

玉米油水化脱胶工艺优化及植物甾醇含量变化

闫亚鹏¹, 马传国^{1,2}, 景璐璐¹

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 小麦和玉米深加工国家工程研究中心, 郑州 450001)

摘要:为给玉米油的精准适度精炼工艺研究提供参考,探究兼顾植物甾醇保留的玉米油水化脱胶工艺,以玉米原油为原料,以植物甾醇和磷脂含量为考察指标,采用单因素实验和响应面实验对玉米油水化脱胶条件进行优化。结果表明:最优的水化脱胶条件为脱胶温度 58℃、加水量 4.38%、脱胶时间 55 min,在此条件下脱胶油中的磷脂含量为 0.76 mg/g,脱胶率为 92.95%,植物甾醇含量为 1 239.00 mg/100 g,植物甾醇保留率为 83.35%。

关键词:玉米油;水化脱胶;磷脂含量;植物甾醇含量

中图分类号:TS224.6;TS221 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)09-0026-05

Optimization of hydration degumming process of corn oil and change of phytosterol content

YAN Yapeng¹, MA Chuanguo^{1,2}, JING Lulu¹

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. National Engineering Research Center for Wheat and Corn Further Processing, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to provide a reference for the research of precise and moderate refining of corn oil, the process of hydration degumming of corn oil taking into account the retention of phytosterol was investigated. Taking crude corn oil as raw material, the hydration degumming conditions of corn oil were optimized by single-factor experiment and response surface methodology with phytosterol and phospholipid contents as the indexes. The results showed that the optimal hydration degumming conditions of corn oil based on phytosterol retention were obtained as follows: degumming temperature 58℃, water dosage 4.38% and degumming time 55 min. Under these conditions, the content of phospholipid in degummed oil was 0.76 mg/g and the degummed rate was 92.95%, the content of phytosterol was 1 239.00 mg/100 g, and its retention rate was 83.35%.

Key words: corn oil; hydration degumming; phospholipid content; phytosterol content

植物甾醇是一类以环戊烷多氢菲为骨架,且环上 C3 位连有羟基的化合物。植物甾醇通常以游离甾醇、甾醇酯等形式存在于植物油、坚果、植物种子等植物性食物中。人类主要从植物油中摄取植物甾醇^[1]。美国食品药品监督管理局(FDA)宣布植物甾醇的安全等级为一般认为安全(GRAS)^[2],因此植物甾醇具有较高的安全性。国内外研究表明,植

物甾醇具有显著的降血脂、抗氧化、防癌、抗炎等功效^[3-6]。

研究发现,植物甾醇在油脂水化脱胶过程中会有一定的损失,如:程园园等^[7]对菜籽油、亚麻籽油、花生油、紫苏籽油进行水化脱胶,发现4种油的植物甾醇含量分别减少了185.18、77.83、52.65、62.82 mg/100 g;李亚男等^[8]对燕麦麸油进行水化脱胶,发现植物甾醇含量减少了79.38 mg/100 g。玉米油含有丰富的植物甾醇,其含量高达0.58%~1.5%^[9]。探讨玉米油在水化脱胶过程中植物甾醇含量的变化,减少其损失,对于提高玉米油的营养价值具有重要意义。

收稿日期:2022-03-13;修回日期:2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31972110)

作者简介:闫亚鹏(1997),男,硕士研究生,研究方向为油脂化学与品质(E-mail)1425927543@qq.com。

通信作者:马传国,教授,博士生导师(E-mail)mcg66@163.com。

本研究以玉米原油为原料,通过脱胶温度、加水量、脱胶时间单因素实验探究水化脱胶过程中磷脂和植物甾醇含量的变化,然后通过 Design - Expert 软件中的 Box - Behnken 设计响应面实验综合评判各因素对磷脂和植物甾醇含量的影响,得出基于植物甾醇保留的最优的玉米油水化脱胶工艺,以期为玉米油的精准适度精炼工艺研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

