

# 汽爆预处理对油莎豆组分、微观结构 及油脂提取率的影响

杨天翔<sup>1</sup>, 薛慧婷<sup>2</sup>, 任宇飞<sup>1</sup>, 李冠华<sup>1</sup>, 张德建<sup>1</sup>

(1. 内蒙古大学 生命科学学院, 内蒙古自治区高校生物种质资源保护与利用工程研究中心, 呼和浩特 010070;

2. 内蒙古医科大学 基础医学院, 呼和浩特 010110)

**摘要:**旨在提高油莎豆油的提取率,对油莎豆进行不同时间的汽爆预处理,探究汽爆预处理对油莎豆的化学组分、微观结构以及油脂提取率的影响。结果显示:汽爆预处理使油莎豆的脂溶物和水溶物含量增加,纤维素、半纤维素和果胶含量减少,木质素含量增加;汽爆预处理使油莎豆细胞壁主要化学键发生断裂或修饰;汽爆(30 min)后油莎豆形状发生明显变化,细胞间裂缝变大,细胞结构破损,排列杂乱;汽爆后油莎豆的油脂提取率增至18.41%,比汽爆前(14.58%)提高26.27%。综上,汽爆破壁促进油莎豆油提取的方法是可行的。

**关键词:**油莎豆;汽爆;细胞壁;油脂浸提

**中图分类号:**TS222+.1; TS224 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2024)10-0014-06

## Effects of steam explosion pretreatment on composition, microstructure and oil extraction rate of *Cyperus esculentus*

YANG Tianxiang<sup>1</sup>, XUE Huiting<sup>2</sup>, REN Yufei<sup>1</sup>, LI Guanhua<sup>1</sup>, ZHANG Dejian<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia Autonomous Region University Biological Germplasm Resources Conservation and

Utilization Engineering Research Center, School of Life Sciences, Inner Mongolia University,

Hohhot 010070, China; 2. College of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical

University, Hohhot 010110, China)

**Abstract:** In order to improve the extraction rate of *Cyperus esculentus* oil, the *Cyperus esculentus* was pretreated with steam explosion for different time, and the effects of steam explosion pretreatment on the chemical composition, microstructure and oil extraction rate of *Cyperus esculentus* were explored. The results showed that steam explosion increased the contents of fat soluble matter and water soluble matter, decreased the contents of cellulose, hemicellulose and pectin, and increased the content of lignin. The main chemical bonds of *Cyperus esculentus* cell wall were broken or modified by steam explosion pretreatment. After steam explosion for 30 min, the shape of *Cyperus esculentus* changed obviously, the cracks between the cells became larger, the cell structure was damaged, and the arrangement was disorderly. After steam explosion, the oil extraction rate of *Cyperus esculentus* increased to 18.41%, which was 26.27% higher than that before steam explosion (14.58%). In conclusion, the method of steam explosion for wall rupture to promote oil extraction of *Cyperus esculentus* is feasible.

**Key words:** *Cyperus esculentus*; steam explosion; cell wall; oil extraction

收稿日期:2023-09-11;修回日期:2024-05-18

作者简介:杨天翔(2003),男,在读本科,食品科学与工程专业(E-mail)ytx030717@163.com。

通信作者:李冠华,副教授(E-mail)liguanhua1984@126.com。

油莎豆(*Cyperus esculentus*),也称铁荸荠、虎坚果,为多年生莎草科植物<sup>[1]</sup>,原产于非洲和地中海沿岸国家,1960年被引入中国。2016年《全国种植业结构调整规划(2016—2020)》中已将油莎豆作为我国重要推广种植的新型经济作物,截至2019年全

国油莎豆种植面积约为 13 333 hm<sup>2</sup> (20 万亩)<sup>[2]</sup>。油莎豆生物量大,根系发达,抗逆性强,有“油料植物之王”之称,富含油酸、亚油酸、亚麻酸、维生素 E、甾醇、萜类和蒽醌等活性成分<sup>[3]</sup>。有研究证实油莎豆油具有较强的抗氧化、抑菌、抗炎活性,有助于强身健体、滋润肠道<sup>[4]</sup>,对于冠心病、肥胖、糖尿病和胃肠道等相关疾病具有一定的预防功效<sup>[5]</sup>。

