

马油酶法提取工艺优化及精炼对其品质的影响

孙龙珠¹, 王颖¹, CHISORO Prince^{1,2}, 曹克涛³, 郭玉杰¹, 张春晖¹

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193; 2. 南非福特哈尔大学 畜牧科学系, 东开普敦 艾丽丝 5700; 3. 新疆野马文化发展有限公司, 乌鲁木齐 830000)

摘要:为提高马油的提取率及品质,以新疆马脂肪为原料,采用酶法提取马油。以马油提取率为考察指标,在单因素实验的基础上,通过响应面法优化马油的酶法提取工艺条件,并通过脱胶、脱酸、脱色对粗马油进行精炼处理,对比分析精炼前后马油的感官品质、理化指标和脂肪酸组成。结果表明:酶法提取马油的最佳工艺条件为选用中性蛋白酶、酶添加量 2 000 U/g、料液比 1:2、酶解温度 45℃、酶解时间 2 h,在此条件下马油提取率为 81.69%;精炼后马油的色泽、气味等感官指标明显改善,酸值(KOH)由 1.13 mg/g 降至 0.92 mg/g,过氧化值由 0.75 mmol/kg 降至 0.63 mmol/kg,碘值由 81.14 g/100 g 升至 88.95 g/100 g,不饱和脂肪酸含量升高了 3.1%。综上,采用中性蛋白酶酶法提取马油能有效提升马油提取率,且精炼后马油品质更佳。

关键词:马油;酶法提取;油脂精炼;品质

中图分类号:TS225.2;TS224.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)07-0013-08

Optimization of enzymatic extraction process for horse oil and effect of refining on its quality

SUN Longzhu¹, WANG Ying¹, CHISORO Prince^{1,2}, CAO Ketao³, GUO Yujie¹, ZHANG Chunhui¹

(1. Key Laboratory of Agro-products Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Department of Livestock and Pasture Science, University of Fort Hare, Alice 5700, Eastern Cape, South Africa; 3. Xinjiang Yema Cultural Development Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to improve the extraction rate and quality of horse oil, Xinjiang horse fat was used as raw material to extract horse oil by enzymatic method. With the extraction rate of horse oil as the index, on the basis of single factor experiments, the process conditions of enzymatic extraction for horse oil were optimized by response surface methodology. The crude horse oil was refined by degumming, deacidification and decolorization, and the changes of sensory quality, physicochemical indexes and fatty acid composition of horse oil before and after refining were compared. The results showed that the optimal extraction conditions of horse oil were obtained as follows: neutral protease dosage 2 000 U/g, solid-liquid ratio 1:2, enzymatic hydrolysis temperature 45℃, enzymatic hydrolysis time 2 h. Under these conditions, the extraction rate of horse oil was as high as 81.69%. The sensory indexes such as color and odor of horse oil were significantly improved after refining. The acid value decreased from 1.13 mgKOH/g

to 0.92 mgKOH/g, the peroxide value decreased from 0.75 mmol/kg to 0.63 mmol/kg, and the iodine value increased from 81.14 g/100 g to 88.95 g/100 g, and the unsaturated fatty acid content increased by 3.1%. In conclusion, extraction of horse oil using neutral protease could effectively improve the extraction rate of horse oil,

收稿日期:2024-06-03;修回日期:2025-04-01

基金项目:2022年丝绸之路经济带创新驱动发展试验区、乌昌石国家自主创新示范区科技发展计划(2022LQ01002)

作者简介:孙龙珠(1998),女,硕士研究生,研究方向为畜产品加工(E-mail) chengnanfeng@outlook.com。

通信作者:郭玉杰,副研究员,博士(E-mail) Guoyujie324@163.com;张春晖,研究员,博士(E-mail) dr_zch@163.com。

and the quality of horse oil is better after refining.

Key words: horse oil; enzymatic extraction; oil refining; quality

马是我国畜牧业的重要组成部分,2022年新疆马存栏量达110.1万匹,居全国首位^[1]。近年来新疆马产业呈现多元化发展,产业产值逐年增加,马肉、马乳消费群体呈现由区内向区外扩展的趋势。肉马宰杀过程中会产生皮毛、骨、血、脂肪等大量副产物,传统屠宰加工方式对副产物综合利用重视程度不足,造成了严重的资源浪费和环境污染。《新疆统计年鉴》显示,2020年新疆马肉产量为7.17万t^[2],而马的肉脂比接近35:1^[3],因此2020年新疆马脂肪总产量约为2050t。研究表明,马脂肪中粗脂肪含量约为91%,且相对于其他动物油脂而言,其不饱和脂肪酸含量更高^[4]。此外,马油具有良好的抗氧化性能^[5],并且具有较强的渗透性^[6]。近年来,马油产品越来越多地出现在我们生活当中,如马油皂、马油洗发水、马油面霜等。因此,提升马油提取率和品质对于生产高附加值马油产品有重要作用。

