

蜂花粉可溶性膳食纤维酶法提取 工艺优化及其理化分析

Enzymatic extraction of bee pollen soluble dietary
fiber and its physicochemical analysis

郑 慧 陈希平 尤 祯 丹 夏冬雪 胡 熙

ZHENG Hui CHEN Xi-ping YOU Zhen-dan XIA Dong-xue HU Xi

(湖南中医药大学药学院, 湖南 长沙 410208)

(College of Pharmacy, Hunan University of Traditional Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China)

摘要:采用纤维素酶法提取蜂花粉可溶性膳食纤维,分析其理化特性,并与酸提、碱提产品进行对比。结果表明,酶法提取蜂花粉可溶性膳食纤维最优工艺条件为:酶解温度 50 ℃,酶解时间 2 h,酶用量 2.5%,pH 4。在该条件下,可溶性膳食纤维得率为 4.11%,产品呈乳白色、粉体,荷花蜂花粉特有气味浓郁,膨胀力 2.03 mL/g、持水力 1.01 g/g、水溶性 91.26%,含有甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖 7 种单糖组分,具有多糖特征吸收峰。与碱提、酸提工艺相比,酶提产品具有较好水溶性和感官品质,更易于应用在饮料类食品的开发中。

关键词:蜂花粉;可溶性膳食纤维;酶法提取;单糖组分;红外光谱

Abstract: Bee pollen soluble dietary fiber was extracted by enzymatic extraction, and the physicochemical properties was analyzed, while, the products were compared with the bee pollen soluble dietary fiber by acid extraction and alkali extraction. The optimal enzymatic extraction conditions were determined as follows: extraction temperature 50 ℃, extraction time 2 h, enzyme 2.5%, pH 4. Under the conditions, the yield of bee pollen soluble dietary fiber was 4.11%. The product is milk-white powder, and has good smell. The swelling capacity, water holding capacity and the water-solubility of the fiber were 2.03 mL/g, 1.01 g/g, 91.26%, respectively. The bee pollen soluble dietary fiber was composed of 7 kinds of monosaccharide, such as mannose, rhamnose, glucuronic acid, galacturonic acid, glucose, galactose and arabinose, and has the absorption peak of polysaccharides. Compared with alkali extraction and acid extrac-

tion, The bee pollen soluble dietary fiber has better water solubility and sensory quality, and is easier to apply enzymatic extraction to the beverage products development.

Keywords: bee pollen; soluble dietary fiber; enzymatic extraction; monosaccharides; infrared spectrum

蜜蜂花粉,简称蜂花粉,是蜜蜂从显花植物花药内采集的花粉粒,向其内加入了花蜜与唾液,混合而成的一种不规则扁圆形团状物^[1]。蜂花粉营养丰富^[2-3],具有多种保健功能^[4-6],被誉为“微型营养库”。但由于蜂花粉含砂含杂、口感独特,且细胞壁质地坚硬、生物利用率差,目前大部分蜂花粉被直接作为蜂粮用于饲养蜜蜂,深加工产品较少。中国作为世界第一养蜂大国,其资源优势远未体现^[7]。近年来蜂花粉研究主要集中在细胞壁的破壁工艺^[8-9],以及其生物类黄酮、多糖的提取和研究上^[4,10-11],对于纤维类成分仅在营养组分测定中有所提及,并未有系统深入地研究。

可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)是指不被人体消化道酶消化,能溶于温热水,和水结合形成凝胶物质,且其水溶液能被 4 倍体积的乙醇再沉淀的那部分物质。其主要通过在大肠中发挥代谢作用达到降低胆固醇、防治高血压及心血管疾病等多种功效^[12-13]。同时良好的水溶性,使其能更广泛地应用在各类食品中,尤其是饮料类产品的开发中^[14]。SDF 常规提取方法有碱提、酸提和酶提^[15]。本试验拟采用纤维素酶法提取蜂花粉 SDF,并与前期研究得到的酸提^[16]、碱提^[17]产品进行对比,比较不同提取方法对蜂花粉 SDF 产品特性的影响,旨在为蜂花粉 SDF 进一步的开发利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与主要仪器

