

辐照对豆渣可溶性膳食纤维结构与理化性质的影响

李 杨 陈凡凡 杨 朔 郭增旺 王中江 滕 飞

(东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 采用辐照技术预处理豆渣后提取可溶性膳食纤维(SDF),分别通过扫描电镜、X衍射技术、红外光谱技术表征辐照技术对其微观结构、结晶度和基本结构的影响;通过测定 SDF 提取率、持水力、膨胀力、阳离子交换能力、结合水力、α-葡萄糖苷酶活性和抗氧化性,探究辐照技术对其理化性质的影响。结果表明:与未经辐照的豆渣 SDF 相比,其微观结构更加细腻蓬松,结晶度提高了 3.78 个百分点;理化性质明显改善,提取率提高了 1.79 个百分点,膨胀力增大了 1.12 mL/g,结合水力增大了 0.28 g/g,持水力提高了 0.52 g/g,抗氧化能力提高了 1.23 mmol/g,阳离子交换能力和 α-葡萄糖苷酶活性也显著提高。辐照在改变豆渣 SDF 结构的基础上,进而影响其理化性质。本试验可为研究辐照对豆渣 SDF 作用机理和豆渣储藏技术提供前期的理论基础。

关键词: 可溶性膳食纤维;辐照;X 射线衍射;红外光谱

中图分类号: TS210.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0372-09

Effects of Irradiation on Structure and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber of Bean Dregs

LI Yang CHEN Fanfan YANG Shuo GUO Zengwang WANG Zhongjiang TENG Fei

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The soluble dietary fiber (SDF) was extracted after pretreatment of bean dregs by irradiation technology. The microstructure, crystallinity and basic structure were observed by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and infrared spectroscopy to analyze the effects of irradiation technology for SDF. The yield and water holding capacity of SDF, expansion force, cation exchange capacity, combined hydraulic power, α-glucosidase activity and antioxidant activity were obtained to explore the effect of irradiation technology on its physical and chemical properties. The results showed that the microstructure, the crystallinity, the physical and chemical properties of irradiated SDF were significantly improved compared with the unirradiated bean dreg SDF. The microstructure of irradiated SDF was finer and fluffy, and the crystallinity was improved by 3.78 percentage points. And the extraction rate was improved from 2.36% to 4.15%, the expansion force was increased from 4.24 mL/g to 5.36 mL/g, the combined hydraulic power was increased from 2.93 g/g to 3.21 g/g, the water holding capacity was increased by 0.52 g/g, the antioxidant capacity was increased by 1.23 mmol/g, cation exchange capacity and α-glucosidase activity were also significantly increased. Irradiation affected the physical and chemical properties of the bean dregs by changing the structure of the SDF. This experiment provided a theoretical basis for the study of the mechanism of irradiation on bean dregs SDF and the technology of bean dregs storage, and also provided a method for the extraction of soluble dietary fiber.

Key words: soluble dietary fiber; irradiation; X-ray diffraction; infrared spectroscopy

0 引言

膳食纤维可以调节人体吸收营养物质及排除有

害物质,对机体自身调节发挥重要作用。膳食纤维的主要生理功能包括清理肠道垃圾^[1];预防和降低心脑血管疾病的发病率,如心脏病^[2]、高血压、冠心

收稿日期: 2019-02-15 修回日期: 2019-05-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400702)和黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA17B002)

作者简介: 李杨(1981—),男,教授,博士,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究, E-mail: liyanghuangyu@hotmail.com

通信作者: 滕飞(1986—),女,讲师,博士,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究, E-mail: tengfei-5730@sina.com

病^[3]、肝脏等疾病^[4]；降低胆固醇的吸收。膳食纤维包含可溶性膳食纤维(SDF)和不溶性膳食纤维两种。与不溶性膳食纤维相比,SDF 具有更好的生理功能和生物活性^[5],如降血脂、降胆固醇、降血糖、抗肿瘤^[6]、抗氧化活性、凝胶形成能力和发酵能力等^[7-10],既能溶解于水,吸水膨胀,又能被大肠中微生物降解。在食品工业生产中可作为增稠剂、乳化剂、稳定剂和脂肪替代物^[6]。

我国是世界上大豆加工的主要国家之一,随着大豆加工量的增大,大豆副产物也随之增多,其中豆渣是大豆加工中最多的农业废弃物,每年产量约为 2 000 万 t^[11]。豆渣中总膳食纤维质量分数约为 62.92%,其中 SDF 质量分数约为 2.79%^[12]。因此,大豆加工副产物豆渣可作为膳食纤维加工的重要原料。充分利用我国的大豆资源及其加工副产物,利用先进的科学技术对其进行改性处理,改良生产工艺,开发 SDF 的保健产品,是该领域可持续发展的方向。

辐照技术作为一种杀菌技术,以其能耗低、无毒物残留、无污染、灭菌彻底、不破坏营养成分、操作简单、耗时短和适合大批量杀菌等独特优势,越来越受到生产加工和改性技术研究的重视^[13]。在保证粮食的安全和卫生条件下,通过运用 γ 射线、X 射线或高能电子束等电离辐射产生的射线对粮食进行处理^[14],可降低农产品和食品的损失,增加产品的附加值^[15]。多年来,国内外众多学者对辐照大豆的理化性质进行了研究,大量研究结果表明,辐照仅使大豆色泽变暗、粗脂肪含量及电导率稍提高^[16],对大豆品质、含油率、蛋白含量、氨基酸组成及含量基本无影响^[16-17],并且适当剂量的辐照可提高蛋白功能^[18]。但辐照对大豆中膳食纤维尤其是 SDF 的影响并未被深入研究。

为进一步探究辐照对豆渣 SDF 结构与性质的影响,本文采用辐照技术对豆渣进行处理,并通过扫描电镜、红外光谱和 X 射线衍射研究辐照对 SDF 结构特性的作用机制,探究不同辐照剂量对 SDF 结构性质、结晶度、膨胀力、阳离子交换能力、持水力、结合水力、 α -葡萄糖苷酶活性和抗氧化性的影响,分析引起 SDF 理化性质变化的原因,为豆渣储藏和 SDF 的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料

