

doi:10.12301/spxb202200924

文章编号:2095-6002(2024)01-0156-08

引用格式:王玲玉,赵雪玲,王安琪,等.油莎豆不溶性膳食纤维理化性质、结构特征和乳化特性研究[J].食品科学技术学报,2024,42(1):156-163.



WANG Lingyu,ZHAO Xueling,WANG Anqi,et al. Study on physicochemical, structural and emulsifying properties of insoluble dietary fiber of *Cyperus esculentus*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024,42(1):156-163.

油莎豆不溶性膳食纤维理化性质、结构特征和 乳化特性研究

王玲玉¹, 赵雪玲¹, 王安琪¹, 陈诚², 汪轩羽¹, 王新涛¹,
李秀荷¹, 王慧芳¹, 戴福宏³, 高铁成⁴, 周中凯^{1,*}, 李宁^{4,*}

(1.天津科技大学食品科学与工程学院,天津 300457;2.江南大学食品科学与技术国家重点实验室,江苏无锡 214122;3.新疆三礼粮油有限公司,新疆图木舒克 843900;
4.广州培乐道食品有限公司,广东广州 511400)

摘要:油莎豆是一种优质且有益健康的作物,含有丰富的营养物质。采用酶法提取油莎豆不溶性膳食纤维,以商业化大豆膳食纤维为对照,进行理化性质测定、结构特征和乳化性能研究。结果表明:与大豆膳食纤维相比,油莎豆不溶性膳食纤维具有更好的持水力[(14.45±0.19)g/g]、持油力[(8.21±0.06)g/g]和膨胀力[(14.23±0.12)mL/g]。油莎豆不溶性膳食纤维的体积平均粒径为(64.47±0.18)μm,是大豆膳食纤维体积平均粒径的56.65%。低场核磁结果显示,油莎豆不溶性膳食纤维具有更多的结合水,而大豆膳食纤维中则含有更多的自由水。热重分析表明,与大豆膳食纤维相比,油莎豆不溶性膳食纤维的质量损失较少,热稳定性更好。在乳化性能方面,随着油莎豆不溶性膳食纤维质量分数的增加,其乳液粒径显著性增大;在同等膳食纤维质量分数下,油莎豆不溶性膳食纤维制备的乳液粒径均显著低于大豆膳食纤维制备的乳液粒径,说明油莎豆不溶性膳食纤维制备的乳液稳定性优于大豆膳食纤维制备的乳液。在相同质量分数下,油莎豆不溶性膳食纤维的黏度低于其对应的大豆膳食纤维,但是质量分数4%的油莎豆不溶性膳食纤维制备的乳液的储能模量和损耗模量为最高。研究旨在为油莎豆不溶性膳食纤维的开发利用提供理论依据。

关键词:油莎豆;不溶性膳食纤维;理化性质;结构特征;乳化性能

中图分类号:TS201.2

文献标志码:A

油莎豆是油莎草(*Cyperus esculentus* L.)的块茎,是一种优质的有益健康的作物,富含脂质、蛋白

质、淀粉、维生素、矿物质和生物活性因子。油莎豆已被添加在牛奶、零食、饮料和无麸质面包等食品

收稿日期:2022-10-07

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(22ZYCGSN00360);天津西青重点研发项目(XQZDZX-202006)。

Foundation: Central Guiding Local Science and Technology Development Fund Project (22ZYCGSN00360); Tianjin Xiqing Key Research and Development(XQZDZX-202006)。

第一作者:王玲玉,女,硕士研究生,研究方向为食品科学。

*通信作者:周中凯,男,教授,博士,主要从事谷物科学与营养方面的研究;

李宁,博士,主要从事食品功能配料方面的研究。

中^[1]。在西班牙,油莎豆主要用于制备乳饮料,而膳食纤维(DF)是其主要的副产品,其中不溶性膳食纤维(IDF)的质量分数高达99%^[2]。

DF是多糖及其组装体的复合物,可以抵抗胃和小肠中消化酶的水解,到达大肠后被微生物发酵,随后产生短链脂肪酸(SCFA)。SCFA参与宿主健康相关的代谢通路^[3],已被证明具有降低血液中的胆固醇和葡萄糖水平、通便,以及降低结肠癌、心脏病和肥胖症发病风险的效果。DF已被确定为生物体中第7种重大营养素^[5],根据其水溶性可分为可溶性膳食纤维(SDF)和不溶性膳食纤维(IDF)。SDF含有可溶性半纤维素、果胶等物质,一般认为在增加黏度、降低血糖、血浆胆固醇方面有突出的作用;而IDF含有木质素、纤维素、不溶性半纤维素等,一般被认为会增加粪便体积、促进排便。现有的研究主要集中在SDF中,关于IDF的研究相对较少。研究表明,在提取油脂后的油莎豆豆粕中DF质量分数高达25%,其中质量分数90%以上的DF为不溶性类型^[5],然而对IDF理化性质的系统性研究较少。

