

紫薯不溶性膳食纤维超声辅助酶法提取工艺 及抗氧化活性研究

Extraction of insoluble dietary fiber from Purple sweet potato by ultrasonic assisted enzyme method and the determination of its hydroxyl radical scavenging ability

薛山^{1,2}

XUE Shan^{1,2}

(1. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建漳州 363000; 2. 菌物产业福建省高校工程研究中心, 福建漳州 363000)

(1. College of Biological Science and Technology, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China;

2. Engineering Research Center of Fujian Province for Fungal Industry, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

摘要:研究超声波辅助酶法提取紫薯不溶性膳食纤维(IDF)的工艺,并对其体外抗氧化性进行评定。考察料液比、超声时间、超声功率、 α -淀粉酶用量和酶解温度5个因素对紫薯IDF提取率的影响,在单因素试验的基础上进行正交优化试验,以羟自由基($\cdot\text{OH}$)体外清除率评价IDF的抗氧化水平。结果表明,紫薯IDF的最佳工艺参数为料液比1:15(g/mL)、超声时间40 min、超声功率160 W和酶解温度75℃,该条件下IDF的提取率可高达38.32%。体外抗氧化结果显示紫薯IDF对 $\cdot\text{OH}$ 具有良好的清除效果,并且呈现出一定的量效关系。经计算,其 IC_{50} 值为39.27 mg/mL,抗氧化性强于 V_C 。

关键词:紫薯;不溶性膳食纤维;超声波;酶法;羟自由基

Abstract: The process of extracting the insoluble dietary fiber (IDF) of purple potato by ultrasonic-assisted enzymatic method was studied, and its antioxidation in vitro was also evaluated. The effect of five factors (ratio of material to liquid, ultrasonic time, ultrasonic power, alpha amylase dosage and enzyme hydrolysis temperature) on insoluble dietary fiber extraction rate were determined. Orthogonal optimization test was carried out on the basis of single factor test, and the antioxidant level of IDF was evaluated by hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) in vitro. The single factor test showed that among the factors, the enzymolysis temperature played the most significant role on the extraction. Further orthogonal experiment get the optimum process parameters of purple potato IDF as follows: the ratio of material to liquid 1:15 (g/mL), ultrasonic time 40 min, ultrasonic

power 160 W, and the enzymolysis at 75℃. Under this condition, the IDF extraction could be as high as 38.32%. Finally, the anti-oxidation of purple potato IDF was determined by the method of removing hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$). The results showed that the purple potato IDF has good cleaning effect on $\cdot\text{OH}$, and a certain concentration-response relationship was observed. Its IC_{50} was calculated to be 39.27 mg/mL, and indicated that the antioxidant activity was stronger than V_C .

Keywords: purple sweet potato; insoluble dietary fiber; ultrasonic; enzymic method; hydroxyl radical

紫薯又称紫甘薯、黑紫薯,是一种源于日本的特殊品种^[1]。研究认为紫薯不仅具有非常丰富的膳食纤维,还含有植物多酚、氨基酸、维生素、矿物质,尤其是硒元素等人体需要的营养成分与活性物质^[2-4],对机体抗癌、抗氧化、防辐射、降血压等方面都发挥着不同程度的功效^[5]。目前,有关紫薯方面的研究多涉及紫薯中花青素/花色苷的提取及抗氧化活性测定^[6-8]、紫薯全粉加工利用^[9-10]、紫薯饮料^[11]、紫薯汁糖化^[12]、甘薯蜜^[13]等方面,而针对紫薯膳食纤维提取方面的报道甚少,且多为水溶性的果胶类物质^[14-15],对于不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)提取的关注有待加强。

膳食纤维(dietary fiber, DF)具有丰富而独特的性质,是人体必不可少的“第七营养素”^[16]。1998年, Saura-Calixto^[17]基于此提出了一个新概念——抗氧化膳食纤维,即大量天然抗氧化剂结合到DF基质中的产物。目前,植物性膳食纤维已被证实具有显著的抗氧化活性^[18],尤其是水不溶性膳食纤维中富含黄酮类(花色素苷、黄酮、黄酮醇、黄酮醇)、酚酸(没食子酸、阿魏酸)以及缩合单宁(聚合的原花色苷和分子量水解鞣质)等天然抗氧化成分^[19-21]。