豆渣(豆粉副产物,含水率 85%,蛋白质质量分数 3.0%,脂肪质量分数 0.5%,碳水化合物(纤维

素、多糖等)质量分数 8.0%);由北大荒绿色健康食品有限责任公司提供,大豆品种为黑农 84(蛋白质质量分数 40%);木瓜蛋白酶(酶活力 800 U/mg),北京索莱宝科技有限公司;ABTS 试剂,北京索莱宝科技有限公司。

1.1.2 设备

XRD-6100 型岛津 X 射线衍射仪,深圳市瑞盛科技有限公司;FTIR-650 型傅里叶变换红外光谱仪,天津港东科技股份有限公司;SU8010 型发射扫描电镜,青岛澳信仪器有限公司;755B 型分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;Alpha-4 型冷冻干燥器,德国 Christ 公司;辐照仪器,剂量率 0.2 kGy/h;HH-4 型数显恒温水浴锅,常州丹瑞实验仪器设备有限公司;GL10MD 型高速冷冻离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司;SZ-1 型快速混匀器,常州国宇仪器制造有限公司。

1.2 SDF 的提取

参考文献[19]方法并略加改动。取新鲜豆渣清洗两遍,置于 105℃ 鼓风干燥箱干燥后,采用 0、2、4、6、8、10 kGy 不同辐照剂量进行辐照得辐照预处理豆渣。将辐照预处理豆渣按液料比 20 mL/g 与蒸馏水混合,加入豆渣质量 2% 的木瓜蛋白酶,于 55℃、pH 值 7.4 下酶解 1.5 h 后,在 4℃ 离心机中 8 000 r/min 离心 20 min,取上清液,真空过滤除渣后,按 4 倍体积的 95% 乙醇溶液沉淀 24 h,将沉淀物于 55℃ 下干燥至质量恒定,4℃ 密封备用,得 0、2、4、6、8、10 kGy 不同辐照剂量处理后的豆渣 SDF。

1.3 微观结构的测定

参考文献[20]的方法并改动。将 SDF 样品粉碎后,过 100 目筛,取 1 mg 样品沾样测试,采用离子溅射方法镀金,通过扫描电子显微镜对制备好的样品进行 5 000 倍的观察分析,得到相应的扫描电镜图。

1.4 SDF 结晶特性的测定

参考文献[21]研究方法。将干燥后样品于玛瑙研钵中研磨约 15 min,过 100 目筛,取 1 g 样品进行结晶度测试。测试条件:管流管压分别为 30 mA、30 kV;靶型:Cu;步长:0.02;起始角:10°;终止角:70°。

1.5 SDF 基本结构的测定

参考文献[22]的研究方法,称取 2 mg 样品,磨碎后混入溴化钾纯品(200 mg),于玛瑙研钵中研磨约 15 min 后进行压片(压力 140 N,时间 1 min),将样品薄片放入样品架,置于红外光谱仪内扫描,扫描范围为 400~4 000 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹,信号扫描累加 64 次,绘制红外光谱图。

1.6 SDF 理化特性的测定

1.6.1 提取率

参照文献[23]的方法。将辐照预处理豆渣 10 g (m_2)按液料比 20 mL/g 与蒸馏水混合,加入豆渣质量 2% 的木瓜蛋白酶,于 55℃、pH 值 7.4 下酶解 1.5 h 后,在 4℃ 离心机中 8 000 r/min 离心 20 min,取上清液,真空过滤除渣后,按 4 倍体积的 95% 乙醇溶液沉淀 24 h,将沉淀物于 55℃ 干燥至质量恒定,此时质量为 m_1 。SDF 提取率计算公式为

$$S = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%$$

1.6.2 持水力和结合水力

参照文献[24]研究方法,取 0.300 g SDF 样品,质量记为 m_3 ,按液料比 20 mL/g 加入去离子水,混匀 2 min 后静置 24 h,于 1 500 r/min 下离心 10 min,取沉淀称量,质量记为 m_4 。其持水力计算公式为

$$W = \frac{m_4 - m_3}{m_3}$$

式中 W ——持水力,g/g

参照文献[25]的研究方法,将 0.1 g 豆渣 SDF 样品浸泡于 25 mL 4℃ 的纯水中,干样品质量记为 m_7 ,4 000 r/min 离心 1 h,除去上清液,残留物于 G-2 型砂芯坩埚中静置 1 h,称取该残留物质量 m_5 ,然后在 120℃ 下干燥 2 h 后,再次称质量 m_6 ,两者差值即为结合水的质量。结合水力计算公式为

$$C = \frac{m_5 - m_6}{m_7}$$

式中 C ——结合水力,g/g

1.6.3 膨胀力

参照文献[26]方法,准确称取 SDF 样品 1.0 g 于直径为 1.5 cm 的试管中,样品质量记为 m_8 ,记膳食纤维体积为 V_1 ,按液料比 20 mL/g 加入去离子水,充分混匀,于室温(20℃)下放置 16 h,记吸水后膳食纤维体积 V_2 。膳食纤维的吸水膨胀指数计算公式为

$$L = \frac{V_2 - V_1}{m_8}$$

式中 L ——吸水膨胀指数,mL/g

1.6.4 阳离子交换能力

参照文献[27]的方法,准确称取豆渣 SDF 样品 300 mg,溶解于 30 mL 0.01 mol/L HCl 溶液中,在 4℃ 下静置 12 h,将 0.2 mL 的 0.1 mol/L NaOH 进行滴定,记录 NaOH 溶液消耗体积和 pH 值变化,根据得到的数据作 pH 值-NaOH 溶液消耗体积关系图。