传统油莎豆油提取工艺包括压榨法和有机溶剂浸提法,其中:压榨法工艺简单,但运行压力高,残油高<sup>[6]</sup>;有机溶剂浸提法生产效率高,但溶剂的使用可能对环境 and 油脂品质有一定影响<sup>[7]</sup>。近年来,水酶法<sup>[8]</sup>、超临界 CO<sub>2</sub>萃取法<sup>[9]</sup>等方法亦有研究,但上述方法均存在一定局限性,如生产成本高、操作条件严苛或设备要求特殊。因此,寻找高效的油莎豆油提取技术显得尤为重要。

汽爆是一种新型的粮油作物加工技术,其以水蒸气为介质,利用高温高压蒸汽快速渗透进植物细胞组织中,然后在极短的时间内以爆破的方式释放,把热能瞬间转化为机械能,从而破坏粮油作物致密的组织结构<sup>[10]</sup>。汽爆具有增孔、开孔和扩孔的作用<sup>[11]</sup>,同时也会引起孔结构的变化,表现为孔的“坍塌”和“堵塞”等<sup>[12]</sup>,这些变化会影响油脂的提取效率。目前汽爆技术广泛应用于红薯、芝麻、麸皮、大豆、橄榄等作物的加工中<sup>[13]</sup>。何陈灿等<sup>[14]</sup>利用汽爆预处理黄芪提取黄芪多糖、黄芪醇、黄芪甲苷等功能活性成分,促进了黄芪的精深加工;易军鹏等<sup>[15]</sup>采用汽爆预处理提取亚麻籽油,提高了亚麻籽油得率及提取速率,且增加了亚麻籽油中的不饱和脂肪酸亚麻酸的含量;Yi 等<sup>[16]</sup>采用汽爆预处理芝麻制备芝麻油,提高了芝麻油提取率;Peng 等<sup>[17]</sup>使用汽爆预处理麦秸秆与麦麸,破坏纤维素、木质素等,利用内生真菌微球菌生产单细胞油,为其利用提供了新思路。目前,汽爆技术尚未在油莎豆油的提取中应用。

本文利用汽爆预处理油莎豆,探究汽爆预处理前后油莎豆化学组成、微观结构和油脂提取率的差异,以期阐明汽爆预处理对油莎豆细胞壁结构的破坏机制,并为建立油莎豆汽爆加工提取油脂新工艺提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

油莎豆(蒙油莎 2 号,含水量约为 6.74%),收获于内蒙古自治区农业科学研究院,除杂后用湿纱布擦去表面灰尘,自然风干后备用。

石油醚、苯、乙醇、草酸铵、氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钾、乙二胺、硼氢化钠、硫酸、二甲苯等,均为分析纯;FAA 固定液〔由体积分数 5% 的福尔马林(38% 甲醛)、冰醋酸和体积分数 70% 的酒精组成〕。

#### 1.1.2 仪器与设备

SHZ-88 水浴恒温振荡器,力辰科技有限公司;电子分析天平,Sartorius 科学仪器(北京)有限公司;石蜡切片机,德国 Leica 公司;SGO-PH201 生物显微镜,深视光光学仪器有限公司;T2600 紫外可见分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司;iCAN 9 傅里叶红外光谱仪,上海卓光仪器科技有限公司;汽爆罐,鹤壁正道生物能源公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 油莎豆汽爆预处理

油莎豆的汽爆预处理参照 Zhao 等<sup>[18]</sup>的方法,并作适当修改。采用重锤将油莎豆进行破碎处理,将破碎后的油莎豆置于 400 mL 汽爆罐中,通入 213 °C 高温饱和蒸汽,设置汽爆压力为 2 MPa,分别汽爆 10、20、30 min,瞬间泄压。收集汽爆产物,于 63 °C 下烘干至恒重,获得汽爆油莎豆样品(含水量约为 3.03%),分别命名为 P-10、P-20 和 P-30,同时以未经汽爆预处理的油莎豆样品为对照。

#### 1.2.2 油莎豆化学组分测定

脂溶物:采用索氏抽提法提取脂溶物。将样品用滤纸包好后置于索氏提取瓶中,加入 150 mL 体积比为 1:2 的苯-乙醇溶液,于 80 °C 下水浴抽提 3 h,将脱脂后的样品于通风橱中风干,于 105 °C 下烘干至恒重,冷却后称质量。

