

红松松仁膜衣膳食纤维的功能性质

Study on functional properties of dietary fiber from *Pinus Koraiensis* nut coated-film

王 超¹ 徐红艳^{1,2,3} 杨晰茗¹ 钟文杰¹

WANG Chao¹ XU Hong-yan^{1,2,3} YANG Xi-ming¹ ZHONG Wen-jie¹

(1. 延边大学, 吉林 延吉 133002; 2. 延边大学食品研究中心, 吉林 延吉 133002;

3. 吉林省长白山生物资源与健康产业协同创新中心, 吉林 延吉 133002)

(1. Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China; 2. Food Research Center, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China; 3. Center of Co-Innovation for Natural Resources of Changbai Mountain & Health Industry, Yanji, Jilin 133002, China)

摘要:以红松松仁膜衣为原料,制备可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF),对 IDF 进行木聚糖酶改性,制备改性可溶性膳食纤维(Modified soluble dietary, MSDF)和改性不溶性膳食纤维(Modified insoluble dietary fiber, MIDF),测定葡萄糖、胆固醇、胆酸钠吸附能力及葡萄糖透析延迟指数。结果表明:MSDF 的葡萄糖吸附能力较 SDF 显著提高,且 MIDF 的葡萄糖吸附能力较 IDF 极显著提高;模拟胃环境,改性后的膳食纤维的胆固醇吸附能力均有提高,且 MSDF 显著高于 SDF;MIDF 胆酸钠的吸附能力极显著高于 IDF,可达 60.73 mg/g,是 IDF 的 2.98 倍;MIDF 的葡萄糖透析延迟指数高于 IDF,且 120 min 时趋于稳定,可达 21.69%,较 IDF 显著提高了 7.24%。因此,木聚糖酶可提高松仁膜衣膳食纤维的功能性质,且木聚糖酶改性是一种适合松仁膜衣膳食纤维改性的优良方法。

关键词:红松;松仁膜衣;膳食纤维;功能性质;木聚糖酶;改性

Abstract: Preparation of soluble dietary fiber (SDF) and insoluble dietary fiber (IDF) using *Pinus Koraiensis* nut coated-film as raw material, and xylanase in insoluble dietary fiber modification, prepared modified soluble fiber (MSDF) and modified insoluble dietary fiber (MIDF), and determined the dialysis delay index of glucose, cholesterol, sodium cholate adsorption capacity and glucose. Results: the glucose adsorption capacity of MSDF was significantly higher than that of SDF, and the glucose adsorption capacity of MIDF was significantly higher than that of IDF. In the simulated gastric environment, the cholesterol adsorption capacity of modified dietary fiber was improved, and MSDF was significantly higher than SDF. The adsorption capacity of MIDF sodium cholate was significantly higher than IDF, up to 60.73 mg/g, which was 2.98 times that of IDF. The glucose dialysis delay index of MIDF was higher than IDF, and it became stable at 120 min, reaching 21.69%, and increased significantly of 7.24% than IDF. Therefore, xylanase can improve the functional properties of pine fiber film dietary fiber, and the xylanase modification is an excellent modification method on dietary fiber of nut coated-film.

Keywords: *Pinus Koraiensis*; nut coated-film; dietary fiber; functional character; xylanase; modification

红松广泛分布于中国东北、日本、韩国和俄罗斯^[1]。红松松仁膜衣是松仁外层附着的一层红棕色薄皮,是松仁精深加工过程中的副产物^[2],对其生物活性成分及功能作用的相关研究罕见。课题组^[3]前期研究发现红松松仁膜衣含有黄酮、多酚和蛋白质等多种营养活性成分,具有较强的抗氧化作用。赵雅梦等^[4]研究发现松仁膜衣中总膳食纤维含量达 72.14%,具有较高的营养价值。

