

松花纤维及其与燕麦纤维复配后的理化性质对比

曲涛, 高福凯, 程勇, 王召君, 曾茂茂, 秦昉, 陈洁, 何志勇

Physicochemical Properties Comparison of Pine Pollen Fiber and Its Fiber after Compounding with Oat Fiber

QU Tao, GAO Fukai, CHENG Yong, WANG Zhaojun, ZENG Maomao, QIN Fang, CHEN Jie, and HE Zhiyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050205>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大曲理化性质与白酒产品风味的相关性分析

Correlation Analysis between Physicochemical Properties of Daqu and Flavor of Liquor Products

食品工业科技. 2020, 41(18): 244-251 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.039>

燕麦纤维和小麦纤维对小鼠的润肠通便功能比较

Comparison between Oat Fiber and Wheat Fiber on the Laxative Function in Mice

食品工业科技. 2019, 40(23): 296-299,305 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.23.048>

好食脉孢霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维及其理化性质

Preparation and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber(SDF)from Wheat Bran Fermented by *Neurospora sitophila*

食品工业科技. 2021, 42(2): 170-176,191 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030170>

高压射流磨处理对全组分燕麦浆的营养成分及理化性质影响

Effects of High-pressure Jet Mill Treatment on Nutritional Composition and Physicochemical Properties of Whole Grain Oat Slurry

食品工业科技. 2020, 41(13): 92-97,111 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.015>

干热处理不同时间对琼胶与 β -环糊精复配物理化性质的影响

Effect of Different Dry-heating Time on Physicochemical Properties of Agar/ β -cyclodextrin Mixture

食品工业科技. 2018, 39(19): 34-39 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.006>

蒜黄根膳食纤维提取工艺优化及其理化性质分析

Optimization of Extraction Conditions of Dietary Fiber from the Root of Blanched Garlic Leaves and Its Physicochemical Properties Analysis

食品工业科技. 2020, 41(23): 189-194,222 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030060>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曲涛, 高福凯, 程勇, 等. 松花纤维及其与燕麦纤维复配后的理化性质对比 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 53–59. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050205

QU Tao, GAO Fukai, CHENG Yong, et al. Physicochemical Properties Comparison of Pine Pollen Fiber and Its Fiber after Compounding with Oat Fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 53–59. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050205

· 研究与探讨 ·

松花纤维及其与燕麦纤维复配后的理化性质对比

曲涛¹, 高福凯¹, 程勇², 王召君², 曾茂茂², 秦昉², 陈洁², 何志勇^{2,*}

(1.烟台新时代健康产业有限公司, 山东烟台 264000;

2.江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要:为探究松花(复配)纤维组成成分对其理化性质的影响, 测定了松花纤维、燕麦纤维和松花燕麦纤维复配产品中的基本成分、膳食纤维含量及其相关理化性质, 并分析了纤维产品组成成分与理化性质的相关性。结果表明, 除水分含量外, 松花与燕麦纤维复配物的基本成分含量均介于松花纤维和燕麦纤维之间; 三种纤维产品的持水力、持油力、阳离子交换能力、胆固醇吸附能力、亚硝酸盐清除能力和金属离子吸附能力分别为 3.04~5.14 g/g、2.18~3.65 g/g、0.04~0.20 mmol/L、15.50~28.79 mg/g、1.95%~26.22% 和 15.58~19.16 mg/g。主成分分析和相关性分析发现, 纤维产品的持水力、阳离子交换能力和亚硝酸盐清除能力与其粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量呈显著正相关 ($P<0.01$, $P<0.05$), 与总膳食纤维和不溶性膳食纤维含量呈显著负相关 ($P<0.01$, $P<0.05$); 纤维产品的胆固醇吸附能力与其粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与不溶性膳食纤维含量呈极显著正相关 ($P<0.01$)。以上结果说明松花燕麦纤维复配后可以提高其与促进机体消化功能密切相关的部分理化性质。研究结果为松花纤维产品尤其是松花复配纤维产品的开发与应用提供了一定的理论依据。

关键词:松花纤维, 燕麦纤维, 复配物, 组成成分, 理化性质, 相关性分析

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)05-0053-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050205

本文网刊:



Physicochemical Properties Comparison of Pine Pollen Fiber and Its Fiber after Compounding with Oat Fiber

QU Tao¹, GAO Fukai¹, CHENG Yong², WANG Zhaojun², ZENG Maomao², QIN Fang², CHEN Jie², HE Zhiyong^{2,*}

(1. Yantai New Era Health Industry Co., Ltd., Yantai 264000, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The nutritional composition and dietary fiber content of pine pollen fiber, oat fiber, and pine pollen-oat fiber products and their physicochemical properties, and correlation were analyzed to investigate the effects of pine pollen (compound) fiber composition on their physicochemical properties. The results indicated that, except for the moisture content, the proximate composition of pine pollen-oat compound fiber was between that of pine pollen fiber and oat fiber. The water-holding capacity (WHC), oil-holding capacity (OHC), cation exchange capacity (CEC), cholesterol adsorption capacity (CAC), nitrite scavenging capacity (NSC), and metal ion adsorption capacity (MIAC) of three fiber products ranged from 3.04 to 5.14 g/g, 2.18 to 3.65 g/g, 0.04 to 0.20 mmol/L, 15.50 to 28.79 mg/g, 1.95% to 26.22%, and 15.58 to 19.16 mg/g, respectively. The results of principle component analysis and pearson correlation analysis showed that WHC, CEC, and NSC of fiber products were significantly positively correlated with their crude protein, crude fat, and total soluble sugar (TSS) contents ($P<0.01$, $P<0.05$), whereas significantly negatively correlated with their total dietary fiber (TDF) and

