

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021875

引用格式: 黄山, 汪楠, 张月, 等. 机械球磨处理对麻竹笋壳膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 115-120. HUANG Shan, WANG Nan, ZHANG Yue, et al. Effect of mechanical ball milling on physicochemical properties and structure of *Dendrocalamus latiflorus* shell dietary fiber[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(5): 115-120.

机械球磨处理对麻竹笋壳膳食纤维理化性质及结构的影响

黄山^{1,2}, 汪楠^{1,2}, 张月^{1,2}, 张甫生^{1,2}, 郑炯^{1,2*}

1(西南大学 食品科学学院, 重庆, 400715) 2(食品科学与工程国家级实验教学示范中心(西南大学), 重庆, 400715)

摘要 以麻竹笋壳为原料, 机械球磨为处理手段, 通过改变大小球磨珠比例得到不同粒径大小的麻竹笋壳膳食纤维(*Dendrocalamus latiflorus* shell dietary fiber, DSDF), 探究其对麻竹笋壳膳食纤维理化性质的影响, 并以红外光谱、热重分析、扫描电镜等方法表征了经不同大小球数量比处理的 DSDF 形貌、热稳定性和官能团等结构特征。研究结果表明, DSDF 粒径随球磨珠大小球数量比的增加呈先增加后减小的趋势, 当大小球比为 1:5 时, DSDF 粒径最小, 为 684.9 ± 69.23 nm, 持水力为 (4.12 ± 0.04) g/g、持油力为 (3.93 ± 0.18) g/g、膨胀力为 (8.22 ± 0.51) mL/g 最大, 其颜色比未处理组更加明亮且变浅; DSDF 的微观结构特征也在球磨处理后产生了变化, 纤维素部分分解, 热稳定性下降, DSDF 在球磨作用下尺寸减小, 表面粗糙并出现裂痕, 有团聚现象产生, 但球磨处理基本没有改变 DSDF 的官能团特征。这些结果说明机械球磨处理有效改善了 DSDF 特性, 是一种改性 DSDF 的有效方式。

关键词 机械球磨; 麻竹笋壳; 膳食纤维; 理化性质; 微观结构

Effect of mechanical ball milling on physicochemical properties and structure of *Dendrocalamus latiflorus* shell dietary fiber

HUANG Shan^{1,2}, WANG Nan^{1,2}, ZHANG Yue^{1,2},
ZHANG Fusheng^{1,2}, ZHENG Jiong^{1,2*}

1(College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

2(National Demonstration Center for Experimental Food Science and Engineering Education (Southwest University),
Chongqing 400715, China)

ABSTRACT To explore the effect on the physicochemical properties and microstructure of the *Dendrocalamus latiflorus* shell dietary fiber (DSDF), this paper used *Dendrocalamus latiflorus* shell as raw material to obtain DSDF with different particle sizes by mechanical ball milling. The morphology, thermal stability and functional groups were characterized by FT-IR, TGA and SEM. The results showed that the DSDF particle size increased first and then decreased with the increase of the ball-to-ball ratio. When the ball-to-ball ratio was 1:5, the DSDF particle size was the smallest (684.9 ± 69.23 nm), the water holding capacity (4.12 ± 0.04 g/g), oil holding capacity (3.93 ± 0.18 g/g) and swelling capacity (8.22 ± 0.51 mL/g) were the biggest. And its color was brighter and lighter than the original. The microstructure characteristics of DSDF also changed after ball milling, the cellulose partially decomposed and the thermal stability decreased. The size of DSDF decreased under ball milling; the surface was rough and cracked; and agglomeration occurred. However, the functional group characteristics of DSDF were basically unchanged by ball milling. These result indicated that the mechanical ball milling could effectively improve the properties of DSDF, which is an effective way to modify DSDF.