水溶物:将样品置于已恒重的尼龙袋〔规格为 48 μm(300 目),4 cm × 8 cm,下同〕,放入盛有 150 mL 蒸馏水的烧杯中,于 100 °C 下处理样品 1 h,每 5 min 搅拌 1 次,期间更换等体积蒸馏水(100 °C)2 次,取出尼龙袋于 150 mL 蒸馏水(室温)中清洗样品至无泡沫后,于 105 °C 下烘干至恒重,冷却称质量。

果胶:将装有样品的尼龙袋置于 150 mL 质量分数为 0.5% 的草酸铵溶液中,于 100 °C 下处理样品 3 h,每 5 min 搅拌 1 次,期间更换等体积、等质量分数草酸铵溶液(100 °C)2 次,再于 150 mL 蒸馏水(室温)中清洗样品至无泡沫后,于 105 °C 下烘干至恒重,冷却称质量。

半纤维素:将装有样品的尼龙袋置于 150 mL 质量分数为 2% 的 NaOH 溶液中,沸水浴处理样品 3 h,每 5 min 搅拌 1 次,期间更换等体积、等质量浓度 NaOH 溶液(100 °C)2 次,再于 150 mL 蒸馏水(室

温)中清洗样品至无泡沫后,于 105 ℃ 下烘干至恒重,冷却称质量。

以上各组分的含量( $X_i$ )计算见式(1)。

$$X_i = m_i / m_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_i$ 为样品的失重,g; $m_2$ 为样品的质量,g。

**纤维素:**将装有样品的尼龙袋置于 150 mL 4 mol/L KOH 溶液〔含有 1.0 mg/mL 硼氧化钠( $\text{NaBH}_4$ )〕中,于室温下处理样品 3 h,期间更换等浓度的 KOH 溶液(含有 1.0 mg/mL  $\text{NaBH}_4$ )2 次,每 5 min 搅拌 1 次,取出样品后用质量分数为 67% 的硫酸溶液处理 10 min,取出后于 150 mL 蒸馏水(室温)中清洗样品至无泡沫后,于 105 ℃ 烘箱中烘干至恒重,冷却称质量。样品减少的质量为纤维素和半纤维素的质量,此质量减去半纤维素质量即为纤维素的质量。以纤维素的质量与样品质量比值表征纤维素含量。

**木质素:**木质素含量为酸不溶木质素与酸溶木质素含量之和,参照 NY/T 2337—2013 中硫酸法测定,并作适当修改。**酸不溶木质素:**对预先干燥的样品进行脱脂,具体操作同脂溶物含量测定。取出于通风橱中风干脱脂后的样品,将其与质量分数 72% 的硫酸溶液混匀,于 25 ℃ 水浴恒温振荡器(参数设定为 120 r/min)中反应 2 h,用定量滤纸过滤木质素沉积后的悬浮液,收集滤液备用,用 50 ℃ 蒸馏水清洗滤纸上的残渣至中性,将滤渣于 105 ℃ 下烘干至恒重,而后称质量。由式(2)计算酸不溶木质素含量( $X_1$ )。

$$X_1 = m_1 / m_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: $m_1$ 为恒重后滤渣的质量,g; $m_0$ 为样品的质量,g。

**酸溶木质素:**将测定酸不溶木质素时获得的滤液定容至 250 mL,取 1 mL 滤液于试管中,用质量分数 3% 的硫酸溶液稀释 5 倍,在 205 nm 波长处测量其吸光度。按式(3)(参照 GB/T 10337—2008)计算酸溶木质素含量( $X_2$ )。

$$X_2 = A \times V \times n / (\varepsilon \times m_0 \times 1\,000) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $A$ 为吸光度; $V$ 为滤液总体积,mL; $n$ 为稀释倍数; $\varepsilon$ 为吸收系数, $\text{L}/(\text{g} \cdot \text{cm})$ 。本研究中  $\varepsilon$  取值为 25。

### 1.2.3 油莎豆的傅里叶红外光谱(FT-IR)分析

利用傅里叶红外光谱仪对油莎豆的化学基团进行测定。FT-IR 分析条件:扫描范围 400 ~ 4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数 64 次,分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ 。