基金项目:闽南师范大学博士科研启动基金(编号:2006L21513);大闽食品(漳州)有限公司博士后项目基金

作者简介:薛山(1988—),女,闽南师范大学讲师,博士。

E-mail: yixuanchenglion@sina.com

收稿日期:2017-12-05

因此,本试验拟以紫薯这一膳食纤维丰富的原料为对象,优化其不溶性膳食纤维的提取工艺,并测定其体外羟自由基清除能力,以期对紫薯的综合利用与推广提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

紫薯:漳州市沃尔玛超市。

1.2 试剂与仪器

1.2.1 试剂

α -淀粉酶: 2.0×10^4 U/g,河南亚统食品原料有限公司;

氢氧化钠、盐酸、抗坏血酸、硫酸亚铁、过氧化氢、水杨酸:分析纯,西陇化工股份有限公司。

1.2.2 仪器

高速万能粉碎机:FW100型,天津市泰斯特仪器有限公司;

实验室数显分散均质机:AD500S-H型,上海昂尼仪器仪表有限公司;

精密电子天平:AR224CN型,奥豪斯仪器常州有限公司;

pH计:STARTER 2100型,奥豪斯仪器上海有限公司;

数显电子恒温水浴锅:HH-8型,常州国华电器有限公司;

台式低速大容量离心机:L550型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料处理 将紫薯去皮、清洗、切成薄片,放入烘箱 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 鼓风干燥至恒重,将物料充分粉碎,过 40 目筛,阴凉干燥处存放以备。

1.3.2 不溶性膳食纤维的提取 参考文献[22~23]并略微修改:称取 1.000 g 紫薯粉(干重),按比例加入一定的蒸馏水,充分均质混匀,通过盐酸(0.325 mol/L)和氢氧化钠(0.275 mol/L)调节所需要的 pH 值(中偏酸性),加入适量的 α -淀粉酶溶液(50 mg α -淀粉酶溶解于 1 mL pH 6.0 的 PBS 缓冲液中),用超声波处理并加热一段时间,反应后将溶液调至中性。最后,将所得的混合溶液以 $3\ 000 \times g$ 离心 10 min,残渣分别用蒸馏水和无水乙醇洗涤,于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重即得 IDF 粗提物。提取率按式(1)计算:

$$c = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

c ——提取率, %;

m_1 ——膳食纤维的干重, g;

m_2 ——紫薯的质量, g。

1.3.3 单因素试验

(1) 料液比对紫薯 IDF 提取率的影响:在超声功率 200 W、超声时间 30 min、 α -淀粉酶用量 $50\ \mu\text{L/g}$ 、酶解温度 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,考察料液比分别为 1:10, 1:15, 1:20, 1:25, 1:30 (g/mL) 时,对 IDF 提取率的影响。

(2) 超声功率对紫薯 IDF 提取率的影响:考察超声功率

分别为 120, 140, 160, 180, 200 W 时,对 IDF 粗提率的影响。料液比为 1:15 (g/mL),其他反应条件同 1.3.3(1)。

(3) α -淀粉酶用量对紫薯 IDF 提取率的影响:考察 α -淀粉酶用量分别为 30, 40, 50, 60, 70 $\mu\text{L/g}$ 时,对 IDF 粗提率的影响。超声功率为 160 W,其他反应条件同 1.3.3(2)。

(4) 超声时间对紫薯 IDF 提取率的影响:考察超声时间分别为 10, 20, 30, 40, 50 min 时,对 IDF 粗提率的影响。 α -淀粉酶用量为 $50\ \mu\text{L/g}$,其他反应条件同 1.3.3(3)。

(5) 酶解温度对紫薯 IDF 提取率的影响:考察酶解温度分别为 30, 45, 60, 75, 90 $^\circ\text{C}$ 时,对 IDF 粗提率的影响。超声时间为 40 min,其他反应条件同 1.3.3(4)。