1.1.1 材料与试剂

荷花蜂花粉:市售;

基金项目:湖南省科技厅科技计划项目(编号:2014SK3015);湖南中医药大学青年教师科研基金(编号:99820001-131)

作者简介:郑慧,女,湖南中医药大学讲师,硕士。

通信作者:陈希平(1964-),女,湖南中医药大学副教授,博士。

E-mail: 1716425066@qq.com

收稿日期:2016-09-05

纤维素酶、三氟乙酸、1-苯基-3-甲基-5-吡啶酮(PMP):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

单糖标准品(葡萄糖、鼠李糖、甘露糖、半乳糖、阿拉伯糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸):色谱纯,上海叶源生物科技有限公司;

乙腈、甲醇:色谱纯,默克化工技术(上海)有限公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

恒温振荡器:ZHUY-200D型,上海智诚分析仪器制造有限公司;

电子分析天平:AV1120型,日本岛津仪器有限公司;

实验室pH计:STARTER3100/F型,奥豪斯仪器有限公司;

傅立叶变换红外光谱仪:Nicolet iS5型,赛默飞世尔科技公司;

高效液相色谱仪(配紫外检测器):Agilent 1260型,美国安捷伦公司。

1.2 试验方法

1.2.1 蜂花粉 SDF 酶提工艺 蜂花粉经日光晒干、除杂、粉碎过 30 目筛,备用。将预处理后的蜂花粉按 1:15(g/mL)料液比溶于一定 pH 水溶液中,加入一定量的纤维素酶,搅拌均匀,置于恒温培养振荡器中于一定温度下以 250 r/min 振荡酶解一定时间。酶解后 85 °C 水浴 10 min 灭酶活,3 500 r/min 离心 10 min^[14]取上清液,加入 4 倍体积预热至 60 °C 95%乙醇,静置 1 h,絮状沉淀析出,3 500 r/min 离心 10 min 取沉淀,真空干燥至恒重得到酶提蜂花粉 SDF。

1.2.2 单因素试验

(1) 酶解时间对 SDF 得率的影响:固定反应条件为酶解温度 40 °C、pH 4、酶用量 1.5%,考察不同的酶解时间(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 h)对蜂花粉 SDF 得率的影响。

(2) 酶用量对 SDF 得率的影响:固定反应条件为酶解温度 40 °C、pH 4、酶解时间 1.5 h,考察不同的酶用量(0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%)对蜂花粉 SDF 得率的影响。

(3) 酶解温度对 SDF 得率的影响:固定反应条件为酶用量 2.0%、pH 4、酶解时间 1.5 h,考察不同的酶解温度(40, 45, 50, 55, 60 °C)对蜂花粉 SDF 得率的影响。

(4) pH 对 SDF 得率的影响:固定反应条件为酶用量 2.0%、酶解温度 50 °C、酶解时间 1.5 h,考察不同的 pH(2, 3, 4, 5, 6)对蜂花粉 SDF 得率的影响。

蜂花粉 SDF 得率按式(1)计算:

$$x = \frac{M_1}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

x ——蜂花粉 SDF 得率, %;

M_0 ——初始蜂花粉质量, g;

M_1 ——提取后干燥至恒重的蜂花粉 SDF 质量, g。

1.2.3 正交试验设计 在单因素试验的基础上,设计 L9(3⁴) 正交试验,以蜂花粉 SDF 得率为考察指标。

1.2.4 蜂花粉 SDF 感官品质 从成品色泽、气味、性状初步比较酶提、酸提、碱提工艺制备的蜂花粉 SDF 感官品质。

1.2.5 蜂花粉 SDF 膨胀力、持水力和水溶性的测定

(1) 膨胀力的测定:根据文献[18]。

(2) 持水力的测定:根据文献[19],修改如下:准确称取 0.500 g 蜂花粉 SDF 于 100 mL 三角烧瓶中,加入 40 mL 蒸馏水,置于恒温振荡器中 30 °C、250 r/min 振荡 2 h, 4 000 r/min 离心 15 min,除去上清液称重,并按式(2)计算:

$$c = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

c ——蜂花粉持水力, g/g;

m_0 ——初始蜂花粉质量, g;

m_1 ——除去上清液后蜂花粉质量, g。

(3) 水溶性的测定:根据文献[17]。

1.2.6 蜂花粉 SDF 单糖组分测定 采用柱前衍生化 HPLC 法测定。

(1) 蜂花粉 SDF 酸水解及衍生化产物的制备:根据文献[20]。

(2) 色谱条件:Ultimate XB-C₁₈ 色谱柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm);流动相乙腈—0.05 mol/L 磷酸盐缓冲溶液(pH 6.9)(体积比 17:83);柱温 30 °C;流速 1.0 mL/min;检测波长 250 nm;进样量 10 μL。

1.2.7 红外光谱测定 用傅立叶变换红外光谱仪进行测定,波数范围 400~4 000 cm⁻¹。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 酶解时间对蜂花粉 SDF 得率的影响 由图 1 可知,在试验范围内,随着酶解时间的增加,蜂花粉 SDF 得率先升高再降低后略有增加,在 1.5 h 时蜂花粉 SDF 得率最高。这可能是酶解初期随着酶解时间增加,原料与酶接触更加充分,酶解后形成一定聚合度、高分子质量的蜂花粉 SDF,能被 95%的乙醇有效沉淀,使得蜂花粉 SDF 得率增加;此后,随着酶解时间增加,这类具有一定聚合度的高分子质量的蜂花粉 SDF 被过度水解,生成低聚合度的不易被 95%乙醇沉淀的组分,不能被离心收集^[21],从而使蜂花粉 SDF 得率下降。因此选择酶解时间为 1.5 h 为宜。

2.1.2 酶用量对蜂花粉 SDF 得率的影响 由图 2 可知,在

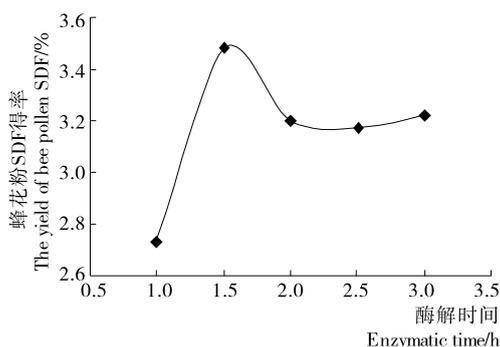


图 1 酶解时间对蜂花粉 SDF 得率的影响

Figure 1 Effect of enzymatic time on the yield of bee pollen SDF

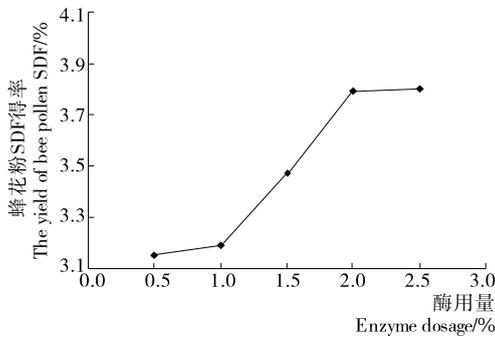


图 2 酶用量对蜂花粉 SDF 得率的影响

Figure 2 Effect of enzyme dosage on the yield of bee pollen SDF

试验范围内,随着酶用量的增加,蜂花粉 SDF 得率逐步增加后趋于平稳。可能是初期随纤维素酶用量增加,蜂花粉酶解愈加充分,得率增加;而酶用量增加至 2.0% 后,相对于蜂花粉质量,酶用量逐渐趋于饱和,得率也趋于平稳。因此从生产成本考虑,选择酶用量为原料的 2.0% 为宜。

2.1.3 酶解温度对蜂花粉 SDF 得率的影响 由图 3 可知,在试验范围内,随着酶解温度升高蜂花粉 SDF 得率先升高后降低。这是因为酶解温度过高或过低都会影响纤维素酶的活性,使得蜂花粉酶解不充分,不能被 95% 乙醇有效沉淀,使得蜂花粉 SDF 得率偏低。因此选择酶解温度 50 °C 为宜。