### 1.2.4 油莎豆微观结构分析

参照张郡月等<sup>[19]</sup>的方法进行油莎豆石蜡切片的制作,并适当改进。将油莎豆样品复水后在 FAA

固定液中固定,置于质量分数 2% 的乙二醇溶液中软化后,将样品分割成合适尺寸,放入体积分数 30% 的乙醇溶液中脱水 2 h,而后吸出 1/4 乙醇溶液,再向其中补充等量二甲苯,重复操作 2 次。然后依次在体积分数 50%、70%、85%、90%、100% 的乙醇溶液中重复上述脱水步骤。完成脱水后取出样品进行切片透明处理,为使后续浸蜡操作中石蜡更顺利地进入组织,在 36 ℃ 下再用纯二甲苯对样品浸泡 2 h,吸出 1/4 二甲苯,再向剩余溶液中加入等体积碎蜡屑,混合均匀,重复操作 1 次,过夜。取出 1/2 已加入碎蜡屑的二甲苯,再向其中加入等体积碎蜡屑,于 58 ℃ 下加热 4 h,重复操作 3 次。于 65 ℃ 下用液蜡包埋样品,冷却使蜡凝固,修剪蜡块形状,切片、烤片后将切片在二甲苯脱蜡缸中脱蜡透明,用蒸馏水清洗后干燥,备用。将切片置于普通光学显微镜下,在不同倍数下观察并拍照。

### 1.2.5 油莎豆油的提取及油脂提取率的计算

参照 GB 5009.6—2016 中的索氏抽提法提取油莎豆油,并计算油脂提取率。

### 1.2.6 数据处理

所有实验重复 3 次,结果以“平均值 ± 标准偏差”表示,利用 SPSS16.0 进行显著性分析( $p < 0.05$ ),采用 Origin Pro 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 汽爆对油莎豆化学组分的影响

#### 2.1.1 水溶物、脂溶物含量变化

不同汽爆油莎豆水溶物和脂溶物的含量见图 1。

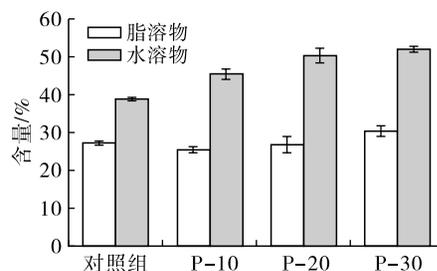


图 1 不同汽爆油莎豆的水溶物、脂溶物含量

Fig.1 Water-soluble and fat-soluble contents of different steam-exploded *Cyperus esculentus*

水溶物主要包括植物中可溶性糖、无机盐类、植物碱、淀粉、果胶质及色素等能够溶于水的成分,脂溶物主要包括脂肪、脂肪酸、蜡及酚类等化合物。由图 1 可知,汽爆油莎豆中水溶物含量随着汽爆时间的延长由对照组的 38.88% 增加至汽爆 30 min 的 52.03%,原因是汽爆使半纤维素降解成可溶性还原

糖<sup>[20]</sup>。当汽爆时间由 10 min 延长至 30 min 时,汽爆油莎豆的脂溶物含量由 25.42% 提高至 30.35%,原因是随着汽爆时间延长,油莎豆细胞壁的致密结构被破坏程度加深,更有利于有机物溶出<sup>[21]</sup>。

### 2.1.2 果胶、木质素、纤维素及半纤维素含量变化

不同汽爆油莎豆的果胶、木质素、纤维素及半纤维素含量见图 2。

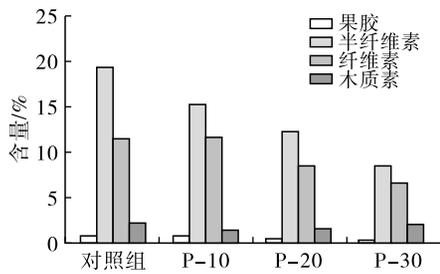


图 2 不同汽爆油莎豆的果胶、木质素、纤维素及半纤维素含量

Fig. 2 Pectin, lignin, cellulose and hemicellulose contents of different steam-exploded *Cyperus esculentus*