目前,动物油脂的提取方法主要有机械压榨法、蒸煮法、有机溶剂提取法、酶解法和超临界CO₂萃取法等^[7]。机械压榨法提取的油脂品质高、无化学试剂残留,但收率较低^[8-9]。蒸煮法是通过高温加热的方式使细胞中的油脂游离出来,从而与脂蛋白分离的油脂提取方式,分为干法提取与湿法提取,该方法操作简便,对设备要求低,但由于干法提取所需时间长、温度高,所得油脂颜色较深,而湿法提取又存在油脂的水分含量高、风味差、易酸败等问题^[10]。有机溶剂提取法成本低、产量高、操作方便,但存在有机溶剂残留、难回收的缺点^[11-12]。超临界CO₂萃取法安全无毒、萃取剂易回收,但对设备要求高,成本投入大。酶法通过生物酶破坏生脂肪中蛋白质与脂肪的结合,使脂肪中的油脂释放出来^[13],该方法提取步骤相对简便、条件温和,有利于减少有益成分的损失,且不会引入有毒有害物质,对水的需求量也较小,相对绿色、安全、环保。近年来,采用酶法提取植物油的研究较多^[14],如应用于米糠油^[15]、甜瓜籽油^[16]、核桃油^[17]、大豆油^[18]等的酶法提取,都具有很好的提取效果,因此越来越多的研究者将目光聚焦于使用酶法提取动物油脂。目前,已有研究人员将酶法应用于猪油、大鲵油^[19-20]、中华鳖油^[21]、羊油^[22]等的提取,但应用于马油提取的报道较少。

前期实验发现,超声辅助酶法对于马油的提取

率没有明显的提升作用,因此本文以新疆阿勒泰地区人工养殖伊犁马的腹部脂肪作为实验原料,在单因素实验的基础上结合响应面法对酶法提取马油的工艺进行探究,并对得到的粗马油进行精炼,对比精炼前后马油的品质变化,以期探寻一种高效的马油提取方法并提升马油的品质,为马油商业化生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

马脂肪,采样自新疆阿勒泰地区屠宰场马(品种为伊犁马)腹部脂肪(粗脂肪含量91.46%、水分含量5.39%、粗蛋白质含量0.86%、灰分含量0.50%),屠宰后立即采样并于-20℃冷冻,顺丰冷链邮寄回实验室。中性蛋白酶(10万U/g)、胰蛋白酶(250万U/g)、木瓜蛋白酶(80万U/g)、碱性蛋白酶(20万U/g),上海源叶生物科技有限公司;三氯甲烷、冰乙酸、氢氧化钾、碘化钾、硫代硫酸钠、无水硫酸钠、乙醚、异丙醇、可溶性淀粉、1-丁醇、环己烷和韦氏试剂等均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

ME403电子分析天平、FE-20K pH计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;208便携式pH计,Testo公司;CR-400色差仪,日本柯尼卡美能达公司;Allegra X-12型台式高速冷冻离心机,美国贝克曼库尔特有限公司;电热恒温水浴锅,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;SHA-B水浴恒温振荡器,江苏省金坛荣华仪器制造有限公司;DH-101-3BS型电热恒温鼓风干燥箱,天津市中环实验电炉有限公司;SYNERGY-H1酶标仪,伯腾仪器(美国)有限公司;GC-450气相色谱仪,美国Varian公司;PEN3电子鼻,德国Airsense公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理

将马脂肪解冻后去除筋膜和结缔组织,切成约0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm的小块,放入避光蒸煮袋中,抽真空后于-20℃储存备用。

1.2.2 酶法提取马油

参考郑晶^[23]的方法并作修改。称取15.00 g处理后的马脂肪于100 mL烧杯中,加入一定质量的蛋白酶和一定体积的超纯水,使用0.1 mmol/L的HCl

和0.1 mmol/L的NaOH调节溶液pH,玻璃棒搅拌后保鲜膜密封,一定温度下恒温水浴酶解一定时间后,80℃灭酶10 min,0.074 mm(200目)尼龙布过滤,8 500 r/min离心15 min,吸取上层油脂,即为粗马油。按式(1)计算马油提取率(ω)。

$$\omega = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为马油的质量,g; m_0 为马脂肪的质量,g。

1.2.3 马油的精炼

参考陈彦婕等^[20]的方法并作修改。脱胶:在60℃下平衡粗马油10 min,添加油质量1%的体积分数为40%的磷酸溶液,在水浴恒温振荡器60℃下以300 r/min振摇10 min,在6 500 r/min下离心10 min,分离上清,得到脱胶马油。脱酸:在60℃下平衡脱胶马油10 min,添加脱胶马油体积0.5%的4 mol/L的NaOH溶液,在水浴恒温振荡器中以初温30℃升至60℃,并在60℃下以300 r/min振摇30 min,在6 500 r/min下离心15 min,分离上清,添加上清质量10%的热超纯水洗涤,在6 500 r/min下离心5 min,重复操作两次,分离上清,得到脱酸马油。脱色:在60℃下平衡脱酸马油10 min,添加油质量1%的活性白土,在水浴恒温振荡器60℃下以300 r/min振摇30 min,在6 500 r/min下离心15 min,分离上清,得到脱色马油。