Pickering乳液是由固体颗粒(多糖、蛋白质等)代替传统的表面活性剂来稳定两相体系,在活性物质的传送上具有独特性能^[4]。考虑到油莎豆IDF的固态性,可能具有在Pickering乳液中发挥稳定作用的潜质,然而该领域的相关研究几乎为空白。为此,本研究拟以大豆IDF为参照,探究油莎豆IDF的理化性质和乳化性质,以期为油莎豆IDF在食品中的开发与利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

油莎豆粕,新疆三礼粮油有限公司;大豆IDF(总DF质量分数85.5%,其中IDF占产品总质量的76.7%)、大豆油,市售;耐高温 α -淀粉酶、溴化钾、二甲基亚砷,上海阿拉丁生化科技有限公司;蛋白酶,诺维信生物有限公司;葡萄糖苷酶,天津市盛润科技有限公司。

1.2 仪器与设备

FA1004B型分析天平,德国Sartorius科学仪器公司;BJ-100型高速多功能粉碎机,上海拜杰实业有限公司;GZX-9146MBE型电热鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司;600C型低速离心机,北京白洋医疗器械有限公司;Bettersize 2600型粒度分析仪,

丹东百特仪器有限公司;Micro MR-25型低场核磁,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;Q50型热重分析仪,美国TA仪器沃特世科技(上海)有限公司;IS50型傅里叶红外光谱仪,美国Nicolet仪器公司;FSH-2A型可调高速均质机,常州越新仪器制造有限公司;LAB expert型分散体系稳定性分析仪,法国Turbiscan仪器公司;MARS 60型动态流变仪,德国哈克仪器公司。

1.3 实验方法

1.3.1 酶解法制备油莎豆IDF

油莎豆IDF提取工艺流程参照郭芸^[6]的方法,并稍加修改。称取100g油莎豆粕,以1:25(g/mL)的料液比加入石油醚,振荡、抽滤、烘干。将烘干的样品与磷酸缓冲溶液(pH值为6.0)混合,加入10mL的耐高温 α -淀粉酶,在95℃下反应1h,冷却至60℃后调pH值为4.5,然后加入10mL蛋白酶,60℃反应1h,调节pH值为4.2,加入10mL葡萄糖苷酶,60℃反应1h后沸水浴灭酶30min。4000r/min离心酶解物20min,用体积分数为75%的乙醇和丙酮分别洗涤沉淀物2次,烘干得油莎豆IDF。

1.3.2 IDF理化指标的测定

1.3.2.1 持水力测定

称取0.05g(精确至0.0001g)样品于10mL离心管中,加入5mL蒸馏水,混匀,室温静置24h,离心去上清液,记录残渣质量。持水力按式(1)计算。

$$\text{持水力} = (m_1 - m_0) / m_0 \quad (1)$$

式(1)中, m_0 为样品质量,g; m_1 为残渣质量,g。

1.3.2.2 持油力测定

称取0.1g(精确至0.0001g)样品于10mL已称重的离心管中,加入2mL大豆油,混匀,室温静置18h,离心去上清液,至离心管内壁无油迹,记录样品与离心管总质量^[7]。持油力按式(2)计算。

$$\text{持油力} = (m_2 - m_1) / m_0 \quad (2)$$

式(2)中, m_0 为样品质量,g; m_1 为离心管质量,g; m_2 为样品与离心管的总质量,g。

1.3.2.3 膨胀力测定

称取1g(精确至0.0001g)样品于10mL离心管中,记录体积(V_0),加入8mL蒸馏水,混匀,室温静置18h,记录膨胀后的体积(V_1)^[7]。膨胀力按式(3)计算。

$$\text{膨胀力} = (V_1 - V_0) / m \quad (3)$$

式(3)中, m 为样品质量,g; V_0 为样品体积,mL; V_1 为静置18h后样品体积,mL。

1.3.2.4 粒径测定

通过激光粒度分析仪在泵速为 1 600 r/min 和屏蔽范围为 5% ~ 10% 的条件下测量 IDF 样品的粒度分布^[8]。

1.3.2.5 低场核磁共振光谱测定

样品称重并快速放入样品瓶中,磁体探头选择 MicroMR-25 mm,所有测量均进行 6.0 μ s (P_1), 2 000 ms (T_w) 和 12 μ s (P_2),总共进行 16 次扫描,获得反演图像^[9]。

1.3.2.6 热稳定性分析

对干燥的样品 (5.0 mg) 进行热重分析 (TGA)。温度程序以 10 $^{\circ}$ C/min 的加热速率从 25 $^{\circ}$ C (室温) 升至 500 $^{\circ}$ C,氮气流速为 30 mL/min。

