

# 尿素包合法富集纯化马齿苋中多不饱和脂肪酸的工艺优化

李冠文, 王辉敏, 杨金梅, 豆永奇, 秦楠, 刘星\*

(山西中医药大学中药与食品工程学院, 榆次 030619)

**摘要:** **目的** 优化尿素包合法富集纯化马齿苋中的多不饱和脂肪酸的工艺条件。**方法** 将新鲜马齿苋经索氏提取后所得的脂肪油通过尿素包合的方式富集纯化多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFAs), 并以 PUFAs 总含量为考察指标, 利用高效液相色谱法测定其含量。在单因素实验的基础上采用响应曲面设计对纯化工艺进行优化, 对比新鲜马齿苋全草油与纯化物 PUFAs 理化性质上的区别。**结果** 尿素包合法富集纯化的最佳工艺为: 尿素与乙醇体积比 1:10 (*V:V*), 尿素与脂肪酸质量比 12:1 (*m:m*), 结晶温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 此时 PUFAs 含量预测值为 110.76 mg/g, 实际值为 116.00 mg/g。就理化性质相比较而言, 纯化物 PUFAs 的酸值无显著差异, 碘值和过氧化值显著提高, 皂化值显著降低( $P<0.05$ ), 表明纯化物 PUFAs 的不饱和度更高, 基本达到本实验的目的。**结论** 该富集纯化工艺操作简单、方便快捷, 适合分离纯化马齿苋脂肪酸类物质, 可为马齿苋多不饱和脂肪酸向功能食品方向发展提供参考。

**关键词:** 尿素包合法; 新鲜马齿苋全草; 高效液相色谱法; 多不饱和脂肪酸; 理化性质

## Optimization of enrichment and purification of polyunsaturated fatty acids in *Portulaca oleracea* by urea inclusion method

LI Guan-Wen, WANG Hui-Min, YANG Jin-Mei, DOU Yong-Qi, QIN Nan, LIU Xing\*

(College of Pharmaceutical and Food Engineering, Shanxi University of Chinese Medicine, Yuci 030619, China)

**ABSTRACT: Objective** To optimize the process conditions of enrichment and purification of polyunsaturated fatty acids in *Portulaca oleracea* by urea inclusion method. **Methods** Polyunsaturated fatty acids were enriched and purified by urea inclusion from the fat oil, which obtained from the extraction of fresh *Portulaca oleracea* by Soxhlet. Taking the total content of polyunsaturated fatty acids (PUFAs) as an index, its content was determined by high performance liquid chromatography. On the basis of single factor experiment, the purification process was optimized by response surface design, and the differences of physicochemical properties between fresh *Portulaca oleracea* whole grass oil and purified PUFAs were compared. **Results** The optimal enrichment and purification process of urea inclusion method was as follows: The volume ratio of urea to ethanol was 1:10 (*V:V*), the mass ratio of urea to fatty acid was 12:1 (*m:m*), and the crystallization temperature was  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , on which condition, the predicted PUFAs

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201903D221032)、山西省自然科学基金面上项目(201801D121256)、山西中医药大学培育项目(2019-PY-109)

Fund: Supported by the Shanxi Key Research and Development Program Project (201903D221032), Shanxi Natural Science Foundation Surface Project (201801D121256), and Shanxi University of Traditional Chinese Medicine Breeding Project (2019-PY-109)

\*通信作者: 刘星, 博士, 副教授, 主要研究方向为药食两用中药功能产品研究。E-mail: sxzydxlx@163.com

\*Corresponding author: LIU Xing, Ph.D, Associate Professor, College of Pharmaceutical and Food Engineering, Shanxi University of Chinese Medicine, Yuci 030619, China. E-mail: sxzydxlx@163.com

content was 110.76 mg/g, and the actual value was 116.00 mg/g. In terms of physical and chemical properties, there was no significant difference in the acid value of the purified PUFAs. The iodine value and peroxide value increased significantly, and the saponification value decreased significantly ( $P < 0.05$ ), indicating that the unsaturated degree of the purified PUFAs was higher, which basically reached the purpose of this experiment. **Conclusion** The enrichment and purification process is simple, convenient and suitable for the separation and purification of fatty acids in *Portulaca oleracea*, which can provide reference for the development of polyunsaturated fatty acids in *Portulaca oleracea* to functional foods.

