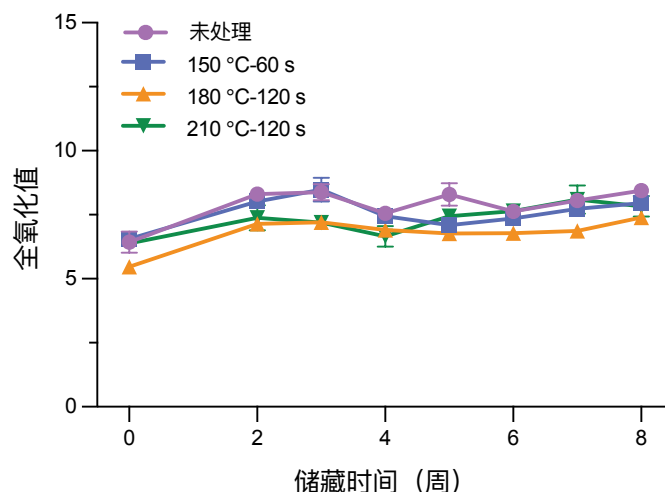


图 3-8 储藏期间玉米胚芽所全氧化值的变化

Fig. 3-8 Changes of total oxidation value of corn germ oil during storage

综合 PV、*p*-AV 和 TV 的分析结果可以得出，180 °C、120 s 的 SHS 预处理条件能够有效抑制玉米胚芽内部脂质的氧化进程，抑制 TV 的整体上升趋势，最终降低玉米胚芽油的氧化劣变风险。这一发现对于优化玉米胚芽的储藏与运输条

件具有重要意义，有助于维持产品品质并确保其安全性。

3.4.8 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂总酚含量的影响

酚类化合物作为天然抗氧化剂，具有显著的清除自由基能力和抗氧化活性等功能，可有效提高油脂的氧化稳定性并延长其货架期^[79, 90]。如图 3-9 所示，储藏初期 SHS 预处理样品的 TPC（176.58~180.53 mg（GAE）/100 g）显著高于未处理样品（140.99 mg（GAE）/100 g）（ $P < 0.05$ ）。这种现象可能与 SHS 预处理的热效应有关。首先，热预处理可能导致多酚聚合物之间的共价键发生热降解，从而提高游离酚类物质的含量^[97, 136, 138]。其次，高温处理可破坏油料细胞结构，促进蛋白质、脂肪和抗氧化物等大分子物质的释放与转化^[136]。

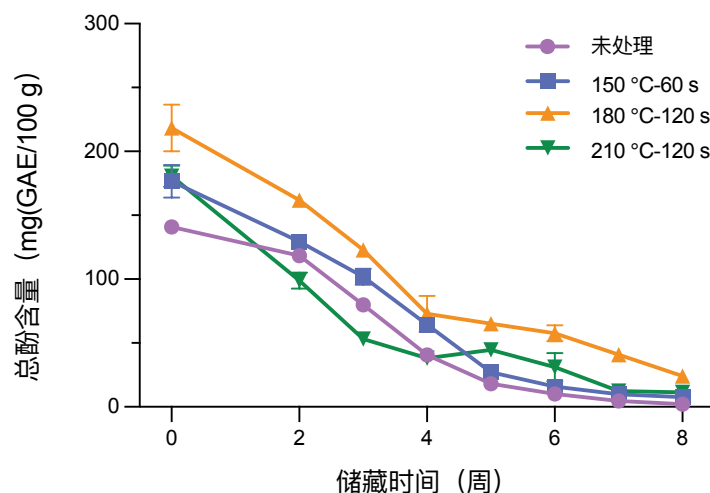


图 3-9 储藏期间玉米胚芽所提取油脂总酚含量的变化

Fig. 3-9 Changes of total phenol content of corn germ oil during storage

在 8 周储藏期间，所有样品的 TPC 均呈现显著下降趋势（ $P < 0.05$ ），这可能是由于酚类化合物在发挥抗氧化作用过程中被持续消耗所致。值得注意的是，180 °C-120 s SHS 预处理样品表现出最优的酚类物质保留率，其 TPC 降低约为初始值的 88.99%，显著低于未处理样品 98.43% 的下降率（ $P < 0.05$ ）。这一结果与罗舜菁等^[57]关于 SHS 预处理对米糠酚类化合物影响的研究发现一致，进一步证实 180 °C、120 s 的 SHS 预处理条件可有效提高玉米胚芽的抗氧化性稳定性。

3.4.9 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂生育酚含量的影响

生育酚作为一类重要的天然抗氧化剂，不仅能够有效抑制不饱和脂肪酸的氧化，还在维持人体健康和促进新陈代谢等方面发挥关键作用^[88, 89]。如图 3-10 所示，储藏初期 SHS 预处理样品的生育酚总含量范围（55.93~58.31 mg/100 g）显

著高于未处理样品 ($54.65 \text{ mg}/100 \text{ g}$) ($P < 0.05$)。这种现象可能与 SHS 预处理的热效应有关, 热处理改变了玉米胚芽细胞的微观结构, 促进了油脂中脂质微量伴随物的溶出, 从而提高了总生育酚含量。

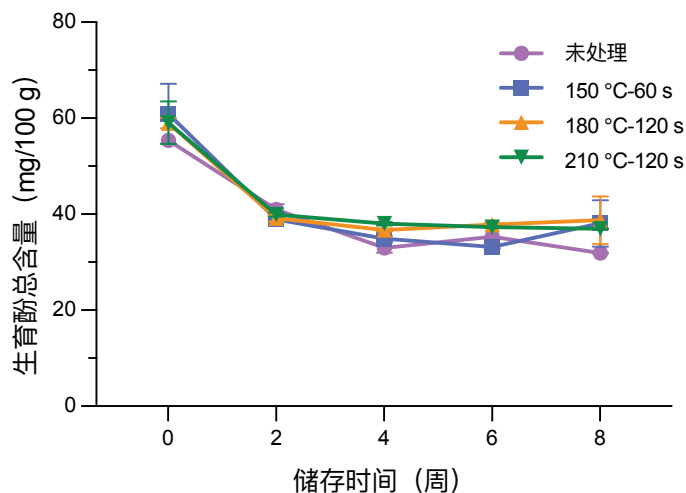


图 3-10 储藏期间玉米胚芽所提取油脂生育酚含量的变化

Fig. 3-10 Changes of tocopherol content of corn germ oil during storage

在 8 周的储藏期内, 所有样品的总生育酚含量均呈现显著下降趋势 ($P < 0.05$), 这可能是由于玉米胚芽在储藏过程中发生脂质氧化水解, 生育酚作为抗氧化剂脂质氧化反应损耗自身所致^[101]。储藏初期 (0~2 周) SHS 预处理组生育酚含量的下降速度快于未处理样品, 但随着储藏时间的延长 (2~4 周), 二者差异逐渐降低, 储藏后期 (4~8 周), 未处理样品生育酚含量的下降速率逐步高于 SHS 预处理组。储藏初期 SHS 预处理组的氧化速率高于未处理样品, 这可能是由于热处理导致脂肪氧合酶活性丧失后, 酶促氧化途径受阻, 而非酶促氧化得到促进, 但在储藏后期, 未处理样品的氧化速率迅速增加, 这可能是酶促氧化和非酶促氧化共同作用的结果。值得注意的是, SHS 预处理样品的生育酚保留率显著优于未处理样品 ($P < 0.05$): $150 \text{ }^{\circ}\text{C}-60 \text{ s}$ 、 $180 \text{ }^{\circ}\text{C}-120 \text{ s}$ 、 $210 \text{ }^{\circ}\text{C}-120 \text{ s}$ SHS 预处理样品的下降幅度分别为: 38.70%、39.58%、34.08%, 均低于未处理样品的 41.76%。

表 3-4 显示, 在玉米胚芽毛油中共检测到 4 种生育酚异构体, 以 γ -生育酚 ($25.99 \sim 56.71 \text{ mg}/100 \text{ g}$) 与 α -生育酚 ($4.27 \sim 7.81 \text{ mg}/100 \text{ g}$) 为主, 两者约占生育酚总量 ($31.80 \sim 67.14 \text{ mg}/100 \text{ g}$) 的 95% 以上。本研究总生育酚含量显著低于团队前期的研究数据 ($P < 0.05$)^[102], 推测差异可能源自原料产地或品种的不同。具体而言, $150 \text{ }^{\circ}\text{C}-60 \text{ s}$ SHS 预处理样品的 β -生育酚含量 ($0.21 \pm 0.01 \text{ mg}/100 \text{ g}$)

显著高于未处理样品 (0.18 ± 0.01 mg/100 g) ($P<0.05$), 180 °C-120 s SHS 预处理样品的 γ -生育酚含量 (49.65 ± 0.01 mg/100 g) 显著高于未处理样品 (45.96 ± 0.01 mg/100 g) ($P<0.05$)。此外, 在 180 °C-120 s 样品在储藏第 8 周时 α -生育酚含量的保留量最高 (5.29 ± 0.01 mg/100 g), 表明 180 °C、120 s 的 SHS 预处理条件可最大限度地保留 α -生育酚这一有益的营养成分。根据上述分析结果可以得出, SHS 预处理不仅有利于提高玉米胚芽的抗氧化性, 还有助于保留和促进营养成分 (如总酚化合物和生育酚) 的溶出, 这些发现与罗舜菁等^[57]关于 SHS 预处理米糠品质影响的研究结果保持相互印证。上述结果表明, SHS 预处理有助于延缓储藏过程中玉米胚芽中生育酚的损耗。

表 3-4 储藏期间玉米胚芽所提取油脂的生育酚含量
Table 3-4 Tocopherol content of corn germ oil during storage

储藏时间 /周	处理条件	α -生育酚 (mg/100 g)	β -生育酚 (mg/100 g)	γ -生育酚 (mg/100 g)	δ -生育酚 (mg/100 g)	生育酚总量 (mg/100 g)
0	未处理	6.73 ± 0.13^{ab}	0.19 ± 0.01^{ab}	46.58 ± 0.89^b	1.90 ± 0.04^b	55.40 ± 1.07^b
	150 °C-60 s	7.09 ± 0.72^a	0.23 ± 0.02^a	51.46 ± 5.25^a	2.16 ± 0.22^a	60.93 ± 6.21^a
	180 °C-120 s	6.61 ± 0.10^{abc}	0.18 ± 0.11^{ab}	50.22 ± 0.89^{ab}	1.96 ± 0.01^{ab}	58.97 ± 1.09^{ab}
	210 °C-120 s	6.37 ± 0.48^{bcd}	0.15 ± 0.01^b	50.42 ± 3.78^{ab}	2.12 ± 0.16^a	59.05 ± 4.43^{ab}
2	未处理	5.94 ± 0.16^{cde}	0.08 ± 0.00^c	33.43 ± 0.92^c	1.54 ± 0.04^{cd}	40.98 ± 1.13^c
	150 °C-60 s	5.02 ± 0.04^{ghij}	0.02 ± 0.00^{cd}	32.34 ± 0.26^{cd}	1.55 ± 0.01^{cd}	38.92 ± 0.31^{cde}
	180 °C-120 s	5.53 ± 0.10^{efg}	0.05 ± 0.01^{cd}	32.11 ± 0.59^{cd}	1.48 ± 0.03^{cd}	39.16 ± 0.72^{cd}
	210 °C-120 s	5.35 ± 0.05^{efgh}	0.03 ± 0.00^{cd}	32.94 ± 0.30^{cd}	1.58 ± 0.01^{cd}	39.90 ± 0.37^{cd}
4	未处理	4.40 ± 0.13^j	/	27.17 ± 0.86^{ef}	1.41 ± 0.04^{cd}	32.98 ± 1.05^{fg}
	150 °C-60 s	4.96 ± 0.08^{ghij}	0.05 ± 0.00^{cd}	28.47 ± 0.49^{def}	1.40 ± 0.02^d	34.88 ± 0.60^{defg}
	180 °C-120 s	5.56 ± 0.05^{efg}	0.03 ± 0.00^{cd}	29.78 ± 0.28^{cdef}	1.36 ± 0.01^d	36.71 ± 0.34^{cdefg}
	210 °C-120 s	5.39 ± 0.05^{efg}	/	31.13 ± 0.30^{cde}	1.49 ± 0.01^{cd}	38.00 ± 0.38^{cdef}
6	未处理	5.12 ± 0.30^{fghij}	/	28.75 ± 1.68^{cdef}	1.46 ± 0.08^{cd}	35.32 ± 2.06^{cdefg}
	150 °C-60 s	4.61 ± 0.05^{hij}	/	27.12 ± 0.28^{ef}	1.42 ± 0.01^{cd}	33.14 ± 0.34^{efg}
	180 °C-120 s	5.69 ± 0.06^{defg}	/	30.71 ± 0.37^{cdef}	1.47 ± 0.02^{cd}	37.86 ± 0.45^{cdef}
	210 °C-120 s	5.21 ± 0.03^{efgh}	0.04 ± 0.00^{cd}	30.59 ± 0.15^{cdef}	1.44 ± 0.01^{cd}	37.28 ± 0.18^{cdefg}
8	未处理	4.45 ± 0.01^{ij}	/	26.08 ± 0.09^f	1.40 ± 0.01^d	31.91 ± 0.11^g
	150 °C-60 s	5.25 ± 0.66^{efgh}	0.045 ± 0.01^{cd}	31.15 ± 3.95^{cde}	1.63 ± 0.21^c	38.07 ± 4.82^{cdef}
	180 °C-120 s	5.81 ± 0.75^{def}	0.04 ± 0.01^{cd}	31.38 ± 4.04^{cde}	1.52 ± 0.20^{cd}	38.74 ± 4.99^{cdef}
	210 °C-120 s	5.15 ± 0.01^{fghi}	0.03 ± 0.00^{cd}	30.36 ± 0.07^{cdef}	1.41 ± 0.00^{cd}	36.95 ± 0.09^{cdefg}