2.1.4 pH 对蜂花粉 SDF 得率的影响 由图 4 可知,在试验范围内,蜂花粉 SDF 得率先升高后降低。因为只有酶的最适 pH 范围内,酶才具有较好的催化活性。而当反应条件

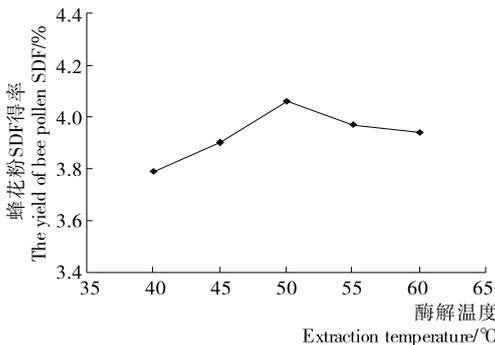


图 3 酶解温度对蜂花粉 SDF 得率的影响

Figure 3 Effect of enzymatic temperature on the yield of bee pollen SDF

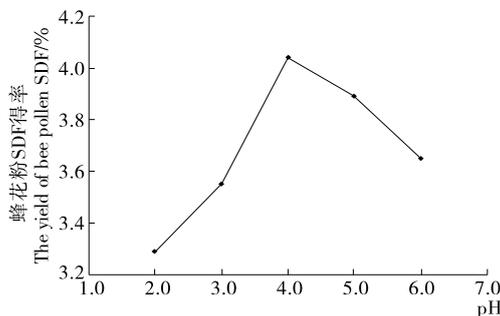


图 4 pH 对蜂花粉 SDF 得率的影响

Figure 4 Effect of pH on the yield of bee pollen SDF

远离最适 pH 范围,酶的活性降低,酶解不充分,从而使蜂花粉 SDF 得率降低。因此选择 pH 4 为宜。

2.2 正交试验结果及数据分析

正交试验因素水平取值见表 1。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factor and level of orthogonal test

水平	A 酶解温度/°C	B 酶解时间/h	C 酶用量/%	D pH
1	45	1.0	1.5	3
2	50	1.5	2.0	4
3	55	2.0	2.5	5

由表 2 可知,4 个因素对蜂花粉 SDF 得率影响大小为 B>A>C>D;最佳提取工艺条件为 A₂B₃C₃D₂,即酶解温度 50 °C,酶解时间 2 h,酶用量 2.5%,pH 值 4。由于此组合在正交表中并未列入,按此条件进行验证实验,蜂花粉 SDF 得率为(4.11 ± 0.04)%,高于正交表中的试验值。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

试验号	A	B	C	D	蜂花粉 SDF 得率/%
1	1	1	1	1	3.54
2	1	2	2	2	3.84
3	1	3	3	3	3.93
4	2	1	2	3	3.74
5	2	2	3	1	4.09
6	2	3	1	2	4.07
7	3	1	3	2	3.61
8	3	2	1	3	3.82
9	3	3	2	1	3.83
<i>k</i> ₁	3.77	3.63	3.81	3.82	
<i>k</i> ₂	3.97	3.92	3.80	3.84	
<i>k</i> ₃	3.75	3.94	3.88	3.83	
<i>R</i>	0.22	0.31	0.07	0.02	

2.3 不同提取方式蜂花粉 SDF 感官品质、膨胀力、持水力和水溶性

与蜂花粉 SDF 的酸提工艺^[16](得率 7.31%)、碱提工艺^[17](得率 12.51%)相比,酶提工艺得率较低。3 种提取方式制备的蜂花粉 SDF 产品,其感官指标、膨胀力、持水力、水溶性见表 3。在感官品质上,与酸提、碱提产品比较,酶提产品呈乳白色、颜色较浅,后期应用对成品色泽影响较小;荷花蜂花粉特有香味浓郁;呈粉末状,易粉碎及后续处理。故在感官品质上酶提产品可开发性较好。