**KEY WORDS:** urea inclusion method; whole grass of fresh *Portulaca oleracea*; high performance liquid chromatography; polyunsaturated fatty acids; physicochemical property

## 0 引言

据《中国药典》记载,马齿苋(*Portulaca oleracea* L.)为一年生肉质植物,其有效部位为干燥地上部分,化学成分主要有生物碱类、萜类、香豆素类、黄酮类、有机酸类、挥发油及多糖类等,具有清热解毒、凉血止血等功效及提高免疫力、降血糖、降血脂、抗氧化等药理作用,是民间及中西医常用于炎症治疗的中药材<sup>[1-4]</sup>。国内外研究表明,马齿苋有效成分中总黄酮含量占全草总重量的 7.67%<sup>[5]</sup>,维生素 C 含量约为 0.009%<sup>[6]</sup>,多糖含量达到 5.672%<sup>[7-8]</sup>。马齿苋作为药食同源中药之一,其中富含的多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFAs)对人体健康具有重要作用,但目前国内外对马齿苋脂肪酸富集纯化工艺的研究匮乏。范少丽等<sup>[9]</sup>通过亚临界流体萃取发现马齿苋全草油的提取率为 2.91%,其中 PUFAs 相对含量高达 64.23%。马齿苋全草产地、前处理方法、提取方式以及甲酯化方法等都可能造成以上现象。PUFAs 是人类生命的关键营养素,是人体不可合成、必须从外界获取的必需脂肪酸。增大不饱和脂肪酸的摄入,同时减少饱和脂肪酸的摄入,有利于降低胆固醇、软化血管以及预防动脉粥样硬化,研究表明膳食摄入 PUFAs 可显著降低心血管疾病风险<sup>[10]</sup>,此外之前的多数研究针对马齿苋干药材,而民间常以新鲜马齿苋草为原料进行食用或治疗,所以对新鲜马齿苋全草中多不饱和脂肪酸进行研究具有重要意义。

脂肪酸富集纯化方法大概分为 2 类:传统方法和新型方法。常见的传统方法包括尿素包合法、冷冻结晶法等,新型方法包括分子蒸馏法、银离子络合法等。新型方法相比传统方法具有工艺简单、提取时间短、无溶剂残留、纯化度高等优点,同时其缺点表现在投资成本高,很难实现工业化生产<sup>[11-13]</sup>。现代研究者也采用 2 种或者多种方式相结合的方法对 PUFAs 进行富集纯化,且富集纯化效果更好<sup>[14-16]</sup>。尿素包合法是利用尿素与直链脂肪酸间结晶为六面晶体的原理将饱和脂肪酸及单不饱和脂肪酸进行包合,从而提高 PUFAs 纯度,该法具有成本低、设备简单易于操作等特

点<sup>[17-19]</sup>,有利于实现马齿苋纯化物的大规模生产。

因此,本研究采用尿素包合法对新鲜马齿苋全草油中 PUFAs 进行富集纯化,并优化工艺条件,采用单因素实验和响应曲面实验,以 PUFAs 含量为考察指标,旨在找到一种方便、快捷、纯度较高的富集纯化工艺,丰富新鲜马齿苋的附加价值,为马齿苋 PUFAs 系列功能食品的开发提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

新鲜马齿苋全草采摘于山东滨州种植基地; $\alpha$ -亚麻酸对照品、亚油酸对照品(纯度 > 98%,北京索莱宝科技有限公司);石油醚(60~90 °C)、尿素、乙醇、无水硫酸钠(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);甲醇、乙腈(色谱纯,河北百灵威超精细材料有限公司);尿素试纸(陆恒生物有限公司)。

JYL-Y912 九阳摩卡破壁机(杭州九阳生活电器有限公司);SB25-120 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司);SHZ-D(III)循环水式真空泵(巩义市予华仪器有限责任公司);SY-2000 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);GZX-9140MBE 电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂);AR223CN 电子天平(美国奥豪斯仪器有限公司);RIGOL-3000 高效液相色谱仪(北京普源精电科技有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 实验前处理