注: 同一列中不同上标字母的值存在显著差异 ($P<0.05$)。

3.4.10 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂 β -胡萝卜素的影响

图 3-11 展示了储藏期间未处理样品与 SHS 预处理样品中 β -胡萝卜素含量的动态变化。如图所示 SHS 预处理样品中 β -胡萝卜素含量 ($24.37\sim24.55$ mg/kg)

显著高于未处理样品 ($22.65 \pm 2.52 \text{ mg/kg}$) ($P < 0.05$), 推测其原因为 SHS 预处理会导致蛋白质变性以及玉米胚芽内部细胞结构破坏进而增加油溶性 β -胡萝卜素含量。储藏 8 周结束时, 未处理样品的 β -胡萝卜素含量最高, 这可能源于未处理样品中酶活相对较高, 导致细胞壁和细胞膜的部分水解, 促进类胡萝卜素-蛋白质复合物的破坏和细胞组织软化, 从而增加了类胡萝卜素的含量^[139]。需要指出的是, 更多的研究^[140]结果显示 β -胡萝卜素在油料储藏过程中呈现下降趋势, 主要源于其作为抗氧化剂, 参与储藏过程中延缓脂质氧化的进程。此外, 油料储藏过程中含油量会随着储藏时间的延长呈现逐渐下降的趋势^[141], 一定程度上也会引起 β -胡萝卜素含量的上升。

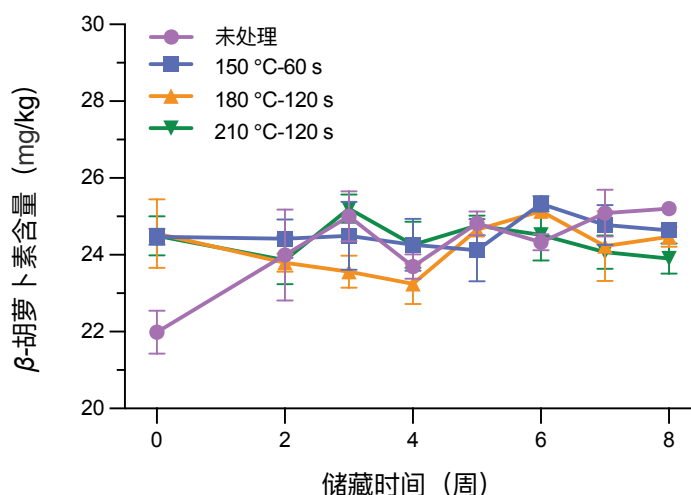


图 3-11 储藏期间玉米胚芽所提取油脂 β -胡萝卜素含量的变化

Fig. 3-11 Changes of β -carotene content of corn germ oil during storage

3.4.11 SHS 预处理对玉米胚芽储藏期间提取油脂抗氧化活性的影响

DPPH 和 ABTS 自由基清除能力是评价抗氧化活性的两个重要指标。图 3-12 展示了储藏期间未处理与 SHS 预处理玉米胚芽样品的抗氧化能力变化。观察图可知, 储藏初期 SHS 预处理样品的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力显著高于未处理样品 ($P < 0.05$), 其中 180 °C-120 s SHS 预处理样品的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力提升幅度分别为 22.68% 和 19.07%。这一现象与 TPC 的增加密切相关, 已有相关研究证实, 酚类化合物是影响油脂抗氧化活性的关键因素^[142]。

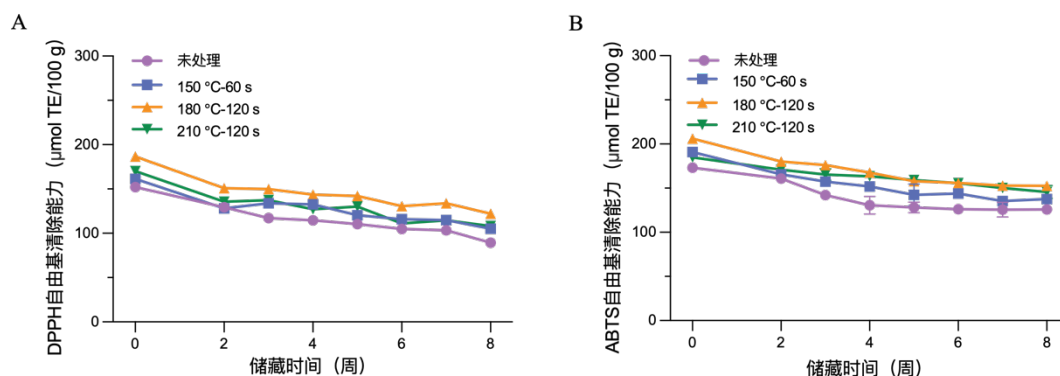


图 3-12 储藏期间玉米胚芽所提取油脂 DPPH 自由基清除能力 (A) 与 ABTS 自由基清除能力 (B) 的变化

Fig. 3-12 Changes of DPPH radical scavenging ability (A) and ABTS radical scavenging ability (B) of corn germ oil during storage

此外, 所有样品的 DPPH 与 ABTS 自由基清除能力均随着储藏时间的延长而呈现缓慢降低的趋势。储藏期末期, 未处理样品的 DPPH 与 ABTS 自由基清除能力最弱, 分别降至 $89.28 \pm 1.24 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$ 和 $125.89 \pm 1.06 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$, 显著低于 SHS 预处理样品(分别为 $105.08 \sim 122.04 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$ 和 $137.55 \sim 152.62 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$) ($P < 0.05$)。值得注意的是, $180^\circ\text{C}-120 \text{ s}$ SHS 预处理样品在整体储藏期间维持了最优的抗氧化活性, 其 DPPH 与 ABTS 自由基清除能力分别保持在 $122.04 \sim 186.74 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$ 和 $152.62 \sim 206.11 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$ 范围内。上述结果表明, SHS 预处理通过提高玉米胚芽的抗氧化能力, 可有效抑制脂质的氧化进程, 从而显著改善了产品的储存稳定性 ($P < 0.05$)。这一发现为优化玉米胚芽的储藏条件提供了重要理论依据。

3.5 本章小结

本章节通过对玉米胚芽 SHS 预处理样品与未处理样品在 $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $75 \pm 3\%$ 相对湿度的条件下进行为期 8 周的储藏实验, 综合分析了所提取玉米胚芽油的理化特性、微量脂肪伴随物以及抗氧化活性的变化规律。系统研究了 SHS 预处理对玉米胚芽储藏品质的影响。主要研究结论如下:

(1) $180^\circ\text{C}-120 \text{ s}$ SHS 预处理样品的各项理化指标 (AV、PV、 $p\text{-AV}$ 、 K_{232} 、 K_{270} 、TV) 均显著优于未处理样品及其他处理组 ($P < 0.05$)。这一结果证实该预处理条件可有效抑制玉米胚芽内部脂质的氧化酸败, 显著延缓脂质劣变进程;

(2) 180°C 、 120 s 的 SHS 预处理条件可最大限度地保留玉米胚芽中的微量脂肪伴随物, 其中总酚、生育酚 (α -生育酚含量的保留量为 $5.29 \pm 0.01 \text{ mg}/100 \text{ g}$)、

β -胡萝卜素（保留量为 24.37~24.55 mg/kg）的保留率显著高于其他处理组（ $P<0.05$ ）；

（3）180 °C-120 s SHS 预处理样品在整个储藏期间维持了最优的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力，分别保持在 122.04~186.74 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ 和 152.62~206.11 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ 范围内，并显著优于其他处理组（ $P<0.05$ ），可促使玉米胚芽的抗氧化活性得到提升；

（4）SHS 预处理（180 °C、120 s）可有效提升玉米胚芽的储藏品质。

第4章 过热蒸汽预处理对玉米胚芽毛油精炼加工的影响

4.1 引言

油脂精炼是通过一系列工序去除毛油中的杂质,以提高油脂的储藏品质和食用安全性为目的的加工过程^[95]。中国粮油学会首席专家王瑞元研究员率先提出并大力倡导食用油精准适度加工理念^[143]。在油脂适度加工方面,通过优化工艺参数及创新加工技术等手段,在确保食用安全的前提下,能够最大程度地保留油脂中的天然营养成分,同时有效控制风险因子的生成^[144]。实施该理念不仅有助于提高油脂产品的营养价值,还能显著降低能耗、减少废水排放,对推动我国油脂加工业向绿色、低碳、可持续方向发展具有重要指导意义。然而在目前的研究中,尚未有研究对 SHS 预处理方法与油脂精炼之间的关系进行探究。基于此,本章在第三章研究基础上,旨在探究 SHS 预处理(180 °C、120 s)对玉米胚芽油适度精炼过程(脱胶、脱酸、脱色)中品质特性的影响。重点关注 SHS 预处理与玉米胚芽油精炼效率的关系,以及通过油脂回色试验探究 SHS 预处理对油脂色泽稳定性的影响。

4.2 实验材料与设备

4.2.1 实验材料

同 2.2.1 中的实验材料。

4.2.2 实验试剂

本章所使用的主要实验试剂见表 4-1，其他重复实验试剂见表 2-1。

表 4-1 主要实验试剂

Table 4-1 Main experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
柠檬酸	≥99.5%	国药集团化学试剂有限公司
活性白土	/	乐平市红宇漂土科技有限公司
磷脂酶 A	LQ-NE 2000	蔚蓝生物科技有限公司
DPPH	/	德国达姆施塔特默克集团
Trolox 标准品	/	美国陶术生物公司

4.2.3 实验设备

本章所使用的主要实验设备见表 4-2，其他重复实验设备见表 2-2。

表 4-2 主要实验设备

Table 4-2 Main experimental equipment

设备名称	型号	厂家
电子天平	HZK-FA110	美国康州 HZ 电子有限公司
过热蒸汽烤箱	ER-TD7001CN	日本东芝公司
高速冷冻离心机	Centrifuge 5810 R	德国艾本德公司
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9101.3A	上海三发科学仪器有限公司
色度仪	Lavibond Model Fx	英国罗维朋公司
紫外分光光度计	UV-5500PC	上海元析仪器有限公司
磁力搅拌器	LC-MSB-HD	上海力辰邦西仪器科技有限公司
高效液相色谱仪	Waters 2695	美国沃特世有限公司
气相色谱仪	GC-7280A	美国安捷伦公司