1.2.4 马油感官品质的测定

黄度值测定:将马油置于透明自封袋中,用锡箔纸紧密包裹(露出检测点)。采用黑、白标板对色差仪进行校准后,将色差仪镜头对准待测样品进行测定。

电子鼻测定:称取3.50 g马油样品于20 mL顶空瓶中,设置冲洗时间180 s,样品测试时间60 s,进行电子鼻测定。PEN3电子鼻标准传感器阵列及性能描述如表1所示。

表1 PEN3电子鼻标准传感器阵列及性能描述

Table 1 Sensor arrays and performance descriptions of PEN3 electronic nose

传感器	敏感物质
W1C	芳香类化合物
W5S	氮氧类化合物
W3C	氨类、芳香类化合物
W6S	氢化物
W5C	短链烷烃、芳香化合物
W1S	甲基类化合物
W1W	无机硫化物
W2S	醇、醛、酮类化合物
W2W	芳香烃化合物、有机硫化物
W3S	长链烷烃

1.2.5 马油理化指标的测定

酸值测定参照GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中的冷溶剂指示剂滴定法;过氧化值测定参照GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的滴定法;碘值测定参照GB/T 5532—2022《动植物油脂 碘值的测定》;水分及挥发物含量测定参照GB 5009.236—2016《食品安全国家标准 动植物油脂水分及挥发物的测定》中电热干燥箱法;熔点测定参照GB/T 12766—2008《动物油脂 熔点测定》;皂化值测定参照GB/T 5534—2008《动植物油脂 皂化值的测定》。

1.2.6 马油脂肪酸组成的测定

脂肪酸组成测定参照GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》,采用酯交换法对马油进行前处理,然后待气相色谱测定。

气相色谱条件:毛细管色谱柱(100 m × 250 μm × 0.2 μm);载气为氮气,流速1 mL/min;进样器温度270℃,检测器温度280℃;程序升温为初始温度100℃,持续13 min,以10℃/min升温至120℃,持续6 min,以1℃/min升温至180℃,持续20 min,以4℃/min升温至220℃,持续10 min。

1.2.7 数据统计与分析

采用Design-Expert 13软件设计响应面实验;采用Excel软件进行数据整理和计算;采用SPSS Statistics 25软件对数据进行显著性分析(单因素ANOVA检验), $p < 0.05$ 表示差异显著;采用Origin Pro 2023b软件绘图。每个样品进行3次重复实验,结果以“平均值 ± 标准差”表示。

2 结果与分析

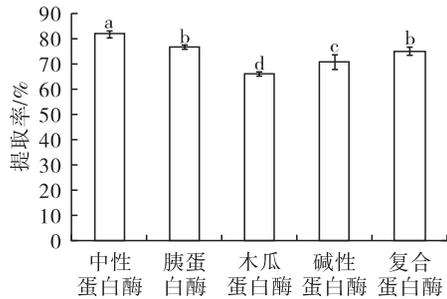
2.1 蛋白酶的筛选

固定酶添加量2 000 U/g,酶解时间2 h,料液比1:2,分别选用中性蛋白酶、胰蛋白酶、木瓜蛋白酶、碱性蛋白酶和复合蛋白酶(中性蛋白酶与碱性蛋白酶比例1:1,中性蛋白酶反应1 h后加入碱性蛋白酶),在各酶的最适pH、温度条件下(见表2)提取马油,考察不同蛋白酶对马油提取率的影响,结果见图1。

表2 不同蛋白酶的最适条件

Table 2 Optimum conditions for different protease

酶种类	pH	温度/℃
中性蛋白酶	7	40
胰蛋白酶	8	40
木瓜蛋白酶	7	55
碱性蛋白酶	10	45
复合蛋白酶	7、10	45



注:不同字母代表差异显著($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

图1 不同蛋白酶对马油提取率的影响

Fig.1 Effect of different protease on extraction rate of horse oil

前期采用干法熬制提取马油,提取率为42.67%。由图1可知,与干法熬制相比,酶法提取马油的提取率明显提升。其中:中性蛋白酶的提取率最高,达到80%以上;胰蛋白酶和复合蛋白酶提取率次之,分别为76.52%和75.21%;木瓜蛋白酶提取效果最差,提取率为65.78%。这是由于不同蛋白酶的底物选择性有明显差异^[24],中性蛋白酶对马脂肪中的蛋白质组分的酶解效果最佳,能够使油脂与蛋白质更好地分离,从而提高马油的提取率。因此,后续采用中性蛋白酶提取马油。