1.3.4 多因素试验 由单因素试验得到的结果作为依据。将单因素试验的 4 个主要因素作为考察对象,设计了四因素三水平表 IDF 提取的正交试验。

1.3.5 清除 $\cdot\text{OH}$ 的测定方法 参考陈琬盈等[24]方法配制待测液。在 1 000 mL 的三角瓶中加入提取的 IDF 5.0 g,加水 400 mL,搅拌均匀后浸泡 1 h,加热液体至沸腾后保持 20 min,于 $13\ 000\ \text{r/min}$ 下均质 1 min,将乳浊液定容到 500 mL 容量瓶。试验时,根据需要稀释成不同浓度的待测液。参照固体粉末抗氧化法测定样品液在 Fenton 反应体系产生的羟自由基[25-26]:分别在试管中加入 1.0 mL 不同浓度的 IDF,并依次添加 9.0 mmol/L 的水杨酸-乙醇溶液、9.0 mmol/L Fe^{2+} 溶液各 0.5 mL,加入 88 mmol/L H_2O_2 5.0 mL 来启动该反应。振荡摇匀在 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴反应 30 min,混合溶液于 $9\ 200 \times g$ 离心 2 min,收集上清液于波长 510 nm 处测定吸光值。同时,以 V_c 作为阳性对照。清除率按式(2)计算,并换算半数抑制率 IC_{50} 。

$$P = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

P —— $\cdot\text{OH}$ 清除率, %;

A_1 ——0.5 mL 水杨酸-乙醇 + 1.0 mL 膳食纤维 + 0.5 mL Fe^{2+} + 5.0 mL H_2O_2 混合液的吸光值;

A_2 ——0.5 mL 水杨酸-乙醇 + 1.0 mL 膳食纤维 + 0.5 mL 蒸馏水 + 5.0 mL H_2O_2 混合液的吸光值;

A_3 ——0.5 mL 水杨酸-乙醇 + 1.0 mL 蒸馏水 + 0.5 mL Fe^{2+} + 5.0 mL H_2O_2 混合液的吸光值。

1.3.6 数据分析方法 所有数据均用 3 次平行试验的“平均值士标准偏差”表示,用 SPSS 17.0 软件对数据进行处理,方差分析中 $P < 0.05$ 为显著差异,图中用字母标记法表示。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 料液比对紫薯 IDF 提取率的影响 由图 1 可知,料液比对试验结果影响显著 ($P < 0.05$)。在料液比为 1:15 (g/mL) 时,IDF 的提取率达到最大值,而后呈现下降的趋势。这可能是物料过多,不能在溶液中充分膨胀;物料太少,纤维素容易水解[27],也可能是随着料液比的增加,混合体系中的其他物质会竞相溶出、相互作用,影响酶反应或膳食纤

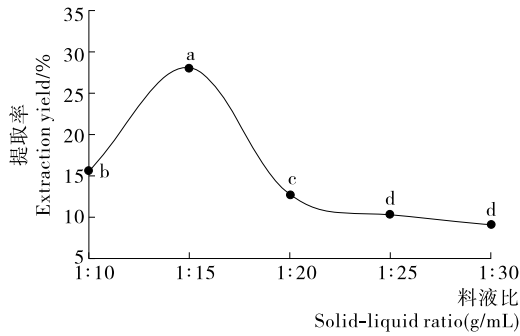


图 1 料液比对紫薯 IDF 提取率的影响

Figure 1 Effect of material liquid ratio on the extraction rate of purple sweet potato IDF

维分子的稳定性。因此,认为料液比在 1 : 15 (g/mL)时结果最优。

2.1.2 超声功率对紫薯 IDF 提取率的影响 超声波作用的功效由原料的数目和结构特性决定,每一种提取物都有其相应的超声功率的提取值。由图 2 可知,超声波功率在 160 W 时,IDF 的提取率达到最大值。这可能是当超声波功率提升时,细胞中的 IDF 溶出,但当超声波功率过大时,细胞中溶出的物质含有降解 IDF 的酶,致使提取率降低^[28-29]。因此,超声功率选用 160 W。

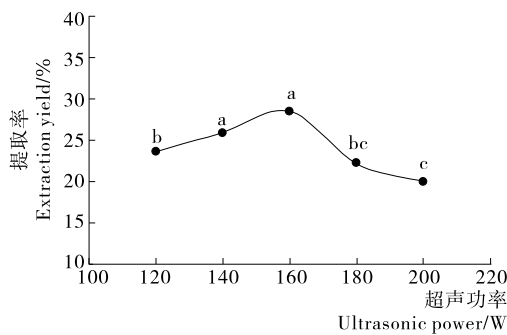


图 2 超声功率对紫薯 IDF 提取率的影响

Figure 2 Effect of ultrasonic power on the extraction rate of purple sweet potato IDF