##### (1)马齿苋脂肪油的制备

称取约 20.00 g 左右的新鲜马齿苋全草于烧瓶中,按 1:22 (*m*:*V*)比例加入适量石油醚(60~90 °C)溶液,利用超声辅助索氏提取法(超声功率 500 W、超声温度 70 °C)提取 61 min,抽滤,按 49:1 (*V*:*V*)比例旋蒸浓缩,回收石油醚,恒重后得到新鲜马齿苋全草油。

##### (2)样品溶液的制备

精密称定 0.100 g 样品于 10 mL 容量瓶,精密加入甲

醇 6 mL, 超声 1~2 min 使不饱和脂肪酸与甲醇混合均匀, 加甲醇定容至刻度线, 振荡混合均匀, 有机微孔滤膜过滤, 即得样品溶液。

### (3) 对照品溶液的制备

精密称定 20 mg  $\alpha$ -亚麻酸对照品, 置于 50 mL 容量瓶中。加入 30 mL 甲醇溶解并充分混合, 甲醇定容至刻度线, 有机微孔滤膜过滤, 即得 0.4 mg/mL 的对照品溶液。

## 1.2.2 马齿苋全草油 PUFAs 的富集与纯化

### (1) 单因素实验

将适量尿素溶于 95%乙醇溶液中使尿素与乙醇达到一定比例(见表 1), 放入 60 °C 水浴锅中搅拌直至溶液澄清, 迅速倒入盛有约 1 g 左右马齿苋全草油的烧瓶中, 使尿素与脂肪酸达到一定比例(见表 1), 混匀后, 于 60 °C 水浴下加热搅拌 10 min, 冷却至室温后开始结晶, 然后置于低温冰箱中更深入结晶, 到达一定结晶时间后, 抽滤、旋蒸、恒重后得到半固体。加入 5 mL 蒸馏水, 用 HCl 调节 pH 至 5~6 后加适量石油醚进行萃取, 用蒸馏水洗涤醚层至用尿素试纸检测无尿素为止, 用无水硫酸钠干燥 4 h, 即可得到纯化物 PUFAs。

按表 1 设计单因素实验, 按照上述操作分别考察尿素与乙醇体积比( $V:V$ ), 尿素与脂肪酸质量比( $m:m$ ), 结晶温度(°C)以及结晶时间(h)对马齿苋 PUFAs 含量的影响。

表 1 单因素实验设计因素水平表

Table 1 Single factor experiment design factor level table

尿素/乙醇 ( $V:V$ )	尿素/脂肪酸 ( $m:m$ )	结晶温度 /°C	结晶时间 /h
1:5	4:1	-6	6
1:10	6:1	-12	12
1:15	8:1	-18	18
1:20	10:1	-24	24
1:25	12:1	-30	30

### (2) 尿素包合法的富集与纯化工艺优化

前期实验研究表明新鲜马齿苋全草油中脂肪酸组成含量由高到低依次为棕榈酸、亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸、油酸、硬脂酸、肉豆蔻酸、二十二碳酸、月桂酸、棕榈油酸、十五碳酸、花生酸、十七碳酸。其中 PUFAs 有  $\alpha$ -亚麻酸和亚油酸(相对含量达 27.6104%), 利用此结果对后续实验进行设计。

采用三因素三水平方式, 利用响应曲面设计对尿素包合法富集与纯化马齿苋脂肪油的工艺进行优化。以高效液相色谱法测定其中 PUFAs 含量, 并将其作为响应值, 考察尿素与乙醇体积比, 尿素与脂肪酸质量比以及结晶温度之间的交互作用对 PUFAs 含量的影响。响应曲面设计因素水平表如表 2 所示。

表 2 响应曲面设计因素水平表

Table 2 Level table of response surface design factors

	尿素/乙醇 ( $V:V$ )	尿素/脂肪酸 ( $m:m$ )	结晶温度 /°C
1	1:10	12:1	-18
0	1:15	10:1	-24
-1	1:20	8:1	-30

### (3) 高效液相色谱条件

色谱柱: Compass  $C_{18}$  柱(250 mm×4.6 mm, 5  $\mu$ m); 流动相: 甲醇-乙腈-0.5%磷酸水溶液(60:22:18,  $V:V:V$ ); 柱温: 26 °C; 检测波长: 210 nm; 流速: 1.1 mL/min。