Key words mechanical ball milling; *Dendrocalamus latiflorus* shell; dietary fiber; physicochemical properties; microstructure

第一作者: 本科生(郑炯副教授为通讯作者, E-mail: zhengjiong_swu@126.com)

基金项目: 国家自然科学基金(31701617)

收稿日期: 2019-08-01, 改回日期: 2019-10-26

竹笋是一种重要的经济作物,在世界各地得到广泛种植,尤其是在亚洲,中国拥有世界上最大的竹笋产业,然而竹笋加工业的快速发展也导致了竹笋加工副产物的大量产生^[1-2]。竹笋壳作为竹笋加工副产物,在生产过程中被随意丢弃,造成极大的浪费和严重的环境污染^[3-4]。为了环境的保护和资源利用的可持续发展,越来越多的科研工作者开始研究高效率地利用竹笋壳等加工副产物的有效方法^[2]。

笋壳中富含膳食纤维,膳食纤维是指不能被人体消化道的内源性酶消化、吸收的,具有生理功效的多糖类食物成分^[5-6],其具有调节肠道菌群、降低血压、防治冠心病、降低血糖、抗癌、减肥等多种生理功能,是人体第七大营养素^[7-8]。为了促进膳食纤维的利用,人们利用多种改性方法对不同食物来源的膳食纤维进行改性,以期改善它的生理功能^[9]。目前对于膳食纤维的改性方法主要有3类:物理法、化学法、生物法^[10]。其中物理法步骤简便易操作,能够较为完整地保留膳食纤维的生物活性^[11],有利于保持食品的优良色泽、风味和质地并提高各种功能特性^[12]。物理法改性膳食纤维主要包括超声、微波、高压均质、超微粉碎等。

机械球磨法作为物理改性技术的一种,其主要原理是利用外部机械力作用,在高转速条件下使样品颗粒、研磨罐和研磨球之间产生频繁碰撞,在被反复挤压撞击的过程中,实现样品颗粒的变形、断裂、微粉化^[13]。球磨法可以实现批量生产且具有生产工艺流程短、低能耗、产生污染少和操作简单等优点^[14-15]。易甜等^[16]利用球磨微细化技术得到了各项性能提升的锦橙皮渣膳食纤维;张丽媛等^[17]研究发现球磨超微粉碎对苹果膳食纤维理化性质和羟自由基清除能力有一定程度的影响;WEN等^[18]报道球磨联合酶法处理的米糠膳食纤维功能特性优于单一酶法处理。但是目前鲜有将球磨法应用于麻竹笋壳膳食纤维(*Dendrocalamus latiflorus* shell dietary fiber, DSDF)改性的报道。因此,本文采用机械球磨法处理 DSDF,通过改变大小球磨珠的配比制得不同粒径大小的样品颗粒,探究机械球磨处理对 DSDF 理化性质及结构特征的影响,旨在扩展机械球磨法的应用范围,为 DSDF 改性提出一种新的有效方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

麻竹笋,购于重庆市北碚区天生菜市场;金龙鱼

食用油,益海嘉里(重庆)粮油有限公司;乙酸乙酯、KBr(分析纯),成都市科隆化学品有限公司。

1.2 仪器与设备

BM6pro 行星式球磨仪(使用不锈钢球 10 mm、3 mm 两种),美国 GRINDER 公司;FW135 中草药粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;1580 车速台式离心机,香港基因有限公司;Zetasizer Nano ZS 粒度分析仪,英国马尔文仪器有限公司;Phenom Pro 扫描电镜,荷兰 Phenom World 公司;Spectrum 100 傅里叶红外光谱仪,美国 Perkin Elmer 公司;UltraScan PRO 分光测色仪,美国 HunterLab 公司;TGA55 热重分析仪,美国 TA 公司。

1.3 球磨处理

挑选新鲜无损伤麻竹笋,剥取竹笋壳,切片后用沸水漂烫 8 min,60 ℃ 烘干,用粉碎机粉碎后过 200 目筛。过筛后的笋壳粉用乙酸乙酯进行脱脂并用纯水清洗,在 60 ℃ 烘箱中烘干,粉碎,得到粗 DSDF。取 8.0 g 粗 DSDF 样品于球磨机中,在球磨时间 3 h、球磨转速 400 r/min、球料质量比为 5:1 的固定条件下,设置不同大小球数量比为 1:1、1:3、1:5、1:7 进行机械球磨,未球磨处理的作为对照组 CK。最后对改性 DSDF 进行理化性质及微观结构的测定。