4.3 实验方法

4.3.1 样品制备

4.3.1.1 原料筛选

同 2.3.1.1 中的筛选方法。

4.3.1.2 SHS 预处理玉米胚芽

首先对 SHS 设备进行预热，直至达到所需的温度并稳定。

处理条件：180 °C-120 s；

对照组：未处理的玉米胚芽；

取 1000 g 玉米胚芽分多次单层放置于烤盘中。处理后，立即将样品从加热室中取出，待样品在室温下冷却后，储存于-20 °C的环境中，直至进行下一步实验。

4.3.1.3 玉米胚芽油的制备

同 2.3.1.3 中的玉米胚芽油制备方法。

4.3.2 油脂精炼

4.3.2.1 脱胶

参考李杉杉等^[145]的方法，采用酶法脱胶工艺对玉米胚芽毛油进行处理。具体实验步骤如下：准确称取 300 g 的玉米胚芽毛油于 250 mL 的圆底烧瓶中加热至 75 °C，保持恒温后，再加入 50%的柠檬酸（质量分数为 50%，添加量为油质量的 0.5%），继续以 200 r/min 的转速持续搅拌 30 min。待油冷却至 55 °C后，加入 0.0405 g 的 NaOH 溶液（质量分数为 50%，占原油质量的 0.0135%），调节 pH 值为 4.4~4.8 左右，以获得最佳磷脂酶活性。然后加入 9.00 mL 的去离子水（占原油质量的 3%）和 0.01%的磷脂酶 A。将混合物以 10000 r/min 高速搅拌 2 min，以充分混合均匀。在 55 °C恒温条件下，以 200 r/min 搅拌进行 4 h 酶解反应。待反应结束后，将混合物升温至 85 °C，维持 10 min 进行酶灭活。最后待反应结束后，以 3900 r/min 离心 20 min，收集上层清液，获得脱胶油样品。

4.3.2.2 脱酸

参考刘玉兰等^[146]的方法，采用碱炼脱酸工艺对玉米胚芽脱胶油进行处理。具体实验步骤如下：准确称取 200 g 脱胶玉米胚芽油于 250 mL 的圆底烧瓶中，搅拌加热至 50 °C后，提高搅拌速度，并缓慢加入称量好的同温碱液进行中和反

应 30 min。当油脂中呈现絮状皂粒相分离特征时，进行降速搅拌，并将反应油样快速升温至 70 °C（1 °C/min），维持 10 min。待形成油皂呈明显分离状态，终止搅拌，进行离心（3900 r/min；20 min），收集上层碱炼半净油搅拌加热至 95 °C 左右，再用微沸蒸馏水（90~95 °C）洗涤 2~3 遍，每次用水量为油质量的 10%，洗涤直至废水 pH 值为中性（7.00±0.20）。最后，再次搅拌加热至 100 °C 持续 15~20 min，继续升温至 125 °C，持续 10 min 进行脱水干燥，待冷却至室温后获得脱酸油样品。

$$\text{加碱总量} = \text{理论加碱量} + \text{超碱量} = \frac{(\text{粗油重} \times \text{AV} \times 7.13 \times 10^{-4}) + (\text{粗油重} \times \text{B}\%)}{c} \quad (4-1)$$

式中：AV：脱胶油酸价；

c：液体碱浓度（14 波美度时 NaOH 溶液的浓度为 9.42%）；

B%：0.1%（超碱系数）。

4.3.2.3 脱色

参考刘玉兰等^[146]的方法，采用活性白土吸附法对玉米胚芽脱酸油进行脱色处理。具体实验步骤如下：准确称取 100 g 的玉米胚芽脱酸油于 250 mL 的三口烧瓶中，将三口烧瓶安装至磁力搅拌器，连接真空系统（真空度：0.09 MPa），加热搅拌油样至 90 °C 保持恒温，进行真空脱水，直至油面上无明显雾气产生为止。再缓慢加入称量好的活性白土（占原油质量的 3%），在操作压力 0.09 MPa 下升温至 100 °C，保持恒温充分搅拌 20 min 后停止加热。继续搅拌，待油温冷却至 70 °C 时破除真空，以 3900 r/min 离心 20 min，收集上层清液，获得脱色油样品。将样品置于棕色玻璃瓶中，并在 -20 °C 条件下保存。

4.3.3 玉米胚芽油的测定

4.3.3.1 磷脂含量的测定

磷脂含量的测定参照 GB/T 5537—2008《粮油检验磷脂含量的测定》中的钼蓝比色法，以 mg/L 表示。如图 4-1 为磷脂含量的标准曲线图。

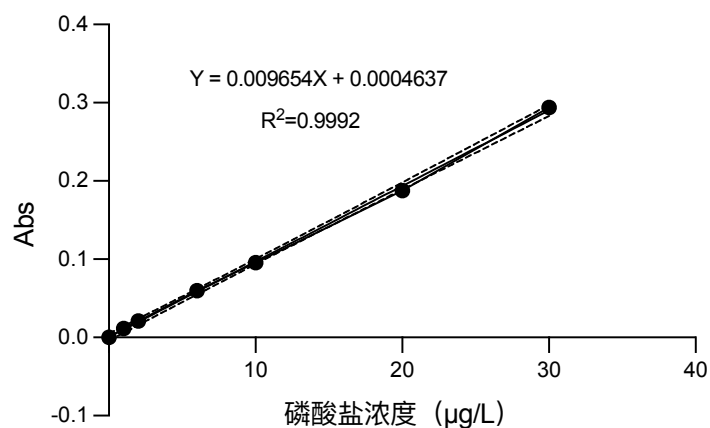


图 4-1 磷脂含量标准曲线

Fig. 4-1 Standard curve of phospholipid content

4.3.3.2 色泽的测定

同 2.3.3.2 中色泽的测定方法。

4.3.3.3 酸价的测定

同 2.3.3.3 中酸价的测定方法。

4.3.3.4 过氧化值的测定

同 2.3.3.4 中过氧化值的测定方法。

4.3.3.5 茴香胺值的测定

同 2.3.3.6 中茴香胺值的测定方法。

4.3.3.6 全氧化值的测定

同 2.3.3.7 中全氧化值的测定方法。

4.3.3.7 生育酚含量的测定

同 2.3.3.9 中生育酚含量的测定方法。

4.3.3.8 β -胡萝卜素含量的测定

同 2.3.3.11 中 β -胡萝卜素含量的测定方法。

4.3.3.9 抗氧化活性的测定

抗氧化活性的测定同 3.3.2.11 中 DPPH 自由基清除能力的测定方法。如图 4-2 为 DPPH 自由基清除能力标准曲线。

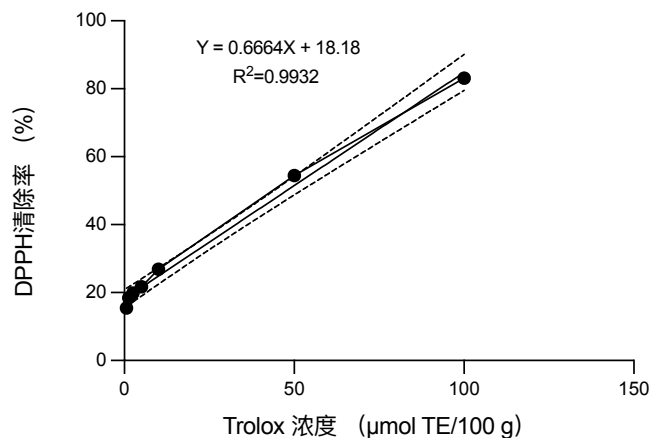


图 4-2 DPPH 自由基清除能力标准曲线

Fig. 4-2 Standard curve of DPPH radical scavenging ability

4.3.4 油脂回色试验

参照张余权等^[147]的方法稍作调整。采用快速烘箱法进行油脂回色试验。称取 100 g 油样置于 250 mL 的烧杯中，均匀置于 105 °C 的烘箱中，每隔 2 h 调整油样位置确保其受热均匀，连续加热 6 h 后取出，置于干燥器中冷却。

4.3.5 数据统计分析

同 2.3.4 中的数据统计分析方法。

4.4 结果与分析

4.4.1 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油磷脂含量的影响

磷脂是磷脂酸的衍生物^[140]，在油脂提取过程中会随着油体一同被提取出来^[148, 149]。然而，磷脂含量较高的植物油通常容易出现油脂回色现象^[150]，这不仅会对油脂的氧化稳定性产生不利影响，还可能导致油脂产品产生异味，从而降低其整体品质^[151]。

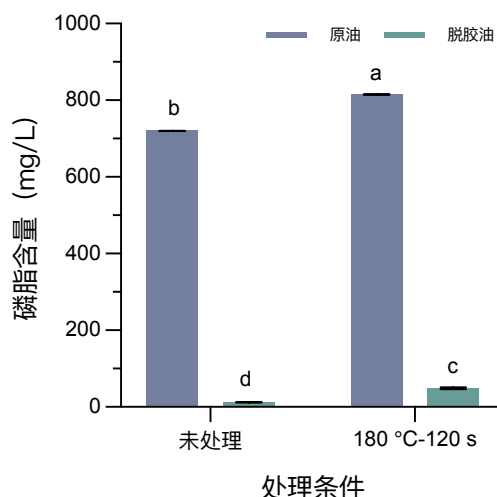


图 4-3 SHS 预处理对脱胶玉米胚芽油磷脂含量的影响

Fig. 4-3 Effect of SHS pretreatment on phospholipid content of degummed corn germ oil

图 4-3 展示了 180 °C、120 s 条件下 SHS 预处理后玉米胚芽毛油在脱胶处理前后的磷脂含量变化。从图中可看出，在酶法脱胶处理前，未处理样品的磷脂含量为 720.15 ± 0.20 mg/L，低于 180 °C-120 s SHS 预处理样品（以下简称 SHS 预处理样品）的 815.14 ± 1.51 mg/L。脱胶处理后，未处理样品的脱胶率为 98.33%，而 SHS 预处理样品的脱胶率为 94.05%。由此可见，SHS 预处理样品的脱胶率略低于未处理样品。这一现象可能是由于高温条件下，油脂中的胶体受热影响以及絮凝过程的可逆性，形成了更多的小分子颗粒^[152]，从而导致 SHS 预处理样品的磷脂含量高于未处理样品，并出现脱胶率降低的情况。

4.4.2 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油酸价的影响

在油脂精炼过程中，脱酸处理是一道非常关键的工序，其主要目的是去除油脂中的游离脂肪酸。因此，AV 的测定常用于评估脱酸处理的效果。AV 反映了油脂的氧化程度，AV 越小，表明油脂的氧化程度越低，品质越好。图 4-4 展示了 SHS 预处理后玉米胚芽脱胶油在脱酸处理前后的 AV 变化图。