2.1.3 α -淀粉酶用量对紫薯 IDF 提取率的影响 由图 3 可知,随着 α -淀粉酶添加量的增加,紫薯 IDF 的提取率也随之升高($P < 0.05$)。当 α -淀粉酶的添加量在 50 $\mu\text{L/g}$ 时,提取率最高,当 α -淀粉酶的添加量继续增加,IDF 的提取率反而降低。推测原因可能是 α -淀粉酶添加量过低时,淀粉没能完全水解,而淀粉酶加入量太高,造成其中的半纤维素等物质溶出,导致提取率下降^[30]。故 α -淀粉酶的添加量选用 50 $\mu\text{L/g}$ 。

2.1.4 超声时间对紫薯 IDF 提取率的影响 研究^[31]认为,超声波是一种频率在 20 kHz 以上的声波,其对媒质主要产生独特的机械振动作用和空化作用。故超声辅助溶剂萃取法能够显著提高诸多功效成分的提取^[31-33]。由图 4 可知,超声时间为 10~40 min 时,紫薯 IDF 的提取率与超声时间呈现正相关趋势。超声时间为 40 min 时,提取率达到峰值。推测可能是超声时间的延长有助于有效物质的溶出,但当超

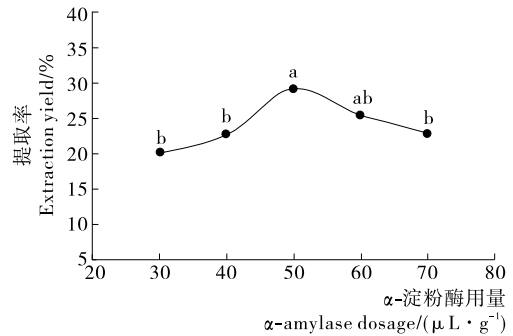
图 3 α -淀粉酶用量对紫薯 IDF 提取率的影响

Figure 3 Effect of the amount of alpha amylase on the extraction rate of purple sweet potato IDF

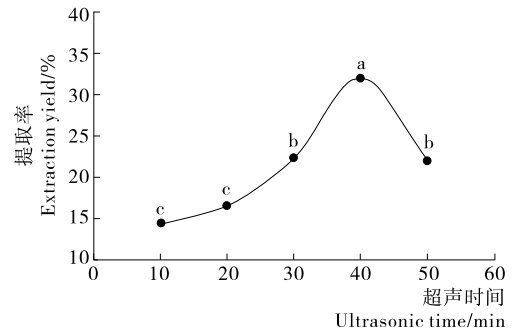


图 4 超声时间对紫薯 IDF 提取率的影响

Figure 4 Effect of ultrasonic time on the extraction rate of purple sweet potato IDF

声时间过长时,细胞中分解 IDF 的酶也被溶出,造成提取率降低。故超声时间选择 40 min。

2.1.5 酶解温度对紫薯 IDF 提取率的影响 由图 5 可知, IDF 的提取率随着酶解温度的上升而逐步升高,在 75 $^{\circ}\text{C}$ 时提取率最大,当温度继续升高,提取率反而迅速下降($P > 0.05$)。当温度达到蛋白质变性温度范围后,分子快速的运动,使酶牢固的二级和三级结构键被打破,该变性作用时常造成蛋白质聚集而导致酶失活^[34]。综上,酶解温度选择 75 $^{\circ}\text{C}$ 比较合适。

2.2 正交因素试验结果

为了优化提取工艺条件,依据单因素的试验结果(α -淀粉酶的添加量为 50 $\mu\text{L/g}$),以紫薯的 IDF 提取率为指标,选

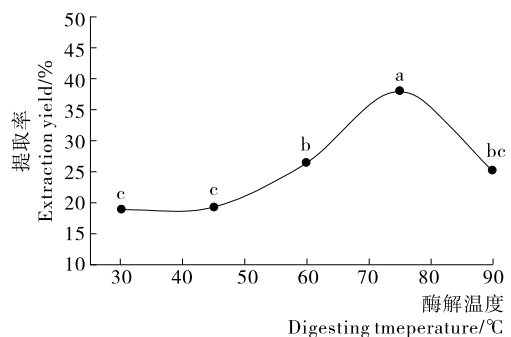


图 5 酶解温度对紫薯 IDF 提取率的影响

Figure 5 Effect of enzymatic hydrolysis temperature on the extraction rate of purple sweet potato IDF

择超声功率、超声时间、酶解温度、料液比作为考察因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验设计优化工艺。紫薯正交试验设计见表1,紫薯正交试验结果见表2。