膳食纤维(Dietary fiber, DF)是植物来源的碳水化合物聚合物,在人体中拥有着不可替代的生理作用^[5]。根据溶解度,可分为可溶性膳食纤维(SDF)和不溶性膳食纤维(IDF)^[6]。SDF 和 IDF 在人体中的生理作用不同,IDF 可以增加人的粪便体积,减少便秘的风险,而 SDF 可以降低血清胆固醇含量,降低血液中的葡萄糖水平^[7]。高膳食纤维饮食可以降低 2 型糖尿病、心血管疾病和结肠癌

基金项目:吉林省教育厅“十三五”科学技术项目重点课题(编号: JJKH20180885KJ)

作者简介:王超,男,延边大学在读硕士研究生。

通信作者:徐红艳(1975—),女,延边大学副教授,博士。

E-mail: xuhongyan@ybu.edu.cn

收稿日期:2019-12-29

的风险^[8]。为了增强膳食纤维的功能,已经开发了膳食纤维的化学、物理和生物改性方法^[9]。酶解作用被认为是最有前途和最优选的技术,具有高产物收率和低能量需求的优点^[10]。研究^[11]表明,采用木聚糖酶对膳食纤维改性,能够释放阿拉伯木聚糖和阿魏酰低聚糖,具有多种生理活性作用,从而提高膳食纤维的功能性质。课题组^[12]前期优化了酶法改性红松松仁膜衣膳食纤维的条件,发现木聚糖酶改性是一种合适的方法,并通过扫描电子显微镜、红外光谱和 X-射线衍射检测发现,改性后膳食纤维表面疏松多孔、化学官能团变化、结晶区被破坏,预示木聚糖酶改性可能会改变了松仁膜衣膳食纤维的理化功能性质。

基于课题组的前期研究,试验拟以红松松仁膜衣为原料制备膳食纤维,采用木聚糖酶对其改性,比较研究红松松仁膜衣 SDF、IDF、MSDF、MIDF 的葡萄糖吸附能力、胆固醇吸附能力、胆酸钠吸附能力和葡萄糖透析延迟指数,通过比较体外功能性质,为红松松仁膜衣膳食纤维体内功能作用的研究提供思路,并促进红松松仁膜衣的精深加工及功能性食品开发。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

红松松仁膜衣:梅河口市实全土特产品有限公司;

高峰 α -淀粉酶 ($\geq 4\ 000\ \text{U/g}$)、碱性蛋白酶 ($\geq 200\ 000\ \text{U/g}$)、木聚糖酶 ($\geq 6\ 000\ \text{U/g}$):上海源叶生物技术有限公司;

邻苯二甲醛、胆固醇、糠醛:分析纯,北京博奥拓达科技有限公司;

无水乙醇、石油醚、氢氧化钠、浓硫酸、冰乙酸、盐酸、葡萄糖:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

酸度计:PHS-3C 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

离心机:Z400K 型,德国 Hermle 公司;

电子天平:LT2002TS 型,常熟市天量仪器有限责任公司;

冷冻干燥机:FD-1A-50 型,北京博医康实验仪器有限公司;

分光光度计:U-3900 型,日本日立公司。

1.2 方法

1.2.1 膳食纤维的制备 将红松松仁膜衣粉碎过筛用淀粉酶、蛋白酶进行酶解,得到的沉淀即为 IDF,上清液按 1:4 加入无水乙醇,置于 4℃ 冰箱过夜,离心后得到的沉淀即为 SDF,冻干后保存备用。IDF 用木聚糖酶进行酶法改性,灭酶后离心得到的沉淀即为 MIDF,上清液按

1:4 加无水乙醇,置于 4℃ 冰箱过夜,离心后得到的沉淀即为 MSDF,冷冻干燥后保存备用。

1.2.2 膳食纤维对葡萄糖吸附能力的测定 根据周笑犁等^[13]的方法,绘制葡萄糖标准曲线方程为: $Y=1.194X+0.1018$, $R^2=0.9940$ 。按式(1)计算葡萄糖吸附能力。

$$ACG = \frac{m_1 - m_2}{m}, \quad (1)$$

式中:

ACG——葡萄糖吸附能力,mg/g;

m_1 ——溶液中葡萄糖的质量,mg;

m_2 ——上清液葡萄糖的质量,mg;

m ——样品质量,g。

1.2.3 膳食纤维对胆固醇吸附能力的测定 根据罗磊等^[14]的方法,绘制胆固醇标准曲线为: $Y=2.1403X+0.2178$, $R^2=0.9983$ 。按式(2)计算胆固醇吸附能力。

$$ACC = \frac{m_1 - m_2}{m}, \quad (2)$$

式中:

ACC——胆固醇吸附能力,mg/g;

m_1 ——吸附前溶液的胆固醇质量,mg;

m_2 ——吸附后上清液中胆固醇质量,mg;

m ——样品质量,g。

1.2.4 膳食纤维对胆酸钠吸附能力的测定 根据 Chu 等^[15]的方法,绘制胆酸钠标准曲线为: $Y=1.5396X+0.1451$, $R^2=0.9937$ 。按式(3)计算胆酸钠吸附能力。

$$SCAC = \frac{m_1 - m_2}{m}, \quad (3)$$

式中:

SCAC——胆酸钠吸附能力,mg/g;

m_1 ——吸附前溶液的胆酸钠质量,mg;

m_2 ——吸附后上清液中胆酸钠质量,mg;

m ——样品质量,g。

1.2.5 膳食纤维葡萄糖透析延迟指数的测定 根据 Daou 等^[16]的方法,绘制葡萄糖标准曲线为: $Y=2.4711X-0.0032$, $R^2=0.9971$ 。按式(4)计算葡萄糖透析延迟指数。

$$GDRI = \frac{C_0 - (C - C_d)}{C_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

GDRI——葡萄糖透析延迟指数,%;

C ——试样溶液葡萄糖浓度,mg/mL;

C_d ——试样对照葡萄糖浓度,mg/mL;

C_0 ——空白对照葡萄糖浓度,mg/mL。

1.3 数据分析

每个结果重复处理 3 次,数据使用 WPS 2019 进行整理和作图,并采用 SPSS 22.0 软件对数据进行分析。

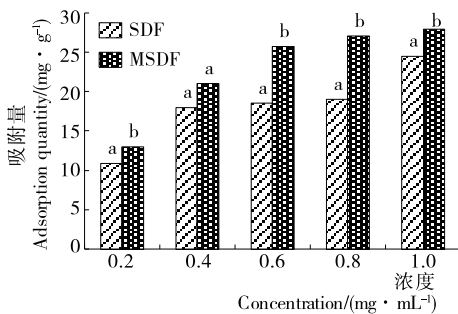
2 结果与分析

2.1 膳食纤维对葡萄糖的吸附能力

膳食纤维具有抑制葡萄糖扩散的功效,可降低血液中葡萄糖的含量,有效控制血糖指数。由图 1、2 可知,膳食纤维对葡萄糖吸附能力均随葡萄糖浓度的增加而提高。MSDF 的葡萄糖吸附能力较 SDF 有显著提高($P < 0.05$),且 MIDF 的葡萄糖吸附能力较 IDF 有极显著提高($P < 0.01$)。黄冬云等^[17]研究也表明木聚糖酶制备米糠膳食纤维能显著增强其葡萄糖吸附能力。由此可见,通过对 IDF 改性所制得的膳食纤维,其葡萄糖吸附能力有显著增强,其原因可能是细胞壁上的大分子被木聚糖酶降解,纤维结构变得疏松,孔隙增多且变大,小分子更容易进入内部,从而吸附更多的葡萄糖分子^[16]。

