

超声辅助酶解法提取羊油工艺优化

孙佳宁, 张莉, 朱明睿, 徐艳丽, 赛麦提·艾则孜, 王璐瑶, 王子荣

(新疆农业大学 食品科学与药学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:以阿勒泰羊尾脂为试验材料,采用超声辅助中性蛋白酶酶解法提取羊油。在单因素试验的基础上,通过 Plackett - Burman 试验筛选出对羊油得率具有显著影响的因素,并在此基础上采用 Box - Behnken设计响应面试验对羊油提取工艺进行优化。结果表明,超声辅助酶解法提取羊油最佳工艺条件为料液比 1:2、中性蛋白酶添加量 1.0%、超声酶解温度 46 °C、酶解时间 2 h、超声时间 34 min、超声功率 200 W,在此条件下羊油得率为 79.98%,显著高于干法熬制(74.35%)和酶解法(72.16%)($P < 0.05$)。3种方法所得羊油熔点、皂化值和碘值差异不显著($P > 0.05$);超声辅助酶解法所得羊油过氧化值(0.38 mmol/kg)和酸值(KOH)(0.86 mg/g)显著低于干法熬制所得羊油,酸值(KOH)显著高于酶解法所得羊油($P < 0.05$)。采用超声辅助酶解法提取羊油得率高,产品品质较好,为羊尾脂的加工利用提供新思路 and 一定的理论依据。

关键词:羊油;超声辅助酶解法;Plackett - Burman 试验;Box - Behnken 试验;理化指标

中图分类号:TS224.4;TS225.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)09-0015-07

Ultrasound - assisted enzymatic hydrolysis for extraction of sheep oil

SUN Jianing, ZHANG Li, ZHU Mingrui, XU Yanli,

Saimat Aizezi, WANG Luyao, WANG Zirong

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract:The fat in Altay sheep's tails was taken as test material, and sheep oil was extracted with ultrasound - assisted neutral protease enzymatic hydrolysis. On the basis of single factor experiment, the factors that had significant influence on the yield of sheep oil was selected through Plackett - Burman design, and on this basis, Box - Behnken design response surface methodology was used to optimize the extraction process of sheep oil. The results showed that the optimal process conditions were obtained as follows: ratio of material to liquid 1:2, dosage of neutral protease 1.0%, ultrasonic enzymatic hydrolysis temperature 46 °C, enzymatic hydrolysis time 2 h, ultrasonic time 34 min, and ultrasonic power 200 W. Under these conditions, the yield of sheep oil was 79.98%, which was significantly higher than dry decocting (74.35%) and enzymatic hydrolysis method (72.16%) ($P < 0.05$). There was no significant difference in the melting point, saponification value and iodine value of the three methods ($P > 0.05$). The peroxide value (0.38 mmol/kg) and acid value (0.86 mgKOH/g) of the sheep oil obtained by ultrasound - assisted enzymatic hydrolysis method were significantly lower than that of dry decocting, and the acid value was significantly higher than that of enzymatic hydrolysis ($P < 0.05$).

These results indicated that ultrasound - assisted enzymatic extraction process could increase the yield and

improve the quality of sheep oil. This process could provide new ideas and theoretical basis for the processing and utilization of the fat in sheep's tails.

Key words: sheep oil; ultrasound - assisted enzymatic hydrolysis; Plackett - Burman design; Box - Behnken design; physicochemical index

收稿日期:2020-12-01;修回日期:2020-12-28

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01A38)

作者简介:孙佳宁(1996),男,硕士研究生,研究方向为食品营养与安全(E-mail)2366305370@qq.com。

通信作者:王子荣,教授(E-mail)wangzirong212@126.com。

阿勒泰羊以稳定的遗传性能和生产性能等特点著称,是肉脂兼用的优良地方品种^[1-2]。成年阿勒泰羊的体重至少可达 120 kg,尾脂可占胴体质量的 20%^[3]。羊尾脂中含有丰富的不饱和脂肪酸,具有很高的营养价值和食用价值^[4-5]。我国目前对于羊尾脂的加工利用相对落后,传统加工方法提油率较低,油脂氧化严重,致使羊尾脂利用率较低,造成严重的浪费。