玉米原油,山东某油厂提供。5 α 胆甾烷醇(纯度 $\geq 95\%$)、胆固醇棕榈酸酯(纯度 $\geq 98\%$),美国 Sigma 公司;正己烷(色谱纯),韩国德山药品工业公司;正己烷、乙酸乙酯、乙醚、氢氧化钾、甲醇、盐酸、氧化锌、浓硫酸、钼酸钠、硫酸联氨、磷酸二氢钾均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

SBEQ - CA2155 SPE 氨基固相萃取小柱,上海安普科技有限公司;AYAUY - 220 电子分析天平,日本 SHIMADZU 公司;HH - 4 恒温数显搅拌水浴锅,常州丹瑞实验仪器设备有限公司;OS20 - S LED 数显顶置式电子搅拌器,大龙兴创实验仪器(北京)股份公司;S25 涡旋仪,德国 IKA 公司;Nexis2030 气相色谱仪,日本岛津公司;SHZ - D(III)循环水式真空泵,巩义市予华仪器设备有限公司;TG16 - WS 台式高速离心机,长沙高新区湘仪离心机仪器有限公司;T6 紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;SRJX - 4 - 13 马弗炉,北京市永光明仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 水化脱胶

取一定质量玉米原油加热到一定温度后,适当调快搅拌速度,之后缓慢加入一定量(以油质量为基准)同温热水,保持恒定温度搅拌一定时间后,降低搅拌速度,让胶体絮凝,待胶杂与油呈明显分离状

态时,停止搅拌,立即倒入离心筒进行离心分离。将上层净油于 90 $^{\circ}\text{C}$ 真空下进行减压脱水干燥,得脱胶油。

1.2.2 玉米油指标的测定

磷脂含量测定,参照 GB/T 5537—2008;酸值测定,参照 GB 5009.229—2016;过氧化值测定,参照 GB 5009.227—2016;水分含量测定,参照 GB 5009.236—2016。

植物甾醇测定,按照 Esche 等^[10]的方法并稍加修改。称取 30~40 mg 油样(精确至 0.000 1 g)于 10 mL 离心管中,分别加入 100 μL 质量浓度 2 mg/mL 的胆固醇棕榈酸酯、5 α 胆甾烷醇标准溶液,再加入正己烷涡旋,待测样,备用。向 SPE 小柱加入正己烷以活化柱子。再向小柱中加入 1 mL 待测样,加入 10 mL 正己烷 - 乙醚(体积比 98:2)洗脱出组分 A,加入 20 mL 正己烷 - 乙酸乙酯(体积比 96:4)以洗脱干扰组分,加入 10 mL 正己烷 - 乙酸乙酯(体积比 5:95)洗脱出组分 B,将组分 A、B 氮气吹干后,组分 A 皂化处理加入正己烷涡旋取上清,组分 B 直接用正己烷复溶,二者过 0.45 μm 有机滤膜后进气相色谱分析。气相色谱条件:Rtx - 200MS 色谱柱(30 m \times 0.25 mm);进样口温度 280 $^{\circ}\text{C}$;柱温 340 $^{\circ}\text{C}$;升温程序为起始温度 100 $^{\circ}\text{C}$,以 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 上升至 310 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 2 min,再以 1.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 上升至 315 $^{\circ}\text{C}$,最后以 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 上升至 340 $^{\circ}\text{C}$ 并保持 5 min;火焰离子化检测器温度 360 $^{\circ}\text{C}$;氮气流速 25 mL/min,氢气流速 11.2 mL/min;分流比 1:7.5;进样量 1 μL 。采用内标法计算组分 A 加组分 B 的含量,即为植物甾醇含量。

1.2.3 数据分析

实验中每个样品均做两次平行,采用 Excel 和 SPSS 进行数据的计算和分析,实验结果以“平均值 \pm 标准偏差”表示。

2 结果与讨论

2.1 玉米原油基本指标(见表 1)