表1 紫薯的正交试验设计表

Table 1 Orthogonal experimental design of purple sweet potato

水平	A 超声功率/W	B 超声时间/min	C 酶解温度/°C	D 料液比(g/mL)
1	140	35	65	1:10
2	160	40	75	1:15
3	180	45	85	1:20

表2 紫薯的正交试验结果表

Table 2 Results of orthogonal test of purple sweet potato

序号	A	B	C	D	提取率/%
1	1	1	1	1	31.27
2	1	2	2	2	36.48
3	1	3	3	3	29.02
4	2	1	2	3	35.38
5	2	2	3	1	32.17
6	2	3	1	2	34.41
7	3	1	3	2	31.64
8	3	2	1	3	32.96
9	3	3	2	1	30.22
<hr/>					
k_1	32.26	32.76	32.88	31.22	
k_2	33.99	33.87	34.03	34.18	
k_3	31.61	31.22	30.94	32.45	
R	2.38	2.65	3.08	2.96	

由表9可知,酶解温度是超声波辅助酶法提取紫薯IDF的最关键控制因素,其次依次是料液比、超声波时间和超声功率。从 k 值可知,最优工艺组合是 $A_2B_2C_2D_2$,即超声功率160 W、超声波时间40 min、酶解温度75 °C、料液比1:15 (g/mL)。

2.3 最优组合的验证实验

依据正交试验结果和分析可得到提取的最佳工艺条件为:超声功率160 W、超声时间40 min、酶解温度75 °C、料液比1:15 (g/mL)。用最佳的工艺组合对紫薯的IDF进行提取,得到提取率为 $(38.32 \pm 0.22)\%$,证实了 $A_2B_2C_2D_2$ 为最优组合。

2.4 紫薯的IDF对·OH的清除结果

由图6可知,伴随浓度的增加,紫薯IDF和 V_c 对·OH的清除率都随之升高($P < 0.05$)。紫薯IDF的浓度为1~3 mg/mL,清除率上升较为缓慢,但在3~5 mg/mL时,清除率的上升较为显著。经计算,紫薯IDF的 IC_{50} 为39.27 mg/mL, V_c 的 IC_{50} 为13.15 mg/mL(图7)。由此可见,紫薯IDF对·OH有良好的清除效果。

紫薯IDF的抗氧化性主要是基于结合在IDF上的酚类

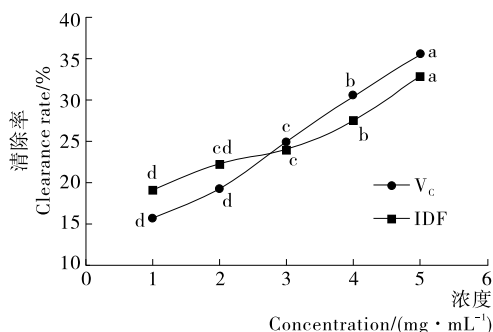


图6 紫薯IDF对·OH的清除率

Figure 6 The clearance rate of purple sweet potato IDF to ·OH

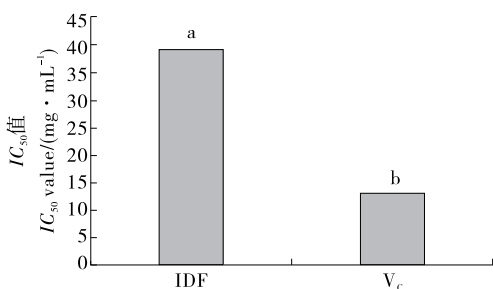


图7 紫薯IDF和 V_c 的 IC_{50} 值

Figure 7 IC_{50} value of purple sweet potato IDF and V_c

物质^[18,35]。孙海燕^[3]研究发现,紫薯中的主要酚类物质中类黄酮最高,含量高达 (7.38 ± 0.21) mg/g; 单体酚种类最高达10种,其中儿茶素的含量最高为4.54 mg/L。紫罗兰和秦紫一号2种紫薯均具有较强的抗氧化能力,且紫薯中的各酚类物质均与不同的抗氧化方法有显著的相关性。蔡湛等^[36]评价了紫薯的抗氧化性并通过UPLC-ESI-MS鉴定出了7种紫薯花色苷和3种其他酚类物质,其中花色苷中酰基化的基团主要为咖啡酸、阿魏酸和对羟基苯甲酸,其他酚类物质主要是绿原酸。紫薯中的酚类含量不仅远高于普通甘薯^[37],其花色苷含量也非常丰富,且具有较好的热稳定性和光稳定性^[38],这些强活性物质有相当一部分会结合在膳食纤维上,成为抗氧化功效发挥的基础。此外,李润国等^[39]也报道了紫薯膳食纤维对1,1-二苯基-2-苦味酰基自由基、超氧阴离子自由基以及羟自由基的清除功效。