2.2 膳食纤维对胆固醇的吸附能力

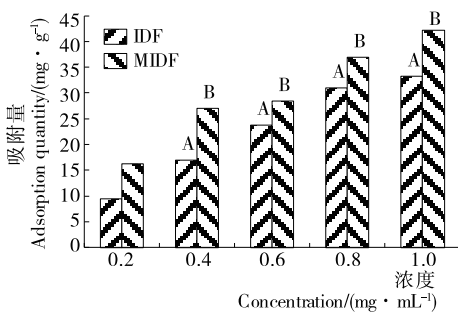
试验测定了 SDF、IDF、MSDF、MIDF 在模拟胃环境(pH 为 2)和肠道环境(pH 为 7)条件下胆固醇的吸附能力,结果见图 3。在模拟胃环境中,改性使 IDF、SDF 胆固醇吸附能力均有所提高,且 MSDF 显著高于 SDF($P < 0.05$),可达 56.142 mg/g。在模拟肠道环境中,其改性前后的胆固醇吸附能力无明显变化。梁志宏等^[18]研究发现



相同浓度下,小写字母不同表示差异性显著($P < 0.05$)

图 1 SDF、MSDF 对葡萄糖的吸附能力

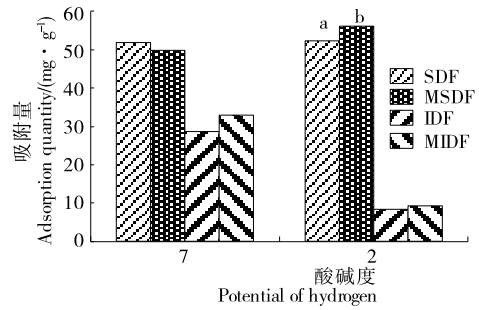
Figure 1 Adsorption capacity for glucose by SDF and modified-SDF



相同浓度下,大写字母不同表示差异极显著($P < 0.01$)

图 2 IDF、MIDF 对葡萄糖的吸附能力

Figure 2 Adsorption capacity for glucose by IDF and modified-IDF



同一 pH 下,SDF 与 MSDF 比较,IDF 与 MIDF 比较,小写字母不同表示差异性显著($P < 0.05$)

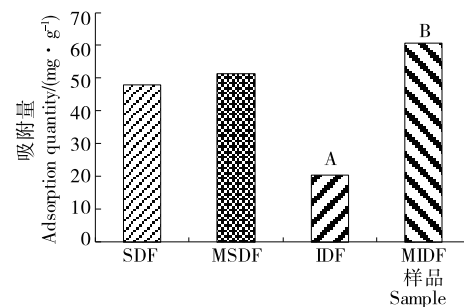
图 3 松仁膜衣膳食纤维的胆固醇吸附能力

Figure 3 Cholesterol adsorption capacity of *Pinus Koraiensis* nut coated-film dietary fiber

木聚糖酶和纤维素酶制备残次裂枣膳食纤维的胆固醇吸附能力均显著增强,而 pH 环境是影响膳食纤维胆固醇吸附的一个重要的因素。

2.3 膳食纤维对胆酸钠的吸附能力

胆汁酸主要存在于肠肝循环系统并通过再循环起一定的保护作用,从而调节人体代谢。膳食纤维通过吸附胆汁酸,可抑制胆汁酸的重吸收并排出体外以减少有害物质的产生,预防结肠癌。试验测定了 SDF、IDF、MSDF、MIDF 胆酸钠的吸附能力,结果见图 4。MSDF 胆酸钠的吸附量为 51.31 mg/g;MIDF 胆酸钠的吸附量为 60.73 mg/g,极显著高于 IDF ($P < 0.01$),是 IDF 的 2.98 倍。MIDF 胆酸钠吸附能力之所以极显著提高,主要原因可能是酶法改性,改变了膳食纤维的内部结构,增强了膳食纤维的分子极性,提高了阳离子化程度,所以更易于与胆酸盐的阴离子形成不同电性离子间的相互作用力,增强对胆酸钠的吸附能力。试验表明,木聚糖酶改性可增强膳食纤维的胆酸钠吸附能力,使膳食纤维的利用率得到提高。孙杰等^[19]研究发现高温改性莲蓬膳食纤维的胆酸钠吸附能力显著增强,改性后的膳食纤维表面结