1.4 理化特性的测定

1.4.1 粒径测定

取 0.01 g DSDF 溶于 20 mL 蒸馏水中,充分摇匀后离心取上清液,采用 Zetasizer Nano ZS 粒度分析仪测定其粒径大小。

1.4.2 持水力、持油力和膨胀率的测定

参考 WANG 等^[19]的方法进行测定,并在实际试验条件下稍作修改。

(1)持水力。取 0.5 g(m_1)膳食纤维粉放入离心管(m_2)中,加入 20 mL 蒸馏水饱和,室温浸泡 6 h 后 4 500 r/min 离心 20 min,去除上清液称重(m_3)。根据公式(1)计算其持水力(WHC)。

$$\text{WHC}/(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{m_3 - (m_1 + m_2)}{m_1} \quad (1)$$

(2)持油力。取 0.5 g(m_1)膳食纤维粉放入离心管(m_2)中,加入 20 mL 食用油饱和,室温浸泡 6 h 后 4 500 r/min 离心 20 min,去除上清液称重(m_4)。根据公式(2)计算其持油力(OHC)。

$$\text{OHC}/(\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{m_4 - (m_1 + m_2)}{m_1} \quad (2)$$

(3)膨胀力。取 0.3 g(m)膳食纤维粉,放入 10 mL 量筒中读取体积 V_1 ,加入 10 mL 蒸馏水,振荡混

匀后静置 24 h, 读取体积 V_2 。根据公式(3)计算其膨胀力(SC)。

$$SC/(mL \cdot g^{-1}) = \frac{V_2 - V_1}{m} \quad (3)$$

1.4.3 颜色的测定

使用 UltraSan PRO 测色仪测定样品的颜色特征。开机后首先用黑白板校正, 矫正完成后测定样品 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 重复测定 6 次, 其中 L^* 表示亮度(0 表示黑色, 100 表示白色); a^* 表示红绿度(值越小表示靠近绿色, 值越大表示靠近红色); b^* 表示黄蓝度(值越小表示靠近蓝色, 值越大表示靠近黄色)^[20-21]。根据公式(4)计算其总色差 ΔE , $\Delta E < 1.5$ 表示颜色与未处理组差异小; $1.5 \leq \Delta E \leq 3.0$ 表示差异明显; $\Delta E > 3.0$ 表示差异极显著^[22]。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (4)$$

式中, L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 为未处理组值; L^* 、 a^* 、 b^* 为处理组值。

1.5 红外光谱分析

取 0.01 g 干燥 DSDF 粉末, 放入研钵中, 加入 1.00 g 干燥的 KBr, 研磨混匀。取 0.1 g 研磨后的粉末, 均匀平铺在压片模具中, 抽气加压维持 2 min 左右。压片后进入红外光谱仪中进行扫描测定, 扫描次数: 32 次, 分辨率: 4 cm^{-1} , 扫描范围: $500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 。

1.6 热重分析

取 5~6 mg 干燥 DSDF 粉末用同步热分析仪进行热重分析, 采用热重法(thermogravimetry, TG)和微分热重分析法(differential thermogravimetry analysis, DTG)测定样品的热力学性质。试验在充 N_2 的条件下进行, 升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 测定范围为室温至 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.7 微观结构

将干燥至恒重的 DSDF 粉末固定于双面导电的样品台上, 喷金使其具有导电性, 采用扫描电镜观察样品的微观结构并拍照记录。扫描电镜电压 10 kV, 放大倍数 800 倍。

1.8 数据处理

采用 Excel 2010 处理数据, 结果均用 $\bar{x} \pm s$ 表示; 运用 SPSS 24 统计软件, 对数据进行 Duncan 法差异显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著; 运用 Origin 2017 软件对数据进行处理绘图。所有试验均重复 3 次以上。

2 结果与分析

2.1 理化特性

2.1.1 粒径

机械球磨处理对 DSDF 粒径大小的影响如图 1 所示。机械球磨处理显著减小了 DSDF 的粒径, 并且随着大小球磨珠比的增加, DSDF 粒径逐渐减小, 当大小球磨珠比 1:5 时, 粒径达到最小值, 为 $(684.9 \pm 69.23) \text{ nm}$ 。大小球比继续增加, DSDF 粒径开始增大。推测可能是因为在球磨过程中, 大球与样品撞击接触点少, 主要起到剪切作用, 将粒径偏大的样品颗粒初步细化。而小球尺寸小, 与样品撞击点多, 负责将被大球初步细化的样品颗粒进一步细化^[23]。在球料比固定的条件下, 随着大小球比的增加, 大球的初步剪切细化作用被弱化; 小球数量的增多使球间碰撞变多, 与样品碰撞次数减少, 因此样品粒径增大。也可能是因为 DSDF 粒径的减小, 比表面积增大, 表面活性增强而出现团聚现象, 从而导致测得粒径增大^[17]。