2.2 酶法提取马油单因素实验

考察单一影响因素时,固定其他因素水平为酶添加量2000 U/g、酶解时间2 h、料液比1:2、酶解温度55℃。经测定,马脂肪的pH为6.91,与中性蛋白酶的最适pH接近,为避免调节pH过程中酸或碱的加入对马油品质的影响,单因素实验以及响应面实验过程中均不再调节酶解的pH。

2.2.1 酶添加量对马油提取率的影响

酶添加量对马油提取率的影响见图2。

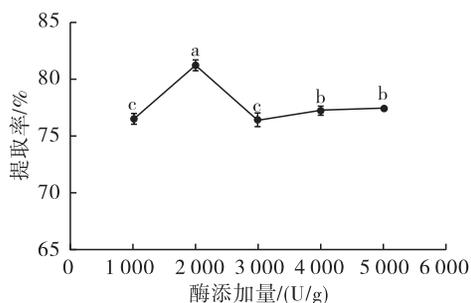


图2 酶添加量对马油提取率的影响

Fig.2 Effect of enzyme dosage on extraction rate of horse oil

由图2可知,马油提取率随酶添加量的增加总体先升高后降低,在酶添加量为2000 U/g时,提取

率最高。这是因为中性蛋白酶的作用机制是与脂蛋白结合,导致底物分子中的键断裂,从而使被包裹的油脂释放出来。在酶添加量为1000~2000 U/g时,底物充足,酶与底物接触完全,反应速率较快,脂蛋白逐渐被水解,马油不断释放,提取率逐渐升高^[25];但当酶添加量超过2000 U/g后,蛋白酶添加过量导致脂蛋白过度酶解产生大量小分子的肽,小分子肽具有表面活性剂的作用,促进了游离马油的乳化,从而降低了提取率^[26-27]。也有研究发现,一些商品化蛋白酶产品含有的加工助剂对脂类物质具有黏附效应,过量添加商品蛋白酶会降低脂类物质的提取率^[28-29]。

2.2.2 酶解时间对马油提取率的影响

酶解时间对马油提取率的影响见图3。

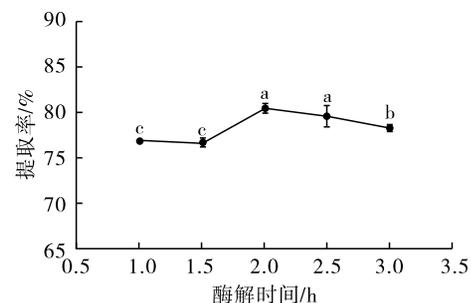


图3 酶解时间对马油提取率的影响

Fig.3 Effect of enzymatic hydrolysis time on extraction rate of horse oil

由图3可知,马油提取率随着酶解时间的延长而增加,在酶解2 h时,提取率达到最高,为80.49%,之后略有降低。这是由于酶与底物的反应需要一定时间,随酶解时间延长,酶与底物充分结合,马油提取率不断上升,酶解2 h时,酶已将脂质中的油几乎全部释放,而继续延长酶解时间,会导致马油的乳化程度增大或油脂发生水解,提取率反而降低。

2.2.3 料液比对马油提取率的影响

料液比对马油提取率的影响见图4。

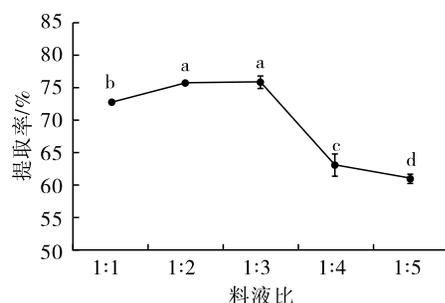


图4 料液比对马油提取率的影响

Fig.4 Effect of solid-liquid ratio on extraction rate of horse oil

由图 4 可知,随着料液比的降低,马油提取率先增加后降低,在料液比 1:2 和 1:3 时提取率最高,分别为 75.68% 和 75.71%。这是因为料液比较高时,随着水量的增多,酶在水溶液中的分布面积增加,酶与底物的接触概率增加,从而使马油提取率上升。料液比 1:2 与料液比 1:3 相比,马油提取率虽有增加但变化不明显,可能是因为料液比 1:2 时,酶与底物接触概率已经相对较高,增加水量至料液比 1:3,对酶与底物有效接触的作用有限,导致提取率变化不显著。而当水量持续增加(料液比小于 1:3)时,会降低酶在体系中的浓度,对反应不利,还会增加废水的排放量及后续工艺中破乳的难度,使废水处理和破乳的经济成本增加。