1.3.3 IDF 基团测定

称取 1 mg 干燥的样品与 150 mg 溴化钾充分研磨混合,然后在 0.5 MPa 的压力下压成薄膜状。在 400 ~ 4 000 cm^{-1} 波长下由 FTIR 仪器 (Nicolet IS50),通过 32 次扫描收集光谱^[8]。

1.3.4 IDF 乳化性质的测定

1.3.4.1 乳液的制备

称取一定质量的样品,配置 IDF 质量分数分别为 1.0%、2.5%、4.0% 的悬浊液,加入大豆油,乳液中大豆油的体积分数为 25%,用高速均质机在 10 000 r/min 条件下均质 1 min,得到 IDF 乳液。

1.3.4.2 乳液粒径分布测定

方法同 1.3.2.4 节。

1.3.4.3 乳液稳定性测定

取 20 mL 新鲜 IDF 乳液加入样品瓶中进行测定,温度设定为 25 $^{\circ}$ C,扫描时间为 6 h,每 5 min 扫描 1 次。

1.3.4.4 乳液流变学性质测定

吸取适量乳液置于 60 mm 的平板上,平板间隙为 1 mm,测试温度设为 25 $^{\circ}$ C,用光学动态流变仪对乳液进行静态流变和动态流变的测定。

1.4 数据处理

实验重复 3 次,结果以平均值 \pm 标准偏差表示。采用单因素方差分析 (ANOVA) 和多重比较检验法进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 油莎豆 IDF 的理化性质分析及结构表征

2.1.1 油莎豆和大豆 IDF 的理化性质比较

IDF 的持水力、持油力和膨胀力影响了食品原

料的加工特性。持水力和膨胀力是 DF 重要的水合特性,在食品和人体生理中发挥着重要的功能,其高持水力和高膨胀力可以增加肠道中 IDF 的体积,不仅可以促进肠道蠕动,还可以增加饱腹感和防止肥胖^[10]。具有高持水力的 DF 可以锁住食物的水分,减少因脱水而导致的食物收缩,从而提高产品的质量。高持油力的 IDF 可以使高脂肪食品更加稳定,延长其保质期,也可以作为乳化剂,在肠道中干扰肠道对膳食脂质的吸收,并可以促进脂质化合物 (胆汁酸、胆固醇等) 的排泄^[10]。

油莎豆和大豆 IDF 的理化性质见表 1。由表 1 可知,油莎豆 IDF 的持水力、持油力和膨胀力均高于大豆 IDF,分别是大豆 IDF 的 1.60、2.22、1.75 倍。可能是由于油莎豆 IDF 具有疏松多孔结构和较大的比表面积,更有利于水分子的渗透,增加水分的吸收能力,从而增加持水力和膨胀力。而油莎豆 IDF 高持油力是由于其粒径分布较小,总表面积较大导致的^[11]。

表 1 油莎豆与大豆 IDF 的理化性质

Tab. 1 Physicochemical properties of *Cyperus esculentus* and soybean IDF

IDF	持水力/ ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	持油力/ ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	膨胀力/ ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)
油莎豆	14.45 \pm 0.19 ^a	8.21 \pm 0.06 ^a	14.23 \pm 0.12 ^a
大豆	9.01 \pm 0.11 ^b	3.70 \pm 0.01 ^b	8.13 \pm 0.25 ^b

不同字母表示同列数据差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.2 油莎豆和大豆 IDF 的粒径分布分析

D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别表示样品的累计粒径分布达到质量分数 10%、50%、90% 时对应的粒径。 $D[3,2]$ 表示样品的表面积平均粒径, $D[4,3]$ 表示样品的体积平均粒径,它们差值越大,粒度分布越宽。油莎豆和大豆 IDF 粒径分布见表 2 和图 1。由表 2 和图 1 可知,油莎豆 IDF 的粒径整体分布小于大豆 IDF,体现在 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、 $D[3,2]$ 和 $D[4,3]$ 均是大豆 IDF 的 50% 左右,酶解法提取 IDF 的粒径更小。颗粒大小的变化会导致 IDF 特性的相应变化,超细 IDF 表现出更高的持水力和膨胀力,在游离和结合酚类物质中表现出更高的可提取性、酚类物质的生物可及性和抗氧化性能^[12]。小粒径的 IDF 添加到面条中可以增加感官评分,减少蒸煮损失,降低对蛋白质网络结构的破坏程度^[13]。

表2 油莎豆与大豆 IDF 的粒径分布

Tab.2 Particle size distribution of *Cyperus esculentus* and soybean IDF

IDF	D10	D50	D90	D[3,2]	D[4,3]	μm
油莎豆	15.68 ± 0.08 ^b	55.17 ± 0.18 ^b	127.73 ± 0.75 ^b	20.61 ± 0.10 ^b	64.47 ± 0.18 ^b	
大豆	33.69 ± 0.09 ^a	99.70 ± 0.28 ^a	215.90 ± 0.72 ^a	44.42 ± 0.09 ^a	113.8 ± 0.36 ^a	