### 1.2.3 马齿苋脂肪酸的理化指标测定

对马齿苋全草油及马齿苋纯化物 PUFAs 分别参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》、GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》、GB/T 5532—2008《动植物油脂 碘值的测定》、GB/T 5534—2008《动植物油脂 皂化值的测定》进行酸值、过氧化值、碘值以及皂化值指标的测定。

### 1.2.4 数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2010 及 SPSS 22.0 软件作图分析并借助 Design Expert 8.6 软件进行响应面优化实验及数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果与分析

#### 2.1.1 尿素与乙醇体积比对 PUFAs 富集的影响

通过尿素与乙醇体积比单因素实验结果可知, 在一定包含条件下, PUFAs 含量随着尿素与乙醇体积比的减小而呈现明显的先增长后降低趋势。这可能是由于尿素随着乙醇体积的增多而溶解度升高, 对饱和以及单不饱和脂肪酸的包含效率更高, 当尿素与乙醇体积比达到 1:15 后, 尿素达到饱和状态, 随着体积的继续增大, 包含反应可能出现向逆方向进行, 因此溶液中 PUFAs 含量先增多后减少<sup>[20]</sup>。综合以上分析, 尿素与乙醇取 1:10、1:15、1:20 ( $V:V$ ) 进入后续实验。

#### 2.1.2 尿素与脂肪酸质量比对 PUFAs 富集的影响

通过尿素与脂肪酸质量比单因素分析结果可以得出, 随着尿素与脂肪酸质量比的增大, PUFAs 含量表现为平稳-增长-降低趋势, 在尿素与脂肪酸质量比为 10:1 时有最大值。这可能是由于在一定范围内, 尿素特异性包含反应比较缓慢, 超过该范围后, 特异性正向包含反应持续进行, 未包含的 PUFAs 含量达到峰值, 峰值之后出现尿素非特异性包含程度上升, 即部分 PUFAs 被尿素包含。综合以上分析, 尿素与脂肪酸取 8:1、10:1、12:1 ( $m:m$ ) 进入后续实验。

#### 2.1.3 结晶温度对 PUFAs 富集的影响

随着尿素包含时结晶温度的降低, PUFAs 含量呈现出

小幅度上升-小幅度降低-大幅增长-降低的趋势。这是由于结晶温度对尿素包合反应的影响较为复杂,一方面降温会降低反应速率,另一方面降温有利于结晶体的形成<sup>[18]</sup>。随着结晶温度的降低,尿素包合反应更有利于形成结晶体,当结晶温度超过-24 °C后,非结晶体在低温状态下会形成结晶物,抽滤后滤饼中将会损失掉本该溶解在溶液中的 PUFAs。综合以上分析,结晶温度取-18、-24、-30 °C进行后续实验。

#### 2.1.4 结晶时间对 PUFAs 富集的影响

研究结果表明,PUFAs 含量随着结晶时间的延长而呈现持续增大趋势,推测可能有以下 2 个原因。(1)实验选取了不合适的时间段,导致在该时间段内尿素包合反应还未进行完全。(2)马齿苋纯化物 PUFAs 中还有其他 PUFAs 未被检出,随着结晶时间的延长,其他 PUFAs 被缓慢分离出来。结合以上 3 个因素的 PUFAs 含量,最终固定结晶时间为 6 h 进行后续响应曲面设计。

## 2.2 尿素包合法富集与纯化工艺优化结果与分析

### 2.2.1 响应曲面设计实验方案及结果

结合上述单因素结果分析,选取尿素与乙醇体积比(简称尿醇比)、尿素与脂肪酸质量比(简称尿脂比)及结晶温度三因素进行 Box-Behnken 响应曲面设计的三因素三水平实验,其方案和结果如表 3 所示。

### 2.2.2 响应曲面法设计试验结果方差分析

对表 3 数据进行回归分析,得到 PUFAs 含量( $Y$ )的回归方程:  $Y=83.35-5.52A+2.98B-4.77C-9.03AB+5.54AC-0.39BC+11.11A^2-1.22B^2-6.94C^2$ ,在  $\alpha=0.05$  显著水平下剔除不显著项后,回归方程简化为:  $Y=83.35-5.52A-4.77C-9.03AB+5.54AC+11.11A^2-6.94C^2$ 。