收稿日期: 2022-05-19

作者简介: 曲涛 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 功能食品研究与开发, E-mail: qtsdsu@126.com。

* 通信作者: 何志勇 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物活性物质与功能性食品, E-mail: zhyhe@jiangnan.edu.cn。

in-soluble dietary fiber (IDF) ($P<0.01$, $P<0.05$); CAC were significantly negatively correlated with their crude protein, crude fat, and TSS ($P<0.01$), whereas significantly positively correlated with their IDF ($P<0.01$). Results indicated that the compounding of pine pollen and oat fiber could improve some of its physicochemical properties that were closely related to the promotion of the digestive function of the body. The present results provide a theoretical basis for the development and application of pine pollen fiber products, especially pine pollen compound fiber products.

Key words: pine pollen fiber; oat fiber; compound; nutritional composition; physicochemical property; correlation analysis

松花粉(Pine pollen)是我国传统的药食同源花粉,富含多种营养素如蛋白质、矿物质、维生素、酶和多酚类物质等,具有广阔的开发前景,近年来受到食品医药界的广泛关注^[1]。国内外研究主要集中于松花粉的活性物质以及药理作用上^[2],其产品主要有保健酒、保健饮料和保健糕点等^[3]。大部分松花粉产品主要由松花粉全粉制成,但目前松花粉的产品开发逐渐趋向于其水提取物形式,以求水溶性功能物质的富集与相应的功能特性放大效应。然而,在松花粉开发水提取物产品时,常常造成松花粉水提取后残渣的大量浪费,残渣中可能还存在大量膳食纤维等营养物质。因此,可选择残渣作为提取松花纤维的主要来源。

已有研究报道膳食纤维具有多种功能特性,如水合能力、吸附能力、抗氧化能力和肠道调节能力等^[4]。膳食纤维可以作为膳食补充剂,长期食用富含膳食纤维的产品有助于改善人群膳食结构,从而控制体重、调节肠道和预防心血管疾病等^[5]。近年来,富含膳食纤维产品开发迅速发展,但我国人均膳食纤维摄入量远远未达到中国营养学会推荐摄入量(25 g)^[5],而松花(复配)纤维产品的开发与利用可为消费者提供更多的选择。已有研究表明,膳食纤维能有效治疗便秘,复配膳食纤维比单一种类的膳食纤维更有利于肠道功能的改善^[6]。芩朋春等^[7]发现燕麦膳食纤维和小麦膳食纤维、胡萝卜膳食纤维的复配明显改善便秘人群的润肠通便功能,且未对人体健康产生不良影响。对于松花燕麦纤维而言,合理调整其原料纤维即松花纤维和燕麦纤维的复配比例可以开发出优质的具有特定功能特性的复配纤维。因此,本研究通过对松花(复配)纤维组成成分及其理化性质的分析,评价纤维基本组成成分与其持水力、持油力、阳离子交换能力、胆固醇吸附能力、亚硝酸盐清除能力和金属离子吸附能力理化性质之间的关联性,为适用于肠道健康的松花纤维产品的高效开发与利用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

盐酸、氯化钠、氢氧化钠、冰乙酸、硫酸、胆固醇、亚硝酸钠、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 CuSO_4 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;大豆油和花生油 益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;玉米油和菜籽油 中粮集团有限公司;鸡蛋 无锡欧尚超市。

Microtrac S3500 型激光粒度分析仪 美国麦克奇有限公司;SpectraMax 190 全波长酶标仪 美国

Molecular Devices 公司;ICS-5000 离子色谱仪 美国戴安公司。

1.2 实验方法

1.2.1 三种膳食纤维粉样品的制备 膳食纤维粉样品由烟台新时代健康产业集团有限公司提供。其中松花纤维粉是以松花粉为原料,经超声水提、分离、高温灭菌和粉碎而成;燕麦纤维粉是以燕麦壳为原料,经高温灭菌、熟化、破碎、超微粉碎后不添加其他辅料而成;松花燕麦纤维粉是将松花纤维粉和燕麦纤维粉按复配比例 1:2.5 进行混合得到。

1.2.2 水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖的测定 分别参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》、GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》、GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》、GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》和任婧^[8]的蒽酮比色法对三种纤维产品中水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量进行测定。

1.2.3 膳食纤维含量测定 参照 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》对纤维产品中总膳食纤维(TDF)、不溶性膳食纤维(IDF)和可溶性膳食纤维(SDF)含量进行测定。

1.2.4 粒径分析 采用 Microtrac S3500 型激光粒度分析仪的干法粒径测试系统测量松花粉粒径分布。具体参数如下:分散压力为 0 Pa,进样时间为 10 s,折射率为 1.52。