由图 2 可知,油莎豆的半纤维素和果胶含量均随着汽爆时间的延长而减少,分别由对照组的 19.44%、0.71% 减少为汽爆 30 min 时的 8.54%、0.52%,原因是汽爆的高温蒸煮作用使油莎豆细胞壁中的果胶和半纤维素降解<sup>[22]</sup>。在较短的汽爆时间内,油莎豆的纤维素含量基本不变,维持在 11.66%,而随着汽爆时间进一步延长,纤维素含量开始下降,汽爆 30 min 时下降至 6.69%,这与 Wooten 等<sup>[23]</sup>提出的纤维素热解模型相符,即纤维素热解为较低聚合度的无定形纤维素,随后进一步分解为水溶性化合物。据此推测纤维素含量下降的原因可能是长时间高温使得纤维素随着半纤维素分解为中间态活性纤维素,而后进一步分解为左旋葡萄糖等化合物而进入水溶物中。随着汽爆时间延长,木质素相对含量增加,原因可能是上述多糖的分解产物进一步发生再聚合反应生成假木质素<sup>[24]</sup>,导致木质素相对含量增加。

### 2.2 油莎豆的 FT-IR 分析

不同汽爆油莎豆的 FT-IR 图谱见图 3。

如图 3 所示,898  $\text{cm}^{-1}$  处为纤维素的  $\beta$ -1,4 糖苷键特征吸收峰<sup>[25]</sup>,与对照组相比,汽爆油莎豆在 898  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰强度减弱,由此推测汽爆可使纤维素中  $\beta$ -1,4 糖苷键断裂,纤维素发生部分降解,致使细胞壁出现裂隙,进而可加快油脂溶出速率。1 033、1 049  $\text{cm}^{-1}$  两处观察到较大程度变化,为 C—O—C(醚键)伸缩振动峰<sup>[26]</sup>,据此推断可能是由于汽爆的强烈破坏作用使醚键裂解,随之半纤维素溶出降解<sup>[27]</sup>,进一步促进油脂溶出,提高油莎豆油的提

取率。汽爆油莎豆在 1 652  $\text{cm}^{-1}$  处的羧酸羰基 C=O 特征吸收峰<sup>[28]</sup>的强度减弱,羰基基团发生拉伸振动,表明汽爆可破坏半纤维素与纤维素及木质素间链接的酯键或是破坏了半纤维素对木质素包裹作用,使得木质素外露<sup>[29]</sup>,进而会影响油莎豆油提取。