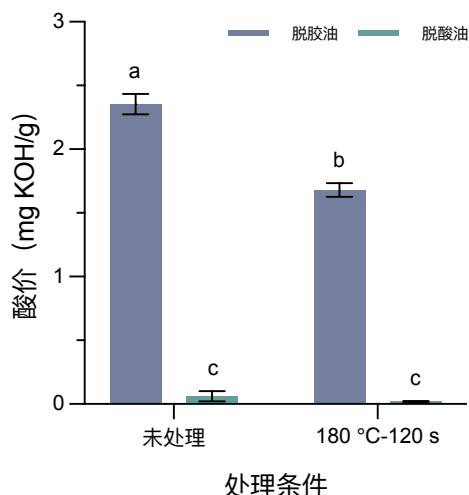


图 4-4 SHS 预处理对脱酸玉米胚芽油酸价的影响

Fig. 4-4 Effect of SHS pretreatment on acid value of deacidified corn germ oil

由图中可观察到, SHS 预处理样品的 AV 为 1.68 ± 0.05 mg KOH/g, 未处理样品的 AV 为 2.35 ± 0.08 mg KOH/g。两者 AV 均低于 4 mg KOH/g, 符合国家植物油的卫生标准。值得注意的是, SHS 预处理样品的 AV 显著低于未处理样品 ($P < 0.05$)。此外, 经过碱炼脱酸处理后, SHS 预处理样品的脱酸率达到 98.92%, 而未处理样品的脱酸率为 97.37%。这一结果表明, 180 °C、120 s SHS 预处理条件能够有效提高油脂精炼的脱酸效率, 从而进一步提升油脂品质。综上所述, SHS 预处理可能是一种有效的辅助脱酸方法。

4.4.3 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油色泽的影响

在油脂精炼过程中, 脱色是一道较为特殊的工序。它不仅能够去除油脂中的色素, 还可以脱除微量营养素、微量金属离子、残磷以及残皂。此外, 消费者通常更倾向于选择色泽偏浅的食用油脂, 因为普遍认为浅色油脂品质更好^[153]。因此, 脱色处理常用于改善油脂色泽, 从而提升油脂品质^[141]。然而, 并非所有色素的脱除都能提高油脂质量。从适度精炼的角度来看, 油脂的脱色处理需要适度进行, 以避免微量营养素的过度流失^[154]。

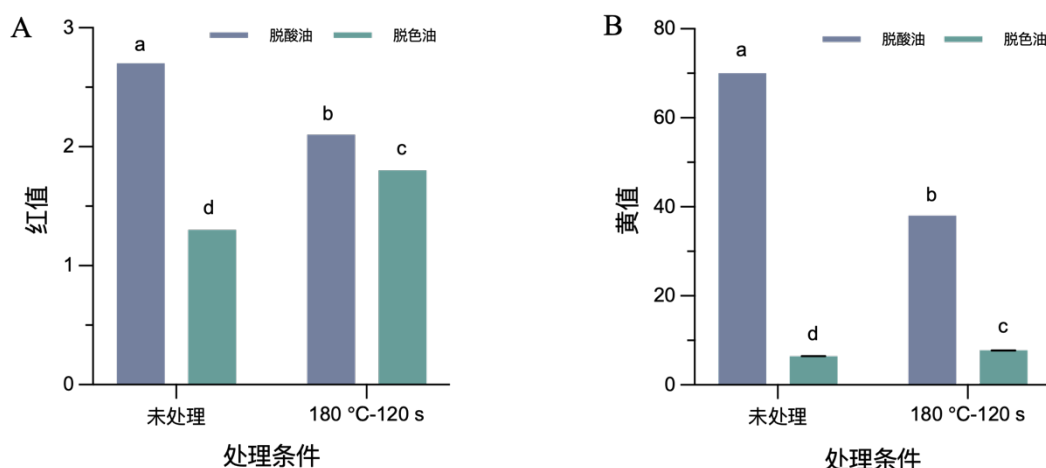


图 4-5 SHS 预处理对脱色玉米胚芽油红值 (A) 和黄值 (B) 的影响

Fig. 4-5 Effect of SHS pretreatment on red value (A) and yellow value (B) of decolorized corn germ oil

图 4-5 展示了 180 °C、120 s SHS 预处理后玉米胚芽脱酸油在脱色处理前后 R 值和 Y 值的变化。从图中可以看出，脱色前 SHS 预处理样品的 R 值、Y 值均低于未处理样品，表明 SHS 预处理有助于降低油脂的初始色泽。经过脱色处理后，未处理样品 R 脱色率为 51.85%；Y 脱色率为 90.76%；而 SHS 预处理样品的 R 脱色率为 14.29%，Y 脱色率为 79.65%。显然，SHS 预处理样品的脱色率显著低于未处理样品 ($P < 0.05$)。

β -胡萝卜素能够是油脂中常见的类胡萝卜素之一，能够赋予油脂黄色和红色，并具有较强的抗氧化性^[135]。研究表明， β -胡萝卜素在发挥抗氧化作用的过程中会发生降解，从而导致食品颜色下降^[155]。因此，在精炼过程中，未处理样品中的 β -胡萝卜素可能因发挥抗氧化作用而发生降解，进而降低了 R 值和 Y 值，导致其脱色率较高。与此相反，根据第二、三章的研究结果，SHS 预处理能够有效缓解油脂的氧化劣变，因此 SHS 预处理样品中的 β -胡萝卜素无需过多发挥抗氧化作用，从而减少了其降解，最终导致 SHS 预处理样品的脱色率低于未处理样品。

4.4.4 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油过氧化值的影响

通常，PV 可用来评估油脂的氧化程度，PV 越低，表明油脂的酸败程度越低，则油脂品质越好。图 4-6 展示了 180 °C、120 s SHS 预处理对玉米胚芽毛油精炼（包括脱胶、脱酸、脱色）后得到的脱色油（以下简称 SHS 预处理成品油）PV 的影响。

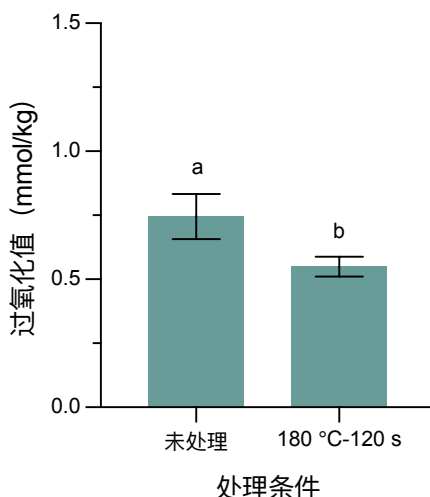


图 4-6 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油过氧化值的影响

Fig. 4-6 Effect of SHS pretreatment on peroxide value of refined corn germ oil

由图中可观察到，精炼后 SHS 预处理成品油的 PV 为 0.75 ± 0.09 mmol/kg，未处理成品油 PV 为 0.55 ± 0.04 mmol/kg。尽管两者均低于 10 mmol/kg，符合国家植物油的卫生标准，但 SHS 预处理成品油的 PV 显著低于未处理成品油 ($P < 0.05$)。这一结果表明，180 °C、120 s 条件下的 SHS 预处理能够有效缓解精炼玉米胚芽油的氧化劣变，从而提升其氧化稳定性。因此，SHS 预处理对油脂精炼工艺的改进可能具有重要意义。

4.4.5 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油茴香胺值的影响

油脂氧化的初级氧化产物容易分解为小分子物质，通常用 p -AV 评估油脂的次级氧化程度，即 p -AV 越高，表明油脂的次级氧化程度越高，品质越差。图 4-7 展示了 180 °C-120 s SHS 预处理对玉米胚芽油精炼后成品油 p -AV 的影响情况。结果显示，SHS 预处理成品油的 p -AV 显著高于未处理成品油 ($P < 0.05$)。这一现象可能是由于 SHS 预处理成品油在精炼过程中经历了多次高温处理，并且在氧气存在的条件下，初级氧化产物进一步分解为次级氧化产物。此外，活性白土的吸附作用可能不足以完全抵消氧化产物的分解作用，从而导致 SHS 预处理成品油的 p -AV 高于未处理成品油。基于此，未来的研究可以进一步优化 SHS 预处理条件以及油脂精炼的步骤和具体参数，以降低 p -AV 并提高油脂品质。

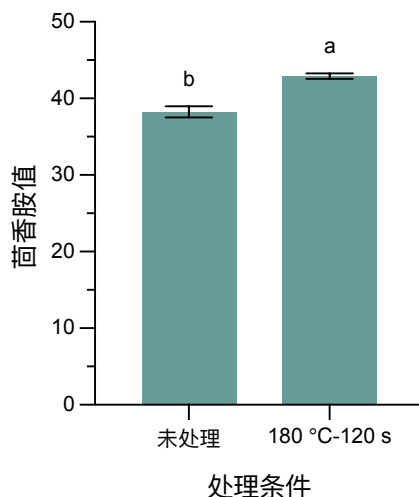


图 4-7 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油茴香胺值的影响

Fig. 4-7 Effect of SHS pretreatment on *p*-anisidine value of refined corn germ oil

4.4.6 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油全氧化值的影响

油脂氧化是一个动态平衡的过程,TV 综合了 PV 和 *p*-AV 的情况($TV=2PV+p\text{-}AV$), 因此 TV 是一种全面评估油脂的氧化程度的指标, 能够准确地反映玉米胚芽油中脂质的氧化状态。图 4-8 展示了 180 °C、120 s SHS 预处理对精炼玉米胚芽成品油 TV 的影响。结果显示, SHS 预处理成品油的 TV 为 44.02, 高于未处理成品油的 39.73。然而, 在第一、二章的研究结果均表明, SHS 预处理样品的 TV 通常低于未处理样品。这一矛盾现象可能表明, SHS 预处理油样在精炼过程中可能伴随着油脂氧化, 从而导致最终 TV 升高。目前, 关于 SHS 预处理对精炼油脂的品质研究较为有限, 因此这一现象的具体机制仍需进一步深入研究。

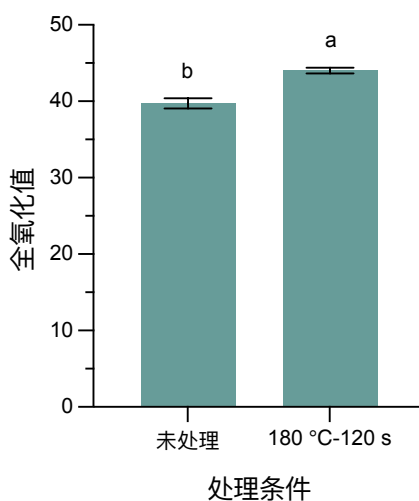


图 4-8 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油全氧化值的影响

Fig. 4-8 Effect of SHS pretreatment on total oxidation value of refined corn germ oil

4.4.7 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油生育酚含量的影响

玉米胚芽油是天然维生素 E 的良好来源,尤其是 γ -生育酚和 α -生育酚等^[72]。表 4-3 为 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油中生育酚含量的影响,根据表格可知本研究共鉴定出 4 种生育酚 (α -、 β -、 γ -和 δ -生育酚)与 4 种生育三烯酚 (α -、 β -、 γ -和 δ -生育酚三烯酚),其中 γ -生育酚含量最为丰富。在玉米胚芽毛油中, γ -生育酚含量范围约为 267.11~304.80 mg/kg,而经过精炼后 γ -生育酚的含量范围降至 17.58~27.33 mg/kg;此外,精炼玉米胚芽油的总生育酚含量与总生育三烯酚含量均低于毛油,这表明油脂精炼会导致其生育酚含量大量脱除,从而造成玉米胚芽油脂营养损失。与此同时,在精炼过程中大部分 SHS 样品中生育酚含量低于未处理样品,特别是 γ -生育酚,这可能是由于 SHS 预处理过程中高温导致的热降解^[156]。因此,优化 SHS 预处理工艺及适度精炼技术仍需进一步研究,以减少营养成分损失并提升油脂品质。

表 4-3 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油生育酚含量的影响

Table 4-3 Effect of SHS pretreatment on tocopherol content in refined corn germ oil