表 1 玉米原油基本指标

| 磷脂含量/(mg/g) | 酸值(KOH)/(mg/g) | 过氧化值/(mmol/kg) | 水分含量/% | 植物甾醇含量/(mg/100 g) |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| 10.72 \pm 0.29 | 6.38 \pm 0.09 | 1.74 \pm 0.02 | 0.20 \pm 0.01 | 1 486.57 \pm 18.36 |

2.2 水化脱胶工艺单因素实验

2.2.1 脱胶温度对磷脂和植物甾醇含量的影响

在加水量 3%、脱胶时间 40 min 条件下,考察玉米油水化脱胶过程中脱胶温度对磷脂和植物甾醇含量的影响,结果见图 1。

由图 1 可知,当脱胶温度从 40 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 60 $^{\circ}\text{C}$ 时,

玉米油中磷脂含量逐渐下降至 1.45 mg/g,之后随水化脱胶温度的继续升高,玉米油中磷脂含量有一定的上升。这是因为当脱胶温度达到胶杂凝聚临界温度时,胶杂最容易凝聚析出,但胶杂凝聚的过程是可逆的,已凝聚的胶杂在高于凝聚临界温度又会重新分散^[11],致使部分析出的磷脂又重新溶解在玉米油中。

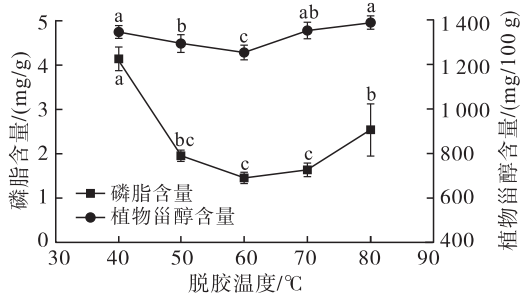


图1 脱胶温度对磷脂和植物甾醇含量的影响

由图1还可以看出,玉米油中植物甾醇含量的变化趋势与磷脂含量的变化趋势相近,但没有磷脂含量的趋势明显。在脱胶温度为60℃时植物甾醇含量下降到最低,为1 253.86 mg/100 g。可能是植物甾醇受胶杂吸附的影响,脱胶产生的胶杂越多,则被胶杂吸附而损失的植物甾醇越多。本文这一研究结果与李俊杰等^[12]的研究结果相符。

2.2.2 加水量对磷脂和植物甾醇含量的影响

在脱胶温度60℃、脱胶时间40 min条件下,考察玉米油水化脱胶过程中加水量对磷脂和植物甾醇含量的影响,结果见图2。

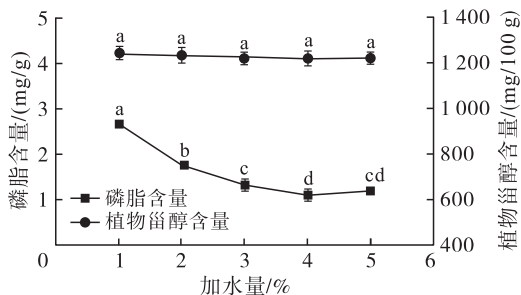


图2 加水量对磷脂和植物甾醇含量的影响

由图2可知,随着加水量的增加,磷脂含量逐渐下降,在加水量为4%时磷脂含量降至最低,为1.11 mg/g,当加水量继续增加到5%时磷脂含量略微上升。水可以润湿磷脂分子,促使胶粒凝聚或絮凝。在脱胶过程中,加入适量的水可以形成稳定的水化混合双分子层结构,胶粒才能絮凝良好^[11];水量不足,磷脂水化不完全,胶粒絮凝不好;水量过多,磷脂作为一种良好的乳化剂有可能发生乳化现象,增加磷脂和油分离的难度^[13]。由图2还可以看出,随着加水量的增加,植物甾醇含量也略微下降,但无显著性差异。可能是因为植物甾醇是极性较小的物质,加水量对其影响较小。