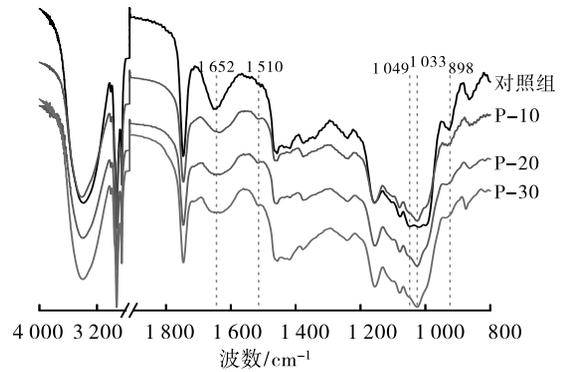


图 3 不同汽爆油莎豆的 FT-IR 图谱

Fig. 3 FT-IR spectra of different steam-exploded *Cyperus esculentus*

### 2.3 汽爆对油莎豆微观结构的影响

不同汽爆油莎豆的微观结构见图 4。

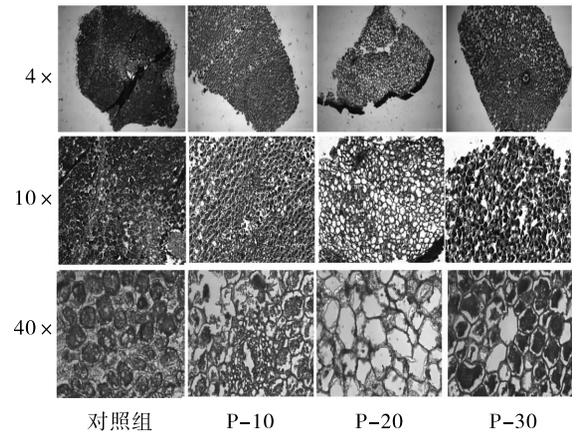


图 4 不同汽爆油莎豆的微观结构

Fig. 4 Microstructure of different steam-exploded *Cyperus esculentus*

由图 4 可知,4 倍放大倍数下,对照组的细胞结构完整,排列紧密,未见有明显破坏,而汽爆油莎豆的细胞结构破碎并出现缝隙,碎片尺寸均匀,说明汽爆的强烈撕裂作用能够破坏细胞壁,打破木质纤维素形成的致密结构<sup>[30]</sup>,有利于油脂溶出。10 倍放大倍数下,与对照组相比,汽爆油莎豆内部的淀粉粒大小发生明显变化,甚至出现无淀粉粒细胞,但分布相对均匀,说明汽爆对淀粉的破坏作用强烈,使淀粉间  $\alpha$ -1,4 糖苷键、 $\alpha$ -1,6 糖苷键部分断裂,淀粉聚合度严重降低<sup>[31]</sup>。40 倍放大倍数下,汽爆油莎豆细胞组织间出现明显裂缝,细胞内淀粉粒颜色加深,原因是随着汽爆时间延长,美拉德反应程度加

深<sup>[32]</sup>,且细胞壁受损使得内容物暴露而发生褐变。综上,随着汽爆时间延长,油莎豆形状发生明显变化,细胞间裂缝变大,细胞结构破损,排列杂乱。

#### 2.4 汽爆对油莎豆油提取率的影响

不同汽爆油莎豆的油脂提取率见图5。

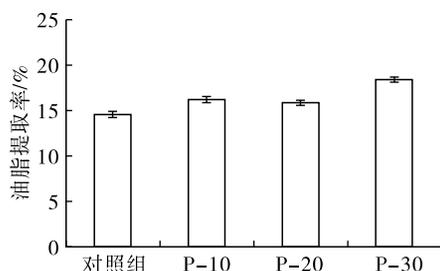


图5 不同汽爆油莎豆的油脂提取率

Fig. 5 Oil extraction rate of different steam-exploded *Cyperus esculentus*

由图5可知,对照组的油脂提取率为14.58%,随着汽爆时间延长,油莎豆油脂提取率增加,汽爆30 min时达到最大提取率(18.41%),比汽爆前提高26.27%。这与Ni<sup>[33]</sup>、Zhang<sup>[34]</sup>等的汽爆处理可提高玉米胚芽油、油茶籽油提取率的结果相似。

### 3 结论

汽爆预处理使油莎豆的脂溶物和水溶物含量增加,纤维素、半纤维素和果胶含量减少,木质素含量增加。汽爆使油莎豆化学基团发生修饰,油莎豆形状发生明显变化,细胞间裂缝变大,细胞结构破损,排列杂乱。汽爆(30 min)后油莎豆的油脂提取率增至18.41%,比汽爆前(14.58%)提高26.27%。因此,将汽爆技术应用于油莎豆油工业生产潜力巨大。