1.2.5 持水力(Water holding capacity, WHC)和持油力(Oil holding capacity, OHC)测定 参照 Liu 等^[9]的方法对 WHC 和 OHC 进行测定。将 0.5 g 纤维产品(干质量)加入 30 mL 去离子水或植物油(大豆油、玉米油、花生油和菜籽油)中并于室温搅拌(150 r/min)过夜。静置 1 h 离心(10000 r/min, 20 min, 25 ℃)后去除上清液将残渣称重(湿质量),计算持水力或持油力。纤维 WHC 或 OHC 按照下列公式计算:

$$\text{WHC/OHC(g/g)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1}$$

式中: W_1 和 W_2 分别为纤维干质量和湿质量, g。

1.2.6 阳离子交换能力(Cation exchange capacity, CEC) 参照 Chau 等^[10]的方法对纤维产品的 CEC 进行测定。将 0.2 g 纤维加入 140 mL 盐酸(0.1 mmol/L)中混匀,于室温下磁力搅拌 24 h 后冲净样品中 Cl^- (蒸馏水冲洗,硝酸银检测)。将上述处理过的样

品加入到 50 mL 5% NaCl 溶液中,然后用 NaOH (0.01 mmol/L)滴定确定消耗 NaOH 溶液体积。CEC 按下列公式计算:

$$CEC(\text{mmol/L}) = \frac{(V_1 - V_0) \times c}{W_1}$$

式中: V_1 和 V_0 分别为滴定纤维组和空白组消耗 NaOH 溶液体积, mL; c 为 NaOH 溶液浓度, mmol/L; W_1 为样品干重, g。

1.2.7 胆固醇吸附能力(Cholesterol absorption capacity, CAC) 参照张启月等^[11]的方法对纤维的 CAC 进行测定: 向 2.0 g 样品中加入 50 g 蛋黄乳液(蛋黄乳液用水稀释 10 倍)并搅拌均匀, 分别使用 0.1 mol/L 的盐酸和氢氧化钠溶液调节 pH2.0 和 7.0, 37 °C 振荡 2 h 后离心(4000 r/min, 20 min)收集上清。取 0.1 mL 上清液, 用冰乙酸补全至 1.0 mL, 先后加入邻苯二甲醛(0.4 mL, 1.0 mg/mL)和 99.5% 冰乙酸与 98.0% 浓硫酸的混合酸(8.0 mL, 1:1), 室温放置 10 min 后测定 550 nm 处的吸光值。使用胆固醇制作标曲($y=38.422x+0.06$, $R^2=0.9938$)进行定量, 按下列公式计算样品对胆固醇的吸附能力:

$$CAC(\text{mg/g}) = \frac{(m_1 - m_2)}{W_1}$$

式中: m_1 和 m_2 分别为吸附前和吸附后蛋黄液中胆固醇量, mg; W_1 为样品干重, g。

1.2.8 亚硝酸盐清除能力(Nitrite scavenging ability, NSA) 参照郑佳欣^[12]的方法对纤维产品的亚硝酸盐清除能力进行测定: 向 0.5 g 纤维产品中加入 100 mL NaNO₂ 溶液(100 μmol/L)并调节 pH 至 2.0 和 7.0, 搅拌至分散, 水浴振荡(37 °C, 120 r/min) 2 h 取出后静置。向上清液(2.0 mL)中加入对氨基苯磺酸溶液(2 mL, 0.4%)混匀, 放置 5 min 后加入盐酸萘乙二胺溶液(1 mL, 0.2%), 定容至 50 mL, 混匀并静置 15 min 后测定 538 nm 处的吸光值。使用 NaNO₂ 制作标曲($y=0.0183x+0.0354$, $R^2=0.9996$)计算 NO₂⁻含量, 并按下列公式计算其对 NO₂⁻的清除率:

$$\text{清除率}(\%) = \frac{(n_0 - n_1)}{n_0} \times 100$$

式中: n_0 和 n_1 分别为溶液中 NO₂⁻初始含量与最终含量, μmol/L。

1.2.9 金属离子吸附能力测定(Metal ion adsorption capacity, MIAC) 参照周崇银等^[13]的方法测定纤维产品对金属离子(Cd²⁺、Pb²⁺和 Cu²⁺)的吸附作用: 分别取 100 mL 100 mg/L 的 Cd(NO₃)₂、Pb(NO₃)₂ 和 CuSO₄ 溶液置于三角瓶(250 mL)中, 用 HNO₃ 和 NaOH 溶液(0.01 mol/L)依次调节溶液 pH 至 2.0 和 7.0。加入 0.50 g 样品于三角瓶中振荡培养(37 °C, 120 r/min)2 h 后吸取吸附液并离心, 采用电感耦合等离子体质谱法测定上清液离子浓度。按下列公式计算纤维产品对金属离子的吸附率:

$$MIAC(\text{mg/g}) = \frac{(N_1 - N_2) \times V}{W_1}$$

式中: N_1 为离子的初始浓度, mg/L; N_2 为吸附上清液的离子浓度, mg/L; V 为用于吸附的金属离子体积, L; W_1 为样品质量, g。

1.3 数据处理

实验重复三次并采用平均值±标准偏差表示结果。采用 Statistix 9.0 软件对数据进行单因素方差分析, 并采用最小显著性差异法(LSD)分析平均值之间的差异。主成分分析和相关性分析分别采用 SIMCA 14.1 软件(Umetrics 公司, 瑞士)和 OriginPro 2021 (OriginLab 公司, 美国)。