1.6.5 体外抑制 α-葡萄糖苷酶活性

参照文献[28]的方法,取 100 mg 豆渣 SDF 溶于蒸馏水中,由 0.45 μm 滤膜过滤,配成 20 mg/mL 的样品溶液。依次取 0.2、0.3、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 样品溶液,加入蒸馏水定容至 2 mL,配制不同质量浓度梯度的待测样品溶液。在 96 孔酶标板中先后加入 100 μL 浓度为 0.5 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液、20 μL 质量浓度为 0.913 3 mg/mL 的底物 PNPG(对硝基苯基-β-D-吡喃半乳糖苷)溶液、20 μL 酶溶液、15 μL 不同质量浓度梯度的待测样品溶液,水平振荡混匀并密封,置于 37℃ 培养箱中反应 1 h,然后依次加入 50 μL 浓度为 0.57 mol/L 的 Na₂CO₃ 溶液终止反应。在 405 nm 波长处的吸光度与 α-葡萄糖苷酶抑制率正相关。α-葡萄糖苷酶抑制率的计算公式为

$$G = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100\%$$

式中 G ——α-葡萄糖苷酶抑制率

A_1 ——样品组的吸光度

A_2 ——空白组的吸光度

1.7 体外抗氧化能力

参照文献[29]等的方法进行测定,将样品用磷酸盐缓冲溶液(0.2 mol/L,pH 值 7.4)配制为不同多肽浓度的溶液。用 7.4 mmol/L ABTS 储液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液等体积混合并于室温暗处反应 12~16 h 以制备 ABTS·⁺ 储液。用上述缓冲溶液适当稀释 ABTS·⁺ 储液,使其在波长 734 nm 处的吸光度为 0.70±0.02。为测定样品的 ABTS·⁺ 自由基清除能力,取 4 mL 稀释后的 ABTS·⁺ 溶液,加入 200 μL 样品溶液并混合均匀,于暗处反应 6 min 后,测定其在 734 nm 处的吸光度。以不含样品的缓冲溶液作为空白。标准曲线的测定:磷酸盐缓冲溶液将 10 mmol/L Trolox(水溶性维生素 E)标准溶液稀释成 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25 mmol/L,按照测定样品的方法测定标准曲线。ABTS·⁺ 自由基清除率计算公式为

$$R = \left(1 - \frac{A_{\text{sample}}}{A_{\text{blank}}}\right) \times 100\%$$

式中 A_{sample} ——样品的吸光度

A_{blank} ——空白的吸光度

总抗氧化能力计算公式为

$$Y = C_1 / C_2$$

式中 C_1 ——样品的 ABTS·⁺ 抑制率与 Trolox 的 ABTS·⁺ 抑制率相等时 Trolox 的浓度,mmol/L

C_2 ——样品的质量浓度,取 1.0 mg/mL

Y——总抗氧化能力,mmol/g

1.8 统计分析

每组试验进行 3 次平行试验,并将试验数据进行误差分析。采用统计学软件 SPSS 20.0 进行方差分析和差异显著性分析(显著性水平 $P < 0.05$),采用 Origin 8.5 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 扫描电镜(SEM)方法

由图 1 可知,随着辐照剂量的增大,豆渣 SDF 的微观结构由开始的略有褶皱、结构疏松,而逐渐变

得蓬松并呈现蜂窝状,且在酶解时间为 30 min 时 SDF 结构最蓬松,但随着辐照强度的持续增加,SDF 表面破裂,形成片状结构,且片状结构数目和体积随辐照剂量的增大而逐渐增大,最终形成块状。这表明辐照会诱导纤维素、淀粉和果胶等多糖的降解并发生分子链中的糖苷键断裂^[30]、分子量降低及分子之间的相互作用力变弱,促进羰基及双键的形成,进而导致 SDF 的结构松弛,呈蜂窝状结构^[31],且辐照剂量越大,组织软化程度越显著^[32];但当辐照剂量超过 6kGy 时,豆渣 SDF 聚合度下降,进而表面结构发生断裂^[33],组织结构松散。

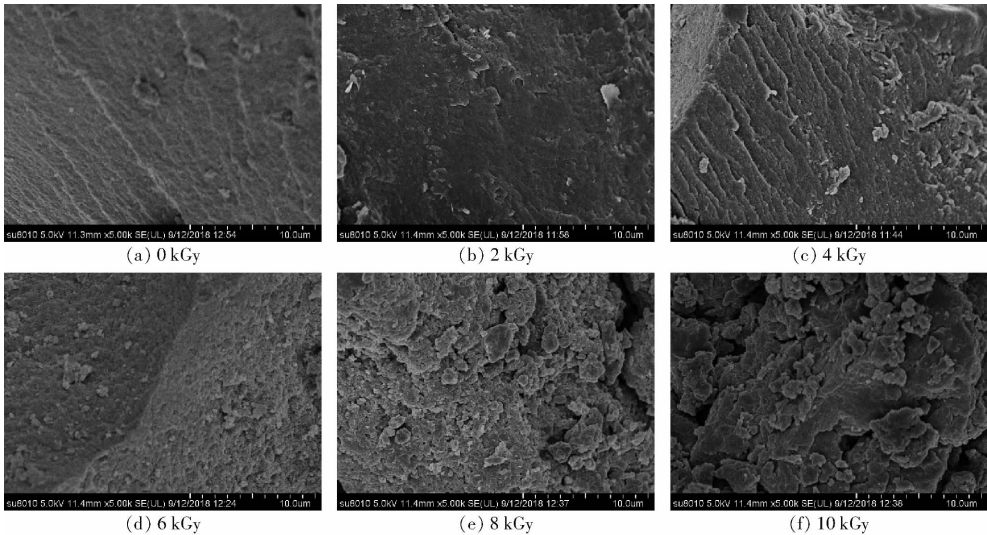


图 1 辐照剂量对 SDF 显微结构的影响

Fig.1 Effect of irradiation dose on microstructure of SDF

2.2 X 射线衍射测试方法

X 射线衍射(X-ray diffraction,XRD)是通过 X 射线在晶体中所产生的衍射现象来反映物质结晶特性和结晶度的分析方法^[34-35]。整体峰型表征样品的晶体类型,衍射峰强度的增大表明该衍射角度处的结晶度增大。由图 2 可知,辐照处理并不会引起峰型改变,且各样品在扫描角度(2θ)为 22.3° 、 28.0° 处均有明显的吸收峰,这表明 6 种 SDF 的晶体均为 I 型纤维素类型,由有序的结晶纤维素区和无序的纤维素和半纤维素区组成,辐照技术并不会改变 SDF 的纤维素类型;随着辐照剂量的增大,其峰强度出现先增大后减小的趋势,且在辐照剂量为 6 kGy 时达到峰值。此时结晶度也由 19.34% 提高到 23.12%,但随着辐照剂量持续增大,结晶度反而降低,这表明辐照强度对衍射峰强度的影响具有两面性。其原因可能为辐照可破坏膳食纤维的表面结构,切断膳食纤维的分子链,软化多糖组织结构^[32],降解半纤维素和木质素等杂质,暴露结晶区^[21],促使衍射峰强度增强,但随着辐照剂量的进一步增大,暴露的结晶区发生降解^[21],减小了晶体粒度,导致