2.2.3 脱胶时间对磷脂和植物甾醇含量的影响

在脱胶温度60℃、加水量4%条件下,考察脱胶时间对玉米油水化脱胶过程中磷脂和植物甾醇含量的影响,结果见图3。

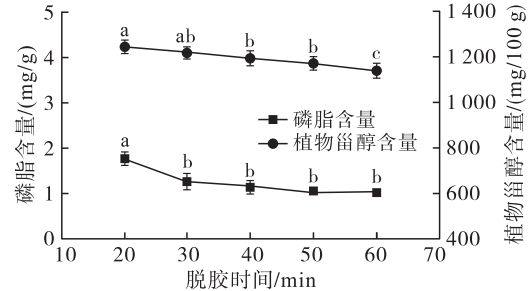


图3 脱胶时间对磷脂和植物甾醇含量的影响

由图3可知,随着脱胶时间从20 min延长至50 min,磷脂含量由1.80 mg/g逐渐降至1.03 mg/g,植物甾醇含量也呈下降趋势。脱胶50 min后,磷脂含量已经趋于稳定;但植物甾醇含量随脱胶时间延长继续下降,在脱胶60 min时降至1 142.49 mg/100 g,推测随着脱胶时间的延长油脂中植物甾醇与胶杂接触时间延长,被吸附量增多,从而进一步加大了植物甾醇的损失。同时进一步说明脱胶时间对植物甾醇的损失比较关键。

2.3 水化脱胶工艺响应面实验

在单因素实验基础上,依据 Design - Expert 软件,采用三因素三水平 Box - Behnken 实验设计,以脱胶温度(A)、加水量(B)、脱胶时间(C)为自变量,磷脂含量(Y_1)、植物甾醇含量(Y_2)为响应值进行响应面优化实验。响应面实验因素与水平见表2,响应面实验设计与结果见表3。

表2 响应面实验因素与水平

| 水平 | 脱胶温度/°C | 加水量/% | 脱胶时间/min |
|----|---------|-------|----------|
| -1 | 40 | 1 | 20 |
| 0 | 60 | 3 | 40 |
| 1 | 80 | 5 | 60 |

表3 响应面实验设计与结果

| 实验号 | A | B | C | Y_1 /(mg/g) | Y_2 /(mg/100 g) |
|-----|----|----|----|---------------|-------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1.15 | 1 170.25 |
| 2 | 0 | -1 | -1 | 5.22 | 1 304.63 |
| 3 | 0 | -1 | 1 | 2.87 | 1 271.13 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 1.41 | 1 192.18 |
| 5 | -1 | -1 | 0 | 6.00 | 1 341.86 |
| 6 | -1 | 0 | -1 | 4.02 | 1 445.72 |
| 7 | 1 | 0 | 1 | 1.37 | 1 297.38 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0.96 | 1 197.42 |
| 9 | -1 | 0 | 1 | 1.37 | 1 306.23 |
| 10 | 1 | 1 | 0 | 0.77 | 1 300.71 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 1.40 | 1 204.99 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 1.20 | 1 209.48 |
| 13 | 1 | 0 | -1 | 2.14 | 1 335.08 |
| 14 | -1 | 1 | 0 | 1.07 | 1 343.46 |
| 15 | 0 | 1 | -1 | 1.05 | 1 304.49 |
| 16 | 0 | 1 | 1 | 0.77 | 1 273.56 |
| 17 | 1 | -1 | 0 | 4.10 | 1 301.56 |

以磷脂含量(Y_1)为响应值,对表3数据进行回归拟合,得到回归方程: $Y_1 = 1.22 - 0.51A - 1.85B - 0.79C + 0.40AB + 0.47AC + 0.59BC + 0.72A^2 + 1.05B^2 + 0.28C^2$ ($R^2 = 0.9884$)。