2 结果与分析

2.1 膳食纤维产品营养成分分析

三种纤维产品基本成分含量如表 1 所示, 松花纤维粉、燕麦纤维粉和松花燕麦纤维粉水分和灰分含量分别在 3.74%~7.39% 和 1.68%~2.48% 之间。松花纤维、燕麦纤维粉和松花燕麦纤维粉的粗蛋白含量较低, 尤其是燕麦纤维粉和松花燕麦纤维粉的粗蛋白含量仅在 1.52%~3.20% 之间, 可能是在制备纤维粉时已去除部分蛋白质, 导致粗蛋白含量低于松花粉原料。松花纤维粉粗脂肪含量和可溶性总糖含量显著高于燕麦纤维粉和松花燕麦纤维粉粗脂肪含量和可溶性总糖含量($P<0.05$)。松花纤维和燕麦纤维复配后的松花燕麦纤维基本成分除水分含量外均介于松花纤维和燕麦纤维之间。

表 1 三种纤维产品基本成分

Table 1 The proximate composition of three fiber products

样品	水分 (%)	灰分 (%)	粗蛋白 (%)	粗脂肪 (%)	可溶性总糖 (%)
松花纤维粉	4.77±0.44 ^b	1.68±0.52 ^a	8.02±0.35 ^a	7.84±0.34 ^a	17.48±0.07 ^a
燕麦纤维粉	7.39±0.12 ^a	2.48±0.74 ^a	1.52±0.49 ^c	1.19±0.85 ^c	0.74±0.05 ^c
松花燕麦纤维粉	3.74±0.15 ^c	1.71±0.34 ^a	3.20±0.30 ^b	3.30±0.05 ^b	14.56±2.18 ^b

注: 同列不同小写字母代表差异显著性, $P<0.05$; 表2-表5同。

三种纤维粉的膳食纤维含量如表 2 所示, 燕麦纤维粉的 TDF(88.75%)显著高于松花燕麦纤维粉(83.23%)和松花纤维粉(68.18%)($P<0.05$), 燕麦纤维粉的 IDF(78.59%)显著高于松花燕麦纤维粉(73.73%)和松花纤维粉(64.98%)($P<0.05$)。由于松花纤维粉为松花粉水提取后的残渣冻干粉, SDF 已在提取过程中除去, 因此含松花纤维粉的产品主要以 IDF 为主。

表 2 三种纤维产品膳食纤维含量

Table 2 The content of dietary fiber in three fiber products

样品	TDF (%)	IDF (%)	SDF (%)
松花纤维粉	68.18±0.08 ^c	64.98±0.15 ^c	3.20±0.07 ^c
燕麦纤维粉	88.75±0.07 ^a	78.59±0.90 ^a	10.15±0.83 ^a
松花燕麦纤维粉	83.23±0.40 ^b	73.73±0.69 ^b	9.50±0.29 ^b

2.2 膳食纤维产品粒径分析

粒径是表征颗粒体系的重要指标,纤维产品的理化性质与纤维的粒径大小关系密切。纤维产品的粒径分布如图1所示,松花纤维、燕麦纤维和松花燕麦纤维的平均粒径分别为272.8、30.79和152.8 μm 。纤维的制备过程改变了其粒径大小,松花纤维仅通过常规的机械粉碎法得到,而燕麦纤维是经过超微粉碎得到,因此燕麦纤维的平均粒径明显小于松花纤维^[3]。此外,由于实际工艺生产需求,松花燕麦复配纤维被制成颗粒状,且松花燕麦复配纤维的平均粒径介于松花纤维和燕麦纤维之间。

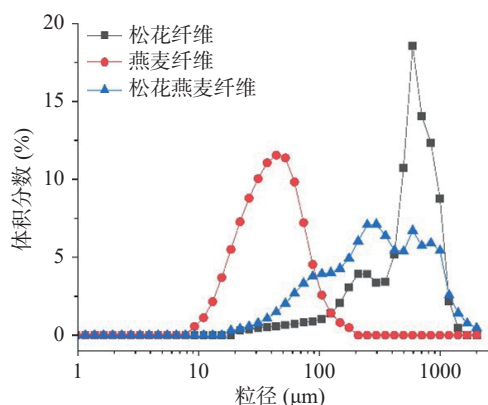


图1 三种纤维产品的粒径分布图

Fig.1 Particle size distribution of three fiber products

2.3 膳食纤维产品持水力和持油力分析

如表3所示,三种产品持水力大小顺序为:松花纤维粉>松花燕麦纤维粉>燕麦纤维粉。松花纤维粉颗粒较大,经过复配成的松花燕麦纤维粉其粒径减小、比表面积增大,有利于水分子与亲水性基团的结合,可能会导致持水力增加^[14]。然而,本研究中复配纤维的持水力却表现出下降的趋势,这可能是由于超微粉碎破坏了燕麦纤维颗粒致密的多孔网状结构,原本由氢键作用存在于多孔网状结构内部空隙间的水分被释放,对水分的束缚能力减小,最终导致燕麦纤维持水能力降低。而当松花纤维与燕麦纤维按1:2.5混合制成复配纤维后,虽然复配纤维粒径减小但多孔网状结构却低于同等量的松花纤维,松花纤维由于保持了其致密的多孔网状结构而表现出比复配纤维更佳的持水能力^[15-16]。在关于洋蓟膳食纤维的研究中也报道了类似的结果^[16]。