不同字母表示同列数据差异显著($P < 0.05$)。

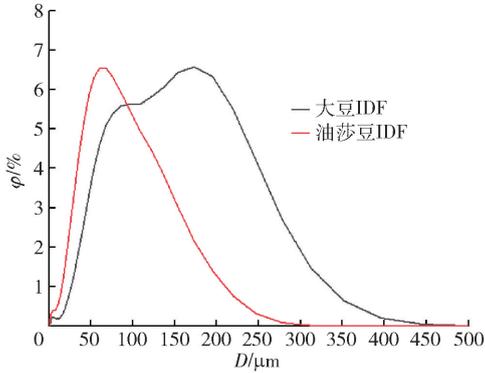


图1 油莎豆与大豆 IDF 的粒径分布

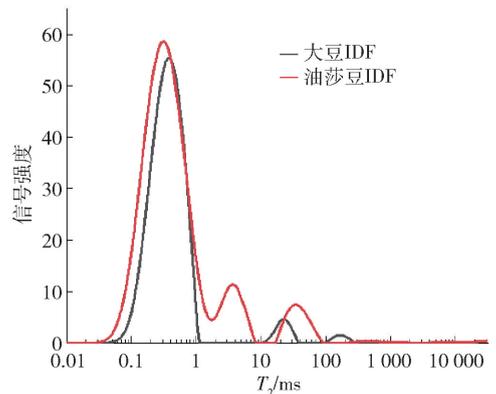
Fig.1 Particle size distribution of *Cyperus esculentus* and soybean IDF

图2 油莎豆与大豆 IDF 的水分分布

Fig.2 Moisture distribution of *Cyperus esculentus* and soybean IDF

2.1.3 油莎豆和大豆 IDF 的水分分布特征分析

DF 中的水分主要分为 3 种形态:结合水、不易流动水和自由水。质子所处的化学环境不同,其弛豫时间 T_2 的长短不同,水分的自由度也不同。弛豫时间 T_2 越短表明水与物质结合越紧密,越不容易排出,反之则质子自由度越高,越容易排出^[14],因此,通过弛豫时间 T_2 可以了解油莎豆 IDF 中水分的分布情况。

油莎豆和大豆 IDF 水分分布结果见图 2。由图 2 可知,油莎豆 IDF 与大豆 IDF 各存在 3 个峰组,油莎豆 IDF 的峰集中在 0.01 ~ 2 ms (T_{2b})、2 ~ 10 ms (T_{21})、10 ~ 100 ms (T_{22}),大豆 IDF 的峰集中在 0.01 ~ 2 ms (T_{2b})、10 ~ 50 ms (T_{22})、100 ~ 500 ms (T_{23})。其中弛豫时间最短的 T_{2b} 组分代表 IDF 中结合紧密的水组分,为结合水。弛豫时间 T_{21} 组分的水自由度介于结合水和自由水之间,容易发生转化,为不易流动水。弛豫时间 T_{22} 组分的水也是不易流动水,但是比 T_{21} 组分更易流动。最长弛豫时间 T_{23} 组分的水具有流动性,为自由水。与大豆 IDF 相比,油莎豆 IDF 具有更多的结合水和不易流动水,说明其持水能力更强,这可能与其特定的空间和分子结构有关。

2.1.4 油莎豆和大豆 IDF 的热稳定性分析

油莎豆和大豆 IDF 热稳定性分析结果见图 3。

由图 3 可知, IDF 的 TGA 结果显示了 2 个失重阶段,在第一个失重阶段,油莎豆 IDF 质量损失为 5.255%,大豆 IDF 质量损失为 9.156%,这个阶段是自由水和结合水的损失,油莎豆 IDF 损失更少的结合水;在第二个失重阶段,油莎豆 IDF 的失重是从 269.07 °C 到 348.04 °C,质量损失为 68.515%;大豆 IDF 的失重从 238.98 °C 到 344.67 °C,质量损失为 67.244%,这主要是因为 IDF 通过脱羟基、脱氧或脱羧降解^[15]。总体来看,油莎豆 IDF 的热稳定性较高,可能是由于油莎豆 IDF 具有更多的有序结构。

2.1.5 油莎豆和大豆的红外光谱分析

油莎豆和大豆 IDF 的红外光谱见图 4。由图 4 可知,油莎豆 IDF 与大豆 IDF 具有多头的特征吸收峰,两者的红外光谱相似,只是一些特征带的波数和峰强度发生了变化,表示油莎豆与大豆 IDF 的化学基团相同,结构相似。