现阶段大多采用传统的干法熬制、浸提法等提取动物油脂^[6-7]。其中干法熬制是通过高温加热使脂肪中的油脂渗出,出油率较低,加之长时间的高温会使油脂氧化,导致颜色加深,品质变差。采用浸提法所得油脂水分含量较高,易酸败,对油脂的风味影响较大^[8]。酶解法作为新兴的油脂提取方法,主要通过酶的作用使蛋白质和脂肪的结合被破坏,从而释放出油脂^[9]。酶解法具有出油率高、成本低、提取条件温和及所得油脂品质较好等特点,被广泛应用于甲鱼油^[10]及种子油^[11]等动植物油脂的提取。超声波提取常作为辅助提取方法^[12],主要是通过超声波空化作用、机械破碎等方式加速组织结构破坏,促进待提取物质与组织细胞分离,从而提高出油率^[13-14],且对油脂影响小,具有广阔的发展前景。近年来国内外研究表明,超声辅助酶解法作为一种新兴的提取方法被广泛应用于植物油^[15]以及鱼虾^[16]等动物油脂的提取中,但应用于羊油提取的报道较少。

本试验利用超声辅助中性蛋白酶酶解法提取羊油。通过单因素试验以及 Plackett - Burman 试验筛选出显著影响羊油得率的因素,在此基础上运用 Box - Behnken 设计响应面法优化羊油提取工艺条件,对该条件下所得羊油品质与干法熬制、酶解法进行对比分析,以期阿勒泰羊尾脂的高效提取提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

阿勒泰羊尾脂(10月龄),购于乌鲁木齐市苏来曼众意屠宰业。中性蛋白酶(20万U/g,来源于枯草芽孢杆菌),北京鸿润宝顺科技有限公司。磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、高锰酸钾、重铬酸钾、硫代硫酸钠、冰乙酸、氢氧化钾、三氯甲烷等均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

Al204 - IC 电子分析天平,梅特勒 - 托利多仪器(上海)有限公司;SF - GL - 16A 高速冷冻离心机,上海菲哈尔分析仪器有限公司;KQ250DE 数控

超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;SSW - 600 - 2S 电热恒温水槽,上海市博迅实业有限公司医疗设备厂;PHB - 4 便携式 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 超声辅助酶解法提取羊油

羊尾脂→去除表面结缔组织→切成方块(1 cm × 1 cm × 1 cm)→绞碎→称取 20 g 于 150 mL 烧杯→加入适量蒸馏水→加入磷酸盐缓冲液调节 pH 至 7→加入中性蛋白酶→超声处理→置于水浴锅中恒温酶解→升温至 80 °C 灭酶 10 min→5 000 r/min 离心 25 min→取上清液→羊油

1.2.2 干法熬制和酶解法提取羊油

干法熬制:参照杜禹岐^[17]干法熬制的方法提取羊油。

酶解法:参照本试验优化所得的酶解工艺参数提取羊油。

1.2.3 羊油理化指标的测定

熔点测定参照 GB/T 24892—2010,皂化值测定参照 GB/T 5534—2008,碘值测定参照 GB/T 5532—2008,酸值测定参照 GB 5009.229—2016,过氧化值测定参照 GB 5009.227—2016。

1.2.4 数据处理

Plackett - Burman 试验以及 Box - Behnken 试验均采用 Design Expert 10.0.3 软件设计分析,采用 Origin 9.0 软件作图,采用 SPSS 20.0 软件处理数据,每组处理均重复 3 次,取平均值。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 料液比对羊油得率的影响