长结晶区域形成无序区,进而使结晶度降低。这与扫描电镜的实验结果一致,进一步证明了辐照对膳食纤维结构的降解作用。

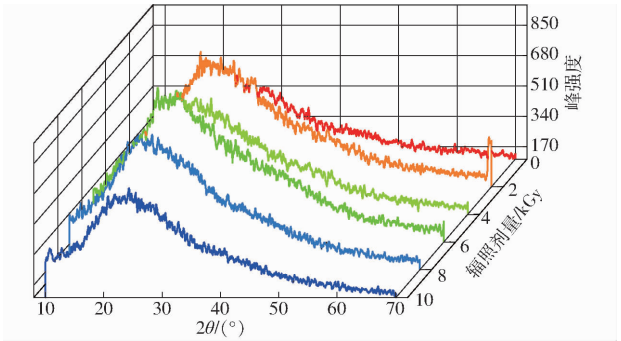


图 2 不同辐照剂量 SDF 的 X 衍射光谱图

Fig.2 X-ray diffraction spectrum of different irradiation doses of SDF

2.3 红外光谱分析法

傅里叶红外光谱的峰型和特征吸收峰的位置分别表征样品的基本结构和特定波长下官能团对应特定吸收峰。由图 3 可知,随着辐照剂量的增大,豆渣 SDF 的特征吸收峰的峰形、位置未发生明显变化,均有 3 个明显的吸收峰,但在 $3\,300 \sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$ 的

O—H 振动吸收峰随着辐照剂量的增大,其峰强度呈现逐渐减小趋势,且当辐照剂量超过 4 kGy 时减小的趋势减慢,这种现象表征豆渣 SDF 中处于缔合状态的氢键减少,氢键的来源主要是果胶(半乳糖醛酸)和半纤维素(木糖、甘露糖、半乳糖和阿拉伯糖),这表明果胶和半纤维素在辐照条件下发生部分降解;1 000 ~ 1 300 cm^{-1} 处的峰为 C—O 伸缩振动,分别为 C—O—H 和糖环 C—O—C 或伯醇的 O—H 变角振动导致,表明该分子含有 COH 和 COC 键^[36];1 632 cm^{-1} 和 1 578 cm^{-1} 之间的吸收带分别与羰基(—COOR)基团和羧酸根离子(—COO—)拉伸有关^[37],1 670.53 cm^{-1} 波数处为 C=O 的伸缩振动区,出现的吸收峰是糖分子中羰基的吸收峰,这些区域的吸收峰均为糖类的特征吸收峰,表明豆渣 SDF 的结构并未完全破坏,辐照处理只是降解了部分豆渣 SDF 的结构,促使少量膳食纤维的聚集结构开始解聚,导致游离基团数目增多,最终使特定官能团对应吸收峰信号强度有不同程度的提升。这与文献[22]研究结果一致,并进一步验证了 X 射线衍射研究结果。

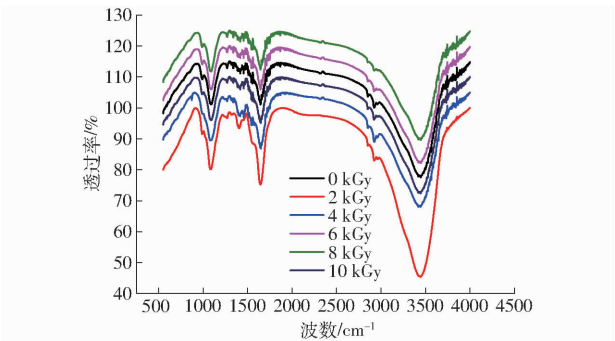


图 3 不同辐照剂量 SDF 的红外光谱图

Fig.3 Infrared spectrum of different irradiation doses of SDF

2.4 SDF 的理化指标测定

2.4.1 提取率

由图 4(图中不同字母表示差异显著,下同)可知,随着辐照剂量的增大,豆渣 SDF 的提取率呈现逐渐增大的趋势,且在辐照剂量超过 6 kGy 时提取率增加率减小并趋于定值。与未经辐照的豆渣 SDF 相比,经过 6 kGy 辐照豆渣 SDF 提取率从 2.36% 提高到 4.15%,提高了 1.79 个百分点。研究表明,辐照处理能使豆渣的微观结构发生破坏,切断多糖物质的分子链^[38],将半纤维素转化成 SDF^[28],并且促进了 SDF 的溶出,进而显著提高 SDF 的提取率。