SDF 与 MSDF 比较,IDF 与 MIDF 比较,大写字母不同表示差异极显著($P < 0.01$)

图 4 松仁膜衣膳食纤维的胆酸钠吸附能力

Figure 4 The sodium cholate adsorption capacity for *Pinus Koraiensis* nut coated-film dietary fiber

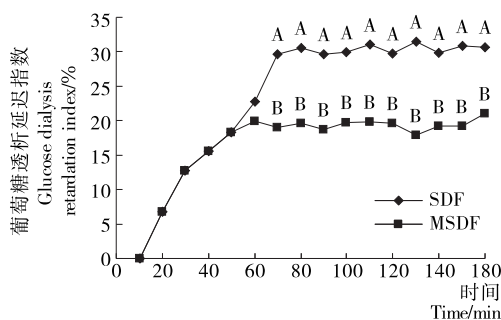
构疏松,使更多的亲水基团暴露,于是表现出更大的胆固醇吸附容量,与试验结果一致。

2.4 膳食纤维的葡萄糖透析延迟指数测定

膳食纤维的葡萄糖透析延迟指数与 SDF 含量有关, SDF 含量越高,葡萄糖透析延迟指数越高^[20]。试验测定了 SDF、IDF、MSDF、MIDF 的葡萄糖透析延迟指数,结果见图 5、6。

由图 5 可知, SDF 和 MSDF 的葡萄糖透析延迟指数随着时间的变化呈上升趋势,在 70 min 时 SDF 的葡萄糖透析延迟指数可达 29.64%,在 60 min 时 MSDF 的葡萄糖透析延迟指数达到 19.57%。MSDF 的葡萄糖透析延迟指数比 SDF 低的主要原因可能是酶法改性改变了膳食纤维的分子结构进而改变了分子间作用力,导致在不断振荡的透析体系中,膳食纤维分子间作用力增强,使分子间相互聚集,减弱了与葡萄糖分子结合的能力。

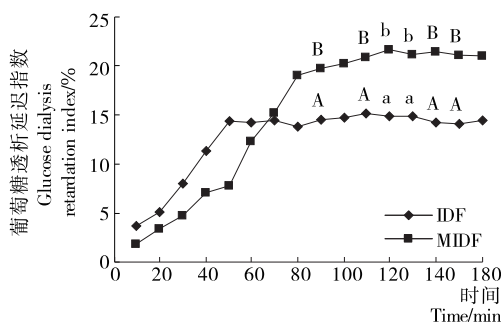
由图 6 可知, IDF 和 MIDF 的葡萄糖透析延迟指数随着时间的变化呈上升趋势,在 50 min 时 IDF 的葡萄糖透析延迟指数可达 14.36%, MIDF 的葡萄糖透析延迟指数高于 IDF,且 120 min 时趋于稳定,可达 21.69%,较 IDF 显著提高了 6.84%($P < 0.05$)。黄清霞等^[21]研究发现柠檬膳食纤维的葡萄糖透析延迟指数随着时间的增加呈增加趋势,随着透析时间的延长,对葡萄糖的吸附能力接近饱



相同时间内,大写字母不同表示差异极显著($P < 0.01$)

图 5 葡萄糖透析延迟指数与时间的关系图

Figure 5 The relationship between GDRI and time



相同时间内,大写字母不同表示差异极显著($P < 0.01$),小写字母不同表示差异性显著($P < 0.05$)