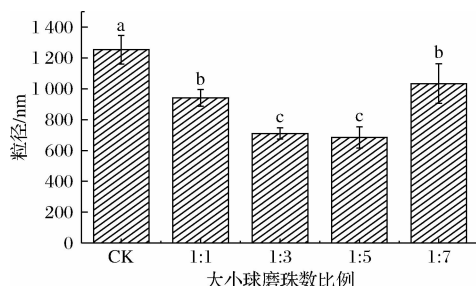


图 1 机械球磨处理对 DSDF 粒径大小的影响

Fig. 1 Effect of ball milling on the grain size of DSDF

注: 不同小写字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$) (下同)

2.1.2 持水力、持油力、膨胀力

图 2 表明, 经过机械球磨处理后, 样品的 WHC、OHC、SC 都有所提升, 且都在大小球磨珠数比例为 1:5 时有最大值 [WHC = $(4.12 \pm 0.04) \text{ g/g}$, OHC = $(3.93 \pm 0.18) \text{ g/g}$, SC = $(8.22 \pm 0.51) \text{ mL/g}$], 这一结果与 LUO 等^[24]利用复合酶改性毛竹笋壳膳食纤维的结果相似。

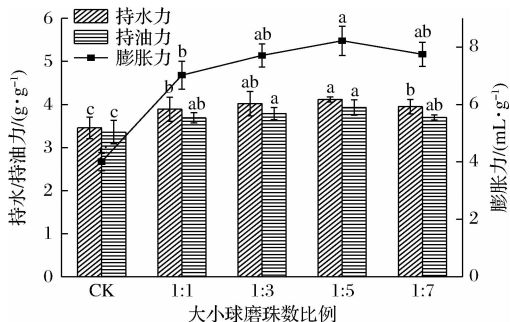


图 2 机械球磨处理对 DSDF 持水力、持油力及膨胀力的影响

Fig. 2 Effects of ball milling on WHC, OHC and SC of DSDF

随着大小球比继续增加,样品的 WHC、OHC、SC 开始下降。水合性质 WHC 和 SC 通常与样品密度、孔隙率、亲水基团暴露程度等有关。DSDF 经球磨处理后粒径减小,比表面积增大,导致其与水的接触面积增大,且因为球磨粉碎过程使 DSDF 孔隙率增加,亲水基团更多地暴露出来,水合性质提高^[25]。OHC 的提升与 DSDF 体积密度降低、多孔性和毛细管吸引力作用增强有关^[26]。在添加改性 DSDF 后,有利于增强食品体系中水和油的稳定性,对食品质构及营养价值产生影响。

2.1.3 色泽

颜色测定结果如表 1 所示,与未处理组相比,经过机械球磨处理后, L^* 显著提升($P < 0.05$),表明处理组亮度提高; a^* 显著下降($P < 0.05$),表明处理组红绿度变化明显,颜色变浅; b^* 差异不显著,表明处理组黄蓝度变化不明显;处理组 ΔE 都大于 1.5,表明颜色变化差异显著。该结果与球磨处理锦橙皮渣膳食纤维结果一致^[16]。这可能是因为 DSDF 深色大颗粒在球磨、撞击、剪切等作用力下被粉碎混匀,导致其整体色泽变浅^[27]。也可能是球磨高温和机械力的作用使 DSDF 发生褐变或破坏了 DSDF 中的色素物质^[28]。食品的色泽是影响食品感官品质的一个重要因素,以上测定结果表明可将 DSDF 应用于其他食品改变其颜色特征,为食品实际生产提供参考。