在 3421 cm^{-1} 附近出现的吸收峰对应于 O—H 的伸缩振动,其主要来源于纤维素和半纤维素^[16],油莎豆 IDF 的峰强度明显大于大豆 IDF,是由于油莎豆 IDF 中的纤维素和半纤维素含量高于大豆 IDF。在 2857 cm^{-1} 附近出现的吸收峰来自多糖的甲基和亚甲基基团的 C—H 伸缩振动^[17],油莎豆

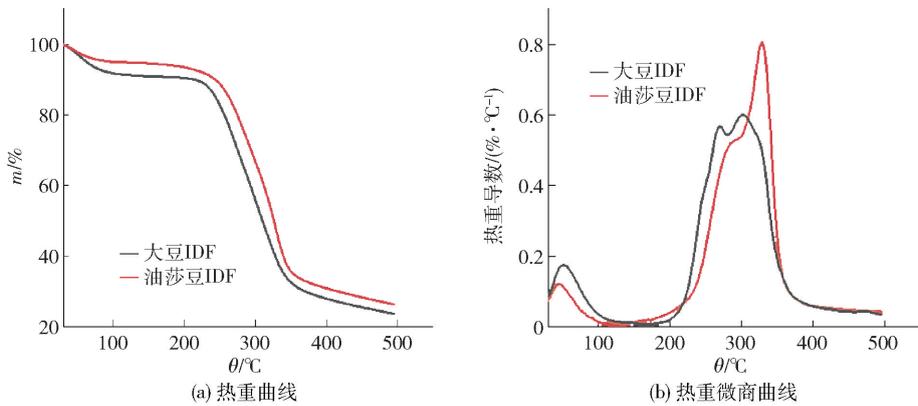


图3 油莎豆与大豆 IDF 的热稳定性分析

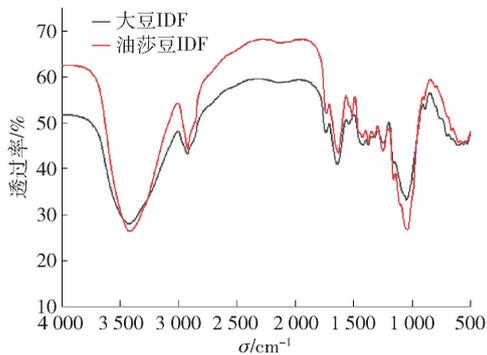
Fig. 3 Thermogravimetric analysis of *Cyperus esculentus* and soybean IDF

图4 油莎豆与大豆 IDF 的红外光谱

Fig. 4 FTIR spectra of *Cyperus esculentus* and soybean IDF

IDF 的峰强度明显大于大豆 IDF,油莎豆 IDF 中的多糖含量高。在 1736 cm^{-1} 附近出现的吸收峰对应于 $\text{C}=\text{O}$ 拉伸, 1637 cm^{-1} 附近出现的吸收峰对应于木质素芳香烃的特征弯曲或拉伸^[18]。 $1200\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰可能是由于 $\text{C}-\text{H}$ 的可变角度振动,而在 1000 cm^{-1} 附近的峰是 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动,是典型的木聚糖吸收峰^[19],油莎豆 IDF 的木聚糖半纤维素含量高于大豆 IDF。

2.2 油莎豆和大豆 IDF 制备的乳液粒径分布分析

乳液液滴的大小对配方乳液的特性和应用有很大影响。油莎豆和大豆 IDF 乳液粒径分布见表 3 和图 5。由表 3 和图 5 可知,随着油莎豆 IDF 含量的增加,油莎豆 IDF 制备的乳液粒径 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、 $D[3,2]$ 和 $D[4,3]$ 也随之增加。在相同含量下,大豆 IDF 制备的乳液的粒径均高于油莎豆 IDF 制备的乳液,并且具有显著性差异。

2.3 油莎豆和大豆 IDF 制备的乳液稳定性分析

TSI(Turbiscan stability index) 值用来判定乳液

的稳定性,值越大,稳定性越差。油莎豆和大豆 IDF 乳液 TSI 值见图 6。由图 6 可知,在短时间内,质量分数为 2.5% 油莎豆 IDF 制备的乳液 TSI 值迅速升高,稳定性最差。随着时间的延长,质量分数为 4% 大豆 IDF 乳液呈现出较高的稳定性。其中质量分数为 2.5% 油莎豆 IDF 乳液短时间和长时间的稳定性是最差的,可能是由于油莎豆 IDF 中的结合水含量较高,与其他成分之间的作用力较小,维持乳液稳定的能力较弱;而大豆 IDF 中含有较高的自由水,在其乳液相界面能发挥较好的平衡作用。