回归模型方差分析结果(表 4)得出,整体模型失拟度  $P=0.2050>0.1$ ,模型项  $P=0.0026<0.01$ ,表明此模型与实际情况相拟合;此外尿醇比、结晶温度对尿素包合效果影响分别为极显著、显著;尿醇比与尿脂比交互作用影响极显著、尿醇比与结晶温度交互作用影响显著(3D 响应曲面见

图 1);尿醇比、结晶温度二次项影响极显著。由此可得各因素对纯化物 PUFAs 含量的影响顺序依次为  $A$ (尿醇比) $>C$ (结晶温度) $>B$ (尿脂比),即尿素与乙醇体积比对 PUFAs 总含量影响最大,结晶温度次之,尿素与脂肪酸质量比的影响最小。

表 3 响应曲面设计实验方案及结果  
Table 3 Response surface design test scheme and results

实验号	A 尿醇比 (V:V)	B 尿脂比 (m:m)	C 结晶温 度/°C	PUFAs 含量 /(mg/g)
1	-1	0	1	79.50
2	0	-1	-1	76.70
3	0	1	-1	79.28
4	-1	1	0	90.45
5	1	0	-1	84.44
6	0	-1	1	71.87
7	0	0	0	79.96
8	0	1	1	72.91
9	1	-1	0	114.09
10	-1	-1	0	85.94
11	0	0	0	84.02
12	0	0	0	80.40
13	1	1	0	82.49
14	0	0	0	84.47
15	0	0	0	87.90
16	-1	0	-1	104.05
17	1	0	1	82.06

表 4 响应曲面法设计试验结果方差分析  
Table 4 Analysis of variance of response surface method design test results

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1640.01	9	182.22	10.59	0.0026	**
A-尿醇比	243.48	1	243.48	14.14	0.0071	**
B-尿脂比	70.87	1	70.87	4.12	0.0820	
C-结晶温度	181.79	1	181.79	10.56	0.0141	*
AB	325.98	1	325.98	18.94	0.0033	**
AC	122.95	1	122.95	7.14	0.0319	*
BC	0.60	1	0.60	0.035	0.8569	

表 4(续)

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
$A^2$	519.53	1	519.53	30.18	0.0009	**
$B^2$	6.23	1	6.23	0.36	0.5664	
$C^2$	202.96	1	202.96	11.79	0.0109	**
残留物	120.51	7	17.22			
失拟项	77.85	3	25.95	2.43	0.2050	
误差	42.65	4	10.66			
总离差	1760.52	1	6			

注: \*表示  $P < 0.05$ , 差异显著; \*\*表示  $P < 0.01$ , 差异极显著。

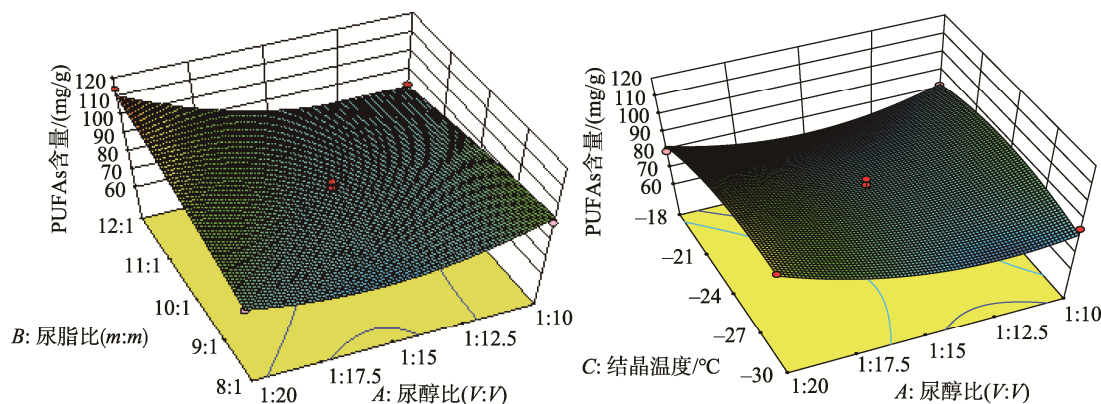


图 1 交互作用对 PUFAs 总含量的响应曲面

Fig.1 Response surface of interaction to total content of PUFAs

2.2.3 回归模型方程的验证

由表 5 可以看出, PUFAs 总含量预测值为 110.76 mg/g 与平均实际值 116.00 mg/g 相近, 平均误差为 1.75 mg/g, 说明此模型方程与实际情况拟合度较好, 利用响应曲面法优化尿素包合法富集纯化马齿苋 PUFAs 工艺是可行的。