2.2.4 酶解温度对马油提取率的影响

酶解温度对马油提取率的影响如图 5 所示。

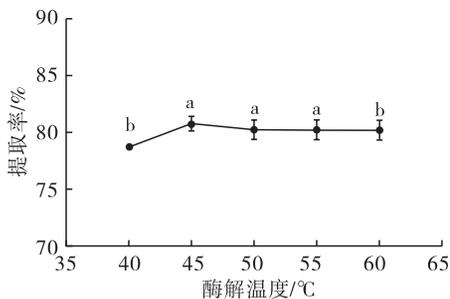


图 5 酶解温度对马油提取率的影响

Fig. 5 Effect of enzymatic hydrolysis temperature on extraction rate of horse oil

由图 5 可知,酶解温度在 45 ~ 55 °C 时,马油提取率变化不大,在酶解温度为 45 °C 时,马油提取率为 80.84%。这是由于细胞膜的渗透性和扩散系数随着温度的升高而增加,因而提高酶解温度可以降低油脂的黏度,增加油脂的扩散和传质,从而有利于提高油脂提取率。但温度过高,酶结构会发生变化,导致活性降低甚至失活,不利于油脂的提取。酶法提取温度较低,可有效保留油脂中的微量营养素,并提升其理化品质。综合考虑能耗和出油率,提取温度应尽可能低^[29],因此确定马油提取温度为 45 °C。

2.3 酶法提取马油响应面实验

2.3.1 响应面设计与回归模型方差分析

在单因素实验基础上,固定酶解温度 45 °C,以酶添加量(A)、料液比(B)、酶解时间(C)为考察因素,马油提取率(Y)为响应值,基于 Box - Behnken 设计三因素三水平响应面优化实验。响应面实验因素水平见表 3,响应面实验设计及结果见表 4,回归模型方差分析见表 5。

表 3 响应面实验因素水平

水平	A 酶添加量/(U/g)	B 料液比	C 酶解时间/h
-1	1 000	1:1	1.5
0	2 000	1:2	2.0
1	3 000	1:3	2.5

表 4 响应面实验设计与结果

实验号	A	B	C	马油提取率/%
1	-1	-1	0	71.35
2	1	-1	0	75.21
3	-1	1	0	68.39
4	1	1	0	77.33
5	-1	0	-1	67.35
6	1	0	-1	73.14
7	-1	0	1	69.32
8	1	0	1	75.43
9	0	-1	-1	71.37
10	0	1	-1	73.67
11	0	-1	1	75.45
12	0	1	1	72.18
13	0	0	0	82.13
14	0	0	0	79.43
15	0	0	0	80.42
16	0	0	0	79.37
17	0	0	0	81.59

表 5 回归模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	335.53	9	37.28	39.18	<0.000 1	**
A	76.26	1	76.26	80.15	<0.000 1	**
B	0.41	1	0.41	0.44	0.530 6	
C	5.87	1	5.87	6.17	0.042 0	*
AB	6.43	1	6.43	6.76	0.035 4	*
AC	0.03	1	0.03	0.03	0.874 3	
BC	7.77	1	7.77	8.16	0.024 4	*
A ²	92.56	1	92.56	97.28	<0.000 1	**
B ²	33.73	1	33.73	35.45	0.000 6	**
C ²	88.72	1	88.72	93.24	<0.000 1	**
残差	6.66	7	0.95			
失拟项	0.45	3	0.15	0.10	0.957 8	不显著
纯误差	6.21	4	1.55			
总和	342.19	16				

注: ** 表示影响极显著, $p < 0.01$; * 表示影响显著, $p < 0.05$

Note: ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

对表 4 的数据进行回归拟合分析,建立二次多项回归方程: $Y = 80.59 + 3.09A - 0.23B + 0.86C +$

$1.27AB + 0.08AC - 1.39BC - 4.69A^2 - 2.83B^2 - 4.59C^2$ 。由表 5 可知:模型 F 值为 39.18, p 值小于 0.000 1, 模型极显著, 说明该数学模型能够很好地解释马油提取率的变化; 失拟项 p 值为 0.957 8, 大于 0.05, 失拟项不显著, 说明方程可以预测响应值。模型的决定系数(R^2)为 0.980 5, 大于 0.85, 变异系数(CV)为 1.3%, 说明响应值与自变量之间有较高的拟合度, 线性关系显著, 可对实验进行理论预测。模型的校正决定系数(R^2_{Adj})为 0.955 5, 说明实验值与回归模型拟合度高, 可以很好地解释响应值的变化。因此, 此模型可以用来优化酶法提取马油工艺。一次项 A 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对马油提取率影响极显著, 一次项 C 和交互项 AB 、 BC 对马油提取率影响显著。各因素对马油提取率影响程度大小依次为 $A > C > B$, 即酶添加量 > 酶解时间 > 料液比。