2.4 油莎豆和大豆 IDF 制备的乳液流变学性质分析

油莎豆和大豆 IDF 乳液流变学性质见图 7。由图 7 可知,质量分数为 2.5% 油莎豆 IDF 乳液的黏度随着剪切速率的增加呈现先增加后减小的趋势,这可能与乳液的不稳定性有关。而其余的油莎豆 IDF 和大豆 IDF 制备的乳液均随着剪切速率的增加而减小,呈现剪切稀化现象,符合非牛顿流体特性,其中 4% 大豆 IDF 乳液黏度高于其他乳液。黏度变化的原因可能是随着剪切速率的增加,乳液的内部结构被破坏,油水界面的相互作用力和范德华力减弱,增大了流体的流动性,进而使表观黏度降低。油莎豆 IDF 制备的乳液整体黏度较低,可能是由于其具有更多的结合水,而自由水含量少。

在低振荡频率下,乳液的储能模量缓慢降低,其变化很小,具有较高的抗变形能力,这是由于固体颗粒在 2 种不混溶液体的界面处的不可逆吸附。其中质量分数为 4% 油莎豆 IDF 乳液的储能模量最高。随着振荡频率的持续增加,各乳液的储能模量均升高。而各乳液的损耗模量随着振荡频率增加逐渐上

表3 油莎豆和大豆 IDF 乳液的粒径分布

Tab.3 Particle size distribution of emulsion made from *Cyperus esculentus* and soybean IDF

IDF 乳液	w/%	D10	D50	D90	D[3,2]	D[4,3]	μm
油莎豆	1.0	0.66 ± 0.00 ^f	2.16 ± 0.05 ^d	62.09 ± 7.27 ^f	1.63 ± 0.02 ^f	18.26 ± 2.95 ^f	
	2.5	0.73 ± 0.01 ^e	2.75 ± 0.14 ^d	75.73 ± 3.17 ^e	1.90 ± 0.05 ^e	25.30 ± 1.26 ^e	
	4.0	1.06 ± 0.01 ^e	30.64 ± 0.44 ^e	106.33 ± 1.76 ^d	3.26 ± 0.03 ^e	41.89 ± 0.51 ^d	
大豆	1.0	1.57 ± 0.01 ^a	67.64 ± 0.45 ^a	197.50 ± 1.05 ^a	5.78 ± 0.06 ^a	85.62 ± 0.65 ^a	
	2.5	0.98 ± 0.01 ^d	32.21 ± 1.72 ^e	159.20 ± 6.24 ^e	2.90 ± 0.06 ^d	53.99 ± 2.06 ^e	
	4.0	1.34 ± 0.01 ^b	53.97 ± 1.64 ^b	171.23 ± 4.29 ^b	4.67 ± 0.06 ^b	69.67 ± 2.04 ^b	

不同字母表示同列数据差异显著 ($P < 0.05$)。

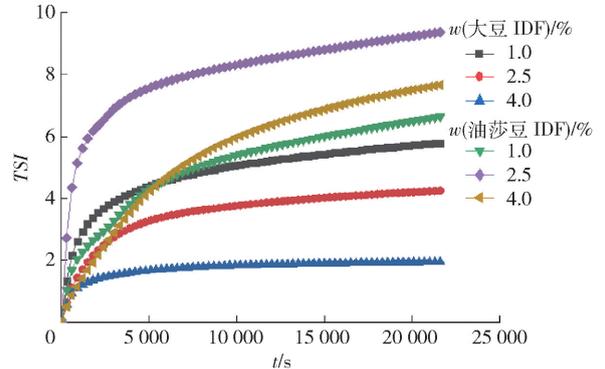
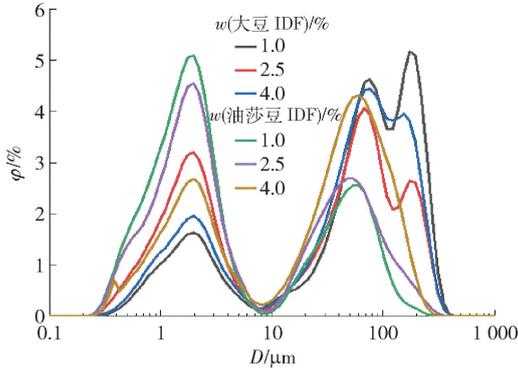
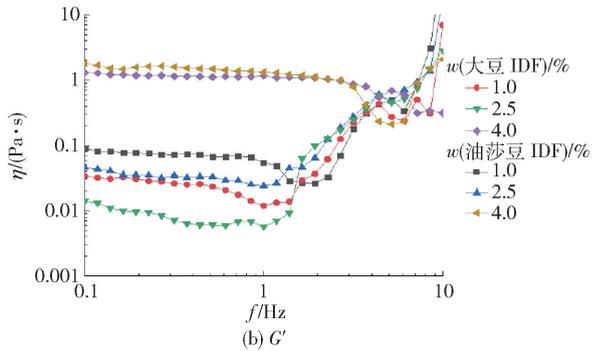
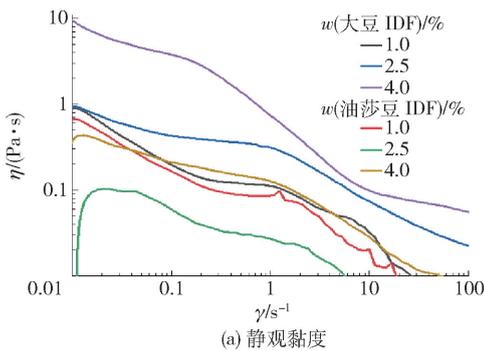