与酸提、碱提产品比较,酶提产品的膨胀力介于二者之间,持水力最低,一方面可能因为不同的提取方式制备的蜂花粉 SDF 其组分不同;另一方面较好的水溶性会使酶提产品或多或少地溶入水中,从而影响其膨胀力和持水力的测定。酶提蜂花粉 SDF 水溶性高达 91.26%,是酸提产品的

表3 蜂花粉 SDF 感官品质、膨胀力、持水力和水溶性[†]

Table 3 Sensory qualities, expansibility, Water holding capacity and water solubility of bee pollen SDF

制备方法	色泽	气味	性状	膨胀力/ (mL · g ⁻¹)	持水力/ (g · g ⁻¹)	水溶性/ %
酶提	乳白色	荷花蜂花粉独特香味浓郁	粉末	2.03 ± 0.02 ^b	1.01 ± 0.10 ^c	91.26 ± 1.49 ^a
酸提	棕黄色	荷花蜂花粉独特香味浓郁	胶状物	0.87 ± 0.07 ^c	1.33 ± 0.08 ^b	84.78 ± 0.91 ^b
碱提	浅棕色	荷花蜂花粉独特香味较淡	粉末	2.83 ± 0.12 ^a	5.23 ± 0.19 ^a	60.39 ± 1.22 ^c

[†] 同一列中标不同字母表示差异极显著(P<0.05)。

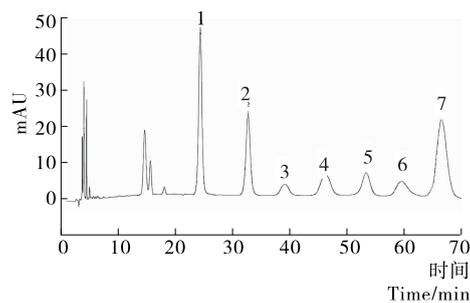
1.07倍、碱提产品的1.51倍。故与酸提、碱提产品相比,酶提产品感官品质较好,水溶性较高,更易于应用在饮料类功能产品的研发中。

2.4 不同提取方式蜂花粉 SDF 单糖组分

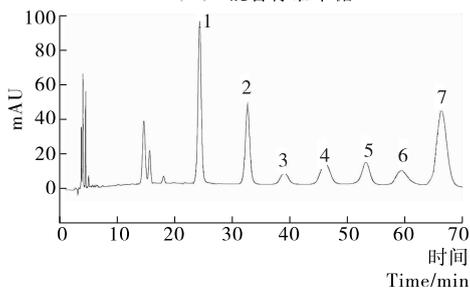
混合标准单糖和酶提产品液相色谱图见图5,酶提、酸提、碱提3种方式制备的蜂花粉 SDF 单糖组分相对质量见表4。由表4可知,3种提取方式制备的蜂花粉 SDF 产品均含有甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖5种单糖组分,此外酶提产品还含有葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸2种糖醛酸组分。结果表明,蜂花粉 SDF 提取方式不同,得到 SDF 产品单糖组分及其相对含量有所差异,这可能是不同提取条件,蜂花粉细胞壁裂解的组分不同、同一组分裂解方式不同。

2.5 不同提取方式蜂花粉 SDF 红外光谱图

酶提、酸提、碱提蜂花粉 SDF 红外光谱见图6,不同提取方式制备的蜂花粉 SDF 红外光谱图均具有多糖特征吸收峰,且峰形相似,但吸收峰的相对强度各有差异。其中,在3304 cm⁻¹附近吸收峰,为O—H伸缩振动;2927 cm⁻¹附近



(a) 混合标准单糖



(b) 酶提蜂花粉SDF

1. 甘露糖 2. 鼠李糖 3. 葡萄糖醛酸 4. 半乳糖醛酸 5. 葡萄糖
6. 半乳糖 7. 阿拉伯糖

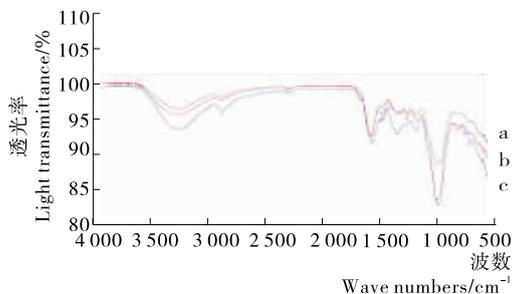
图5 混合标准单糖、酶提蜂花粉 SDF 的液相色谱图

Figure 5 HPLC chromatogram of standard mixed monosaccharides and bee pollen SDF in enzymatic extraction