样品	处理条件	α -生育酚 (mg/kg)	β -生育酚 (mg/kg)	γ -生育酚 (mg/kg)	δ -生育酚 (mg/kg)	α -生育三烯酚 (mg/kg)	β -生育三烯酚 (mg/kg)	γ -生育三烯酚 (mg/kg)	δ -生育三烯酚 (mg/kg)
毛油	未处理	39.20±1.03 ^{ab}	5.08±0.06 ^c	304.08±11.51 ^a	22.00±0.31 ^a	2.51±0.85 ^a	13.47±5.21 ^{ab}	5.50±0.48 ^a	8.77±11.95 ^a
	180 °C-210 s	41.46±1.94 ^{ab}	5.28±0.46 ^{bc}	267.11±10.06 ^b	22.51±1.31 ^a	6.41±4.30 ^a	9.67±1.56 ^{abc}	8.40±4.51 ^a	1.27±1.61 ^a
脱胶油	未处理	36.56±0.68 ^c	5.04±0.05 ^{ab}	298.21±0.81 ^a	21.40±0.68 ^{ab}	5.66±4.60 ^a	15.57±1.3 ^a	7.10±2.66 ^a	1.42±1.06 ^a
	180 °C-210 s	38.81±0.92 ^{bc}	4.94±0.31 ^a	265.89±3.79 ^b	21.88±1.22 ^{ab}	4.55±1.76 ^a	11.95±2.44 ^{abc}	5.72±1.51 ^a	0.96±1.06 ^a
脱酸油	未处理	24.94±0.07 ^d	5.45±0.07 ^{bc}	278.64±0.79 ^b	21.41±0.32 ^{ab}	3.99±2.98 ^a	10.21±1.06 ^{abc}	6.70±2.09 ^a	1.09±1.12 ^a
	180 °C-210 s	22.95±1.26 ^d	4.71±0.59 ^{ab}	241.26±5.73 ^c	19.66±1.62 ^b	3.00±1.53 ^a	11.69±6.88 ^{abc}	5.67±0.93 ^a	0.92±0.07 ^a
脱色油	未处理	12.09±0.02 ^f	5.49±0.05 ^{bc}	27.33±0.17 ^d	14.34±0.20 ^c	6.52±6.31 ^a	4.30±0.17 ^c	5.48±0.91 ^a	0.67±0.47 ^a
	180 °C-210 s	7.67±0.11 ^e	5.94±0.16 ^{abc}	17.58±0.17 ^d	12.03±0.20 ^d	2.31±3.19 ^a	5.14±2.72 ^{bc}	4.32±1.76 ^a	0.87±0.84 ^a

注：同一列中不同上标字母的值存在显著差异 ($P < 0.05$)。

4.4.8 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油 β -胡萝卜素的影响

在油脂的吸附脱色过程中，叶绿素、微量皂脚以及微量金属离子等成分通常会被脱除，但同时类胡萝卜素等有益营养成分也可能被部分去除，其中 β -胡萝卜素是植物油中常见的类胡萝卜素之一。图 4-9 展示了 180 °C、120 s SHS 预处理对玉米胚芽油精炼后成品油中 β -胡萝卜素含量的影响。

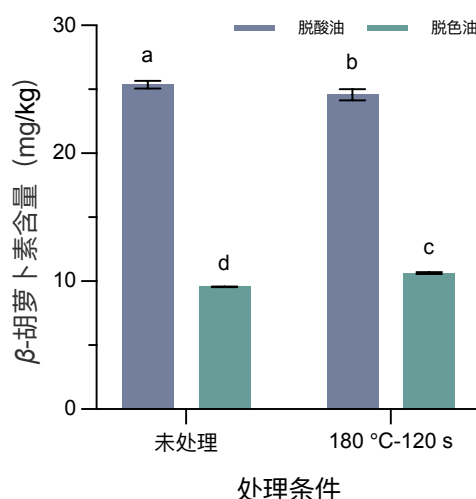


图 4-9 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油 β -胡萝卜素含量的影响

Fig. 4-9 Effect of SHS pretreatment on β -carotene content of refined corn germ oil

从图中可以看出，未处理样品在脱色步骤前后， β -胡萝卜素含量从 25.36 ± 0.30 mg/kg 显著下降至 9.56 ± 0.02 mg/kg ($P < 0.05$)；而 SHS 预处理样品的 β -胡萝卜素含量从 24.58 ± 0.44 mg/kg 降至 10.63 ± 0.08 mg/kg。通过计算可知，未处理样品的 β -胡萝卜素脱除率为 62.30%，显著高于 SHS 预处理样品的 56.74%。这一结果表明，180 °C、120 s 条件下的 SHS 预处理能够更有效地保存精炼玉米胚芽油中的 β -胡萝卜素这一微量营养素。

4.4.9 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油抗氧化活性的影响

图 4-10 展示了 180 °C、120 s SHS 预处理对精炼玉米胚芽油 DPPH 自由基清除能力的影响。从图中可以观察到未处理成品油的 DPPH 自由基清除能力显著低于 SHS 预处理成品油，其值分别为 24.67 ± 2.21 μ mol TE/100 g 和 34.45 ± 1.81 μ mol TE/100 g。油脂的抗氧化能力与其内源性抗氧化物质含量密切相关^[157]。此外，第一章的研究结果表明，酚类化合物可能在 SHS 预处理油样的抗氧化特性中起关键作用。因此，SHS 预处理可能最大程度地保留了油脂中原有的酚类物质，这些物质在后续的精炼过程中发挥了显著的抗氧化活性，进而使 SHS 预处理油

样在精炼后仍能保持较高的抗氧化能力 ($P < 0.05$)。综上所述, 180 °C、120 s 条件下的 SHS 预处理有助于提高精炼油脂的抗氧化活性, 进而增强其氧化稳定性。

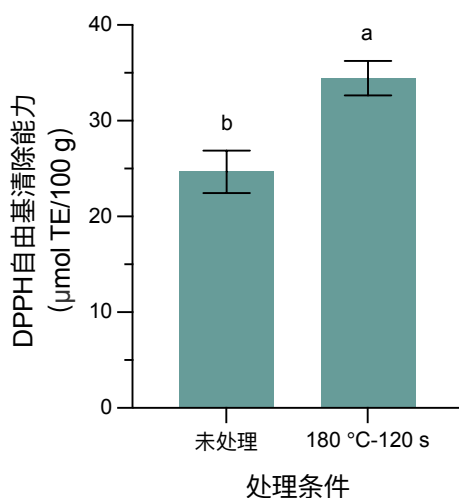


图 4-10 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig. 4-10 Effect of SHS pretreatment on DPPH radical scavenging ability of refined corn germ oil

4.4.10 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油色泽稳定性的影响

油脂的回色现象在自然储存条件下通常是一个缓慢的过程。为了加速这一过程并快速评估油脂的色泽稳定性, 常采用烘箱加速氧化法进行模拟实验。在油脂行业中, 多使用罗维朋色度仪测定植物油色泽, 根据行业标准, 如当罗维朋色泽 R 变化量 (ΔR) ≤ 0.3 且色泽呈现“浅黄色”时, 可判定该油脂的色泽较为稳定 [131]。

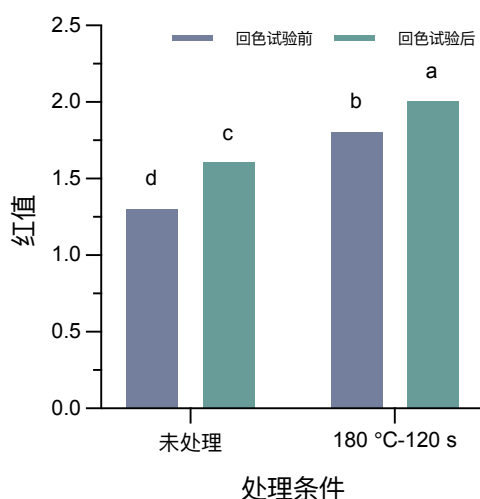


图 4-11 SHS 预处理对精炼玉米胚芽油色泽稳定性的影响

Fig. 4-11 Effect of SHS pretreatment on color stability of refined corn germ oil

如图 4-11 所示, 实验结果表明, 未处理成品油的 ΔR 为 0.3, 而 SHS 预处理

成品油的 ΔR 为 0.2，两者均未超过 $\Delta R \leq 0.3$ 的判定标准，说明这两种成品油的色泽均较为稳定。然而，SHS 预处理成品油的 ΔR 较未处理油样低 0.1，表明其色泽稳定性优于未处理油样。这一差异可能与 SHS 预处理样品的抗氧化活性增强有关，如第一章和本章 4.4.9 中的结果（图 4-10）所示，SHS 预处理样品可能含有更多抗氧化物质（如酚类化合物），这些物质在氧化过程中能够抑制脂质氧化，从而减少脂质色泽变化。因此，SHS 预处理成品油的色泽稳定性更优。

综上所述，180 °C、120 s 的 SHS 预处理有助于提高精炼玉米胚芽油的色泽稳定性。尽管未处理油样与 SHS 预处理油样的 ΔR 仅相差 0.1，但在高品质油脂的生产与储存中，这一差异仍需引起重视，因为它可能对油脂的感官品质和货架期产生重要影响。

4.5 本章小结

本章节通过对玉米胚芽进行 180 °C、120 s 的 SHS 预处理的基础上，再进行油脂精炼与油脂回色试验，以研究 SHS 预处理对玉米胚芽毛油精炼加工的影响。主要结论如下：

（1）在 180 °C、120 s 条件下进行 SHS 预处理，显著提高了油脂精炼加工中的脱酸效率，从而进一步提升油脂精炼的整体效率；

（2）SHS 预处理有效降低了精炼玉米胚芽油的 PV，缓解了其在精炼过程中因脂质氧化导致的劣变现象；

（3）该预处理条件有利于精炼玉米胚芽油更好地保留 β -胡萝卜素，从而维持其营养价值；

（4）经过 180 °C、120 s SHS 预处理后精炼得到的成品油，其 DPPH 自由基清除能力显著优于未处理成品油，表明该预处理条件能够有效提高精炼油脂的抗氧化活性；

（5）SHS 预处理显著改善了精炼玉米胚芽油的色泽稳定性，使其在加工、储存和使用过程中能够更好地保持色泽。

第5章 结论与展望

5.1 结论

本研究系统探讨了 SHS 预处理对玉米胚芽及其毛油品质、储藏品质以及精炼加工的影响,通过多维度实验和综合分析,得出以下主要结论:

(1) 系统探讨了 SHS 预处理对玉米胚芽及其毛油品质的影响。SHS 预处理显著改善了玉米胚芽的加工特性,降低了含水量(2.60%~44.59%),改变了微观结构,促进油体的破裂和聚集,最终提高了出油率(2.81%~26.93%),并改善了其色泽。同时,SHS 预处理显著降低了玉米胚芽毛油的 R 值、AV、PV、*p*-AV、 K_{232} 和 K_{270} 等理化指标($P < 0.05$),有效提升了其品质及氧化稳定性。尽管生育酚、植物甾醇和 β -胡萝卜素等微量脂肪伴随物在预处理后其含量有所降低,但总酚含量和氧化稳定性显著增强($P < 0.05$)。TPC 与 OSI 值呈正相关,分别提高了 9.99%~159.06%和 0.60%~17.76%。通过相关性分析和 PCA 筛选出 150 °C-60 s、180 °C-120 s、210 °C-120 s 为较适宜的 SHS 预处理条件,对提升玉米胚芽毛油品质和延长货架期具有重要意义。

(2) 研究了 SHS 预处理对玉米胚芽储藏品质的影响。由 25±3 °C、75±3% 相对湿度的条件下,进行为期 8 周的储藏实验,结果表明,180 °C-120 s 的 SHS 预处理显著抑制了玉米胚芽内部脂质的氧化酸败,各项理化指标(AV、PV、*p*-AV、 K_{232} 、 K_{270} 、TV)均显著低于未处理样品($P < 0.05$)。此外,该预处理条件最大限度地保留了总酚、生育酚(α -生育酚保留量为 5.29±0.01 mg/100 g)和 β -胡萝卜素(保留量为 24.37~24.55 mg/kg)等微量脂肪伴随物,并显著提升了 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力($P < 0.05$),分别保持在 122.04~186.74 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ 和 152.62~206.11 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ 范围内。本章进一步表明,SHS 预处理可显著提升玉米胚芽的储藏品质($P < 0.05$),尤其在 180 °C、120 s 的条件下对玉米胚芽的效果更佳。