图5 不同含量油莎豆和大豆 IDF 乳液的粒径分布

图6 不同含量油莎豆和大豆 IDF 乳液的 TSI 值变化

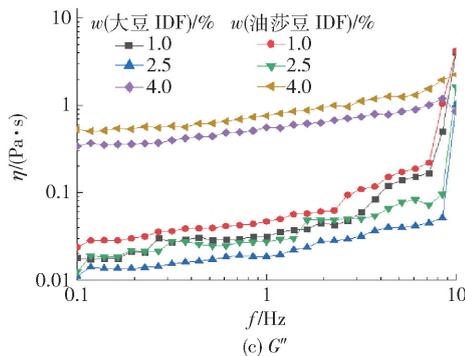
Fig.5 Particle size distribution of emulsion made from *Cyperus esculentus* and soybean IDF at different concentrations

Fig.6 Changes in TSI of emulsion made from *Cyperus esculentus* and soybean IDF at different concentrations



(a) 静观黏度

(b) G'



(c) G''

图7 不同含量油莎豆和大豆 IDF 乳液的流变学性质变化

Fig.7 Changes in rheological properties of emulsion made from *Cyperus esculentus* and soybean IDF at different concentrations

升,且与低频率下储能模量样品间差异性相似。随着振荡频率的增加,油莎豆和大豆 IDF 制备的乳液的储能模量和损耗模量均有交叉的部分,说明其是由固体状态到液体状态的转化,随着振荡频率的增加,乳液的内部结构被破坏。

3 结论

研究发现与大豆 IDF 相比,油莎豆 IDF 的持水力、持油力和膨胀力较高,粒径较小,结合水和不易流动水的比例更高,热稳定性更强。油莎豆 IDF 制备的乳液的粒径显著低于大豆 IDF 制备的乳液,但是乳液的稳定性和黏度较差,随着时间或者剪切速率的增加,维持乳液性能的能力较弱。随着振荡频率的增加,大豆 IDF 制备的乳液和油莎豆 IDF 制备的乳液的储能模量和损耗模量均有交叉的部分,说明其是由固体状态到液体状态的转化,其中质量分数 4% 的油莎豆 IDF 制备的乳液的储能模量和损耗模量最高。研究结果表明,油莎豆 IDF 具有较好的理化性质、结构特征和乳化特性,并体现出油莎豆 IDF 添加量和乳液特性量效依赖关系。本研究旨在为油莎豆 IDF 在食品中的开发利用提供一定的理论依据。

参考文献:

- [1] YU Y, LU X, ZHANG T, et al. Tiger nut (*Cyperus esculentus* L.): nutrition, processing, function and applications[J]. *Foods*, 2022, 11(4): 601.
- [2] SÁNCHEZ-ZAPATA E, MUÑOZ C, FUENTES E, et al. Effect of tiger nut fibre on quality characteristics of pork burger[J]. *Meat Science*, 2010, 85(1): 70–76.
- [3] FLANAGAN B M, WILLIAMS B A, SONNI F, et al. Fruit and vegetable insoluble dietary fibre *in vitro* fermentation characteristics depend on cell wall type[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2020, 23: 100223.
- [4] LOW L E, SIVA S P, HO Y K, et al. Recent advances of characterization techniques for the formation, physical properties and stability of Pickering emulsion [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 277: 102117.
- [5] SÁNCHEZ-ZAPATA E, FUENTES-ZARAGOZA E, FERNANDEZ-LOPEZ J, et al. Preparation of dietary fiber powder from tiger nut (*Cyperus esculentus*) milk (“Horchata”) byproducts and its physicochemical properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(17): 7719–7725.
- [6] 郭芸. 燕麦麸不溶性膳食纤维的酶法提取工艺及应用的研究[D]. 天津:天津大学, 2020.
GUO Y. Study on the enzyme extraction technology and application of insoluble dietary fiber of oat bran [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [7] 栗俊广, 马旭阳, 姜茜, 等. 鹰嘴豆膳食纤维的乳化性能研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(19): 108–114.
LI J G, MA X Y, JIANG Q, et al. Study on the emulsification properties of dietary fiber in chickpea [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(19): 108–114.
- [8] WANG R, WANG J, LIU M, et al. Association of starch crystalline pattern with acetylation property and its influence on gut microbota fermentation characteristics [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 128: 107556.
- [9] XIAO Y, SHANG W, LIU J, et al. Analysis of the physicochemical properties of rice induced by postharvest yellowing during storage [J]. *Food Chemistry*, 2020, 306: 125517.
- [10] KIM H S, YU O K, BYUNN M S, et al. Okara, a soybean by-product, prevents high fat diet-induced obesity and improves serum lipid profiles in C57BL/6J mice [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(2): 607–613.
- [11] 陈贵婷, 胡坦, 徐阳, 等. 柑橘膳食纤维理化性质、生理功能及其在食品中的应用 [J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 336–345.
CHEN G T, HU T, XU Y, et al. Physical and chemical properties, physiological function of citrus dietary fiber and its application in food [J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 336–345.
- [12] ZHAO G, ZHANG R, DONG L, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 450–456.
- [13] ZHANG J, LI M, LI C, et al. Effect of wheat bran insoluble dietary fiber with different particle size on the texture properties, protein secondary structure, and microstructure of noodles [J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2019, 2(4): 97–102.
- [14] 余政毫, 朱文学, 白喜婷, 等. 基于低场核磁共振及成像技术的油莎豆远红外干燥过程中水分变化规律 [J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(16): 131–137.
YU Z H, ZHU W X, BAI X T, et al. Water change rule in the far-infrared drying process based on low-field

- nuclear magnetic resonance and imaging technology [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(16): 131–137.
- [15] XUE Z, CHEN Y, JIA Y, et al. Structure, thermal and rheological properties of different soluble dietary fiber fractions from mushroom *Lentinula edodes* (Berk.) pegler residues[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 10–18.
- [16] MA M M, MU T H. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from de-oiled cumin[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 237–246.
- [17] YAN X, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion process-
ing; the increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran [J]. *Food Chemistry*, 2015, 180: 106–115.
- [18] FENG Z, DOU W, ALAXI S, et al. Modified soluble dietary fiber from black bean coats with its rheological and bile acid binding properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 94–101.
- [19] WANG K, LI M, WANG Y, et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106162.

Study on Physicochemical, Structural and Emulsifying Properties of Insoluble Dietary Fiber of *Cyperus esculentus*

WANG Lingyu¹, ZHAO Xueling¹, WANG Anqi¹, CHEN Cheng², WANG Xuanyu¹, WANG Xintao¹, LI Xiuhe¹, WANG Huifang¹, DAI Fuhong³, GAO Tiecheng⁴, ZHOU Zhongkai^{1,*}, LI Ning^{4,*}

(1. *College of Food Science and Technology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China*; 2. *State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China*; 3. *Xinjiang Sanli Grain and Oil Co Ltd, Tumushuke 843900, China*; 4. *Guangzhou Puratos Food Co Ltd, Guangzhou 511400, China*)

Abstract: *Cyperus esculentus* is a high-quality and healthy crop, rich in nutrients. Insoluble dietary fiber of *Cyperus esculentus* was prepared via an enzymolysis method. Compared with the commercial soybean dietary fiber, the physicochemical, structural and emulsifying properties of *Cyperus esculentus* insoluble dietary fiber (CEIDF) were studied. The results showed that the CEIDF had a better water holding capacity [(14.45 ± 0.19) g/g], oil holding capacity [(8.21 ± 0.06) g/g] and expansion capacity [(14.23 ± 0.12) mL/g], than those of soybean dietary fiber. The average volume diameter of the CEIDF was (64.47 ± 0.18) μm, which was 56.65% of that of soybean dietary fiber. The results of low field NMR indicated that CEIDF had more bound water, while the soybean dietary fiber had more free water. The thermogravimetric analysis showed that CEIDF had a less weight loss and a greater thermal stability compared to the soybean dietary fiber. In terms of emulsifying properties, with the increased concentration of CEIDF, the emulsion particle size increased significantly. Under the same concentration of dietary fiber, the particle size of the emulsion prepared from CEIDF was significantly lower than soybean dietary fiber which indicated that the stability of the emulsion prepared from CEIDF was better than the emulsion prepared from soybean dietary fiber. Under the same concentration, the viscosity of CEIDF was lower than that of soybean dietary fiber, while the energy storage modulus and loss modulus of emulsion prepared from 4% CEIDF were the highest. This study aimed to provide a theoretical basis for the development and utilization of CEIDF.

Keywords: *Cyperus esculentus*; insoluble dietary fiber; physicochemical properties; structural characterization; emulsifying properties

(责任编辑:郝一铭)