图 6 葡萄糖透析延迟指数与时间的关系图

Figure 6 The relationship between GDRI and time

和,达到动态平衡,与试验结果相似。

3 结论

试验制备了红松松仁膜衣膳食纤维并对其不溶性膳食纤维进行木聚糖酶法改性,且对改性前后膳食纤维功能性质进行比较。结果表明,MSDF 的葡萄糖吸附能力较 SDF 有显著提高, MIDF 的葡萄糖吸附能力较 IDF 有极显著提高;在对胆固醇吸附能力方面,模拟胃环境下,改性使 IDF、SDF 的胆固醇吸附能力均有所提高,且 MSDF 显著高于 SDF,可达 56.14 mg/g;但在模拟小肠环境下,其改性前后的胆固醇吸附能力无明显变化;在胆酸钠吸附能力和葡萄糖透析延迟指数方面,改性可显著提高 IDF 的胆酸钠吸附能力和葡萄糖透析延迟指数, MIDF 的胆酸钠吸附量可达 IDF 的近 3 倍。预示经木聚糖酶改性后的红松松仁膜衣膳食纤维可能更具有促进肠道健康、控制血糖、降脂等功能。

参考文献

- [1] QU Hang, GAO Xin, ZHAO Hai-tian, et al. Structural characterization and in vitro hepatoprotective activity of polysaccharide from pine nut (*Pinus Koraiensis* Sieb. et Zucc.)[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 11(223): 115056.
- [2] 张晓茹, 李星, 王彬, 等. 红松松仁膜衣提取物体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 142-146.
- [3] 赵起越, 程晓强, 徐红艳. 红松松仁膜衣营养成分的测定[J]. 吉林农业, 2016(16): 65.
- [4] 赵梦雅, 鞠婷, 凌秀昕, 等. 松仁种皮成分分析及在酸奶中的应用[J]. 现代食品科技, 2017, 33(7): 133-140.
- [5] CHRISTIAN Z, PETER E, KARL-HEINZ E. In vitro model to correlate viscosity and bile acid-binding capacity of digested water-soluble and insoluble dietary fibres[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 423-428.
- [6] CHU Jia-xi, ZHAO Hai-zhen, LU Zhao-xin, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*[J]. Food Chemistry, 2019, 294(11): 79-86.
- [7] YAN Ling, XIONG Chuan-wu, QU Hao, et al. Non-destructive determination and visualisation of insoluble and soluble dietary fibre contents in fresh-cut celeries during storage periods using hyperspectral imaging technique [J]. Food Chemistry, 2017, 228(8): 249-256.
- [8] SUN Jian, ZHANG Ning, YE Hong-xia, et al. High-throughput method for preliminary screening of high dietary fiber rice[J]. Food Chemistry, 2019, 300(11): 125192.
- [9] ZHU Yu, HE Cheng-hu, FAN Hai-xiao, et al. Modification of foxtail millet (*Setaria italica*) bran dietary fiber by xylanase-catalyzed hydrolysis improves its cholesterol-binding capacity [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101(3): 463-468.

(下转第 68 页)