固定酶添加量 1.0%、酶解时间 2 h、超声酶解温度 45 °C、超声功率 200 W、超声时间 30 min,探究料液比对羊油得率的影响,结果见图 1。

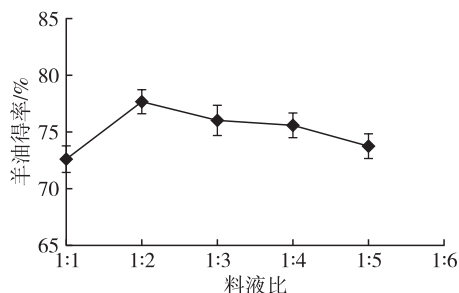


图 1 料液比对羊油得率的影响

由图 1 可知,随着加水量的不断增加,羊油得率呈先升高后降低趋势。在料液比为 1:2 时达到最大值,为 77.67%,相较料液比 1:1 时(72.61%)显著

增加了5.06个百分点($P < 0.05$)。可能是加水量较少时,底物质量浓度大,流动性低,酶与底物接触面积有限。刘昊等^[18]提取鹿油时发现一定范围内液料比的增加有助于酶分子扩散,加快酶解反应的进行,与本试验结果基本一致。随着加水量的进一步增加,羊油得率降低。可能是由于底物不断被稀释,分子间距逐渐变大,酶和底物之间的接触概率变小,阻碍了酶解反应的进行。因此,料液比在1:1~1:3之间较为合适。

2.1.2 酶添加量对羊油得率的影响

固定料液比1:2、酶解时间2 h、超声酶解温度45℃、超声功率200 W、超声时间30 min,探究酶添加量对羊油得率的影响,结果见图2。

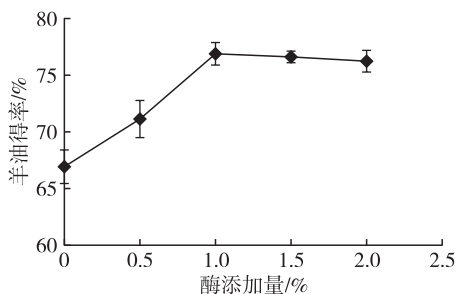


图2 酶添加量对羊油得率的影响

由图2可知,随着酶添加量的不断增加,羊油得率显著提高,在酶添加量为1.0%时达到最大值,为76.87%,与未加酶时相比显著提高了9.95个百分点($P < 0.05$)。说明适量添加蛋白酶可有效提高羊油得率。当底物质量浓度不变时,与底物结合的酶越多,酶解程度越高,油脂溶出越多。但酶添加量大于1.0%时,羊油得率略有降低。刘玉梅等^[19]提取香椿老叶总黄酮时发现酶添加量过多时,体系中多余的酶会粘附在底物表面,阻碍酶解反应的进行。因此,酶添加量在0.5%~1.5%之间较为合适。

2.1.3 酶解时间对羊油得率的影响

固定料液比1:2、酶添加量1.0%、超声酶解温度45℃、超声功率200 W、超声时间30 min,探究酶解时间对羊油得率的影响,结果见图3。

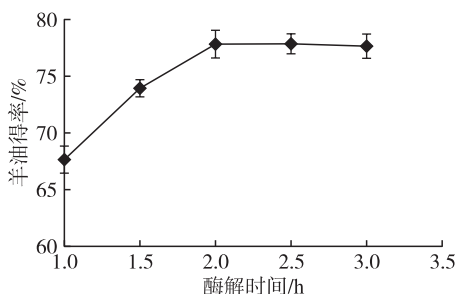


图3 酶解时间对羊油得率的影响

由图3可知,在1~2 h范围内,随着酶解时间延长,羊油得率显著增加了10.19个百分点($P < 0.05$),当酶解时间为2 h时,羊油得率达到最大值,为77.83%。其原因可能是随着酶解时间延长,酶分子能够充分破坏细胞表面结构,使脂肪与蛋白质之间的链接断裂,油脂充分渗出。酶解时间超过2 h后,羊油得率随酶解时间延长趋于平缓,说明此时底物酶解趋于充分。此外,随着酶解时间的延长,乳化油部分增多^[20],可能会影响油脂的分离与品质。因此,酶解时间在1.5~2.5 h之间较为合适。