2.3.2 最优工艺条件的确定与验证

通过 Design - Expert 13 软件分析得出酶法提取马油的最佳工艺条件为酶添加量 2 000 U/g、料液比 1:2、酶解时间 2 h, 在此条件下马油提取率预测值为 80.59%。在最佳工艺条件下进行 3 次验证实验, 马油提取率分别为 81.37%、82.05%、81.65%, 平均

值为 81.69%, 与预测值相差不大, 说明响应面法优化酶法提取马油的工艺可靠。

2.4 精炼对马油品质的影响

2.4.1 感官品质

粗马油与精炼马油的感官指标对比如表 6 所示。

表 6 粗马油和精炼马油感官指标对比

Table 6 Comparison of sensory index of crude horse oil and refined horse oil

项目	粗马油	精炼马油
外观	澄清、深黄	澄清、浅黄
气味	脂肪气味浓郁	淡淡马脂香气
黄度值(b^*)	5.21 ± 0.80^a	1.83 ± 0.28^b

注:同行不同字母代表差异显著($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters in the same row indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

由表 6 可知, 精炼前马油呈深黄色, 脂肪气味浓郁, 精炼后马油色泽变浅, 气味变淡, 黄度值显著降低, 满足 GB 10146—2015《食品安全国家标准 食用动物油脂》的要求, 说明精炼对马油感官品质提升效果明显。

粗马油和精炼马油的电子鼻雷达图与主成分分析(PCA)如图 6 所示。

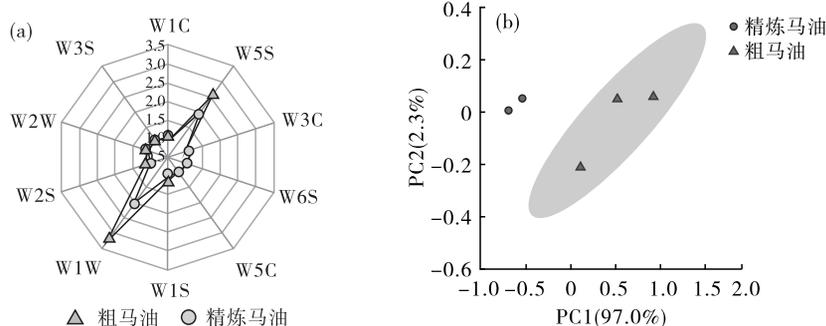


图 6 粗马油和精炼马油的电子鼻雷达图 (a) 与主成分分析 (b)

Fig. 6 Electronic nose radar images (a) and PCA (b) of crude horse oil and refined horse oil

由图 6a 可知, 粗马油和精炼马油均在 W1W 和 W5S 传感器上的响应值较大, 说明马油中无机硫化物和氮氧类化合物含量较高。前期研究表明, 马油相比其他畜禽(如牛、羊、猪)油脂的气味更为浓郁, 而马油的含硫化合物、芳香类化合物和氮氧类化合物气味明显强于其他动物油脂, 推测这些挥发性气味成分可能是导致马油气味较为浓郁的原因。精炼前后马油的主要挥发性气味并没有明显变化, 但精炼马油在 W1W 和 W5S 两个传感器上的响应值更低, 说明精炼有效降低了马油中无机硫化物和氮氧类化合物含量, 改善了马油整体风味品质。由图 6b 可知, PCA 中第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)方差贡献率分别为 97.0% 和 2.3%, 累积方差贡献

率超过 99%, 表明这两个主成分能够代表样品的主要特征信息。另外, 粗马油和精炼马油的样品距离较远, 不重叠, 表明精炼前后的马油能够通过电子鼻分析进行有效区分, 可能的原因是精炼工艺明显降低了马油中一些风味物质的含量, 从而对马油的风味特征产生了重要影响。以上结果与刘霜等^[30]的研究结论一致。

2.4.2 理化指标

粗马油和精炼马油理化指标对比如表 7 所示。

由表 7 可知, 粗马油和精炼马油的熔点和皂化值无显著差异($p > 0.05$)。精炼后, 马油的酸值(KOH)、过氧化值和水分及挥发物含量显著降低($p < 0.05$), 分别由 1.13 mg/g、0.75 mmol/kg 和

0.65%降至0.92 mg/g、0.63 mmol/kg和0.09%，碘值由81.14 g/100 g升高至88.95 g/100 g，各理化指标均符合GB 10146—2015《食品安全国家标准 食用动物油脂》要求，表明精炼能够有效提升油脂的品质，这与刘玉兰等^[31]的研究结果一致。

表7 粗马油和精炼马油理化指标对比

Table 7 Comparison of physicochemical properties of crude horse oil and refined horse oil