- bel-free colorimetric detection of cadmium ions in rice samples using gold nanoparticles[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(17): 8 530-8 534.
- [14] XIAO Meng, FU Qiang-qiang, SHEN Hai-cong, et al. A turn-on competitive immunochromatographic strips integrated with quantum dots and gold nano-stars for cadmium ion detection[J]. *Talanta*, 2017, 178: 644-649.
- [15] MEEK K N, RANGEL A E, HEEMSTRA J M. Enhancing aptamer function and stability via in vitro selection using modified nucleic acids[J]. *Methods*, 2016, 106: 29-36.
- [16] 张辉, 叶华, 吴世嘉, 等. 核酸适配体及其在食品安全领域中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(10): 194-199.
- [17] BAYRAMOGLU G, OZALP V, DINCIBAL U, et al. Fast and sensitive detection of Salmonella in milk samples using aptamer functionalized magnetic silica solid phase and MCM-41-aptamer gate system [J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2018, 4: 1 437-1 444.
- [18] WU Yuan-gen, ZHAN Shen-shan, WANG Lu-mei, et al. Selection of a DNA aptamer for cadmium detection based on cationic polymer mediated aggregation of gold nanoparticles[J]. *The Analyst*, 2014, 139(6): 1 550-1 561.
- [19] 赵旭, 吴世嘉, 乐琳, 等. 基于核酸适配体的镉离子可视化检测方法[J]. *食品与机械*, 2018, 34(6): 35-38.
- [20] PANG Yuan-feng, RONG Zhen, WANG Jun-feng, et al. A fluorescent aptasensor for H5N1 influenza virus detection based-on the core-shell nanoparticles metal-enhanced fluorescence (MEF)[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 66: 527-532.
- [21] KANG Bei-hua, GAO Zhong-feng, LI Na, et al. Thiazole orange as a fluorescent probe: Label-free and selective detection of silver ions based on the structural change of imotif DNA at neutral pH[J]. *Talanta*, 2016, 156/157: 141-146.
- [22] NYGREN J, SVANVIK N, KUBISTA M. The interactions between the fluorescent dye thiazole orange and DNA[J]. *Biopolymers*, 2015, 46(1): 39-51.
- [23] SUN Chun-yan, SU Rui-fang, BIE J, et al. Label-free fluorescent sensor based on aptamer and thiazole orange for the detection of tetracycline[J]. *Dyes and Pigments*, 2017, 149: 867-875.
- [24] XING Yun-peng, LIU Chun, ZHOU Xiao-hong, et al. Label-free detection of kanamycin based on a G-quadruplex DNA aptamer-based fluorescent intercalator displacement assay[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8 125-8 132.
- [25] ZHU Yu-feng, WANG Yong-sheng, ZHOU Bin, et al. A multifunctional fluorescent aptamer probe for highly sensitive and selective detection of cadmium (II)[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 409: 4 951-4 958.
- [26] CAO Dong-yu, FAN Jun, QIU Jun-ru, et al. Masking method for improving selectivity of gold nanoclusters in fluorescence determination of mercury and copper ions[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 42: 47-50.
-
- (上接第 42 页)
- [10] ABDESSALEM M, RODRIGUEZ-GUTIERREZ G, RUBIO-SENENT F, et al. Enzymatic conversion of date fruit fiber concentrates into a new product enriched in antioxidant soluble fiber[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 75(1): 727-734.
- [11] SWENNEN K, COURTIN C M, DELCOUR J A. Non-digestible oligosaccharides with prebiotic properties [J]. *Critical Reviews in Food Science Nutrition*, 2006, 46(6): 459-471.
- [12] 赵欣悦, 王秋阳, 杨晰茗, 等. 木聚糖酶改性红松松仁膜衣膳食纤维工艺优化及结构分析[J]. *东北农业科学*, 2019(5): 111-115, 122.
- [13] 周笑琴, 王瑞, 高蓬明, 等. 刺梨果渣膳食纤维的体外吸附性能[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(2): 187-191.
- [14] 罗磊, 王雅琪, 马丽苹, 等. 绿豆皮可溶性膳食纤维提取工艺优化及其物理特性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(8): 144-149.
- [15] CHU Jia-xi, ZHAO Hai-zhen, LU Zhao-xin, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294(10): 79-86.
- [16] DAOU C, ZHANG Hui. Study on functional properties of physically modified dietary fibres derived from defatted rice bran[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2012, 4(9): 85-97.
- [17] 黄冬云, 钱海峰, 苑华宁, 等. 木聚糖酶制取米糠膳食纤维的功能性质[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(12): 30-34.
- [18] 梁志宏, 茹慧玲, 王俊宇, 等. 残次裂枣膳食纤维的酶解法提取及其品质分析[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(6): 175-180.
- [19] 孙杰, 韩苗苗, 龚超, 等. 莲蓬膳食纤维的高温改性及其理化和应用特性研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(2): 141-145.
- [20] 包怡红, 冯雁波. 响应面试验优化红松松仁膳食纤维制备工艺及其理化性质分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(14): 11-17.
- [21] 黄清霞, 雷激, 李华鑫, 等. 高生物活性柠檬膳食纤维的功能特性研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(5): 226-229.