2.1.4 超声酶解温度对羊油得率的影响

固定料液比1:2、酶添加量1.0%、酶解时间2 h、超声功率200 W、超声时间30 min,探究超声酶解温度对羊油得率的影响,结果见图4。

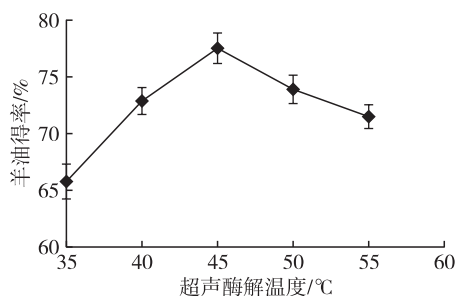


图4 超声酶解温度对羊油得率的影响

由图4可知,羊油得率随超声酶解温度升高呈先上升后下降趋势。超声酶解温度为35℃时羊油得率仅为65.78%,这可能是由于温度较低时,酶活性较低,酶解程度较低。在35~45℃范围内,随着超声酶解温度升高,羊油得率不断增加,在45℃时达到最大值,为77.53%,相较于35℃时显著增加了11.75个百分点($P < 0.05$)。可能是温度升高,酶分子运动加快,酶与底物之间的接触概率增加,促进了蛋白质与油脂分离。邸红艳等^[21]提取核桃粕蛋白时发现适当升高温度可以提高蛋白质的溶解度,同时有利于超声波的空化作用。当超声酶解温度为55℃时,羊油得率仅为71.52%,可能是由于温度较高,导致部分酶变性或失活,羊油得率降低。综上考虑,超声酶解温度在40~50℃之间较为合适。

2.1.5 超声功率对羊油得率的影响

固定料液比1:2、酶添加量1.0%、酶解时间2 h、超声酶解温度45℃、超声时间30 min,探究超声功率对羊油得率的影响,结果见图5。

由图5可知,随着超声功率增加,羊油得率呈先上升后下降趋势,超声功率200 W时达到最大值,为77.93%。在50~200 W范围内,随着超声功率增大,超声波对底物均质作用越明显,伴随振动产生

的能量加快了酶分子运动,增加了酶与底物的接触概率^[22]。同时超声空化作用使脂肪细胞膜破裂,促进油脂分子溶出,羊油得率不断增加。张婧倩等^[23]发现低功率超声波不足以破坏蛋白质的高级结构,随着超声功率增强,蛋白质的结合位点暴露更明显,有助于酶分子与蛋白质结合。当超声功率增加到 250 W 时,羊油得率为 76.05%,相比 200 W 时下降了 1.88 个百分点。可能是由于超声功率过大,瞬时热效应过于明显,使部分酶分子失活或变性,导致羊油得率降低。因此,超声功率在 150 ~ 250 W 之间较为合适。

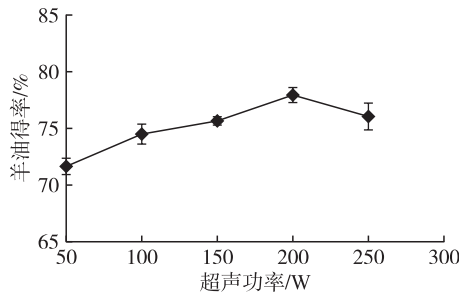


图5 超声功率对羊油得率的影响

2.1.6 超声时间对羊油得率的影响

固定料液比 1:2、酶添加量 1.0%、酶解时间 2 h、超声酶解温度 45 °C、超声功率 200 W,探究超声时间对羊油得率的影响,结果见图 6。

由图 6 可知,随着超声时间延长,羊油得率呈先上升后下降趋势。超声时间 30 min 时羊油得率最高,为 77.01%,相较超声时间 10 min 时显著提高 6.02 个百分点($P < 0.05$)。在 10 ~ 30 min 范围内,

随着超声时间延长,酶分子运动加快,酶与底物充分接触,促进了酶解反应的进行。超声空化作用还可以改变蛋白质的次生结构和亚基组成,从而提高蛋白质的酶解敏感性^[24]。在 30 ~ 50 min 范围内,长时间的超声处理使体系内热能增加,空化作用更明显,液体介质中微泡的形成和破裂会释放能量,产生瞬时局部高温、高压^[25],可能会破坏酶分子的空间结构,导致后续酶解过程中与底物结合的酶变少,羊油得率降低。因此,超声时间在 20 ~ 40 min 之间较为合适。