对表3磷脂含量实验结果进行方差分析,结果如表4所示。由表4可知,模型极显著($p < 0.0001$),失拟项不显著($p = 0.1160$),说明该模型与实际情况拟合较好,可以用于预测磷脂含量的变化。从 p 值可以看出,一次项 A 、 B 、 C ,交互项 BC 以及二次项 A^2 、 B^2 对磷脂含量有极显著影响($p < 0.01$),交互项 AB 、 AC 对磷脂含量有显著影响($p < 0.05$)。3个因素对磷脂含量影响大小依次为 $B > C > A$ 。

表4 磷脂含量响应面结果方差分析

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | p | 显著性 |
|-------|-------|-----|-------|--------|----------|-----|
| 模型 | 45.30 | 9 | 5.03 | 66.02 | < 0.0001 | ** |
| A | 2.07 | 1 | 2.07 | 27.21 | 0.0012 | ** |
| B | 27.50 | 1 | 27.50 | 360.68 | < 0.0001 | ** |
| C | 5.05 | 1 | 5.05 | 66.22 | < 0.0001 | ** |
| AB | 0.64 | 1 | 0.64 | 8.39 | 0.0231 | * |
| AC | 0.88 | 1 | 0.88 | 11.58 | 0.0114 | * |
| BC | 1.41 | 1 | 1.41 | 18.51 | 0.0036 | ** |
| A^2 | 2.17 | 1 | 2.17 | 28.42 | 0.0011 | ** |
| B^2 | 4.62 | 1 | 4.62 | 60.55 | 0.0001 | ** |
| C^2 | 0.34 | 1 | 0.34 | 4.41 | 0.0740 | |
| 残差 | 0.53 | 7 | 0.08 | | | |
| 失拟项 | 0.39 | 3 | 0.13 | 3.78 | 0.1160 | |
| 绝对误差 | 0.14 | 4 | 0.04 | | | |
| 总和 | 45.83 | 16 | | | | |

注: * 为显著($p < 0.05$); ** 为极显著($p < 0.01$)。下同

以植物甾醇含量(Y_2)为响应值,对表3数据进行回归拟合,得到回归方程: $Y_2 = 1194.86 - 25.32A + 0.38B - 30.20C - 0.61AB + 25.45AC + 0.64BC + 92.34A^2 + 34.69B^2 + 58.90C^2$ ($R^2 = 0.9658$)。

对表3植物甾醇实验结果进行方差分析,结果如表5所示。由表5可知,模型极显著($p < 0.01$),失拟项不显著($p = 0.1985$),说明该模型与实际情况拟合较好,可以用于预测植物甾醇含量的变化。从 p 值可以看出,一次项 A 、 C ,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对植物甾醇含量有极显著影响($p < 0.01$),交互项 AC 对植物甾醇含量有显著影响($p < 0.05$)。3个因素对植物甾醇含量影响大小依次为 $C > A > B$ 。

通过 Design - Expert 软件的优化模块,以 Y_1 为考察指标,得到最优的水化脱胶工艺条件为脱胶温度 58°C 、加水量 4.38% 、脱胶时间 55 min ,该条件下预测的植物甾醇含量为 $1223.54\text{ mg}/100\text{ g}$,磷脂含量为 $0.74\text{ mg}/\text{g}$;以 Y_2 为考察指标,得到最优的水化

脱胶工艺条件为脱胶温度 44°C 、加水量 3.28% 、脱胶时间 22 min ,该条件下预测的植物甾醇含量为 $1367.43\text{ mg}/100\text{ g}$,磷脂含量为 $3.00\text{ mg}/\text{g}$ 。考虑到油脂工业上对于脱胶的要求,并同时兼顾植物甾醇的保留,确定最终玉米油水化脱胶工艺条件为脱胶温度 58°C 、加水量 4.38% 、脱胶时间 55 min ,在此条件下进行3次验证实验,脱胶油中植物甾醇含量为 $(1239.00 \pm 18.42)\text{ mg}/100\text{ g}$,磷脂含量为 $(0.76 \pm 0.02)\text{ mg}/\text{g}$,植物甾醇保留率为 83.35% ,脱胶率为 92.95% 。