表3 三种纤维产品持水力和持油力

Table 3 Water-holding capacity and oil-holding capacity of three fiber products

样品	持水力(g/g)	持油力(g/g)			
		大豆油	玉米油	花生油	菜籽油
松花纤维粉	5.14±0.10 ^a	2.18±0.06 ^b	2.53±0.04 ^a	2.22±0.17 ^c	2.27±0.12 ^b
燕麦纤维粉	3.04±0.02 ^c	3.02±0.05 ^a	3.17±0.24 ^a	2.70±0.05 ^b	2.51±0.33 ^{ab}
松花燕麦纤维粉	4.36±0.02 ^b	3.17±0.16 ^a	3.11±0.04 ^a	3.65±0.05 ^a	3.20±0.02 ^a

此外,还测定了三种纤维对常见的植物油的持

油能力,三种样品对大豆油的持油力大小依次为松花燕麦纤维粉>燕麦纤维粉>松花纤维粉;对玉米油的持油力大小依次为燕麦纤维粉>松花燕麦纤维粉>松花纤维粉;对花生油的持油力大小依次为松花燕麦纤维粉>燕麦纤维粉>松花纤维粉;对菜籽油的持油力大小依次为松花燕麦纤维粉>燕麦纤维粉>松花纤维粉。这说明松花纤维粉经燕麦纤维粉复配后对大豆油、花生油和菜籽油的持油能力增强。纤维粉微观结构与比表面积的不同和植物油组成的差异是导致纤维粉对植物油持油能力变化的主要原因^[17]。此外,膳食纤维的疏水性质也极大影响着其持油能力^[18]。

膳食纤维的质量与其持水力和持油力密切相关。高持水力的膳食纤维可以锁住食物中的水分,减少脱水引起的收缩,从而提高产品质量。此外,它们还能促进肠道蠕动,加速毒素的排出^[14]。膳食纤维中的亲水基团和网状结构是其持水力的基础。持油力通常与纤维颗粒的表面性质、总电荷密度和多糖组分有关。高持油力的膳食纤维可以明显改善食品的感官特性,使高脂肪食品更加稳定,有助于延长食品的保质期。

2.4 膳食纤维产品的吸附能力分析

三种样品的阳离子交换能力、胆固醇吸附能力和亚硝酸盐清除能力如表4所示。膳食纤维的阳离子交换能力可以被理解为是经过离子交换过程(吸附液中的离子来交换纤维上的离子)来保持离子的保留能力或体内的缓冲能力^[19]。由表4可知,三种样品的阳离子交换能力强弱依次为松花纤维粉>松花燕麦纤维粉>燕麦纤维粉。阳离子交换能力主要依赖于官能团如羟基、酚基和羧基,这些官能团可以取代氢离子和金属离子发生相互作用(尤其是在富含的果胶和纤维素样品中)^[20]。松花燕麦纤维粉样品可能暴露出了更少的侧基如羟基、羧基和偕胺基等官能团,因此其阳离子交换能力低于松花纤维粉。具有高阳离子交换能力的膳食纤维能够包裹、破坏和分解脂质乳剂,从而降低脂质的扩散和吸收^[19]。

表4 三种纤维产品阳离子交换能力、胆固醇吸附能力和亚硝酸盐清除能力

Table 4 Cation exchange capacity, cholesterol adsorption capacity, and nitrite scavenging capacity of three fiber products

样品	阳离子交换能力 (mmol/L)	胆固醇吸附能力 (mg/g)	亚硝酸盐清除能力 (%)
松花纤维粉	0.20±0.01 ^a	15.50±2.19 ^b	26.22±0.38 ^a
燕麦纤维粉	0.04±0.01 ^c	28.79±2.73 ^a	1.95±2.31 ^c
松花燕麦纤维粉	0.07±0.01 ^b	21.29±5.04 ^{ab}	14.97±0.28 ^b

膳食纤维对胆固醇的吸附能力常被作为亲脂性物质吸附的评价指标。膳食纤维可通过降低胶束胆固醇的溶解度和抑制胆固醇摄取来降低胆固醇的吸收^[21]。从表4可知,燕麦纤维粉和松花燕麦纤维粉的胆固醇吸附能力较好,分别为28.79和21.29 mg/g。有文献报道纤维产品所带电荷是影响纤维与胆固醇

间结合力的主要因素^[22]。当纤维表面带负电荷时,纤维在酸性条件下具有更好的胆固醇吸附能力;当纤维表面带正电荷时,纤维在中性条件下与胆固醇结合更多。

亚硝胺类化合物是典型的化学致癌物,它是由胃中的亚硝酸盐和仲胺合成的,在进入肠道后能够引起癌症^[23]。松花纤维粉的亚硝酸盐清除能力较强,燕麦纤维粉亚硝酸盐清除能力最差,这是由于不同的化学吸附能力造成的。松花纤维粉致密的网状结构与表面较多的酚酸基团的存在可与机体中酸性条件下形成的氮氧化合物结合,从而达到吸附效果,而燕麦纤维由于网状结构被严重破坏,吸附能力降低^[20]。

膳食纤维因其良好的吸附性能可应用于吸附重金属,过量摄入重金属离子会导致免疫异常。重金属离子不应该被吸收,大部分都是从体内排出的^[24]。但少量被血液循环吸收,然后沉积在重要的内脏器官和骨髓,抑制这些器官的功能,从而导致中毒反应。胃肠道是重金属离子进入人体的主要环境,但又难以排出。膳食纤维的强吸附能力,能有效防止机体对重金属离子的吸收,可防止对胃肠道造成不必要的损害^[25]。如表 5 所示,三种纤维产品对 Cu^{2+} 的吸附能力大小依次为:燕麦纤维粉>松花燕麦纤维粉=松花纤维粉;三种样品对 Cd^{2+} 的吸附能力大小依次为:燕麦纤维粉>松花纤维粉>松花燕麦纤维粉;三种样品对 Pb^{2+} 的吸附能力大小依次为:松花纤维粉>松花燕麦纤维粉>燕麦纤维粉。膳食纤维对重金属的吸附能力与其组成有关,纤维素和半纤维素对重金属的吸附能力较强,而木质素对重金属的吸附能力较弱^[26]。同时,膳食纤维的比表面积也与其吸附能力密切相关^[27]。