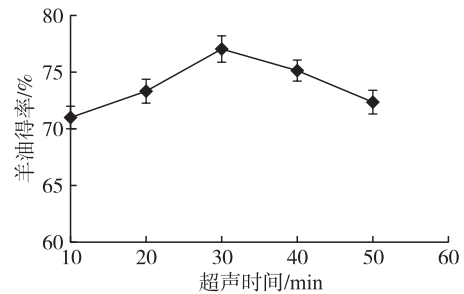


图6 超声时间对羊油得率的影响

2.2 Plackett - Burman 试验

在单因素试验的基础上,进行 Plackett - Burman 试验设计,以羊油得率为响应值,从料液比、酶添加量、酶解时间、超声酶解温度、超声时间、超声功率中筛选出对羊油得率有显著影响的因素,每个因素设置 2 个水平,再增加 5 个虚拟因素作误差分析,采用 Design Expert 10.0.3 软件设计,Plackett - Burman 试验因素水平如表 1 所示,Plackett - Burman 试验设计及结果如表 2 所示。

表1 Plackett - Burman 试验因素水平

水平	A 料液比	B 酶添加量/%	C 酶解时间/h	D 超声酶解温度/°C	E 超声时间/min	F 超声功率/W	G/H/J/K/L 虚拟因子
-1	1:1	0	1	35	10	50	-
1	1:5	2	3	55	50	250	-

表2 Plackett - Burman 试验设计及结果

试验号	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	羊油得率(Y)/%
1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	58.47 ± 1.28
2	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	60.57 ± 1.29
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	72.73 ± 0.53
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	79.04 ± 1.92
5	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	62.73 ± 1.74
6	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	67.52 ± 0.80
7	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	54.04 ± 1.52
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	73.38 ± 0.88
9	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	61.78 ± 1.01
10	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	72.26 ± 0.68
11	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	62.61 ± 0.51
12	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	55.99 ± 1.13
13	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	58.47 ± 1.28

续表 2

试验号	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	羊油得率(Y)/%
14	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	60.57 ± 1.29
15	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	72.73 ± 0.53
16	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	79.04 ± 1.92
17	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	62.73 ± 1.74

对表 2 数据进行拟合,得到回归方程为 $Y = 365.0933 - 5.20667A + 0.715B - 2.44C - 2.755D + 3.0333E - 0.828333F$ 。对回归模型进行方差分析,结果如表 3 所示。

表 3 回归模型方差分析

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	P 值	显著性
回归模型	612.62	6	102.10	8.77	0.0154	*
A	325.31	1	325.31	27.93	0.0032	**
B	6.13	1	6.13	0.53	0.5005	
C	71.44	1	71.44	6.13	0.0561	
D	91.08	1	91.08	7.82	0.0382	*
E	110.41	1	110.41	9.48	0.0275	*
F	8.23	1	8.23	0.71	0.4388	
残差	58.24	5	11.65			
合计	670.85	11				

注: $R^2 = 0.9132$, $R_{Adj}^2 = 0.8090$; * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

F 值可用来检验各变量对响应值影响的显著性高低, F 值越大, 则相应变量的显著程度越高。当模型的显著性检验概率 $P < 0.05$ 时, 认为该模型具有统计学意义。由表 3 可知, 各因素对羊油得率影响大小顺序依次为 $A > E > D > C > F > B$, 料液比、超声时间及超声酶解温度 3 个因素对响应值有极显著或显著影响, 是影响羊油得率的主要因素, 其余因素为不显著因素。

2.3 Box - Behnken 试验

在单因素试验和 Plackett - Burman 试验的基础上, 固定酶添加量 1.0%、酶解时间 2 h、超声功率 200 W, 选取对羊油得率影响较大的料液比、超声时间、超声酶解温度为自变量, 以羊油得率为响应值, 根据 Box - Behnken 试验原理, 进行三因素三水平优化试验, 并进行回归分析、建立数学模型, Box - Behnken 试验因素水平见表 4, Box - Behnken 试验设计及结果见表 5。

表 4 Box - Behnken 试验因素水平

水平	X_1 料液比	X_2 超声酶解温度/°C	X_3 超声时间/min
-1	1:1	40	20
0	1:2	45	30
1	1:3	50	40

采用 Design Expert 10.0.3 软件对表 5 中的试验数据进行拟合回归分析可得羊油得率对料液比 (X_1)、超声酶解温度 (X_2)、超声时间 (X_3) 的二次多项拟合回归方程: $Y = 79.49 - 2.46X_1 + 1.07X_2 +$