项目	粗马油	精炼马油
酸值(KOH)/(mg/g)	1.13 ± 0.01 ^a	0.92 ± 0.03 ^b
过氧化值/(mmol/kg)	0.75 ± 0.01 ^a	0.63 ± 0.01 ^b
碘值/(g/100 g)	81.14 ± 0.44 ^b	88.95 ± 2.04 ^a
水分及挥发物含量/%	0.65 ± 0.02 ^a	0.09 ± 0.01 ^b
熔点/°C	35.76 ± 0.30 ^a	35.53 ± 0.25 ^a
皂化值(KOH)/(mg/g)	193.32 ± 5.83 ^a	192.51 ± 3.37 ^a

2.4.3 脂肪酸组成

粗马油和精炼马油脂肪酸组成及含量如表8所示。

表8 粗马油和精炼马油脂肪酸组成及含量

Table 8 Fatty acid composition and content of crude horse oil and refined horse oil %

脂肪酸	粗马油	精炼马油
癸酸(C10:0)	0.07 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.01 ^a
月桂酸(C12:0)	0.16 ± 0.01 ^a	0.17 ± 0.01 ^a
肉豆蔻酸(C14:0)	3.10 ± 0.10 ^a	2.78 ± 0.01 ^b
十五烷酸(C15:0)	0.24 ± 0.00 ^a	0.23 ± 0.00 ^a
棕榈酸(C16:0)	24.79 ± 0.52 ^a	23.63 ± 0.03 ^a
十七烷酸(C17:0)	0.48 ± 0.01 ^a	0.47 ± 0.00 ^a
硬脂酸(C18:0)	6.84 ± 0.22 ^a	6.59 ± 0.03 ^a
花生酸(C20:0)	0.11 ± 0.00	-
肉豆蔻油酸(C14:1n5)	0.10 ± 0.01 ^a	0.12 ± 0.00 ^a
棕榈油酸(C16:1n7)	2.98 ± 0.13 ^b	3.15 ± 0.42 ^a
十七碳一烯酸(C17:1n7)	-	0.39 ± 0.06
油酸(C18:1n9c)	29.55 ± 0.70 ^b	31.93 ± 0.16 ^a
花生一烯酸(C20:1)	0.30 ± 0.01 ^b	1.51 ± 0.09 ^a
亚油酸(C18:2n6c)	28.46 ± 0.67 ^a	28.10 ± 0.14 ^b
γ-亚麻酸(C18:3n6)	0.08 ± 0.00	-
α-亚麻酸(C18:3n3)	1.93 ± 0.09 ^a	0.83 ± 0.03 ^b
二十碳二烯酸(C20:2n6)	0.65 ± 0.02	-
反油酸(C18:1n9t)	0.16 ± 0.01	-
反亚油酸(C18:2n6t)	-	0.04 ± 0.00
饱和脂肪酸(SFA)	35.78 ± 0.87 ^a	33.93 ± 0.10 ^b
单不饱和脂肪酸(MUFA)	32.93 ± 0.84 ^b	37.10 ± 0.73 ^a
多不饱和脂肪酸(PUFA)	31.13 ± 0.79 ^a	28.93 ± 0.17 ^b
不饱和脂肪酸(UFA)	64.06 ± 1.62 ^b	66.03 ± 0.89 ^a
反式脂肪酸(TFA)	0.16 ± 0.01 ^a	0.04 ± 0.00 ^b

注：-表示未检出

Note: -. Not detected

由表8可知，粗马油中共检出17种脂肪酸，精炼马油中共检出15种脂肪酸，马油精炼前后脂肪酸组成变化较小，主要脂肪酸均为棕榈酸、油酸和亚油酸。精炼后马油的饱和脂肪酸含量由35.78%降至33.93%，单不饱和脂肪酸含量由32.93%增加至37.10%，多不饱和脂肪酸含量则略微下降，由31.13%降至28.93%。精炼马油不饱和脂肪酸含量相比粗马油升高3.1%。

马油中含有少量反式脂肪酸，精炼后马油中反式脂肪酸含量由0.16%降至0.04%，这与马油精炼过程中未进行高温脱臭紧密相关。相关文献表明植物油在高温脱臭过程中易产生反式脂肪酸，这是因为油脂中的不饱和脂肪酸在高温下发生异构化反应所致^[32]，因此精炼应在合适的温度下进行。

3 结论

本研究通过单因素实验及响应面优化实验对新疆马油的酶法提取工艺进行优化，确定了最佳提取工艺条件为料液比1:2、中性蛋白酶添加量2000 U/g、酶解温度45℃、酶解时间2 h，在此条件下马油提取率为81.69%。精炼后马油色泽变浅，有淡淡马脂香气，其无机硫化物和氮氧类化合物含量明显降低，酸值、过氧化值和水分及挥发物含量显著降低，碘值显著升高，不饱和脂肪酸含量显著升高。综上，精炼处理显著提升了新疆马油的品质。