表 1 机械球磨处理对 DSDF 色泽的影响

Table 1 Effects of ball milling on color of DSDF

大小球比	L^*	a^*	b^*	ΔE
CK	79.06 ± 0.32 ^d	8.48 ± 0.21 ^a	25.55 ± 0.42 ^a	—
1:1	80.71 ± 0.41 ^c	7.22 ± 0.40 ^b	25.38 ± 0.55 ^a	2.23 ± 0.58 ^b
1:3	83.43 ± 0.72 ^b	6.82 ± 0.23 ^c	25.55 ± 0.38 ^a	4.47 ± 0.77 ^a
1:5	83.35 ± 0.78 ^b	6.62 ± 0.29 ^c	25.03 ± 0.87 ^a	4.55 ± 0.87 ^a
1:7	83.92 ± 0.28 ^b	6.59 ± 0.18 ^c	25.64 ± 0.26 ^a	5.25 ± 0.38 ^a

注:同一列不同小写字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)(下同)

2.2 结构特征

2.2.1 红外光谱分析

图 3 是机械球磨处理前后 DSDF 的红外光谱分析图。由图 3 可知,机械球磨处理前后基本一致,未出现新的吸收峰,说明 DSDF 经过机械球磨处理后没有产生新的化合物。3 316 cm^{-1} 处的宽吸收峰是纤维素和半纤维素中 O—H 伸缩振动产生的^[29];2 935 cm^{-1} 处的吸收峰代表的是多糖亚甲基的 C—H 振动,处理组的峰强度较未处理组减小,说明经过处理后 DSDF 的多糖亚甲基部分遭到一定程度的破坏;1 638 cm^{-1}

处出现的吸收峰是 C=O 的非对称伸缩振动产生,说明 DSDF 中含有羧、醛基^[30];1 483 cm^{-1} 处代表的是木质素中的苯环特征吸收峰,可以说明木质素的存在;1 056 cm^{-1} 处出现的较宽吸收峰是纤维素和半纤维中 C—O 收缩振动产生的^[31];882 cm^{-1} 处是 β -糖苷键的特征吸收峰,说明 DSDF 中含有 β -糖苷键。由以上结果可知,机械球磨处理基本没有改变 DSDF 的官能团结构,DSDF 与官能团相关的优良性能不会因为机械球磨处理而减弱或消失。

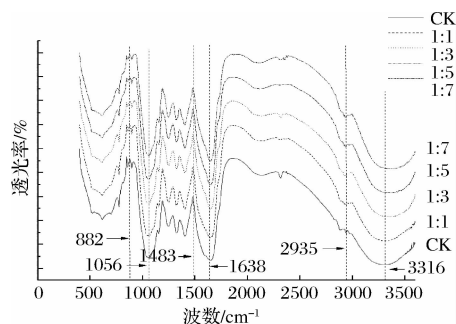


图 3 红外光谱分析

Fig. 3 FTIR spectra of DSDF

2.2.2 热重分析

图 4 是对 DSDF 的热稳定性分析。从图 4-b 可知,DSDF 的热分解过程主要由 3 个阶段组成。50 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围 DSDF 开始失去水分,经过球磨处理的 DSDF 失重速率大于 CK 组,这是因为球磨处理后 DSDF 粒径减小,孔隙增多,更多的亲水基团被暴露出来,使原有的结合水更容易在高温环境中流失;150 $^{\circ}\text{C}$ 附近的失重峰,可能是少量可溶性杂质如蛋白质的存在导致的;在 200 ~ 350 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围,DSDF 的失重主要是因为纤维素、半纤维素及木质素的热分解,经过球磨处理的 DSDF 在此温度范围内失重总量没有明显变化,但失重速率增大,这是由于机械球磨对 DSDF 的剪切细化作用初步破坏 DSDF 的结构,使纤维素、半纤维素和木质素被初步分解。总的来说,机械球磨处理细化了 DSDF,使其部分大分子结构破坏,降低了 DSDF 的热稳定性。

2.2.3 微观结构

图 5 是 DSDF 经机械球磨处理前后的扫描电镜图。从图 5-a 可以看出,未处理的 DSDF 体积明显大于处理组,表面较为光滑,颗粒大小形状不一,多倾向于球形。经过机械球磨处理的 DSDF 在高速剪切作用下产生不规则的破碎、断裂,使 DSDF 出现孔隙,表面粗糙并出现裂痕,颗粒尺寸显著减小,比表面积大大增加,其中大小球比 1:5 时颗粒尺寸最小(图 5-

d)。球磨处理可能破坏 DSDF 链间部分氢键导致其微观形状改变,趋向于片状。从图 5 中也能看到存在一定程度的团聚现象,这可能与球磨处理后颗粒表面活性、表面静电吸引力增强有关。这些现象为 DSDF 理化性质和结构特征的变化提供了佐证。总的来说,机械球磨处理改变了 DSDF 的微观结构,对 DSDF 的优良理化性质产生了积极的作用。