$1.41X_3 + 0.17X_1X_2 + 0.37X_1X_3 - 0.23X_2X_3 - 5.74X_1^2 - 2.95X_2^2 - 1.67X_3^2$ 。进一步对回归模型进行方差分析, 结果见表 6。

表 5 Box - Behnken 试验设计及结果

试验号	X_1	X_2	X_3	羊油得率(Y)/%
1	0	0	0	80.56 ± 1.80
2	-1	0	-1	72.96 ± 1.36
3	0	0	0	78.89 ± 0.97
4	0	0	0	79.24 ± 0.83
5	0	0	0	79.16 ± 1.09
6	0	1	-1	74.98 ± 1.26
7	1	0	-1	67.49 ± 1.49
8	0	-1	1	75.21 ± 1.18
9	-1	1	0	74.46 ± 0.94
10	-1	-1	0	72.26 ± 1.04
11	1	-1	0	66.79 ± 1.42
12	1	1	0	69.67 ± 1.67
13	1	0	1	71.93 ± 1.01
14	0	-1	-1	72.79 ± 1.25
15	-1	0	1	75.91 ± 1.29
16	0	0	0	79.61 ± 0.86
17	0	1	1	76.48 ± 1.62

由表 6 可知, 该模型 F 值为 59.95, $P < 0.0001$, 回归模型极显著, 失拟项 P 值为 0.3407, 不显著, 因此该模型有效, 能够用于预测羊油得率。回归决定

系数(R^2)为0.987 2,说明该模型拟合程度较好。修正决定系数(R_{Adj}^2)为0.970 7,说明预测值和实际值具有很好的相关性。交互项 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 的 P 值均大于0.05,无显著交互作用,料液比、超声酶解温度、超声时间3个因素对羊油得率影响大小与Plackett-Burman试验结果吻合,因此该模型可以用于对羊油得率的分析 and 预测。通过Design Expert 10.0.3软件对数据进一步分析可得羊油最佳提取工艺条件为料液比1:1.8、酶解时间2 h、超声酶解温度45.80℃、酶添加量1.0%、超声功率200 W、超声时间33.88 min,在此条件下羊油得率最佳理论预测值为80.10%。

表6 回归模型方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	277.95	9	30.88	59.95	<0.000 1	**
X_1	48.56	1	48.56	94.27	<0.000 1	**
X_2	9.11	1	9.11	17.70	0.004 0	**
X_3	15.99	1	15.99	31.04	0.000 8	**
X_1X_2	0.12	1	0.12	0.22	0.650 1	
X_1X_3	0.56	1	0.56	1.08	0.333 8	
X_2X_3	0.21	1	0.21	0.41	0.542 0	
X_1^2	138.96	1	138.96	269.75	<0.000 1	**
X_2^2	36.70	1	36.70	71.24	<0.000 1	**
X_3^2	11.81	1	11.81	22.93	0.002 0	**
残差	3.61	7	0.52			
失拟项	1.92	3	0.64	1.51	0.340 7	
纯误差	1.69	4	0.42			
总和	281.56	16				

注: $R^2 = 0.987 2$, $R_{Adj}^2 = 0.970 7$; *表示差异显著($P < 0.05$), **表示差异极显著($P < 0.01$)。

表7 不同提取方法对羊油得率及品质的影响

提取方法	羊油得率/%	皂化值(KOH)/ (mg/g)	过氧化值/ (mmol/kg)	碘值(I)/ (g/100 g)	酸值(KOH)/ (mg/g)	熔点/℃
超声辅助酶解法	79.98 ± 0.89 ^a	198 ± 1 ^a	0.38 ± 0.01 ^b	47.81 ± 0.51 ^a	0.86 ± 0.01 ^b	37.75 ± 0.57 ^a
干法熬制	74.35 ± 0.59 ^b	201 ± 2 ^a	0.40 ± 0.01 ^a	48.79 ± 0.28 ^a	0.89 ± 0.02 ^a	36.83 ± 0.53 ^a
酶解法	72.16 ± 0.20 ^c	198 ± 2 ^a	0.38 ± 0.01 ^b	47.88 ± 0.34 ^a	0.83 ± 0.01 ^c	37.44 ± 0.80 ^a