表 5 三种纤维产品对金属离子的吸附能力

Table 5 Metal ion adsorption capacity of three fiber products

样品	Cu^{2+} (mg/g)	Cd^{2+} (mg/g)	Pb^{2+} (mg/g)
松花纤维粉	18.26±0.10 ^b	17.18±0.06 ^b	17.32±0.09 ^a
燕麦纤维粉	19.16±0.01 ^a	17.53±0.03 ^a	15.58±0.14 ^c
松花燕麦纤维粉	18.21±0.02 ^b	16.94±0.10 ^c	16.13±0.04 ^b

2.5 松花纤维的组成成分与其理化性质的主成分分析和相关性分析

根据三种纤维产品的组成成分和理化性质分析的结果可以看出不同纤维产品的理化性质存在一定的差异,这可能与其组成成分密切相关。由于直接结果信息较为复杂,难以继续挖掘其中的信息,因此,本研究采用主成分分析法,剔除相关性不大与数据重叠的信息,对三种纤维产品的组成成分和理化性质进行深度挖掘分析^[28-29]。

主成分分析的得分图和载荷图如图 2 和图 3 所示。由图 2 可知前两个主成分的累积贡献率为 94.2% ($\text{PC1}=67.2\%$, $\text{PC2}=27.0\%$),能够较好地拟合以上数据,能够代表所有变量信息。载荷图上的绝对值(载荷代表点到原点的距离)越大,该因素对主成分影响

越大^[30]。由载荷图(图 3)可知,对主成分 1 有显著贡献的因素有灰分、粗蛋白、粗脂肪、可溶性总糖、TDF 和 IDF 含量,对主成分 2 有显著贡献的因素有水分和 SDF 含量。结合得分图和载荷图分析可以得到纤维产品的组成成分与其理化性质之间的关联性。图 2(得分图)中松花纤维产品分布在得分图的左下角区域,在图 3(载荷图)对应的左下角区域中,粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量较高,且其持水力、阳离子交换能力、亚硝酸盐清除能力以及对铬离子吸附能力较强。图 2 中燕麦纤维产品分布在得分图的右下角区域,在图 3 对应的右下角区域中,水分、灰分、TDF 和 IDF 含量较高,且其对大豆油和玉米油的持油力、胆固醇吸附能力以及对铅离子和铜离子吸附能力较强。图 2 中松花燕麦纤维产品分布在得分图的上方区域,在图 3 对应的上方区域中, SDF 含量较高,且其对花生油和菜籽油的持油力较强。以上结果表明主成分分析的主要贡献因素(纤维产品的组成成分:水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪、可溶性总糖、膳食纤维)与纤维产品的理化性质存在一定的关联。

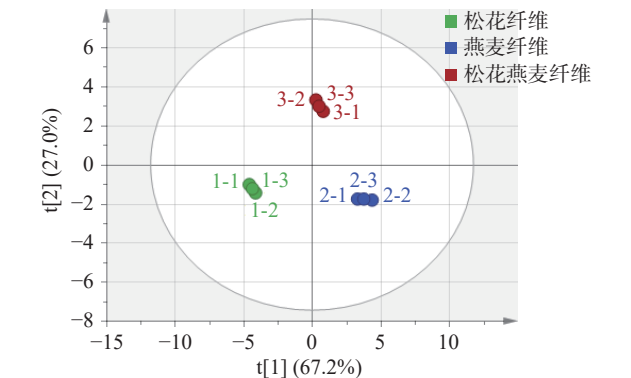


图 2 三种纤维产品的主成分分析得分图
Fig.2 PCA score plot of three fiber products

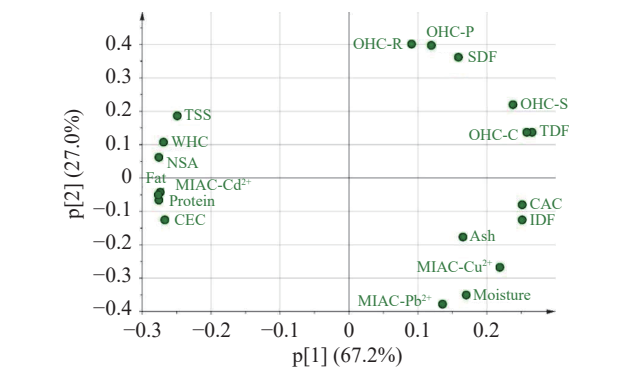


图 3 三种纤维产品的主成分分析载荷图
Fig.3 PCA loading plot of three fiber products
注: Moisture: 水分; Ash: 灰分; Protein: 粗蛋白; Fat: 粗脂肪; TSS: 可溶性总糖; TDF: 总膳食纤维; IDF: 不溶性膳食纤维; SDF: 可溶性膳食纤维; WHC: 持水力; OHC-S、OHC-C、OHC-P 和 OHC-R 分别代表对大豆油、玉米油、花生油和菜籽油的持油力; CEC: 阳离子交换能力; CAC: 胆固醇吸附能力; NSA: 亚硝酸盐清除能力; MIAC: 金属离子吸附能力; 图 4 同。