表5 植物甾醇含量响应面结果方差分析

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | p | 显著性 |
|-------|----------|-----|----------|-------|----------|-----|
| 模型 | 75954.82 | 9 | 8439.42 | 21.95 | 0.0003 | ** |
| A | 5127.89 | 1 | 5127.89 | 13.34 | 0.0082 | ** |
| B | 1.16 | 1 | 1.16 | 0.00 | 0.9577 | |
| C | 7297.48 | 1 | 7297.48 | 18.98 | 0.0033 | ** |
| AB | 1.50 | 1 | 1.50 | 0.00 | 0.9519 | |
| AC | 2590.37 | 1 | 2590.37 | 6.74 | 0.0356 | * |
| BC | 1.65 | 1 | 1.65 | 0.00 | 0.9496 | |
| A^2 | 35905.31 | 1 | 35905.31 | 93.40 | < 0.0001 | ** |
| B^2 | 5067.58 | 1 | 5067.58 | 13.18 | 0.0084 | ** |
| C^2 | 14606.30 | 1 | 14606.30 | 37.99 | 0.0005 | ** |
| 残差 | 2691.10 | 7 | 384.44 | | | |
| 失拟项 | 1755.27 | 3 | 585.09 | 2.50 | 0.1985 | |
| 绝对误差 | 935.82 | 4 | 233.96 | | | |
| 总和 | 78645.91 | 16 | | | | |

3 结论

通过单因素实验考察了脱胶温度、加水量、脱胶时间对玉米油中磷脂和植物甾醇含量的影响,并结合响应面实验建立模型,得到兼顾植物甾醇保留的最优水化脱胶工艺条件为脱胶温度 58°C 、加水量 4.38% 、脱胶时间 55 min ,在此条件下进行3次平行验证实验,脱胶油中磷脂含量为 $0.76\text{ mg}/\text{g}$,植物甾醇含量为 $1239.00\text{ mg}/100\text{ g}$,脱胶率为 92.95% ,植物甾醇保留率为 83.35% 。

参考文献:

- [1] 刘雅谦,李琳,孙万成,等. 植物甾醇的抗炎性研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(5): 93-99.
- [2] SUN S, 翟鹏贵, 彭启辉, 等. 新资源食品原料植物甾醇和植物甾醇酯的安全与应用[J]. 中国卫生监督杂志, 2011, 18(1): 51-55.
- [3] JONES P J, RAEINISARJAZ M, NTANIOS F Y, et al. Modulation of plasma lipid levels and cholesterol kinetics by phytosterol versus phytostanol esters[J]. J Lipid Res, 2000, 41(5): 697-705.

(下转第58页)

2.3 烘干工序对棉酚脱除效果的影响

采用两道盘式烘干机串联梯度烘干的方式处理物料,考察了一、二道烘干机出料温度对棉酚脱除效果的影响,结果见表6。

表6 烘干机出料温度对棉酚脱除效果的影响

| 一道烘干机 | | 二道烘干机 | |
|------------|--------------------|------------|--------------------|
| 出料温度/ ℃ | 出料棉酚 含量/(mg/kg) | 出料温度/ ℃ | 出料棉酚 含量/(mg/kg) |
| 52 | 350 | 84 | 250 |
| 52 | 354 | 84 | 267 |
| 52 | 363 | 84 | 301 |
| 52 | 361 | 84 | 233 |
| 53 | 403 | 90 | 298 |
| 53 | 405 | 90 | 288 |
| 53 | 411 | 90 | 276 |
| 54 | 423 | 90 | 265 |
| 54 | 433 | 90 | 302 |
| 54 | 419 | 94 | 355 |
| 55 | 509 | 94 | 345 |
| 55 | 465 | 94 | 363 |
| 56 | 508 | 96 | 383 |
| 56 | 489 | 96 | 399 |
| 56 | 477 | 96 | 405 |