注:同列不同肩标字母表示差异显著($P < 0.05$)。

3 结论

以阿勒泰羊尾脂为原料,采用超声辅助酶解法提取羊油,通过单因素试验、Plackett-Burman试验和响应面试验对提取工艺条件进行优化,得到的最佳工艺条件为料液比1:2、酶解时间2 h、超声酶解温度46℃、中性蛋白酶添加量1.0%、超声功率200 W、超声时间34 min,在此条件下羊油得率为79.98%,显著高于酶解法和干法熬制($P < 0.05$),

2.4 验证试验

综合考虑实际生产的可操作性,将超声辅助酶解法提取羊油工艺条件优化为料液比1:2、酶解时间2 h、超声酶解温度46℃、酶添加量1.0%、超声功率200 W、超声时间34 min,在此工艺条件下进行3次平行验证试验,羊油得率平均值为79.98%,与理论预测值相对误差为-0.15%,说明Box-Behnken试验得到的模型数据有效。

2.5 不同提取方法对羊油品质的影响

采用干法熬制、酶解法和超声辅助酶解法提取羊油,对比不同提取方法对羊油得率和品质的影响,结果如表7所示。由表7可知,超声辅助酶解法羊油得率最高,为79.98%,相较于干法熬制(74.35%)提高了5.63个百分点,显著高于酶解法(72.16%)($P < 0.05$)。这是由于超声波空化作用进一步破碎了羊尾脂组织结构,油脂在酶的作用下更易渗出。3种方法所得羊油熔点、皂化值和碘值差异不显著($P > 0.05$)。超声辅助酶解法提取羊油的酸值显著高于酶解法,这与张婷^[26]提取猕猴桃籽油的结果基本一致。研究表明,超声波处理会在一定程度上促进油脂水解^[27-29],导致游离脂肪酸含量略微升高,这可能是本试验中酸值升高的原因。超声辅助酶解法提取羊油的酸值显著低于干法熬制($P < 0.05$)。超声辅助酶解法所得羊油过氧化值显著低于干法熬制($P < 0.05$),与酶解法差异不显著($P > 0.05$)。这是由于干法熬制温度较高,酶解所需温度较低,而高温会加速油脂氧化酸败^[30],使油脂酸值、过氧化值升高。综合考虑得率和品质,超声辅助酶解法能够有效提高羊尾脂的利用率,且所得羊油品质较好。

且所得羊油品质较好。该方法操作简便,可为日后羊油提取工业化生产提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] WANG J J, XU M S, WANG X H, et al. Comparative proteome analysis reveals lipid metabolism-related protein networks in response to rump fat mobilization[J/OL]. Int J Mol Sci, 2018, 19(9): 2556[2020-12-01]. <https://doi.org/10.3390/ijms19092556>.