2.4.2 持水力和结合水力

持水力通常指分子(通常以低浓度构成的大分子)构成的机体通过物理方式截留大量的水而阻止水渗出的能力。结合水力通常与其分子中亲水基团

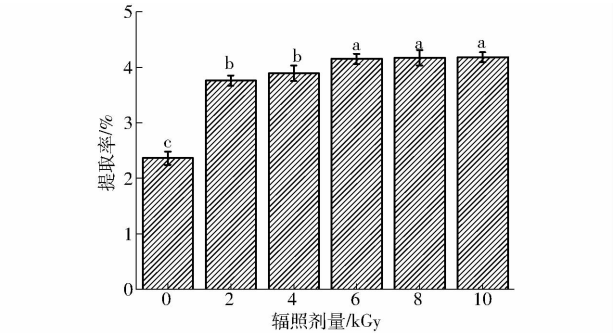


图 4 辐照剂量对豆渣 SDF 提取率的影响

Fig.4 Effect of irradiation doses on extraction rate of bean dregs SDF

的暴露量有关,亲水基团暴露得越多,结合水力越高^[39]。由图 5 可知,随着辐照剂量的增大,SDF 的持水力和结合水力呈现先增大后减小的趋势,且在辐照剂量为 6 kGy 时持水力和结合水力达到最大,结合水力从 2.93 g/g 增至 3.21 g/g,持水力从 2.94 g/g 增至 3.46 g/g。这表明适当的辐照处理可以显著提高持水力和结合水力,其原因是辐照处理可以使膳食纤维的糖苷键发生断裂,导致多糖纤维素的降解和氢键的断裂^[30],其微观结构转变为蜂窝状,为水分子的储存提供了更多空间^[40],从而增强 SDF 的持水性^[41],降低链间的氢键^[42],并诱导膳食纤维结构中亲水性基团的暴露,促使结合水力提高;但是辐照剂量过大时,会导致 SDF 的网状结构发生破坏,造成持水力和结合水的能力下降。

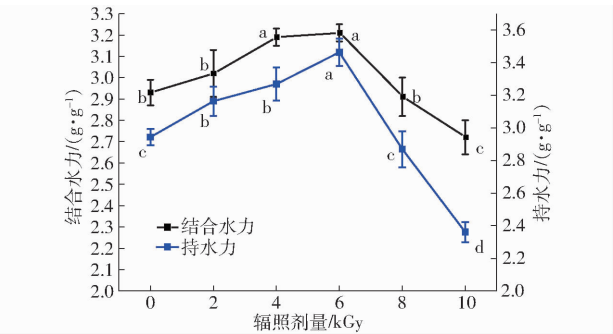


图 5 辐照剂量对 SDF 持水性的影响

Fig.5 Effect of irradiation doses on water retention of SDF

2.4.3 膨胀力

由图 6 可知,随着辐照剂量的增大,膨胀力呈现逐渐增大的趋势,从 4.24 mL/g 增至 5.36 mL/g,且当辐照剂量大于 6 kGy 时,SDF 的膨胀力增大速度逐渐减慢直至平缓,其表明适当的辐照剂量对膳食纤维的膨胀力有显著的提高作用。研究表明,粒度可影响膳食纤维的膨胀力^[43],辐照可使部分 SDF 断裂转变为小分子,从而使膳食纤维致密的网状结构变得疏松,体积和比表面积有所增大,同时可溶物质含量增多,从而导致膳食纤维膨胀性提高;但由于

SDF 含有 β -葡聚糖^[44],当膳食纤维颗粒过小时, β -葡聚糖含量减小,膨胀性被限制^[45],且 SDF 吸水膨胀后相互之间产生的阻力阻碍 SDF 膨胀进而膨胀力减小^[46],这表明适当辐照剂量可提高 SDF 的膨胀力。

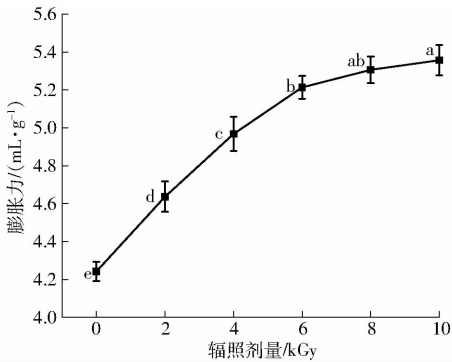


图 6 辐照剂量对 SDF 膨胀力的影响

Fig. 6 Effect of irradiation doses on expansion of SDF

2.4.4 阳离子交换能力

阳离子交换能力与其羧基、羟基等离子型官能团的暴露量有关^[47],阳离子交换能力的曲线斜率越大,样品阳离子交换能力越差^[48]。由图 7 可知,随着辐照剂量的增大,曲线斜率逐渐减小,这表明阳离子交换能力呈逐渐增大的趋势。在 NaOH 溶液消耗量为 1.8 mL 时,溶液的 pH 值趋于稳定,阳离子交换能力基本达到平衡。膳食纤维的组织结构一般均带有一些侧链基团,这些含有羧基和氨基的侧链基团可与一些阳离子实现可逆交换。辐照剂量的增大使膳食纤维的比表面积增大,粒度减小,使更多能进行有机阳离子交换的基团暴露出来,从而呈现出一种能维持 pH 值稳定和离子浓度平衡的作用。随着辐照剂量的进一步增大,豆渣 SDF 粒度减小,分子中的羧基、羟基和氨基等侧链暴露增多,其弱酸性表现得更明显,阳离子交换能力更强^[49]。通过改变离子的瞬时浓度,影响消化道的 pH 值、渗透压及氧化还原电位等,进而为消化提供一个更有利的环境^[50]。

2.4.5 体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性

α -葡萄糖苷酶水解 α -1,4-葡萄糖苷键后释放出对硝基苯酚(pNP)^[51],SDF 可抑制 α -葡萄糖苷酶活性,进而减少 pNP 的生成量^[52],从而使 405 nm 波长处的峰强度发生变化。图 8 中斜率越大,SDF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制率越强,则人体对单糖的吸收越小,降糖效果越明显。由图 8 可知,随着辐照剂量的逐渐增大,豆渣 SDF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制率呈现逐渐增大的趋势,与未经辐照的 SDF 相比,经过辐照豆渣 SDF 对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力更强,且辐照剂量越大抑制效果越明显。研究表明,膳食纤维