3 结论

运用超声波辅助酶法提取紫薯IDF简便可行,料液比、超声时间、超声功率、 α -淀粉酶用量和酶解温度均能够影响IDF的提取率,其中酶解温度对试验结果的影响最为显著。正交优化试验最终得到的提取工艺参数为: α -淀粉酶添加量50 μ L/g、料液比1:15 (g/mL)、超声时间40 min、超声功率160 W和酶解温度75 °C,该条件下提取率可达38.32%。体外抗氧化试验表明,紫薯IDF具有较强的羟自由基清除能力。这可能与膳食纤维中结合的花色苷或活性酚类等抗氧化物质有关。

如今,许多果蔬中的抗氧化膳食纤维已广泛应用于食品保鲜与功能食品研发等领域^[40]。紫薯作为良好的膳食纤维

来源,具有广阔的市场前景,亟待更深入的研究和利用。

参考文献

- [1] 杨巍,黄洁琼,陈英,等.紫薯的营养价值与产品开发[J].农产品加工: 学刊, 2011(8): 41-43.
- [2] 杨磊,胡阿丽.紫薯颗粒全粉研究[J].中国农学通报, 2017, 33(19): 148-151.
- [3] 孙海燕. 2 种紫薯化学抗氧化能力比较[J].食品与发酵工业, 2017, 43(3): 163-168.
- [4] 余凡,葛亚龙,杨恒拓,等.紫薯的营养保健功能及其应用前景[J].杭州化工, 2013, 43(3): 15-18.
- [5] 吕昱,严敏.紫薯花色苷的生理功能及分离纯化研究进展[J].食品与机械, 2013, 29(4): 205-254.
- [6] 田喜强,董艳萍.超声波辅助提取紫薯花青素及抗氧化性研究[J].中国酿造, 2014, 33(1): 77-80.
- [7] CIPRIANO P D A, EKICI L, BARNES R C, et al. Pre-heating and polyphenol oxidase inhibition impact on extraction of purple sweet potato anthocyanins[J]. Food Chemistry, 2015, 180: 227-234.
- [8] TRUONG V D, HU Z, THOMPSON R L, et al. Pressurized liquid extraction and quantification of anthocyanins in purple-fleshed sweet potato genotypes[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2012, 26(1/2): 96-103.
- [9] 刘阳,傅亚平,廖卢艳,等.紫薯熟全粉变温压差膨化干燥技术研究[J].中国酿造, 2015, 34(8): 58-62.
- [10] PENG Zhen, LI Jing, GUAN Yu-fang, et al. Effect of carriers on physicochemical properties, antioxidant activities and biological components of spray dried purple sweet potato flours[J]. Food Science and Technology, 2013, 51(1): 348-355.
- [11] 赵红岩.紫薯功能饮料双酶水解工艺[J].中国酿造, 2015, 34(3): 118-121.
- [12] 党妮,刘水英.响应面法优化紫薯汁糖化工艺研究[J].中国酿造, 2014, 33(8): 55-59.
- [13] WANG Yong-tao, LIU Fang-xia, CAO Xia-min, et al. Comparison of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of purple sweet potato nectar[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16(39): 326-334.
- [14] 赵丰丽,吕金莲,吴奔,等.紫薯渣果胶提取工艺研究[J].中国酿造, 2016, 35(11): 133-135.
- [15] 郑凯,何方岳,徐静雯,等.紫薯中果胶提取工艺条件的研究[J].广州化工, 2015, 43(4): 79-81.
- [16] 赵二劳,王璐.膳食纤维的保健功能及其制备研究进展[J].食品与机械, 2011, 27(3): 165-168.
- [17] SAURA-CALIXTO F. Antioxidant dietary fiber product: a new concept and a potential food ingredient[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 1998, 46(10): 4 303-4 306.
- [18] 谌小立,赵国华.抗氧化膳食纤维研究进展[J].食品科学, 2009, 30(5): 291-294.
- [19] SÁNCHEZ-ALONSO I, JIMÉNEZ-ESCRIG A, SAURA-CALIXTO F, et al. Antioxidant protection of white grape pomace on restructured fish products during frozen storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(1): 42-50.