- [2] ZHU C Y, FAN H Y, YUAN Z H, et al. Genome - wide detection of CNVs in Chinese indigenous sheep with different types of tails using ovine high - density 600K SNP arrays[J/OL]. *Sci Rep*, 2016, 6: 27822 [2020 - 12 - 01]. <https://doi.org/10.1038/srep27822>.
- [3] LI Y, LI Y B, LIU C J. Changes in lipid oxidation and fatty acids in Altay sheep fat during a long time of low temperature storage[J]. *J Oleo Sci*, 2017, 66(4): 321 - 327.
- [4] 蒙建菊. 阿勒泰大尾羊尾脂超显微结构及脂肪酸组成分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- [5] 刘成江, 吴洪斌, 王俊钢, 等. 新疆肥尾羊脂肪特性研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(6): 159 - 161.
- [6] 张佰帅, 王宝维. 动物油脂提取及加工技术研究进展[J]. *中国油脂*, 2010, 35(12): 8 - 11.
- [7] 李梦凡, 宁种, 判承初, 等. 酶解法制备罗非鱼油工艺研究[J]. *中国油脂*, 2015, 40(7): 6 - 11.
- [8] 戚彪, 米瑞芳, 熊苏玥, 等. 超声波辅助酶解法提取食用猪油工艺优化及胆固醇脱除[J]. *肉类研究*, 2018, 32(7): 23 - 28.
- [9] 陶轶松, 吴芮, 包建强. 酶解法制备甲鱼油工艺研究[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(3): 182 - 187.
- [10] 宋恭帅, 张蒙娜, 俞喜娜, 等. 5种提取方法对甲鱼油品质的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(9): 1789 - 1799.
- [11] NGUYEN H C, VUONG D P, NGUYEN N T T, et al. Aqueous enzymatic extraction of polyunsaturated fatty acid - rich sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seed oil: an eco - friendly approach [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 133: 109992 [2020 - 12 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109992>.
- [12] JOVEN J M O, GADIAN J T, PEREZ M A, et al. Optimized ultrasonic - assisted oil extraction and biodiesel production from the seeds of *Maesopsis eminii* [J/OL]. *Ind Crop Prod*, 2020, 155: 112772 [2020 - 12 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112772>.
- [13] SENRAYAN J, VENKATACHALAM S. Ultrasonic acoustic - cavitation as a novel and emerging energy efficient technique for oil extraction from kapok seeds [J/OL]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 62: 102347 [2020 - 12 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102347>.
- [14] CRAVOTTO G, BOFFA L, MANTEGNA S, et al. Improved extraction of vegetable oils under high - intensity ultrasound and/or microwaves [J]. *Ultrason Sonochem*, 2008, 15(5): 898 - 902.
- [15] AMIGH S, DINANI S T. Combination of ultrasound - assisted aqueous enzymatic extraction and cooking pretreatment for date seed oil recovery [J]. *Heat Mass Transf*, 2020, 56(8): 2345 - 2354.
- [16] SIEWE F B, KUDRE T G, NARAYAN B. Optimisation of ultrasound - assisted enzymatic extraction conditions of umami compounds from fish by - products using the combination of fractional factorial design and central composite design [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 334: 127498 [2020 - 12 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127498>.
- [17] 杜禹岐. 阿勒泰大尾羊尾脂提取、精炼、改性及起酥油的制备[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- [18] 刘昊, 张涛铄, 张彤瑶, 等. 超声波辅助水酶法提取鹿油的工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. *经济动物学报*, 2020, 24(1): 36 - 41.
- [19] 刘玉梅, 张家俊, 吴浪. 复合酶协同超声波法提取香椿老叶总黄酮工艺研究[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(11): 223 - 230.
- [20] 包怡红, 郭阳. 响应面法优化超声波辅助水酶法提取松籽油工艺及其氧化稳定性[J]. *食品科学*, 2016, 37(22): 60 - 68.
- [21] 邸红艳, 马海乐, 王洋, 等. 超声辅助提取核桃粕蛋白的工艺研究[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(7): 164 - 172.
- [22] 贾俊强, 吴琼英, 杜金娟, 等. 超声波辅助水酶法提取蚕蛹油工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(16): 52 - 57.
- [23] 张婧倩, 龙肇, 梁安源, 等. 超声预处理对米渣蛋白酶解特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(11): 138 - 143.
- [24] AKRAM A N, ZHANG C H. Effect of ultrasonication on the yield, functional and physicochemical characteristics of collagen - II from chicken sternal cartilage [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 307: 125544 [2020 - 12 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125544>.
- [25] 杨进妹, 王婷, 何荣海. 超声对酶解反应的影响[J]. *农产品加工*, 2010(7): 70 - 71.
- [26] 张婷. 猕猴桃籽油的提取及其氧化稳定性的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.
- [27] 支敏, 陆鑫, 李红霞, 等. 微波超声波联合技术加速油脂水解[J]. *食品科技*, 2013, 38(7): 206 - 210.
- [28] MERCANTILI L, DAVIS F, SEMUS P J H. Ultrasonic initiation of the alkaline hydrolysis of triglycerides (saponification) without phase catalysis[J]. *J Surfactants Deterg*, 2014, 17(1): 133 - 141.
- [29] 张振山, 刘玉兰, 张丽霞, 等. 超声波辅助提取对亚麻籽油得率和品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(8): 90 - 94.
- [30] ABBAS A M, ANOWARUL I M, OTHMAN N H, et al. Effect of heating on oxidation stability and fatty acid composition of microwave roasted groundnut seed oil [J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 54(13): 4335 - 4343.