2.2.4 马齿苋脂肪酸的理化指标测定结果

表 6 结果显示, 新鲜马齿苋全草油与马齿苋纯化物 PUFAs 之间酸值差异不显著( $P > 0.05$ ), 而过氧化值、碘值以及皂化值存在显著差异( $P < 0.05$ )。马齿苋纯化物 PUFAs 的过氧化值、碘值与全草油相比较, 是因为纯化物 PUFAs 中含多个双键, 结构复杂, 氧化稳定性较差, 易发生氧化腐败现象<sup>[21-23]</sup>。而皂化值相对较低, 表明纯化物 PUFAs 相对分子质量较大, 其发生皂化反应的几率越小, PUFAs 的品质更好<sup>[24-26]</sup>。

3 结论

本研究中新鲜马齿苋全草油提取率达 2.90%, 尿素包合法富集纯化马齿苋 PUFAs 的最佳工艺条件为: 尿素与乙醇 1:10 (V:V), 尿素与脂肪酸 12:1 (m:m), 结晶温度 -20 °C, 此时 PUFAs 含量为 116.00 mg/g, 纯度为 73.9015% > 27.6104%。通过以上实验对比, 发现尿素与乙醇体积比对 PUFAs 含量有极显著影响, 且富集纯化后的 PUFAs 不饱和度更高、质量更好, 符合本实验目的。通过响应曲面法优化富集纯化工艺及对比优化前后油脂的理化性质, 建立了易于操作、方便检测的尿素包合工艺及检测方法, 对下一步新鲜马齿苋全草 PUFAs 脂肪酸组成的鉴定、产品微胶囊化及功能食品功效评价等提供了理论数据基础。

表 5 富集工艺验证实验结果  
Table 5 Experimental results of enrichment process validation

实验号	PUFAs 总含量预测值/(mg/g)	PUFAs 总含量实际值/(mg/g)	绝对误差/(mg/g)	平均值/(mg/g)	平均误差/(mg/g)
1	110.76	122.88	12.12		
2	110.76	101.63	9.13	116.00	1.75
3	110.76	123.47	12.71		

表6 马齿苋全草油与纯化物 PUFAs 理化性质对比( $n=3$ )  
Table 6 Comparison of physicochemical properties between whole grass oil of *Portulaca oleracea* oil and purified PUFAs ( $n=3$ )

理化指标	马齿苋全草油	纯化物 PUFAs
酸值/(mg/g)	70.125±0.010 <sup>a</sup>	70.125±0.020 <sup>a</sup>
过氧化值/(g/100 g)	3.430±0.087 <sup>b</sup>	10.959±0.073 <sup>a</sup>
碘值/(g/100 g)	65.988±0.229 <sup>b</sup>	97.615±0.074 <sup>a</sup>
皂化值/(mg/g)	364.650±0.121 <sup>a</sup>	255±0.102 <sup>b</sup>