- [20] SANCHEZ-ALONSO I, BORDERIAS A J, LARSSON K, et al. Inhibition of hemoglobin-mediated oxidation of regular and lipid-fortified washed cod mince by a white grape dietary fiber[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(13): 5 299-5 305.
- [21] SÁNCHEZ-ALONSO I, BORDEÍAS A J. Technological effect of grape antioxidant dietary fibre added to minced fish muscle[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2008, 43(6): 1 009-1 018.
- [22] 李凤.椰子渣不溶性膳食纤维酶法提取[J].食品科学, 2008, 29(10): 215-217.
- [23] HASSAN F A, ISMAIL A, HAMID A A, et al. Characterisation of fibre-rich powder and antioxidant capacity of Mangifera pajang K. fruit peels[J]. Food Chemistry, 2011, 126(1): 283-288.
- [24] 陈琬盈,李江,郑育桃,等.三种膳食纤维的抗氧化活性及主要吸附能力的比较研究[J].中国酿造, 2015(1): 99-104.
- [25] 牛广财,朱丹,肖盾,等.花红可溶性膳食纤维的抗氧化活性[J].食品科学, 2011(19): 100-103.
- [26] SERPEN A, CAPUANO E, FOGLIANO V, et al. A new procedure to measure the antioxidant activity of insoluble food components[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(19): 7 676-7 681.
- [27] 谢永红,廖立敏.蔗渣中不溶性膳食纤维提取工艺[J].江南大学学报: 自然科学版, 2013(3): 331-334.
- [28] WANG Zhao-mei, CHEUNG Yi-ching, LEUNG Po-hong, et al. Ultrasonic treatment for improved solution properties of a high-molecular weight exopolysaccharide produced by a medicinal fungus[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5 517-5 522.
- [29] VINATORU M. An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2001, 8(3): 303-313.
- [30] 袁建,李大川,石嘉悻,等.响应面法优化麦麸蛋白质和膳食纤维的提取工艺[J].食品科学, 2011, 32(10): 25-30.
- [31] WEI Xin-lin, CHEN Miao-ai, XIAO Jian-bo, et al. Composition and bioactivity of tea flower polysaccharides obtained by different methods[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(2): 418-422.
- [32] CHEN Xiao-ping, WANG Wan-xiang, LI Shui-bing, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of Lingzhi 5 polysaccharides using response surface methodology and its inhibitory effect on cervical cancer cells[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(10): 944-948.
- [33] 薛山.紫苏精油的研究新趋势[J].中国食品添加剂, 2011(1): 199-204.
- [34] 刘达玉,左勇.酶解法提取薯渣膳食纤维的研究[J].食品工业科技, 2005, 26(5): 90-92.
- [35] TRUONG V D, DEIGHTON N, THOMPSON R T, et al. Characterization of anthocyanins and anthocyanidins in purple-fleshed sweet potatoes by HPLC-DAD/ESI-MS/MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(1): 404-410.