从表6可以看出,随着一道烘干机出料温度的升高,一道烘干机出料棉酚含量呈明显上升趋势。在二道烘干机中,随着出料温度的升高,物料中的棉酚含量同样呈上升趋势。生产过程中检测的棉酚为

游离棉酚,高温湿热环境会促使游离棉酚与棉籽蛋白中的氨基酸结合生成无毒的结合棉酚。随着烘干温度的升高,物料中的甲醇被迅速蒸发,湿热的环境得到改善,游离棉酚与物料作用的时间缩短,因此棉酚含量的降幅减小。所以宜采取低温多道烘干的方式,利于物料中棉酚的脱除。

3 结论

本研究在生产线上考察了低温棉籽蛋白加工过程中产品棉酚含量的影响因素,确定了预处理工段应保持入浸棉坯粉末度10%左右,控制入浸棉坯水分以4%左右为佳;浸出工段控制新鲜溶剂甲醇体积分数92%~93%,甲醇循环液甲醇体积分数78%~80%(第1梯度)、65%~68%(第2梯度),料液比1:0.5~1:0.6,甲醇循环液温度50~53℃,浸出器不低于二段梯度逆流萃取;烘干工段则应当尽可能地延长烘干工序时间,采取多道多台低温烘干设备,梯度连续将物料烘干。在此条件下,棉籽蛋白中游离棉酚含量降低至400 mg/kg以下。

参考文献:

- [1] 胡春雷,李孝华,何锡玉,等. 2019年棉花加工行业产业发展报告[J]. 中国棉花加工,2020(2):14-17.
- [2] 刘玉兰. 油脂制取与加工工艺学[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [3] 王品,何明,黄帮裕,等. 棉籽蛋白的研究进展[J]. 广州化工,2012,40(15):22-23,26.
- [4] 张宇,孙波,赵晓,等. 南瓜籽甾醇对SD大鼠体内抗氧化作用的影响[J]. 中国油脂,2019,44(7):94-97.
- [5] SHAHZAD N, KHAN W, SHADAB M D, et al. Phytosterols as a natural anticancer agent: current status and future perspective[J]. Biomed Pharmacother, 2017, 88: 786-794.
- [6] DEVARAJ S, JIALAL I, ROCKWOOD J, et al. Effect of orange juice and beverage with phytosterols on cytokines and PAI-1 activity[J]. Clin Nutr, 2011, 30(5): 668-671.
- [7] 程园园,刘大川,刘晔,等. 4种油料压榨油的品质评价[J]. 中国油脂,2016,41(1):7-10.
- [8] 李亚男,王韧,陈正行,等. 燕麦麸油的精制及其在面霜中的抗氧化研究[J]. 中国粮油学报,2021,36(12):64-71.
- [9] 郑淑敏. 玉米油精炼过程中游离甾醇和甾醇酯含量变化研究[D]. 郑州:河南工业大学,2016.
- [10] ESCHE R, BARNSTEINER A, SCHOLZ B, et al. Simultaneous analysis of free phytosterols/phytostanols and intact phytosteryl/phytostanyl fatty acid and phenolic acid esters in cereals[J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(21): 5330-5339.
- [11] 刘玉兰. 油脂制取与加工工艺学[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [12] 李俊杰,李珂,莫玉花,等. 米糠油酸法脱胶工艺及对 γ -谷维素、 β -谷甾醇损失的影响研究[J]. 中国油脂,2017,42(4):16-19,31.
- [13] 杨佳佳,鹿保鑫. 青豆油脱胶工艺研究[J]. 中国粮油学报,2013,28(3):74-79.

(上接第29页)