为进一步分析纤维产品与其理化性质之间的关

关联性,基于主成分分析结果,本研究选择主成分分析的主要贡献因素(水分、粗蛋白、粗脂肪、可溶性总糖、TDF、IDF和SDF)进行相关性分析。由图4可知,纤维产品的持水力、阳离子交换能力、亚硝酸盐清除能力和对铬离子吸附能力与其粒径、粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量呈显著正相关($P<0.01$, $P<0.05$),与TDF和IDF含量呈显著负相关($P<0.01$, $P<0.05$);纤维产品的持油力主要与其粒径、粗蛋白和粗脂肪(负相关)、膳食纤维(正相关)含量有关,且不同植物油影响因素存在差异;纤维产品的胆固醇吸附能力和对铜离子的吸附能力与其粒径、粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量呈显著负相关($P<0.01$, $P<0.05$),与IDF含量呈极显著正相关($P<0.01$);纤维产品对铅离子的吸附能力主要受水分、IDF和可溶性总糖含量影响。总体而言,纤维产品的微观结构、比表面积、表面基团(电荷和密度)和具体成分含量均会极大影响着其理化性质,且不同性质其主要影响因素不同^[23-27]。

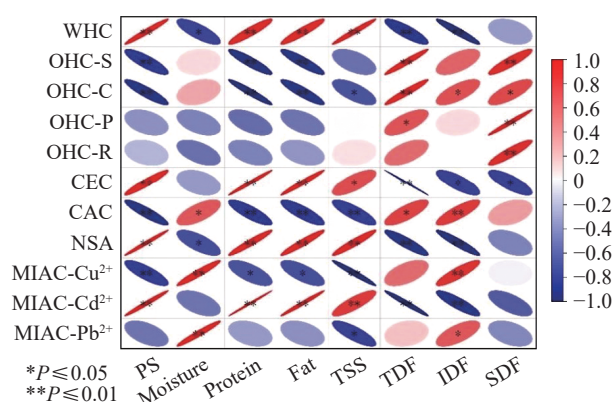


图4 三种纤维产品组成成分与其理化性质的相关性分析
Fig.4 Pearson correlation coefficient between composition and physicochemical properties of three fiber products
注: PS: 粒径。

3 结论

本研究对三种膳食纤维产品(松花纤维、燕麦纤维和松花燕麦纤维)组成成分与其理化性质进行了分析比较,并采用主成分分析和相关性分析对所得结果进行深度挖掘分析其之间的差异与关联性。结果表明:除水分含量外,复配纤维产品(松花燕麦纤维)基本成分含量均介于松花纤维和燕麦纤维含量之间,但三种纤维产品理化性质之间存在一定的差异。通过主成分分析和相关性发现松花(复配)纤维产品的持水力、阳离子交换能力和亚硝酸盐清除能力与其粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量呈正相关($P<0.01$, $P<0.05$),与TDF和IDF含量呈负相关($P<0.01$, $P<0.05$);纤维产品的胆固醇吸附能力与其粗蛋白、粗脂肪和可溶性总糖含量呈负相关($P<0.01$),与IDF呈正相关($P<0.01$);纤维产品对不同植物油持油力和对不同离子吸附能力存在差异。以上结果表明,从提高松花燕麦纤维产品的理化性质与其对应的功能特性

(尤其是在肠道健康领域应用)角度考虑,应适当调整纤维产品的组成成分,使其具有相应较强的理化性质,使加工更加具有针对性,这为松花纤维和松花复配纤维产品的开发与利用提供理论支撑。

参考文献

- [1] CHENG Y, QUAN W, HE Y, et al. Effects of postharvest irradiation and superfine grinding wall disruption treatment on the bioactive compounds, endogenous enzyme activities, and antioxidant properties of pine (*Pinus yunnanensis*) pollen during accelerated storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 144: 111249.
- [2] SHAN Y, YU J, LIU Q, et al. Lipid oxidation stability of ultra-high-temperature short-time sterilization sporoderm-broken pine pollen (UHT-PP) and ^{60}Co -irradiation sterilization sporoderm-broken pine pollen (^{60}Co -PP)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99: 675-684.
- [3] 程勇. 前处理对松花粉营养活性成分及贮藏稳定性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [CHENG Yong. Effects of pretreatment on nutrients, bioactive components and storage stability of pine pollen[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [4] 王浩, 崔敬悦, 李红丽, 等. 膳食纤维的来源及应用进展研究[J]. *农业科技与装备*, 2021(6): 92-93. [WANG Hao, CUI Jingyue, LI Hongli, et al. Study on the source and application of dietary fiber[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2021(6): 92-93.]
- [5] 徐燕, 谭熙蕾, 周才琼. 膳食纤维的组成、改性及其功能特性研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(23): 211-218. [XU Yan, TAN Xilei, ZHOU Caiqiong. Composition, modification and functional properties of dietary fiber[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(23): 211-218.]
- [6] 梁文康. 黄秋葵可溶性膳食纤维提取及通便作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [LIANG Wenkang. Study on the extraction and laxative function of soluble dietary fiber from okra[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
- [7] 岑朋春, 张印红, 李志玲, 等. 复合膳食纤维对便秘患者的通便功能改善作用[J]. *慢性病学杂志*, 2016, 17(6): 671-672. [LING Pengchun, ZHANG Yinhong, LI Zhiling, et al. Improvement of laxative function of compound dietary fiber in patients with constipation[J]. *Chronic Pathematology Journal*, 2016, 17(6): 671-672.]
- [8] 任婧. 番茄果实可溶性糖含量遗传规律的研究及QTL定位[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. [REN Jing. Tomato soluble sugar content genetic regularity analysis and QTL mapping[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.]
- [9] LIU Y, ZHANG H, YI C, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment[J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128352.
- [10] CHAU C, CHEUNG P. Effects of the physico-chemical properties of three legume fibers on cholesterol absorption in hamsters[J]. *Nutrition Research*, 1999, 19: 257-265.
- [11] 张启月, 张士凯, 郝良卿, 等. 不同提取方法对樱桃酒渣水溶性膳食纤维结构、理化与功能性质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42: 98-105. [ZHANG Qiyue, ZHANG Shikai, XI Liangqing, et al.