(3) 探究了 SHS 预处理对玉米胚芽毛油精炼加工的影响。玉米胚芽在经过 180 °C-120 s SHS 预处理后,所提取毛油在精炼(脱胶、脱酸与脱色)过程虽并

未提高脱胶效率，但显著提高了脱酸效率 ($P < 0.05$)，降低了 PV，缓解了精炼玉米胚芽油的脂质氧化劣变。该预处理条件更好地保留了 β -胡萝卜素，维持油脂的营养价值。此外，预处理后的成品油 DPPH 自由基清除能力显著优于未处理成品油 ($P < 0.05$)，提升了其抗氧化活性。SHS 预处理还显著改善了精炼玉米胚芽油的色泽稳定性，使其在后期的深加工应用中能够更好地保持色泽。

5.2 展望

基于当前研究结果，未来仍有以下几个方面值得进一步探索和优化：

(1) 本研究由于实验原料新鲜度的限制，未能系统研究 SHS 预处理对玉米胚芽 LA、LOX、POD 等关键酶活性的影响，后续可将新鲜玉米胚芽作为实验原料，进而深入探讨 SHS 预处理与玉米胚芽酶活性的关系；

(2) 本研究仅将 SHS 预处理对玉米胚芽油总酚含量的影响进行了探讨，还需进一步探讨 SHS 预处理对单个酚类化合物的影响，以更全面地揭示其在油脂氧化稳定性的作用机制；

(3) 虽然 SHS 预处理显著提升了油脂的抗氧化活性，但仍存在 SHS 预处理导致生育酚、植物甾醇和 β -胡萝卜素等微量脂肪伴随物的损失问题，未来研究可探索如何提升在 SHS 预处理过程中的营养组分保留率；

(4) 在本研究中 SHS 预处理对玉米胚芽毛油在脱胶和脱色方面的效果并不理想，后续仍需进一步优化实验方法和参数，对玉米胚芽毛油精炼加工的影响进行深入研究；

(5) 本研究处于实验室阶段，未来仍需进一步探讨 SHS 预处理技术在工业化生产中的可行性和经济性。通过成本效益分析，评估其在规模化生产中的应用潜力。

5.3 创新点

(1) 发现了 SHS 预处理技术可提升玉米胚芽的氧化稳定性及玉米胚芽毛油品质；

(2) 通过储藏实验，发现 SHS 预处理 (180 °C-120 s) 提升了玉米胚芽的储藏品质；

(3) 发现 SHS 预处理 (180 °C-120 s) 可提高玉米胚芽毛油在油脂精炼过程中的脱酸效率，提高了精炼玉米胚芽油的氧化稳定性，改善了其色泽稳定性。

攻读硕士学位期间学术论文发表情况

- [1] Zheng, L. Y., **Zhu, M. M.**, Zhang, F., Jin, J., Jin Q. Z., Guo H. Y.* Activity and characterization of tocopherol oxidase in corn germs and its relationship with oil color reversion[J]. *Molecules*, 2023, 28(6), 2659. 中科院 2 区 (本人第二作者; 导师第一);
- [2] **朱淼淼**, 刘 园, 牛佳钰, 张茹茹, 于 淼, 解梦汐, 谢亮亮, 郭红艳, 张 涛, 郑立友. 过热蒸汽预处理技术在油脂加工中的研究进展[J]. *食品科学*, 2025, 46(9): 337-350. **EI (第一作者)**;
- [3] Zheng, L. Y. [†], Guo, H. Y. [†], **Zhu, M. M.**, Korma, S. A., Jin, J.* , Jin Q. Z., Wang, X. G., Cacciotti, I. Intrinsic properties and extrinsic factors of food matrix system affecting the effectiveness of essential oils in foods: A comprehensive review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(21): 7363-7396. 中科院 1 区 (本人第三作者; 导师第一);
- [4] 钟 雯, 王 政, 韩林娜, 高代玉, **朱淼淼**, 贾惠婷, 谢亮亮, 谢 丹, 郭红艳, 郑立友*. 合子草化学成分及生物活性的研究进展[J]. *农产品加工*, 2024, (21): 1-7+14. **(第五作者)**
- [5] **朱淼淼**, 郭红艳, 谢丹, 谢亮亮, 张涛, 郑立友. 过热蒸汽预处理技术在油脂加工中的研究进展[R]. 重庆: 中国粮油学会油脂分会, 2024. **(第一作者)**;
- [6] 一种控制玉米胚芽油回色的方法[发明]. (申请号: 202410477254.6, 实审阶段, 申请日: 2024 年 06 月 21 日, **本人第三完成人; 导师第一**)

参考文献

- [1] GWIRTZ J A, GARCIA-CASAL M N. Processing maize flour and corn meal food products [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2014, 1312(1): 66-75.
- [2] 王瑞元. 2022 年我国粮油产销和进出口情况 [J]. *中国油脂*, 2023, 48(6): 1-7.
- [3] 连小燕. 玉米胚芽资源的深度利用工艺研究 [D]. 华南理工大学, 2012.
- [4] 张雅娜, 张晟, 周媛媛, 等. 水酶法提取玉米胚芽油的研究进展 [J]. *食品工业*, 2022, 43(8): 253-256.
- [5] 王旭, 赵月, 李婷婷, 等. 天然抗氧化剂对玉米油稳定性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 7-12.
- [6] 冯梦迪. 玉米胚芽储藏稳定性的研究及其调控 [D]. 河南工业大学, 2021.
- [7] 李慧玲, 管骁, 孟祥昕, 等. 玉米油中主要真菌毒素去除方法研究进展 [J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(2): 226-234.
- [8] 马梦恬, 王明辉, 鲁佩杰, 等. 谷物胚芽营养组分与加工技术研究进展 [J]. *中国油脂*, 2023, 48(6): 114-118.
- [9] 朱家彬, 李研财, 苏彩虹, 等. 油料预处理对油脂品质影响的研究进展 [J]. *中国油脂*, 2023, 48(10): 16-24.
- [10] 郝明飞, 徐勇将, 刘元法, 等. 植物油料热预处理方式对油脂品质影响的研究进展 [J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(5): 93-100.
- [11] FANG J J, LIU C X, LAW C L, et al. Superheated steam processing: An emerging technology to improve food quality and safety [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 63(27): 8720-8736.
- [12] CHEN F C, XU B, CUI W Y, et al. Effects of microwave treatment on vegetable oil quality & biological activities [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 153: 104748.

- [13] CAI Z Z, LI K Y, LEE W J, et al. Recent progress in the thermal treatment of oilseeds and oil oxidative stability: A review [J]. *Fundamental Research*, 2021, 1(6): 767-784.
- [14] BRÜHL L. Fatty acid alterations in oils and fats during heating and frying* [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2014, 116(6): 707-715.
- [15] 包含, 陈鹏泉, 朱文学, 等. 油料作物热风干燥特性及湿热传递机理研究进展 [J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(3): 462-473.
- [16] 王伟玲, 钟昔阳, 潘燕, 等. 干热处理对小麦粉热力学特性与面团流变学性质影响 [J]. *食品科技*, 2020, 45(5): 134-142.
- [17] 贾泽宇, 卞科, 刘远晓, 等. 热处理对小麦粉品质特性影响的研究进展 [J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(06): 169-178.
- [18] NEILL G, AL-MUHTASEB A A H, MAGEE T R A. Optimisation of time/temperature treatment, for heat treated soft wheat flour [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(3): 422-426.
- [19] 陈楚滢. 紫苏籽微波预处理及美拉德反应产物对其油脂氧化稳定性的影响 [D]; 江南大学, 2023.
- [20] 王芳婷. 微波稳定化对全麦粉品质的影响 [D]. 河南工业大学, 2016.
- [21] CICCORITTI R, TADDEI F, GAZZA L, et al. Influence of kernel thermal pre-treatments on 5-n-alkylresorcinols, polyphenols and antioxidant activity of durum and einkorn wheat [J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(2): 353-362.
- [22] 胡迪. 过热蒸汽对米糠营养、理化与储藏性质的影响 [D]. 南昌大学, 2018.
- [23] 张兰月, 李文浩, 罗勤贵, 等. 红外烘烤处理对小麦胚贮藏稳定性的影响 [J]. *食品科学*, 2013, 34(16): 321-325.
- [24] ISMAILOGLU S O, BASMAN A. Physicochemical properties of infrared heat-moisture treated wheat starch [J]. *Starch - Stärke*, 2016, 68(1-2): 67-75.
- [25] ALFY A, KIRAN B V, JEEVITHA G C, et al. Recent developments in superheated steam processing of foods-A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(13): 2191-2208.
- [26] LIU Y X, LI M M, JIANG D, et al. Superheated steam processing of cereals and

- cereal products: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(2): 1360-1386.
- [27] 魏思凡, 朱堃华, 皮东楷, 等. 过热蒸汽技术在食品加工中的应用研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 335-344.
- [28] WANG H R, WANG L J, WANG L B, et al. Quality improvement of grounded peanut using superheated steam treatment by the inhibition of microorganisms, lipase, and aflatoxin [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(9): e16517.
- [29] IDRUS N F M, ZZAMAN W, YANG T A, et al. Effect of superheated-steam roasting on physicochemical properties of peanut (*Arachis hypogaea*) oil [J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(4): 911-920.
- [30] IDRUS N F M, YANG T A. Comparison between roasting by superheated steam and by convection on changes in colour, texture and microstructure of peanut (*Arachis hypogaea*) [J]. Food Science and Technology Research, 2012, 18(4): 515-524.
- [31] CHONG W K, MAH S Y, EASA A M, et al. Thermal inactivation of lipoxygenase in soya bean using superheated steam to produce low beany flavour soya milk [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(9): 4371-4379.
- [32] 戴嘉晖, 茅林春, 季文革. 过热蒸汽对山茶籽除菌抑酶及保鲜作用研究 [J]. 粮食与油脂, 2023, 36(10): 92-95.
- [33] WANG M, ZOU Q, ZHANG Y C, et al. Effects of superheated steam pretreatment on phenolics and its antioxidant activity in camellia oleifera oil [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 185: 115028.
- [34] LEE K Y, RAHMAN M S, KIM A N, et al. Effect of superheated steam treatment on yield, physicochemical properties and volatile profiles of perilla seed oil [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110240.
- [35] LING S K, ZZAMAN W, ROSIDI M A, et al. Influence of superheated steam roasting at different temperatures and times on the color changes and fats quality of the sesame seeds and its oils [J]. International Food Research Journal 2018,

- 25(6): 2399-2407.
- [36] ZZAMAN W, BHAT R, YANG T A, et al. Influences of superheated steam roasting on changes in sugar, amino acid and flavour active components of cocoa bean (*Theobroma cacao*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(13): 4429-4437.
- [37] HAUSBRAND E. Drying by means of air and steam [J]. Kemia-Kemi, 1924, 17: 942.
- [38] 柳志玲, 卞科, 关二旗, 等. 过热蒸汽处理面筋蛋白对面团流变学特性及面包品质的影响 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2022, 43(2): 48-55.
- [39] LIU Y X, LI M M, BIAN K, et al. Reduction of deoxynivalenol in wheat with superheated steam and Its effects on wheat quality [J]. Toxins (Basel), 2019, 11(7): 414.
- [40] CENKOWSKI S, PRONYK C, ZMIDZINSKA D, et al. Decontamination of food products with superheated steam [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 68-75.
- [41] 柳志玲. 过热蒸汽对小麦面筋蛋白改性效果研究 [D]. 河南工业大学, 2022.
- [42] SEHRAWAT R, NEMA P K, KAUR B P. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 285-301.
- [43] 马怡光, 张绪坤, 余蓉, 等. 食品低压过热蒸汽干燥技术 [J]. 食品科技, 2012, 37(11): 94-97.
- [44] 刘胜平, 曾恩, 吴青荣, 等. 果蔬低压过热蒸汽干燥研究进展 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(10): 204-207.
- [45] 陈蒙, 辛文才, 陈屹林, 等. 低压过热蒸汽干燥研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 378-382.
- [46] ADAMSKI R, SIUTA D, KUKFISZ B, et al. Influence of process parameters in superheated steam drying on fire and explosion parameters of woody biomass [J]. Fuel Processing Technology, 2021, 211: 106597.