注: 同一行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

### 参考文献

- 张琪琳, 舒亚民, 潘祥林, 等. 药食同源植物多糖治疗溃疡性结肠炎的药理作用及机制研究进展[J]. 药物评价研究, 2021, 44(3): 644–651.  
ZHANG QL, SHU YM, PAN XL, *et al.* Research progress on pharmacological effects and mechanism of medicinal and edible plant polysaccharides in the treatment of ulcerative colitis [J]. Drug Eval Res, 2021, 44(3): 644–651.
- TANG W, LIU D, LI Y, *et al.* Structural characteristics of a highly branched and acetylated pectin from *Portulaca oleracea* L. [J]. Food Hydrocoll, 2021, 116: 106659–106669.
- HOU JL, ZHOU X, WANG P, *et al.* An integrative pharmacology-based approach for evaluating the potential effects of purslane seed in diabetes mellitus treatment using UHPLC-LTQ-Orbitrap and TCMIP V2.0 [J]. Front Pharmacol, 2020, 11: 2302–2319.
- 李海涛, 葛翎, 段国梅, 等. 马齿苋的化学成分及药理活性研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(6): 43–47.  
LI HT, GE L, DUAN GM, *et al.* Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Portulaca oleracea* L. [J]. Chin Wild Plant Res, 2020, 39(6): 43–47.
- 欧燕香, 冯时茵, 黄思文, 等. 一测多评法测定马齿苋中4种黄酮类成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 990–996.  
OU YX, FENG SY, HUANG SW, *et al.* Multiple evaluation method for the determination of four flavonoids in *Portulaca oleracea* L. [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(3): 990–996.
- DEWANTI FD, PUJASMANO B, SUKENDAH, *et al.* Analysis of ascorbic acid content (vitamin C) of purslane (*Portulaca oleracea* L.) at various altitudes in east Java, Indonesia [J]. Earth Env Sci, 2021, 637(1): 12074–12077.
- 黄小强, 丁辉, 刘顺和, 等. 马齿苋多糖对四氯化碳诱导的小鼠急性肝损伤的保护作用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 315–319, 324.  
HUANG XQ, DING H, LIU SH, *et al.* The protective effect of purslane polysaccharide on carbon tetrachloride-induced acute liver injury in mice [J]. Food Ind Technol, 2020, 41(23): 315–319, 324.
- 陈凌, 曹巧巧, 陶昆, 等. 不同生长期马齿苋茎叶提取物的体外抗氧化活性比较[J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(6): 932–936.  
CHEN L, CAO QQ, TAO K, *et al.* Comparison of antioxidant activities in vitro of stem and leaf extracts from *Portulaca oleracea* L. at different growth stages [J]. J Anhui Agric Univ, 2015, 42(6): 932–936.
- 范少丽, 刘璐萍, 付学, 等. 马齿苋全草油的亚临界流体萃取、脂肪酸分析及抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(9): 203–208.  
FAN SL, LIU LP, FU X, *et al.* Subcritical fluid extraction, fatty acid analysis and antioxidant activity of purslane whole herb oil [J]. Food Ferment Ind, 2015, 41(9): 203–208.
- 陈雪, 梁克红, 王靖, 等. 膳食中多不饱和脂肪酸对心血管疾病防治研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(10): 87–94.  
CHEN X, LIANG KH, WANG J, *et al.* Research progress on prevention and treatment of cardiovascular diseases by polyunsaturated fatty acids in diet [J]. China Oil Fat, 2020, 45(10): 87–94.
- 周端, 王晓宇, 李道明, 等.  $\alpha$ -亚麻酸不同富集纯化方法的比较[J]. 中国油脂, 2013, 38(2): 77–80.  
ZHOU D, WANG XY, LI DM, *et al.* Comparison of different enrichment and purification methods of  $\alpha$ -linolenic acid [J]. China Oil Fat, 2013, 38(2): 77–80.
- 唐佳芮, 魏冰, 石珊珊.  $\alpha$ -亚麻酸分离纯化技术研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(8): 28–31, 38.  
TANG JR, WEI B, SHI SS. Research progress on separation and purification technology of  $\alpha$ -linolenic acid [J]. China Oil Fat, 2020, 45(8): 28–31, 38.
- 韦东林, 魏冰, 石珊珊.  $\alpha$ -亚麻酸高效提取纯化工艺研究[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(2): 1–3, 6.  
WEI DL, WEI B, SHI SS. Study on the efficient extraction and purification process of  $\alpha$ -linolenic acid [J]. Cere Food Ind, 2020, 27(2): 1–3, 6.
- ALEJANDRA E, ANDRES R, GRETEL DR, *et al.* EPA/DHA concentrate by urea complexation decreases hyperinsulinemia and increases Plin5 in the liver of mice fed a high-fat diet [J]. Molecules, 2020, 25(14): 3289–3304.
- MARIAJOSE GF, DMITRI F, SVETLANA L, *et al.* Highly concentrated very long-chain PUFA obtainment by Urea complexation methodology [J]. Environ Technol Innov, 2020, 18: 100736–100742.
- QUANYI W, KAIFENG D, CHUNMEI J, *et al.* Optimization of linoleic acid from *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels by response surface methodology [J]. Adv Mater Res, 2012, 1536: 1222–1227.
- 李泉岑, 龙勇益, 夷娜, 等. 尿素包合法富集核桃油不饱和脂肪酸工艺优化[J]. 现代食品, 2020, (20): 99–104.  
LI QZ, LONG YY, YI N, *et al.* Process optimization for enrichment of unsaturated fatty acids in walnut oil by urea inclusion method [J]. Mod Food, 2020, (20): 99–104.
- 张霞, 郝晓丽, 何静, 等. 尿素包合法富集驼峰油中不饱和脂肪酸的工艺优化[J]. 中国油脂, 2020, 45(4): 9–13.  
ZHANG X, HAO XL, HE J, *et al.* Process optimization of urea inclusion method for enrichment of unsaturated fatty acids in hump oil [J]. China Oil Fat, 2020, 45(4): 9–13.
- 张霞. 驼油的不饱和脂肪酸富集及应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.  
ZHANG X. Enrichment and application of unsaturated fatty acids in camel oil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- 胡力, 王芳梅, 王伟, 等. 新疆打瓜籽油中亚油酸的尿素包合纯化工艺研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 62–66.  
HU L, WANG FM, WANG W, *et al.* The urea inclusion purification process of linoleic acid in Xinjiang melon seed oil [J]. China Oils Fats, 2020, 45(9): 62–66.