Effects of different extraction methods on the structure, physicochemical and functional properties of water-soluble dietary fiber from cherry wine dregs[J]. *Food Science*, 2021, 42: 98–105.]

[12] 郑佳欣. 刺梨渣膳食纤维蒸汽爆破改性及结构、功能性质研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. [ZHENG Jiaxin. Structural and functional properties of dietary fiber from chestnut rose residue modified by steam explosion[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.]

[13] 周崇银, 李晗, 范方宇, 等. 西番莲果皮不溶性膳食纤维对金属离子的吸附特性[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(14): 160–167. [ZHOU Chongyin, LI Han, FAN Fangyu, et al. Characteristics of metallic ion adsorption on insoluble dietary fiber from passion peel[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(14): 160–167.]

[14] CHAU C, WANG Y, WEN Y. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre[J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(4): 1402–1408.

[15] 李菁, 吴聪聪, 叶沁, 等. 不同处理方法对豆渣膳食纤维结构和降血糖性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(15): 178–184. [LI Jing, WU Congcong, YE Qin, et al. Effect of different treatments on structure and hypoglycemic properties of okara dietary fibers[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(15): 178–184.]

[16] 王雅怡, 付晓康, 贺便, 等. 不同处理方法对洋蓐膳食纤维结构及理化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(22): 83–89. [WANG Yayi, FU Xiaokang, HE Bian, et al. Effects of different treatments on the structure and physicochemical properties of artichoke dietary fiber[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(22): 83–89.]

[17] EASTWOOD M. The physiological effect of dietary fiber: An update[J]. *Annual Review of Nutrition*, 1992, 12(1): 19–35.

[18] HUANG J, LIAO J, QI J, et al. Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106140.

[19] CHAU C, HUANG Y. Comparison of the chemical composition and physicochemical properties of different fibers prepared from the peel of *Citrus sinensis* L. cv. Liucheng[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(9): 2615–2618.

[20] LYU B, WANG H, SWALLAH M, et al. Structure, properties and potential bioactivities of high-purity insoluble fibre from soybean dregs (Okara)[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130402.

[21] YAO S, XU Y, ZHANG Y, et al. Black rice and anthocyanins induce inhibition of cholesterol absorption *in vitro*[J]. *Food & Function*, 2013, 4(11): 1602–1608.

[22] SINGH J, METRANI R, SHIVANAGOUDRA S, et al. Re-

view on bile acids: Effects of the gut microbiome, interactions with dietary fiber, and alterations in the bioaccessibility of bioactive compounds[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(33): 9124–9138.

[23] 倪松, 崔颖, 姜涛, 等. 食品中N-亚硝胺类化合物检测方法研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(6): 215–219. [NI Song, CUI Ying, JIANG Tao, et al. Research progress in detection methods of N-nitrosamines in foods[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(6): 215–219.]

[24] ZHANG W, ZENG G, PAN Y, et al. Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 172: 102–112.

[25] MA S, REN B, DIAO Z, et al. Physicochemical properties and intestinal protective effect of ultra-micro ground insoluble dietary fibre from carrot pomace[J]. *Food & Function*, 2016, 7(9): 3902–3909.

[26] 钟雅云, 杨敏, 何沁峰, 等. 海带与小麦麸皮由来不溶性膳食纤维的酶辅助提取及其功能特性比较[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(11): 124–131. [ZHONG Yayun, YANG Min, HE Qinfeng, et al. Enzyme-assisted extraction of insoluble dietary fibers from kelp and wheat bran and composition of their functional properties[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(11): 124–131.]

[27] 韦世鹏. 藜麦膳食纤维提取、表征及其吸附性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [WEI Shipeng. Study on the extraction, characterization and adsorption performance of quinoa dietary fiber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]

[28] GRANATO D, SANTOS J, ESCHER G, et al. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 72: 83–90.

[29] 姜春秀, 全威, 陈洁, 等. 不同酪蛋白磷酸肽产品理化性质与持钙能力的相关性分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 292–299. [JIANG Chunxiu, QUAN Wei, CHEN Jie, et al. Correlation analysis between properties and calcium-holding capacity of different casein phosphopeptide products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 292–299.]

[30] PÉREZ-RODRÍGUEZ M, DIRCHWOLF P, RODRÍGUEZ-NEGRÍN Z, et al. Assessing mineral profiles for rice flour fraud detection by principal component analysis based data fusion[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 128125.