- [47] HARIVAINDARAN K V, N.H.TIÊN, T.N.S.ĐINH, et al. The effects of superheated steam roasting on proximate analysis, antioxidant activity, and oil quality of black seed (*Nigella sativa*) [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(11): 7296-7310.
- [48] BARI M L, NEI D, SOTOME I, et al. Effectiveness of superheated steam and gas catalytic infrared heat treatments to inactivate *Salmonella* on raw almonds [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2010, 7(7): 845-850.
- [49] PARK H W, XU J, BALASUBRAMANIAM V M, et al. The effect of water activity and temperature on the inactivation of *Enterococcus faecium* in peanut butter during superheated steam sanitation treatment [J]. Food Control, 2021, 125: 107942.
- [50] 刘海波, 李萌萌, 关二旗, 等. 过热蒸汽处理对赤霉病小麦麸皮中脱氧雪腐镰刀菌烯醇降解效果研究 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(12): 43-47.
- [51] 张楠, 葛鑫会, 石琳, 等. 小麦胚芽的过热蒸汽稳定化工艺研究 [J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 129-132;158.
- [52] ZZAMAN W, YANG T A. Effect of superheated steam and convection roasting on changes in physical properties of cocoa bean (*Theobroma cacao*) [J]. Food Science and Technology Research, 2013, 19(2): 181-186.
- [53] ZZAMAN W, YANG T A. Moisture, color and texture changes in cocoa beans during superheated steam roasting [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2013, 38(3): 1364-1370.
- [54] ZZAMAN W, BHAT R, YANG T A. Application of response surface methodology to optimize roasting conditions in cocoa beans subjected to superheated steam treatments in relevance to antioxidant compounds and activities [J]. Drying Technology, 2014, 32(9): 1104-1111.
- [55] CAO X H, ISLAM M N, NING X, et al. Effects of superheated steam processing on the physicochemical properties of sea rice bran [J]. Food Science and Technology International, 2023, 29(2): 115-125.
- [56] HU Y M, WANG L J, LI Z G. Superheated steam treatment on wheat bran: Enzymes inactivation and nutritional attributes retention [J]. LWT-Food Science

- p and Technology, 2018, 91: 446-452.
- [57] 罗舜菁, 胡迪, 黄克愁, 等. 过热蒸汽处理对米糠营养性质和储藏稳定性的影响 [J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 213-221.
- [58] 叶国栋, 汪丽萍, 沈汪洋, 等. 过热蒸汽处理对麸皮酚类物质及抗氧化活性的影响 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(09): 3598-3605.
- [59] TENYANG N, PONKA R, TIENCHEU B, et al. Effect of boiling and oven roasting on some physicochemical properties of sunflower seeds produced in Far North, Cameroon [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(2): 402-411.
- [60] CHEEVITSOPON E, NOOMHORM A. Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(4): 349-356.
- [61] FEILLET P, AUTRAN J-C, ICARD-VERNIÈRE C. Pasta brownness: An assessment [J]. Journal of Cereal Science, 2000, 32(3): 215-233.
- [62] PRONYK C, CENKOWSKI S, MUIR W E, et al. Effects of superheated steam processing on the textural and physical properties of asian noodles [J]. Drying Technology, 2008, 26(2): 192-203.
- [63] ALTOSAAR G M A U M S I. Lipase activity in oat flour suspensions and soluble extracts [J]. Cereal Chemistry, 1982, 59: 418-422.
- [64] 陈晨, 敬璞, 王绣珊, 等. 米糠酸败机制及其稳定化研究进展 [J]. 食品科学, 2024, 45(13): 335-344.
- [65] H. P. Plant Lipoxygenases. Physiological and molecular features [J]. Plant Physiology, 2002, 130(1): 15-21.
- [66] 胡月明. 过热蒸汽处理对小麦及小麦粉品质的影响研究 [D]. 中国农业大学, 2018.
- [67] PRACHAYAWARAKORN S, PRACHAYAWASIN P, SOPONRONNARIT S. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers [J]. LWT - Food Science and Technology, 2006, 39(7): 770-778.
- [68] 邓家汶. 过热蒸汽处理对青稞制品品质的影响 [D]. 河南工业大学, 2020.
- [69] 何婷. 坚果及籽类食品中沙门氏菌检测的质量控制与改进研究 [J]. 中国

- 食品工业, 2024, 1: 66-68.
- [70] BAN C, LEE D H, JO Y, et al. Use of superheated steam to inactivate salmonella enterica serovars typhimurium and enteritidis contamination on black peppercorns, pecans, and almonds [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 222: 284-291.
- [71] 张春娥, 廖若宇, 刘新保, 等. 呕吐毒素污染对小麦质量安全和品质指标及利用价值的影响 [J]. 食品科学, 2024, 45(3): 211-216.
- [72] 郑立友. 生育红的合成、化学稳定性及其与油脂回色的相关性研究 [D]. 江南大学, 2020.
- [73] LEE K Y, RAHMAN M S, KIM A N, et al. Effect of freeze-thaw pretreatment on yield and quality of perilla seed oil [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 122: 109026.
- [74] AMATSUBO T, HAGURA Y, SUZUKI K. The effect of superheated steam treatment on the quality of vegetable oils [J]. Food Science And Technology Research, 2006, 12(2): 114-118.
- [75] ZHAO T T, HONG S I, LEE J, et al. Impact of roasting on the chemical composition and oxidative stability of perilla oil [J]. Journal of Food Science, 2012, 77(12): C1273-1278.
- [76] RAO Y L, XIANG B R, ZHOU X H, et al. Quantitative and qualitative determination of acid value of peanut oil using near-infrared spectrometry [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(2): 249-252.
- [77] YOSHIDA H, TAKAGI S, MITSUHASHI S. Tocopherol distribution and oxidative stability of oils prepared from the hypocotyl of soybeans roasted in a microwave oven [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1999, 76(8): 915-920.
- [78] 李康宁, 张雪怡, 常明, 等. 澳洲坚果油储藏期间氧化稳定性的研究 [J]. 中国粮油学报, 2024, 39(3): 133-140.
- [79] 戚颖欣, 刘赫冰. 不同制油工艺亚麻籽油的储藏性能研究 [J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 16-20.
- [80] HUANG J H, CHEN C Y, SONG Z H, et al. Effect of microwave pretreatment

- of perilla seeds on minor bioactive components content and oxidative stability of oil [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 133010.
- [81] MEGAHED M G. Microwave roasting of peanuts: Effects on oil characteristics and composition [J]. Nahrung/Food, 2001, 45(4): 255-257.
- [82] YOSHIDA H, ABE S, HIRAKAWA Y, et al. Roasting effects on fatty acid distributions of triacylglycerols and phospholipids in sesame (*Sesamum indicum*) seeds [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001, 81(7): 620-626.
- [83] 罗贤飞. 烘焙条件对油茶籽油抗氧化能力和风味物质的影响研究 [D]. 中南林业科技大学, 2023.
- [84] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Influence of microwave roasting on chemical composition, oxidative stability and fatty acid composition of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil [J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126974.
- [85] 孙洋, 任健, 宋春丽, 等. 制油工艺对玉米胚芽油品质特性及风味成分的作用机制 [J]. 食品科学, 2024, 45(18): 183-189.
- [86] KALUA C M, ALLEN M S, BEDGOOD D R, et al. Olive oil volatile compounds, flavour development and quality: A critical review [J]. Food Chemistry, 2007, 100(1): 273-286.
- [87] ROJAS M, HOMMES A, HEERES H J, et al. Physicochemical phenomena in the roasting of cocoa (*Theobroma cacao* L.) [J]. Food Engineering Reviews, 2022, 14(3): 509-533.
- [88] ZHENG L Y, JIN J, SHI L K, et al. Gamma tocopherol, its dimmers, and quinones: Past and future trends [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(22): 3916-3930.
- [89] 杨海余, 龚文芳, 崔坤鹏, 等. 油茶籽油品质性状研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2024, 39(8): 210-223.
- [90] 欧凯玉, 逢建龙, 张一敏, 等. 天然酚类化合物的抑菌作用及在肉与肉制品中的应用研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(9): 358-366.
- [91] SIGER A, NOGALA-KALUCKA M, LAMPART-SZCZAPA E. The content and antioxidant activity of phenolic compounds in cold-pressed plant oils [J]. Journal of Food Lipids, 2008, 15(2): 137-149.

- [92] 邹波, 钟思彦, 林锦波, 等. 黄皮中黄酮类化合物的结构及生物活性研究进展 [J]. 中国果菜, 2024, 44(2): 47-53.
- [93] RATTANARAT P, CHINDAPAN N, DEVAHASTIN S. Comparative evaluation of acrylamide and polycyclic aromatic hydrocarbons contents in Robusta coffee beans roasted by hot air and superheated steam [J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128266.
- [94] ALAFEEF A K, ARIFFIN F, ZULKURNAIN M. Organic selenium as antioxidant additive in mitigating acrylamide in coffee beans roasted via conventional and superheated steam [J]. Foods, 2020, 9(9): 1197.
- [95] 王玫. 轻度精炼加工对油茶籽油品质和热稳定性的影响研究 [D]. 南昌大学, 2022.
- [96] DIJKSTRA A J. About water degumming and the hydration of non-hydratable phosphatides [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(9): 1600496.
- [97] 陈晓中. 芝麻油回色及其防控措施研究 [D]. 河南工业大学, 2024.
- [98] 王丽娟. 油脂制备过程对油脂色泽的影响及应对措施[J]. 中国油脂, 2004.29(5):29-30.
- [99] KILINÇÇEKER G, SANGÜN M K, ÇELİK S, et al. Evaluation of reusability of bleaching earth in vegetable oil refining [J]. Pigment & Resin Technology, 2020, 49(5): 393-399.
- [100] W Z. Bleaching of edible fats and oils [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2001, 103(8): 501-551.
- [101] SHAHIDI F. Bailey's industrial oil and fat products [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2020.
- [102] ZHENG L Y, JIN J, HUANG J H, et al. Effects of heat pretreatment of wet-milled corn germ on the physicochemical properties of oil [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2018, 55(8): 3154-3162.
- [103] SRUTHI N U, PREMJI Y, PANDISELVAM R, et al. An overview of conventional and emerging techniques of roasting: Effect on food bioactive signatures [J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129088.

- [104] LIU Q, GUO X N, ZHU K X. Effects of frozen storage on the quality characteristics of frozen cooked noodles [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 522-529.
- [105] WANG J D, LIU Z M, ZHENG Y R, et al. Synergistic effects of microcrystalline cellulose and xanthan gum on the stability of milk fat-based UHT whipping cream [J]. LWT - Food Science and Technology, 2023, 184.
- [106] 师萱, 陈娅, 符宜谊, 等. 色差计在食品品质检测中的应用 [J]. 食品工业科技, 2009, 30(5): 373-375.
- [107] 庞文倩, 刘春菊, 李大婧, 等. 热压加工过程中紫玉米花色苷的热降解动力学及色泽变化 [J]. 江苏农业学报, 2023, 39(7): 1583-1592.
- [108] 王俏君. 煎炸过程甘油酯核心醛的变化规律及其影响因素 [D]. 江南大学, 2019.
- [109] RIZVI N B, FATIMA A, BUSQUETS R, et al. Effect of the media in the folin-ciocalteu assay for the analysis of the total phenolic content of olive products [J]. Food Analytical Methods, 2023, 16(11-12): 1627-1634.
- [110] KELEBEK H, SELLI S, KOLA O. Quantitative determination of phenolic compounds using LC-DAD-ESI-MS/MS in cv. Ayvalik olive oils as affected by harvest time [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2016, 11(1): 226-235.
- [111] WANG M, ZHANG Y C, WAN Y, et al. Effect of pretreatments of camellia seeds on the quality, phenolic profile, and antioxidant capacity of camellia oil [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1023711.
- [112] 张飞. 玉米胚芽预处理中生育酚酶促氧化及其与回色关系研究 [D]. 江南大学, 2020.
- [113] DECKER E A, VILLENEUVE P. Impact of processing on the oxidative stability of oil bodies [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(17): 6001-6015.
- [114] ALTAN A, MCCARTHY K L, TIKEKAR R, et al. Image analysis of microstructural changes in almond cotyledon as a result of processing [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(2): E212-221.