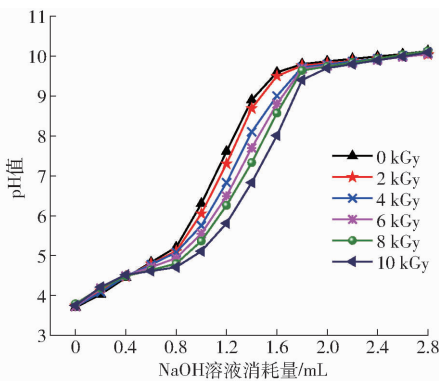


图 7 辐照对豆渣 SDF 阳离子交换能力的影响

Fig. 7 Effect of irradiation on ion exchange capacity of soybean slag

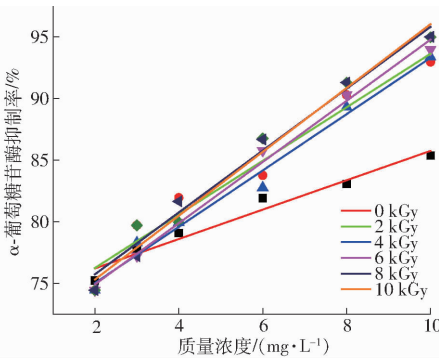


图 8 辐照对豆渣 SDF α -葡萄糖苷酶抑制率的影响

Fig. 8 Effect of irradiation on α -glucosidase inhibition rate of soybean slag

的生物活性与分子质量和单糖组成有密切关系^[53],辐照可降低 SDF 的分子量,且辐照剂量越大降解效果越明显,而低相对分子质量糖类因不能形成聚合结构而表现出良好的生物活性^[28]。因此辐照剂量越大豆渣 SDF 对 α -葡萄糖苷酶抑制效果越明显。结果表明,辐照豆渣 SDF 具有良好的体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性的能力。

2.5 体外抗氧化能力

ABTS 法是基于分光光度法来测定样品的抗氧化活性,ABTS 试剂在氧化剂作用下会形成绿色的 $ABTS \cdot^+$ 自由基,在抗氧化物存在时 $ABTS \cdot^+$ 自由基的产生会被抑制^[54]。由图 9 可知,随着辐照剂量的增加,SDF 的抗氧化能力先增大后减小,且在 6 kGy 时抗氧化能力达到最大(从 7.37 mmol/g 提高到 8.6 mmol/g),这表明适当的辐照剂量可提高 SDF 抗氧化能力。SDF 中含有供氢体,供氢体的释放量越多,提供电子使自由基变为稳定的物质从而中断自由基连锁反应的能力越强,进而抗氧化效果越明显。研究表明,辐射处理可以影响 SDF 构象变化,例如交联、共价键断裂和自由基的形成等,而共价键的断裂可暴露出更多的活性基团,在增加其亲水性的同时抗氧化相关活性物质

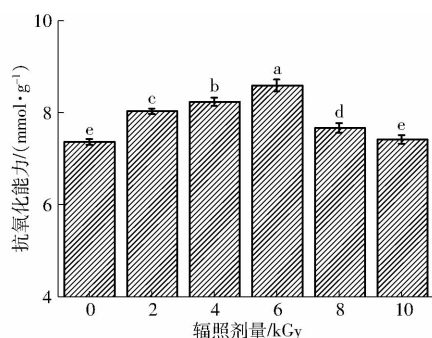


图9 辐照剂量对SDF抗氧化能力的影响

Fig.9 Effect of irradiation doses on antioxidant capacity of SDF

的溶出量也增大,最终供氢体的释放量增多^[55]。但随着辐照剂量的进一步增大,供氢体释放量减少,SDF抗氧化能力减弱,因此低辐照剂量条件下可提高SDF的抗氧化能力,这与文献[56]的研究结果一致。

3 结论

(1)与未经辐照相比,辐照剂量为6 kGy的豆渣SDF结晶度由19.34%提高到23.12%,微观结构变化较为明显,纹理细腻蓬松,分布均匀。上述变化表明,辐照剂量增加会使膳食纤维结构发生降解,结晶区被破坏,共价键断裂,隐藏基团暴露增多,纤维结构变得疏松膨胀,持水性下降。辐照对豆渣SDF理化性质和结构特性具有明显的改良作用。

(2)豆渣经过辐照处理后,豆渣SDF的提取率、膨胀力、阳离子交换能力、持水力和结合水力可得到明显改善。与未经辐照相比,豆渣SDF提取率从2.36%提高到4.15%,膨胀力从4.24 mL/g增大到5.36 mL/g,结合水力从2.93 g/g增大到3.21 g/g,持水力从2.94 g/g提高到3.46 g/g,抗氧化能力从7.37 mmol/g提高到8.6 mmol/g。

参 考 文 献

- [1] 孙元琳, 陕方, 赵立平. 谷物膳食纤维——戊聚糖与肠道菌群调节研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(9): 326–330.
SUN Yuanglin, SHAAN Fang, ZHAO Liping. Research progress in pentosans as a kind of cereal dietary fiber and their gut microflora modulatory effect[J]. Food Science, 2012, 33(9): 326–330. (in Chinese)
- [2] SINGH M, LIU S X, VAUGHN S F. Effect of corn bran as dietary fiber addition on baking and sensory quality [J]. Biocatal. Agr. Biot., 2012, 1(4): 348–352.
- [3] OWENS T J, LARSEN J A, FARCAS A K, et al. Total dietary fiber composition of diets used for management of obesity and diabetes mellitus in cats [J]. Journal of the American Veterinary Medical Association, 2014, 245(1): 99–105.
- [4] GONG J, YANG C. Advances in the methods for studying gut microbiota and their relevance to the research of dietary fiber functions [J]. Food Res. Int., 2012, 48(2): 916–929.
- [5] 高昂, 梁文明, 徐兴阳, 等. 挤压喷雾提高胡萝卜渣膳食纤维含量及其性质评价[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(2): 97–101.
GAO Ang, LIANG Wenming, XU Xingyang, et al. Studies on increased soluble dietary fiber in carrot residues by extrusion spray processing and properties of treated carrot residues[J]. Food Research and Development, 2016, 37(2): 97–101. (in Chinese)
- [6] 曾琳娜, 刘博, 林亲录, 等. 可溶性膳食纤维抗高脂血症研究进展[J]. 粮食与油脂, 2014, 27(1): 1–4.
ZENG Linna, LIU Bo, LIN Qinlu, et al. Progress in anti-hyperlipidemia of soluble dietary fiber[J]. Grain and Oil, 2014, 27(1): 1–4. (in Chinese)
- [7] ESPOSITO F, ARLOTTI G, BIONIFAT A M, et al. Antioxidant activity and dietary fibre in durum wheat bran by-products[J]. Food Research International, 2005, 38(10): 1167–1173.
- [8] FENG T, SU Q, ZHUANG H, et al. Ghost structures, pasting, rheological and textural properties between mesonablumes gum and various starches[J]. Journal of Food Quality, 2014, 37(2): 73–82.
- [9] GALISTEO M, DUARTE J, ZARZUELO A. Effects of dietary fibers on disturbances clustered in the metabolic syndrome[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2008, 19(2): 71–84.
- [10] MATEOS-APARICIO I, MATEOS-PEINADO C, RUPEREZ P. High hydrostatic pressure improves the functionality of dietary fibre in okara by-product from soybean[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(3): 445–450.
- [11] LIU X B, JIN J, WANG G H, et al. Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in Northeast China [J]. Field Crops Research, 2008, 105(3): 157–171.
- [12] 姜海伟, 迟玉杰. 挤压蒸煮对豆渣中可溶性膳食纤维含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(6): 31–35.
QI Haiwei, CHI Yujie. Effects of extrusion-cooking on soluble dietary fiber in soybean residue [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(6): 31–35. (in Chinese)
- [13] LOMBI E, TEARALL K L, HOWARTH J R, et al. Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator thlaspi caerulescens[J]. Plant Physiology, 2002, 128(4): 1359–1367.
- [14] 高美须, 陈浩, 刘春泉, 等. 食品辐照技术在中国的研究和商业化应用[J]. 核农学报, 2007, 21(6): 606–611.
GAO Meixu, CHEN Hao, LIU Chunquan, et al. Researches and commercialization of food irradiation technology in China[J]. Chinese Journal of Nuclear, 2007, 21(6): 606–611. (in Chinese)