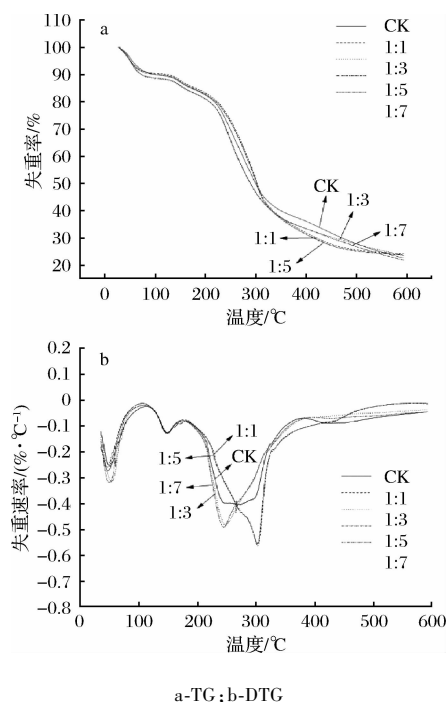
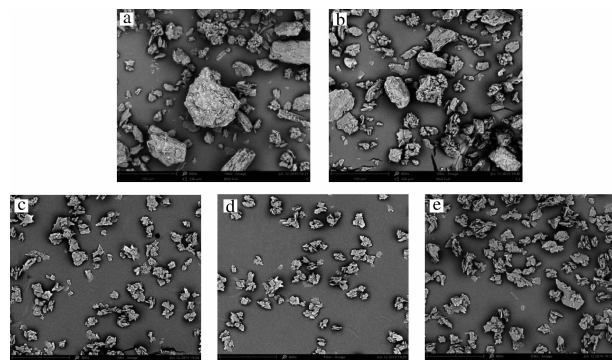


图 4 热重分析

Fig. 4 Thermogravimetric analysis



a-CK;b-1:1;c-1:3;d-1:5;e-1:7

图 5 DSDF 的 SEM 图 (*800)

Fig. 5 The SEM photograph (*800) of DSDF

3 结论

本文研究了机械球磨处理对麻竹笋壳膳食纤维理化特性及特征结构的影响。研究结果表明,经过球磨处理后,DSDF 的颜色变浅,粒径显著减小,对持

水、持油、吸水膨胀等能力产生了积极影响,其中当大小球比为 1:5 时效果最佳;通过红外光谱、热重和扫描电镜分析,球磨处理改变了部分 DSDF 微观结构,DSDF 颗粒表面变得粗糙,比表面积显著增大,孔隙率增加,并使其纤维素、半纤维及木质素部分分解,降低了 DSDF 的热稳定性。综上所述,机械球磨处理有效地改善了 DSDF 理化和结构特性,是改性 DSDF 的一种有效手段,可以为今后膳食纤维的利用开发提供新的参考。