(下转第 163 页)

- 定[J]. 林业科技开发, 2007, 21(3): 47-49.
- [6] 刘露, 龙媛媛, 郭宗雨, 等. 欧亚旋覆花总黄酮对糖基化终末产物诱导 L929 细胞衰老及 RAGE 表达的影响[J]. 中草药, 2018, 49(3): 626-632.
- [7] 何伟平, 王勤志, 朱晓韵, 等. 茄子提取物对清除自由基作用的研究[J]. 轻工科技, 2012(4): 3-4.
- [8] LIU Chang-qing, JIAO Rui-hua, YAO Ling-yuan, et al. Adsorption characteristics and preparative separation of chaetominine from *Aspergillus fumigatus* mycelia by macroporous resin[J]. Journal of Chromatography B, 2016, 1 015: 135-141.
- [9] 李琼, 陈恺, 陈燕勤, 等. 大孔吸附树脂分离纯化核桃青皮总多酚[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 175-180.
- [10] DONG Yi, ZHAO Mou-ming, SUN-WSTERHOUSE Dong-xiao, et al. Absorption and desorption behaviour of the flavonoids from *Glycyrrhiza glabra* L. leaf on macroporous adsorption resins[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 538-545.
- [11] 高海宁, 李彩霞, 张勇, 等. “黑美人”土豆色素体外抗氧化性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(2): 224-228, 233.
- [12] WU Ya-jun, LIU Jing-jing, GU Su, et al. Orthogonal strategy development using reversed macroporous resin coupled with hydrophilic interaction liquid chromatography for the separation of ginsenosides from ginseng root extract [J]. Journal of Separation Science, 2017, 40(21): 4 128-4 134.
- [13] WU Yuan-feng, ZHANG Lei, MAO Jian-wei, et al. Kinetic and thermodynamic studies of sulforaphane adsorption on macroporous resin[J]. Journal of Chromatography B, 2016, 1 028(15): 231-236.
- [14] TANG Liu, WEI Xing-chen, AN Fa-liang, et al. Preparative separation of TL1-1 from *Dalmanella eschscholzii* extract by macroporous resin and evaluation of its antimicrobial activities[J]. Journal of Chromatography B, 2017, 1 060(15): 22-29.
- [15] LI Lu, LIU Ju-zhao, LUO Meng, et al. Efficient extraction and preparative separation of four main isoflavonoids from *Dalbergia odorifera* T. Chen leaves by deep eutectic solvents-based negative pressure cavitation extraction followed by macroporous resin column chromatography [J]. Journal of Chromatography B, 2016, 1 033: 40-48.
- [16] 吕英华, 苏平, 那宇, 等. 桑葚色素体外抗氧化能力研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 3(1): 102-107.
- [17] 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(1): 1 231-1 237.
- [18] 张冰洁. 金银花叶中黄酮类化合物的提取、纯化及其抗氧化研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.

(上接第 152 页)

- [6] 姜永新, 高健, 赵平, 等. 无籽刺梨新鲜果实挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. 食品研究与开发, 2013(14): 91-94.
- [7] 刘芳舒, 张瑜, 罗昱, 等. 无籽刺梨复合果酱配方工艺技术研究[J]. 食品科技, 2015(1): 107-111.
- [8] 严晓月, 刘星, 李永福, 等. 无籽刺梨果酒含片工艺研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 226-230.
- [9] 贺红早, 张玉武, 刘盈盈, 等. 无籽刺梨果酒酿制工艺优化初探[J]. 酿酒科技, 2015(11): 91-93.
- [10] 罗昱, 王亮, 丁筑红. 浑浊型无籽刺梨果汁饮料的研制[J]. 食品科技, 2014(11): 91-96.
- [11] 董爱文, 向中, 王国庆. 不同处理的紫藤花萼中黄色素提取及理化性质研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(7): 255-259.
- [12] 王钦德. 食品试验设计与统计分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 352-354.
- [13] OLIVEIRA I, BAPTISTA P, MALHEIROR, et al. Influence of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruit ripening stage on chemical composition and antioxidant activity[J]. Food Res Int, 2011, 44(5): 1 401-1 407.
- [14] NUNCIO-JÁUREGUI N, MUNERA-PICAZO S, CALÍN-SÁNCHEZ Á, et al. Bioactive compound composition of pomegranate fruits removed during thinning [J]. J Food Compos Anal, 2015, 37: 11-19.
- [15] TAUCHEN J, MARSIK P, KVASNICOVA M, et al. In vitro antioxidant activity and phenolic composition of Georgian, Central and West European wines[J]. J Food Compos Anal, 2015, 41: 113-121.
- [16] 张姣姣, 杜超, 杨维弘, 等. 密蒙花黄色素的提取及其稳定性分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(3): 49-52.
- [17] 许海棠, 廖艳娟, 欧小辉, 等. 密蒙花黄色素的提取及其稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(6): 218-222.

(上接第 157 页)

- [36] 蔡湛, 兰余, 赵淑娟, 等. 紫薯的抗氧化及活性成分研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(1): 43-48.
- [37] TEOW C C, TRUONG V D, MCFEETERS R F, et al. Antioxidant activities, phenolic and β -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours [J]. Food Chemistry, 2007, 103(3): 829-838.
- [38] HWANG Y P, CHOI J H, HAN E H, et al. Purple sweet potatoanthocyanins attenuate hepatic lipid accumulation through activating adenosine monophosphate-activated protein kinase in human HepG2 cells and obese mice[J]. Nutrition Research, 2011, 31(12): 896-906.
- [39] 李润国, 高岩, 单秀峰. 紫甘薯膳食纤维的提取及对自由基的清除作用[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2014, 32(2): 206-209.
- [40] 周小理, 钱韵芳, 周一鸣. 植物性膳食纤维抗氧化活性的研究与应用[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 158-160.