参考文献：

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [2] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [3] 王文君. 超临界CO₂流体萃取马脂及流变特性和贮藏品质研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [4] 李华, 荣群, 张晓萍, 等. 四个部位的马脂肪中脂肪酸成分的研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(6): 1341-1344.
- [5] 谭为. 新疆马脂功效与透皮机制的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2014.
- [6] 张晓萍, 李华, 石庆华, 等. 马油的透皮性能研究[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(6): 1257-1260.
- [7] 王瑛瑶, 栾霞, 魏翠平, 等. 酶技术在油脂加工业中的应用[J]. 中国油脂, 2010, 35(7): 8-11.
- [8] SINHA L K, HALDAR S, MAJUMDAR G C. Effect of operating parameters on mechanical expression of solvent-soaked soybean-grits[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(5): 2942-2949.
- [9] YANG J, WEN C, DUAN Y, et al. The composition, extraction, analysis, bioactivities, bioavailability and

- applications in food system of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 118: 252 – 260.
- [10] 陈彦婕, 唐嘉诚, 宫萱, 等. 鱼油提取、多不饱和脂肪酸富集及 EPA 和 DHA 的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 205 – 210, 220.
- [11] DUNFORD N T. Enzyme – aided oil and oilseed processing: Opportunities and challenges [J/OL]. *Curr Opin Food Sci*, 2022, 48: 100943 [2024 – 06 – 03]. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100943>.
- [12] NDE D, FONCHA A. Optimization methods for the extraction of vegetable oils: A review[J/OL]. *Processes*, 2020, 8(2): 209 [2024 – 06 – 03]. <https://doi.org/10.3390/pr8020209>.
- [13] 沈玉平, 周旭, 张祖姣, 等. 水酶法提取油脂研究进展[J]. *中国油脂*, 2021, 46(2): 14 – 19.
- [14] 王丹丽, 袁雅雯, 王淇, 等. 非热加工技术辅助水酶法提取植物油脂的研究进展[J]. *核农学报*, 2023, 37(8): 1643 – 1650.
- [15] 樊振江, 孟楠, 栗亚琼, 等. 米糠油的提取工艺与营养价值研究进展[J]. *食品科技*, 2023, 48(11): 171 – 177.
- [16] 李群, 李颜, 董绪燕, 等. 响应面法优化甜瓜籽油的超声辅助提取工艺及其品质分析[J]. *中国油脂*, 2023, 48(5): 5 – 11.
- [17] 邓健康, 赵慧博, 耿明雪, 等. 水酶法提取核桃油研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(15): 149 – 155.
- [18] 郝倩, 岳昊. 大豆油水酶法提取技术研究进展[J/OL]. *中国油脂*, 2024: 1 – 11 [2024 – 06 – 03]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230637>.
- [19] 李招, 王建文, 王建辉, 等. 大鲵油的水酶法提取及精制过程中脂肪酸组成的变化[J]. *天然产物研究与开发*, 2019, 31(11): 1975 – 1981.
- [20] 陈彦婕, 唐嘉诚, 宫萱, 等. 大鲵肝油的酶解法制备工艺优化及理化性质分析[J]. *中国油脂*, 2023, 48(3): 1 – 7.
- [21] 单钱艺. 中华鳖加工副产物中油脂加工精炼及抗氧化的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [22] 王玉丹, 马玉莹, 韩玲, 等. 水酶法提取羊油的工艺优化及理化分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(2): 200 – 208.
- [23] 郑晶. 马油不饱和脂肪酸提取及富集研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- [24] 刘晨, 陈复生, 牛瑞浩, 等. 水酶法提取花生油研究进展[J]. *食品工业*, 2020, 41(3): 262 – 266.
- [25] MWAURAH P W, KUMAR S, KUMAR N, et al. Novel oil extraction technologies: Process conditions, quality parameters, and optimization [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2020, 19(1): 3 – 20.
- [26] 蓝东明, 万楚枫, 陈莹, 等. 甘油二酯微胶囊中油脂的酶法提取[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(12): 152 – 158.
- [27] 韩海娜. 鹅油制备甘油二酯微胶囊工艺与功能研究[D]. 山东 青岛: 青岛农业大学, 2014.
- [28] 陈阳, 王鹏, 潘凯进, 等. 三相分配法提取青稞 β -葡聚糖工艺优化及其分子量分布研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 220 – 228.
- [29] GAO Y, DING Z, LIU Y, et al. Aqueous enzymatic extraction: A green, environmentally friendly and sustainable oil extraction technology[J/OL]. *Trends Food Sci Technol*, 2024, 144: 104315 [2024 – 06 – 03]. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104315>.
- [30] 刘霜, 彭思敏, 廖卢艳, 等. 茶油精炼过程中脂肪酸与风味物质变化研究[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(7): 69 – 72.
- [31] 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, 21.
- [32] 谢岩黎, 严瑞东, 王芬, 等. 食用植物油中反式脂肪酸的暴露评估[J]. *食品科技*, 2012, 37(1): 169 – 171.