参考文献

- [1] CHEN Guangjing, CHEN Xuhui, YANG Bing, et al. New insight into bamboo shoot (*Chimonobambusa quadrangularis*) polysaccharides: Impact of extraction processes on its prebiotic activity [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 367–377.
- [2] 王浩, 李凯, 田瑶, 等. 笋壳利用现状及其分析——以四川省为例 [J]. 农村经济与科技, 2018, 29(9): 45–57.
- [3] CHEN G, CHEN K, ZHANG R, et al. Polysaccharides from bamboo shoots processing by-products: New insight into extraction and characterization [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 113–1123.
- [4] GUAN M, ZHANG Z, YONG C, et al. Interface compatibility and mechanisms of improved mechanical performance of starch/poly(lactic acid) blend reinforced by bamboo shoot shell fibers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(35): 47899.
- [5] 张小强. 膳食纤维的定义、分类和理化特性 [J]. 科技展望, 2016, 26(20): 285.
- [6] 扈晓杰, 韩冬, 李铎. 膳食纤维的定义、分析方法和摄入现状 [J]. 中国食品学报, 2011, 11(3): 133–137.
- [7] DEEPAK M, SHEWETA B. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 61(10): 1–6.
- [8] 吴洪斌, 王永刚, 郑刚, 等. 膳食纤维生理功能研究进展 [J]. 中国酿造, 2012, 31(3): 13–16.
- [9] ZHANG M, LIAO A, KIRAN T, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 1–9.
- [10] VIRIDIANAT O, LUIS E G A, SERGIO O, et al. Advances in the functional characterization and extraction processes of dietary fiber [J]. Food Engineering Reviews, 2015, 8(3): 251–271.
- [11] 张宏邦, 罗洁, 易翠平, 等. 稻米膳食纤维的提取、改性及应用研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 141–146.
- [12] 丁莎莎, 黄立新, 张彩虹, 等. 膳食纤维的制备、性能测定及改性的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 381–386.
- [13] 刘露. 机械球磨法改性生物炭材料研究进展 [J]. 四川化工, 2019, 22(3): 14–16.
- [14] WANG Y, FORSSBERG E. Production of carbonate and silica nano-particles in stirred bead milling [J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 81(1): 1–14.
- [15] UMMA A, MALEQUE M A, ISKANDAR I Y, et al. Effect of ball milling parameters on the synthesization of carbon nanotube aluminum nano composite [J]. Advanced Materials Research, 2012, 626

(1):537-541.

- [16] 易甜,崔文文,王明锐,等. 锦橙皮渣膳食纤维微粉化及其功能特性分析[J]. 食品科学,2019,40(10):8-14.
- [17] 张丽媛,陈如,田昊,等. 超微粉碎对苹果膳食纤维理化性质及羟自由基清除能力的影响[J]. 食品科学,2018,39(15):139-144.
- [18] WEN Y, NIU M, ZHANG B, et al. structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. LWT-Food Science and Technology,2017,75:344-351.
- [19] WANG T, SUN X, ZHOU Z, et al. Effects of microfluidization process on physicochemical properties of wheat bran[J]. Food Research International,2012,48(2):742-747.
- [20] CHOI Y M, JUNG K C, JO H M, et al. Combined effects of potassium lactate and calcium ascorbate as sodium chloride substitutes on the physicochemical and sensory characteristics of low-sodium frankfurter sausage[J]. Meat Science,2014,96(1):21-25.
- [21] PROMLUCK S, SHAI B, PANTIPA J, et al. Textural and sensory quality of poultry meat batter containing malva nut gum, salt and phosphate[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40: 498-505.
- [22] 郑炯,陈琪,曾瑞琪,等. 竹笋膳食纤维对黄桃果酱品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2019,45(5):177-184.
- [23] 纪桢,许佳林,孟现星,等. 球磨法制备富硒绿茶粉工艺优化[J]. 食品工业科技,2019,40(7):161-165.
- [24] LUO X, WANG Q, FANG D, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: Structural characterization and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018,120,1 461-1 467.
- [25] 方东亚,郑亚凤. 笋头膳食纤维复合酶法改性工艺优化及其理化特性评价[J]. 福建农业学报,2019,34(3):364-370.
- [26] CHAU C F, WEN Y, WANG Y. Effects of micronisation on the characteristics and physicochemical properties of insoluble fibres[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2006, 86(14):2 380-2 386.
- [27] 宋慧慧,陈芹芹,毕金峰,等. 基于压差闪蒸干燥结合振动磨粉碎制备枸杞粉的性质研究[J]. 中国食品学报,2019,19(6):116-123.
- [28] ALINE J, DENISE M A, MARIA H G C, et al. Evaluation of the chemical composition and colour in long-life tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill) dehydrated by combined drying methods[J]. International Journal of Food Science & Technology,2014,49(9):2 001-2 007.
- [29] CHEN D, LAWTON D, THOMPSON M R. et al. Biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from potato peel waste[J]. Carbohydrate Polymers,2012,90(1):709-716.
- [30] 李璐,黄亮,苏玉,等. 超微化雷竹笋膳食纤维的结构表征及其功能特性[J]. 食品科学,2019,40(7):74-81.
- [31] SUN Shaoni, CAO Xuefei, LI Hanying, et al. Structural characterization of residual hemicelluloses from hydrothermal pretreated *Eucalyptus* fiber[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2014,69:158-164.