#### 参考文献:

- [1] SÁNCHEZ-ZAPATA E, FERNÁNDEZ - LÓPEZ J, ANGEL PÉREZ - ALVAREZ J. Tiger nut (*Cyperus esculentus*) commercialization: Health aspects, composition, properties, and food applications[J]. *Comp Rev Food Sci Food Safe*, 2012, 11(4): 366-377.
- [2] 邸志峰,李青龙,姜伟,等.油莎豆种植与收获机械技术装备研究现状[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(2): 96-106.
- [3] 段帅,吴晓彤,张德健,等.内蒙古油莎豆主要栽培品种的营养成分[J]. *中国油脂*, 2022, 47(3): 100-104.
- [4] OLABIYI A A, OBOH G, ADEFEGHA S A. Effect of dietary supplementation of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) and walnut (*Tetracarpidium conophorum* Müll. Arg.) on sexual behavior, hormonal level, and antioxidant status in male rats[J/OL]. *J Food Biochem*, 2017, 41(3): e12351 [2023-09-11]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12351>.
- [5] OLUWAJUYITAN T D, IJAROTIMI O S. Nutritional, antioxidant, glycaemic index and antihyperglycaemic properties of improved traditional plantain-based (*Musa AAB*) dough meal enriched with tigernut (*Cyperus esculentus*) and defatted soybean (*Glycine max*) flour for diabetic patients[J/OL]. *Heliyon*, 2019, 5(4): e01504 [2023-09-11]. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01504>.
- [6] GUO T, WAN C, HUANG F, et al. Evaluation of quality properties and antioxidant activities of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) oil produced by mechanical expression or/with critical fluid extraction[J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 141: 110915 [2023-09-11]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110915>.
- [7] OMILAKIN R O, IBRAHIM A P, SOTUNDE B, et al. Process modeling of solvent extraction of oil from *Hura crepitans* seeds: Adaptive neuro-fuzzy inference system versus response surface methodology[J]. *Biomass Convers Biorefin*, 2023, 13(1): 247-260.
- [8] PAWAR K R, NEMA P K, GUPTA R, et al. Optimization and characterization of aqueous enzyme-assisted solvent extraction of apricot kernel oil[J/OL]. *Food Sci Biotechnol*, 2024 [2023-09-11]. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01553-9>.
- [9] 周玉凤,张海东,熊昆,等.超临界CO<sub>2</sub>萃取植物功能性油脂的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(20): 334-339.
- [10] 张燕鹏,杨瑞金,华霄,等.蒸汽爆破辅助提取高温豆粕中的蛋白质[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(1): 190-193.
- [11] 隋文杰.生物质物料特性与汽爆炼制过程关系的研究[D].北京:中国科学院研究生院过程工程研究所,2016.
- [12] SUI W, CHEN H. Multi-stage energy analysis of steam explosion process[J]. *Chem Eng Sci*, 2014, 116: 254-262.
- [13] WANG C, LIN M, YANG Q, et al. The principle of steam explosion technology and its application in food processing by-products[J/OL]. *Foods*, 2023, 12(17): 3307 [2023-09-11]. <https://doi.org/10.3390/foods12173307>.
- [14] 何陈灿,吴洁,陈翠,等.蒸汽破壁预处理技术对黄芪提取的影响研究[J]. *广东饲料*, 2022, 31(4): 25-29.
- [15] 易军鹏,李冰,张棋,等.蒸汽爆破处理对亚麻籽油脂肪酸组成的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(9): 88-93.
- [16] YI J, ZHANG Q, LI X, et al. Steam explosion technology based for oil extraction from sesame (*Sesamum indicum* L.) seed[J]. *J Saudi Soc Agric Sci*, 2019, 18(1): 1-6.
- [17] PENG X, CHEN H. Single cell oil production in solid-state fermentation by *Microsphaeropsis* sp. from steam-exploded wheat straw mixed with wheat bran[J].