- [15] 李晨阳. 辐照对霉变大豆中主要营养成分影响的研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2014.
LI Chenyang. The effects of irradiation on the main nutritional components of mildew soybeans [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 王若兰, 杨延远, 郭靖. γ 射线、电子束处理对大豆品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 5–8.
WANG Ruolan, YANG Yanyuan, GUO Jing, Effects of γ -ray and electron beam treatment on soybean quality[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2010, 31(5): 5–8. (in Chinese)
- [17] 崔龙, 王炯, 许勃, 等. 电子束辐照对大豆品质的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(5): 900–906.
CUI Long, WANG Xian, XU Bo, et al. Effect of electron beam irradiation on the quality of soybean [J]. Chinese Journal of Nuclear Agriculture, 2018, 32(5): 900–906. (in Chinese)
- [18] DAVIES K J. Protein damage and degradation by oxygen radicals[J]. Journal of Biological Chemistry, 1987, 262(20): 9902–9907.
- [19] FERMANDES A, BARREIRA J C M, ANTONIO A L, et al. Exquisite wild mushrooms as a source of dietary fiber: analysis in electron-beam irradiated samples[J]. LWT—Food Science and Technology, 2015, 60(2): 855–859.
- [20] 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, 2016, 75: 344–351.
- [21] 周丽珍, 孙海燕, 刘冬, 等. 改性方法对豆渣膳食纤维的结构影响研究[J]. 食品科技, 2011, 36(1): 143–147.
ZHOU Lizhen, SUN Haiyan, LIU Dong, et al. Influence of modification methods on the structure of dietary fiber from soybean residue [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(1): 143–147. (in Chinese)
- [22] ULLAH I, YIN T, XIONG S, et al. Effects of thermal pre-treatment on physicochemical properties of nano-sized okara (soybean residue) insoluble dietary fiber prepared by wet media milling[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237(5): 18–26.
- [23] 李黎, 王宇辉. 响应面法优化发酵法提取枣渣中不溶性膳食纤维提取工艺优化[J]. 中国食品添加剂, 2017(9): 140–145.
LI Li, WANG Yuhui. Applying response surface methodology to optimize extraction of insoluble dietary fiber from jujube residues using fermentation [J]. China Food Additives, 2017(9): 140–145. (in Chinese)
- [24] 李娜, 宁正祥, 祝子坪, 等. 豆渣膳食纤维的制备及性能研究[J]. 食品科学, 2009, 30(20): 251–254.
LI Na, NING Zhenxiang, ZHU Ziping, et al. Preparation and characterization of dietary fiber from bean dregs [J]. Food Science, 2009, 30(20): 251–254. (in Chinese)
- [25] 王旭, 梁栋, 徐杨, 等. 挤压膨化辅助提取米糠可溶性膳食纤维及其特性研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 153–159.
WANG Xu, LIANG Dong, XU Yang, et al. Extrusion-assisted extraction process of rice bran soluble dietary fiber and its properties [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 153–159. (in Chinese)
- [26] 赵泰霞, 张明玉. 超声波辅助酶法提取红豆中的膳食纤维[J]. 农产品加工, 2016, 4(7): 8–11.
ZHAO Taixia, ZHANG Mingyu. Extraction of dietary fiber from red beans by ultrasonic assisted enzymatic method [J]. Farm Products Processing, 2016, 4(7): 8–11. (in Chinese)
- [27] FAGAN C C, DONNELLI C P, CULLEN P J, et al. The effect of dietary fibre inclusion on milk coagulation kinetics [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 261–268.
- [28] 曹龙奎, 康丽君, 寇芳, 等. 改性前后小米糠膳食纤维结构分析及体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 46–52.
CAO Longkui, KANG Lijun, KOU Fang, et al. Structural analysis and in vitro inhibitory effect on α -glucosidase activity of millet bran dietary fiber before and after modification [J]. Food Science, 2018, 39(11): 46–52. (in Chinese)
- [29] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay [J]. Free Radical Biology & Medicine, 1999, 26(9–10): 1231–1237.
- [30] XUETONG F. Radiation chemistry of food components[M]// Food irradiation research and technology. Second edition. John Wiley & Sons, Inc., 2012: 75–97.
- [31] 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(10): 102–112.
- [32] XU Z, SUN Y, YANG Y, et al. Effect of γ -irradiation on some physiochemical properties of konjac glucomannan [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 70(4): 444–450.
- [33] 王磊, 石可敬, 廖晨, 等. 改性花生可溶性膳食纤维功能及结构特性研究[J]. 食品工业, 2018, 39(4): 204–208.
WANG Lei, SHI Kexin, LIAO Chen, et al. Study on functional and structural property of modified soluble dietary fiber from peanut [J]. The Food Industry, 2018, 39(4): 204–208. (in Chinese)
- [34] 高洁, 汤烈贵. 纤维素科学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 41–60.
- [35] 陈雪峰, 吴丽萍, 刘爱香. 挤压改性对苹果膳食纤维理化性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(12): 57–60.
CHEN Xuefeng, WU Liping, LIU Aixiang. Effect of extrusion on the physiochemical properties of apple dietary fiber [J]. Food and Fermentation Industries, 2005, 31(12): 57–60. (in Chinese)
- [36] CHENH, ZHAO C, LI J, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from