- [21] 赵腾飞, 应晓国, 张宾, 等. 大黄鱼(*Larimichthys crocea*)鱼油的制备及其理化性质研究[J]. 中国油脂, 2021, (3): 1–11.  
ZHAO TF, YING XG, ZHANG B, *et al.* Preparation and physicochemical properties of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fish oil [J]. China Oil Fat, 2021, (3): 1–11.
- [22] 郑富良, 杨斌, 黄济勇, 等. 酶法改性樟树籽仁油制备含  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸结构脂质及其理化性质与抗氧化活性[J]. 中国油脂, 2020, 45(12): 76–83.  
ZHENG FL, YANG B, HUANG JY, *et al.* Preparation of structural lipids containing  $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acids by enzymatic modification of camphor seed kernel oil and its physicochemical properties and antioxidant activity [J]. China Oil Fat, 2020, 45(12): 76–83.
- [23] 陈国艳, 刘付英, 郭颖, 等. 青刺果及其油的理化性质和其油的脂肪酸组成研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(1): 69–71.  
CHEN GY, LIU FY, GUO Y, *et al.* Physicochemical properties and fatty acid composition of fruit and its oil [J]. Cere Oils, 2020, 33(1): 69–71.
- [24] 田潇潇, 王羚, 方学智, 等. 不同干燥方式对山桐子油理化性质、脂肪酸组成及微量营养成分含量的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(1): 8–11, 55.  
TIAN XX, WANG L, FANG XZ, *et al.* Effects of different drying methods on physicochemical properties, fatty acid composition and trace nutrient content of *Jatropha curcas* oil [J]. China Oil Fat, 2020, 45(1): 8–11, 55.
- [25] MARCOS APM, MARINA NFDS, CARLOS EFDC, *et al.* Physicochemical characterization, fatty acid composition, and thermal analysis of *Bertholletia excelsa* HBK oil [J]. Pharma Mag, 2015, 11(41): 147–151.
- [26] 李红, 司俊玲, 董天浩, 等. 诃子油的理化性质及脂肪酸组成分析[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(4): 56–57.  
LI H, SI JL, DONG TH, *et al.* Physicochemical properties and fatty acid composition analysis of *Terminalia chebula* oil [J]. Cere Oil, 2016, 29(4): 56–57.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

## 作者简介



李冠文, 硕士研究生, 主要研究方向为药食两用中药功能产品研究。  
E-mail: 1164602786@qq.com



刘星, 博士, 副教授, 主要研究方向为药食两用中药功能产品研究。  
E-mail: sxzydxlx@163.com