- Bioresour Technol, 2008, 99(9): 3885 – 3889.
- [18] ZHAO Z M, YU W, HUANG C, et al. Steam explosion pretreatment enhancing enzymatic digestibility of overground tubers of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) [J/OL]. Front Nutr, 2022, 9: 1093277 [2023 – 09 – 11]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1093277>.
- [19] 张郡月, 韩祥, 杨帆, 等. 不同种源防风种子的萌发特性与鉴别[J]. 种子, 2023, 42(6): 26 – 33, 48.
- [20] LIU Z H, CHEN H Z. Xylose production from corn stover biomass by steam explosion combined with enzymatic digestibility[J]. Bioresour Technol, 2015, 193: 345 – 356.
- [21] YU G, GUO T, HUANG Q, et al. Preparation of high – quality concentrated fragrance flaxseed oil by steam explosion pretreatment technology [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(4): 2112 – 2123.
- [22] CHEN H Z. Gas explosion technology and biomass refinery[M]. Dordrecht: Springer, 2015.
- [23] WOOTEN J B, SEEMAN J I, HAJALIGOL M R. Observation and characterization of cellulose pyrolysis intermediates by <sup>13</sup>C PMAS NMR. A new mechanistic model[J]. Energy Fuels, 2004, 18(1): 1 – 15.
- [24] ALVIRA P, TOMÁS – PEJÓ E, BALLESTEROS M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review [J]. Bioresour Technol, 2010, 101(13): 4851 – 4861.
- [25] 颜蕾, 李彩群, 谢君, 等. 酸 – 碱两段组合预处理对杨木发酵的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 254 – 263.
- [26] 董孝通, 王亚娟, 吴祖芳, 等. 乙醇再生微晶纤维素的分级及其结构表征[J]. 精细化工, 2023, 40(2): 343 – 348.
- [27] 冯成启. 利用对甲苯磺酸选择性提取蔗渣半纤维素和木质素的机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [28] 陈慕华, 嵇震, 王芳, 等. 纤维素基共聚型聚羧酸减水剂的合成及其性能[J/OL]. 化工进展: 1 – 9 [2024 – 05 – 18]. [https://doi.org/10.16085/j.issn.1000 – 6613.2024 – 0139](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0139).
- [29] 李冠华, 陈洪章. 汽爆秸秆漆酶协同作用提取木质素[J]. 生物工程学报, 2014, 30(6): 911 – 919.
- [30] 冉福, 雷赵民, 焦婷, 等. 汽爆处理对玉米 – 小麦型混合秸秆营养品质的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(3): 878 – 887.
- [31] 李光磊, 张国丛, 刘本国, 等. 蒸汽爆破处理对籼米淀粉分子结构的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 136 – 141.
- [32] 王丹凤, 祝梓淳, 高珊, 等. 蒸汽爆破对麦麸功能特性及美拉德反应程度的影响[J]. 中国食物与营养, 2023, 29(9): 16 – 21.
- [33] NI S, ZHAO W, ZHANG Y, et al. Efficient and eco – friendly extraction of corn germ oil using aqueous ethanol solution assisted by steam explosion [J]. J Food Sci Technol, 2016, 53(4): 2108 – 2116.
- [34] ZHANG S, PAN Y G, ZHENG L, et al. Application of steam explosion in oil extraction of camellia seed (*Camellia oleifera* Abel.) and evaluation of its physicochemical properties, fatty acid, and antioxidant activities[J]. Food Sci Nutr, 2019, 7(3): 1004 – 1016.
- 
- (上接第13页)
- [23] 郭英, 赵荣敏. 不同微波预处理对压榨元宝枫籽油营养品质及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(12): 139 – 145.
- [24] YE M, ZHOU H, HAO J, et al. Microwave pretreatment on microstructure, characteristic compounds and oxidative stability of camellia seeds[J/OL]. Ind Crop Prod, 2021, 161: 113193 [2024 – 04 – 18]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113193>.
- [25] 黄颖, 郭萍梅, 郑畅, 等. 微波预处理对芝麻油营养品质及抗氧化能力的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(2): 1 – 4.
- [26] YI X K, LIU G F, RANA M M, et al. Volatile profiling of two pear genotypes with different potential for white pear aroma improvement[J]. Sci Hort, 2016, 209: 221 – 228.
- [27] JIANG H, WANG X. Biosynthesis of monoterpenoid and sesquiterpenoid as natural flavors and fragrances[J/OL]. Biotechnol Adv, 2023, 65: 108151 [2024 – 04 – 18]. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108151>.
- [28] ZHANG W, CAO X, LIU S Q. Aroma modulation of vegetable oils: A review [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2020, 60(9): 1538 – 1551.
- [29] YIN W, SHI R, LI K, et al. Effect of microwave pretreatment of sunflower kernels on the aroma – active composition, sensory quality, lipid oxidation, tocopherols, heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons of sunflower oil[J/OL]. LWT – Food Sci Technol, 2022, 170: 114077 [2024 – 04 – 18]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114077>.
- [30] 李丽, 蒋景龙, 胡佳乐, 等. HS – SPME – GC – MS 与 ROAV 相结合的 4 种柑橘果皮精油关键香气物质分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(5): 221 – 230.
- [31] 高颖, 李雪梅. 6 个不同产地小茴香精油香气成分及感官分析研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(3): 157 – 160.
- [32] 高露, 赵镭, 史波林, 等. 气相色谱 – 质谱联用结合气味活度值分析红花椒油的关键香气物质特征[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(22): 295 – 301.
- [33] 肖作兵, 李静, 牛云蔚, 等. GC – O/AEDA 法结合 OAV 及香气重组试验鉴定玫瑰精油中特征香气化合物[J]. 中国食品学报, 2018, 18(4): 319 – 324.