- [115] MANIKPURI S, KHETO A, SEHRAWAT R, et al. How superheated steam treatment modifies the physicochemical, functional, nutritional, and anti-nutritional attributes: A case study on guar bean flour [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 88.
- [116] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Impact of infrared and dry air roasting on the oxidative stability, fatty acid composition, maillard reaction products and other chemical properties of black cumin (*Nigella sativa* L.) seed oil [J]. *Food Chemistry*, 2019, 295: 537-547.
- [117] YODKAEW P, CHINDAPAN N, DEVAHASTIN S. Influences of superheated steam roasting and water activity control as oxidation mitigation methods on physicochemical properties, lipid oxidation, and free fatty acids compositions of roasted rice [J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(1): 69-79.
- [118] LIU X R, FU S J, DENG J W, et al. Influence of superheated steam treatment on physicochemical, edible, and storage characteristics of highland barley grains [J]. *Cereal Chemistry*, 2023, 100:936–944.
- [119] YANG Z, ZHOU Y, XING J J, et al. Effect of superheated steam treatment and extrusion on lipid stability of black soybean noodles during storage [J]. *Food Control*, 2022, 132: 9.
- [120] WANG H R, CUI S W, WANG A L, et al. Influence of superheated steam treatment with tempering on lipid oxidation and hydrolysis of highland barley during storage [J]. *Food Control*, 2021, 127: 108133.
- [121] DEMNATI D, PACHECO R, MARTÍNEZ L, et al. Effect of roasting temperature and time on the chemical composition and oxidative stability of argan (*Argania spinosa* L.) oils [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(7): 1700136.
- [122] WAN F C, FENG C F, LUO K Y, et al. Effect of steam explosion on phenolics and antioxidant activity in plants: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 124: 13-24.
- [123] ZOU Y P, GAO Y Y, HE H, et al. Effect of roasting on physico-chemical properties, antioxidant capacity, and oxidative stability of wheat germ oil [J].

- LWT - Food Science and Technology, 2018, 90: 246-253.
- [124] IRAKLI M, KLEISIARIS F, MYGDALIA A, et al. Stabilization of rice bran and its effect on bioactive compounds content, antioxidant activity and storage stability during infrared radiation heating [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 80: 135-142.
- [125] MOHAMED AHMED I A, USLU N, MUSA OZCAN M, et al. Effect of conventional oven roasting treatment on the physicochemical quality attributes of sesame seeds obtained from different locations [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128109.
- [126] SIGER A, KACZMAREK A, RUDZIŃSKA M. Antioxidant activity and phytochemical content of cold-pressed rapeseed oil obtained from roasted seeds [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, 117(8): 1225-1237.
- [127] GAO P, CAO Y, LIU R, et al. Phytochemical content, minor-constituent compositions, and antioxidant capacity of screw-pressed walnut oil obtained from roasted kernels [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2018, 121(1): 1800292.
- [128] MALIĆANIN M, RAC V, ANTIĆ V, et al. Content of antioxidants, antioxidant capacity and oxidative stability of grape seed oil obtained by ultra sound assisted extraction [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2014, 91(6): 989-999.
- [129] EMMANOUILIDOU M G, KOUKOURIKOU-PETRIDOU M, GERASOPOULOS D, et al. Oxidative stability, fatty-acid and phenolic composition of cypriot monovarietal virgin olive oils with progressive fruit maturity [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 104: 104191.
- [130] ZHENG L Y, KARRAR E, XIE L L, et al. High-Purity Tocored Improves the Stability of Stripped Corn Oil Under Accelerated Conditions [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2020, 122(2): 1900307.
- [131] 曾晶. 加工方式对山茶油组分和储藏稳定性的影响研究 [D]. 华南理工大

- 学, 2023.
- [132] 朱巧楠, 王鹏, 杨选, 等. 油茶饼粕抗氧化肽的鉴定及其稳定性 [J]. 中国食品学报, 2024, 24(7): 332-341.
- [133] LUO X, WU S, XUE J, et al. The bioactive peptide screening from *Torreya grandis* meal protein hydrolysates [J]. Food Bioscience, 2021, 44.
- [134] GALLEGO M, MORA L, REIG M, et al. Stability of the potent antioxidant peptide SNAAC identified from Spanish dry-cured ham [J]. Food Research International, 2018, 105: 873-879.
- [135] 张余权. 植物油储存过程中回色机理研究 [D]. 江南大学, 2015.
- [136] 田田. CSLM 参考-基于油体结构稳定性的碧根果仁氧化行为及加工控制研究 [D]; 江南大学, 2023.
- [137] 栾霞, 祖丽亚, 樊铁. 食用油脂中 *p*-茴香胺值的测定 [J]. 中国油脂, 2006, 31(11): 38-40.
- [138] ZOU Z, XI W P, HU Y, et al. Antioxidant activity of Citrus fruits [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 885-896.
- [139] TIMM N D S, RAMOS A H, FERREIRA C D, et al. Influence of germ storage from different corn genotypes on technological properties and fatty acid, tocopherol, and carotenoid profiles of oil [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(6): 1449-1460.
- [140] TALEON V, MUGODE L, CABRERA-SOTO L, et al. Carotenoid retention in biofortified maize using different post-harvest storage and packaging methods [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 60-66.
- [141] 洪莹, 邵子晗, 曹磊, 等. 留胚米贮藏过程中脂质氧化及挥发性物质变化的研究 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 248-255.
- [142] 罗凡, 陈志吉, 蓝丽丽, 等. 加热对油茶籽油及饼粕总酚及其抗氧化能力的影响 [J]. 林业科技, 2020, 56(2): 61-68.
- [143] 王瑞元, 王兴国, 何东平. 食用油精准适度加工理论的发端、实践进程与发展趋势 [J]. 中国油脂, 2019, 44(7): 1-6.
- [144] 金青哲, 金俊, 赵晨伟, 等. 我国植物油料油脂加工技术新进展 [J]. 中国

- 油脂, 2024, 49(6): 1-5.
- [145] 李杉杉, 程倩, 谢亮, 等. 大豆原油酶法脱胶 [J]. 中国油脂, 2022, 47(9): 30-34.
- [146] 刘玉兰, 宋二立, 朱文学, 等. 原油品质和精炼过程对油莎豆油综合品质的影响 [J]. 中国油脂, 2022, 47(7): 9-14.
- [147] 张余权, 徐学兵, 姜元荣, 等. β -胡萝卜素、甾醇、磷脂、生育酚对油脂回色的影响 [J]. 中国油脂, 2015, 40(1): 41-43.
- [148] ALI A H, ZOU X, ABED S M, et al. Natural phospholipids: Occurrence, biosynthesis, separation, identification, and beneficial health aspects [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(2): 253-275.
- [149] GHAZANI S M, MARANGONI A G. Minor components in canola oil and effects of refining on these constituents: A review [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2013, 90(7): 923-932.
- [150] 孙百创, 汤见平, 严中和, 等. 精炼过程对大豆油回色的影响 [J]. 中国油脂, 2021, 46(11): 7-13.
- [151] VAISALI C, CHARANYAA S, BELUR P D, et al. Refining of edible oils: A critical appraisal of current and potential technologies [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 50(1): 13-23.
- [152] 沈柯辰. 接骨木籽油提取精炼工艺优化及其品质研究 [D]. 山东农业大学, 2022.
- [153] JURIC S, JURIC M, KRÓL-KILIŃSKA Ż, et al. Sources, stability, encapsulation and application of natural pigments in foods [J]. Food Reviews International, 2020, 38(8): 1735-1790.
- [154] 张文龙, 黄成义, 赵晨伟, 等. 植物油中的色素及吸附脱色研究进展 [J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 21-28.
- [155] 赵小皖, 刘洵好, 李慧勤, 等. β -胡萝卜素的降解及其对食品体系的影响 [J]. 食品工业科技, 2011, 32(3): 417-421.
- [156] ABRANTE-PASCUAL S, NIEVA-ECHEVARRIA B, GOICOECHEA-OSÉS E. Vegetable oils and their use for frying: A review of their compositional differences and degradation [J]. Foods, 2024, 13(24): 4186.

- [157] 耿树香, 徐田, 李勇杰. 云南主栽核桃和油橄榄 16 个品种油脂体外抗氧化活性研究 [J]. 西部林业科学, 2024, 53(5): 16-23.

致谢

居诸不息，寒暑推移。三载求学时光即将画上句号。当我回首在安工程的求学之旅，承载着我无数的欢笑与汗水，以蕴藏着丰富的知识与成长。纵有万般不舍，但仍心存感激。在这里我既感受到了来自师长、同学、朋友的真挚关怀，也收获了知识的硕果。

厚谊常存魂梦里，深恩永志我心中。求学三年载，幸蒙我的恩师——郑立友老师的悉心指导，您严谨的治学态度、勤勉的工作作风与积极的人生信念，深深影响了我学术与品格的成长。在科研道路上，您始终以精益求精的学术标准引领我前行。从课题方向的选择到论文框架的打磨，从实验设计的推敲到数据结论的凝练，您总能在百忙中抽出时间逐字逐句批阅指导。在为人处世方面，您春风化雨般的教诲同样令我受益匪浅。恩师三载传道授业之恩，学生铭记于心。我也十分感谢郭红艳老师，犹记得数个深夜收到您批注详尽的修改意见，凌晨时分收到您回复的文献建议，您用实际行动诠释了何为“学高为师，身正为范”。您教会我的不仅是专业知识，更是如何以系统性思维剖析问题，以批判性眼光审视结论，这些科研素养将成为我终身受用的财富。同时感谢研究生三年所有的授课老师，正是各位老师们的谆谆教诲，使我在学术上收获颇多，在此表示最真挚的感谢。

感谢我最最最亲爱的家人们，你们永远是我身后最坚定的避风港，你们是个永远无条件支持我的人。你们的爱我会牢记于心，砥砺前行。在未来的时光，换我来做你们的避风港。

感谢一直陪伴在我身边的挚友曦曦、李赞赞、老琳和老程以及远在天南海北的战友们，与你们同频共振的默契，早已超越了言语，也正你们的关心与鼓励，使我一直快乐着、坚持着、努力着学习与生活。感谢我的师姐郭玉峰以及师弟们闵奥、阿德、阿龙、韩国以及王哥，与你们在实验室并肩攻坚的日子令我十分难忘，正是因有你们实验室才会充满欢声笑语。感谢我的室友们梦蝶、雨晴和杰杰，难忘每次桌上给我留的零食、更难忘每个晚归的深夜给我留的夜灯，因你们的包容与关心，108 才是异乡最温暖的港湾。此外，还要感谢我的同学们，有了你们

一路的帮助，让我在学习与生活中感受到了温暖。

道阻且长，行则将至。最后感谢一路走来并且坚持着的自己，作为一个跨专业生，一路的难只有自己知道。未来也要继续向前闯，向前进，但也不会忘记回首来时的路。

山水有来路，早晚复相逢。愿我们此去各有山海，但求不负热爱；纵使前程万里，莫忘少年同游。虽然即将与母校挥手告别，但我将带着这段难忘的记忆与感恩，勇敢迈向新征程。感谢我的母校，感谢一路上所有支持我的人，因你们的陪伴让我更坚定前行的信念。