- nodes of lotus root[J]. LWT—Food Science and Technology, 2018,93(3):204–211.
- [37] YAN X, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion processing: the increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran[J]. Food Chemistry, 2015, 180(1):106–115.
- [38] AYLANGANA, IC E, OZYARDIMCI B. Investigation of gamma irradiation and storage period effects on the nutritional and sensory quality of chickpeas, kidney beans and green lentils[J]. Food Control, 2017,80(4):428–434.
- [39] 蓝海军, 刘成梅, 涂宗财, 等. 大豆膳食纤维的湿法超微粉碎与干法超微粉碎比较研究[J]. 食品科学, 2007, 28(6): 171–174.
- LAN Haijun, LIU Chenmei, TU Zongcai, et al. Wet or dry processing comparative study on super micro-milling soybean dietary fiber [J]. Food Science, 2007, 28(6):171–174. (in Chinese)
- [40] AL-SHERAJI S H, ISMAIL A, MANAP M Y, et al. Purification, characterization and antioxidant activity of polysaccharides extracted from the fibrous pulp of Mangiferapajang fruits[J]. LWT—Food Science and Technology, 2012, 48(2):291–296.
- [41] XIA Q, GU M, LIU J, et al. Novel composite gels of gelatin and soluble dietary fiber from black bean coats with interpenetrating polymer networks[J]. Food Hydrocolloids, 2018,83(4):72–78.
- [42] LIU T, MA Y, XUE S, et al. Modifications of structure and physicochemical properties of maize starch by γ -irradiation treatments[J]. LWT—Food Science and Technology, 2012, 46(1):156–163.
- [43] ALAM S A, JARVINEN J, KIRJORANTA S, et al. Influence of particle size reduction on structural and mechanical properties of extruded rye bran[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(7):2121–2133.
- [44] NA L, ZIQIAN F, YUGE N, et al. Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77(10): 557–565.
- [45] HUANG K, DU B, XU B. Alterations in physicochemical properties and bile acid binding capacities of dietary fibers upon ultrafine grinding[J]. Powder Technology, 2018, 326(12):146–150.
- [46] 李焕霞, 王华, 刘树立. 粒度不同对膳食纤维品质影响研究[J]. 食品与发酵科技, 2007, 43(3):35–37.
- LI Huanxia, WANG Hua, LIU Shuli. Effects of different particle sizes on dietary fiber quality [J]. Food Science and Technology, 2007, 43(3): 35–37. (in Chinese)
- [47] 胡国华, 黄绍华. 米糠膳食纤维的制备与性能研究[J]. 中国食品添加剂, 1997(4):16–20.
- [48] 刘静娜, 庄远红, 黄志娜, 等. 芦笋皮和茎中膳食纤维的提取及功能性质的比较[J]. 食品科技, 2014, 39(12): 269–272.
- LIU Jingna, ZHUANG Yuanhong, HUANG Zhina, et al. Comparison of the extraction and functional properties of dietary fiber between the peel and stem of asparagus [J]. Food Science, 2014, 39(12): 269–272. (in Chinese)
- [49] 付旭恒, 吴伟, 吴晓娟, 等. 米糠贮藏时间对米糠不溶性膳食纤维功能性质的影响[J]. 中国油脂, 2017,42(7):84–87.
- FU Xuheng, WU Wei, WU Xiaojuan, et al. Effect of storage time of rice bran on functional properties of rice bran insoluble dietary fiber [J]. Chinese Fat, 2017,42(7):84–87. (in Chinese)
- [50] 宋江良. 高活性非水溶性茶叶膳食纤维提取及其功能性研究[D]. 福州:福建农林大学, 2011.
- SONG Jiangliang. Study on extraction of high active tea insoluble dietary fiber and its function [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [51] DENG Y, LIN-SHIAU S, SHVUR L, et al. Pu-erh tea polysaccharides decrease blood sugar by inhibition of α -glucosidase activity in vitro and in mice[J]. Food Function, 2015, 6(5): 1539–1546.
- [52] YU Z P, YIN Y G, ZHAO W Z, et al. Novel peptides derived from egg white protein inhibiting alpha-glucosidase[J]. Food Chemistry, 2011,129(4): 1376–1382.
- [53] CUI L, GU X, WANG F J, et al. Purification and structural characterization of an α -glucosidase inhibitory polysaccharide from apricot (*Armeniaca sibirica* L. Lam.) pulp[J]. Carbohydrate Polymers,2015, 121: 309–314.
- [54] FLOEGEL A, KIM D O, CHUNG S J, et al. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidantrich US foods[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2011,24(10): 1043–1048.
- [55] 涂宗财, 段邓乐, 王辉, 等. 豆渣膳食纤维的结构表征及其抗氧化性研究[J]. 中国粮油学报, 2015,30(6):22–26.
- TU Zongcai, DUAN Dengle, WANG Hui, et al. Structural characterization and antioxidant activity of soybean dregs dietary fiber [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015,30(6): 22–26. (in Chinese)
- [56] KRISHNAN V, SINGH A, THIMMEGOWDA V, et al. Low gamma irradiation effects on protein profile, solubility, oxidation, scavenger abilityand bioavailability of essential minerals in black and yellow Indian soybean (*Glycine max* L.) varieties[J]. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry, 2016, 307(1):49–57.