表4 蜂花粉 SDF 单糖组分相对含量

Table 4 Relative contents of bee pollen SDF monosaccharide components %

单糖	酶提 SDF	酸提 SDF	碱提 SDF
甘露糖	1.28	5.02	2.46
鼠李糖	1.51	1.31	0.84
葡萄糖醛酸	0.37	—	—
半乳糖醛酸	3.25	—	—
葡萄糖	9.51	40.93	18.31
半乳糖	30.62	24.21	26.50
阿拉伯糖	53.46	28.53	51.89



a. 碱提 b. 酶提 c. 酸提

图6 蜂花粉 SDF 红外光谱图

Figure 6 Infrared spectrum of bee pollen SDF

近吸收峰,为糖类的C—H伸缩振动;1637 cm⁻¹附近吸收峰,为C=O伸缩振动;1410 cm⁻¹附近吸收峰,为C—H变角振动;1070 cm⁻¹附近吸收峰,为C—O伸缩振动,也属于糖分子的特征峰^[22]。另一方面,不同提取条件下产品组分、纯度略有差异,可能导致吸收峰强度不同^[23]。

3 结论

用纤维素酶提取蜂花粉 SDF,酶提产品呈乳白色粉状,具有荷花蜂花粉特有香味,具有一定的膨胀力、持水力,水溶性较好,含有甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖7种单糖,其红外光谱图具有多糖的特征吸收峰。

蜂花粉 SDF 酸提、碱提、酶提3种提取工艺中,碱提工艺得率最高;酶提产品感官品质、水溶性较好,利于后期的加工处理,更易于应用在功能食品,尤其是饮料类产品的开发中。

后期将对3种提取工艺制备的 SDF 进行分离纯化及功能特性比较,为产品开发利用提供进一步的理论依据。

参考文献

- [1] THORP R W. The collection of pollen by bees[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2000, 222: 211-223.
- [2] ALMEIDA-MURADIAN L B, PAMPLONA L C, COIMBRA S, et al. Chemical composition and botanical evaluation of dried bee pollen pellets[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2005, 18: 105-111.
- [3] YANG Kai, WU Dan, YE Xing-qian, et al. Characterization of chemical composition of bee pollen in China[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2013, 61: 708-718.
- [4] 杨晓萍, 吴谋成. 油菜蜂花粉多糖抗肿瘤作用的研究[J]. *营养学报*, 2006, 28(2): 160-162, 166.
- [5] 彭定利, 孙丽萍, 庞杰, 等. 油菜蜂花粉保肝活性组分的分离及细胞学筛选[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(3): 100-105.
- [6] 刘建涛, 赵利, 苏伟, 等. 蜂花粉生物活性物质的研究进展[J]. *食品科学*, 2006, 27(12): 909-912.
- [7] 胡元强. 2015 年蜂产品市场回顾与 2016 年蜂产品市场预测[J]. *蜜蜂杂志*, 2016(5): 40-43.
- [8] 王凯, 任向楠, 董捷, 等. 多指标评价果胶酶对油菜蜂花粉的破壁作用[J]. *食品与机械*, 2015, 31(6): 164-168.
- [9] XU Xiang, SUN Li-ping, DONG Jie, et al. Breaking the cells of rape bee pollen and consecutive extraction of functional oil with supercritical carbon dioxide[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2009(10): 42-46.
- [10] GAMPOS M G, WEBBY R F, MARKHAM K R, et al. Age-induced diminution of free radical scavenging capacity in bee pollens and the contribution of constituent flavonoids[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2003, 51: 742-745.
- [11] 陈莲君, 徐德平. 油菜蜂花粉中黄酮的分离纯化及结构鉴定[J]. *食品与机械*, 2012, 28(3): 119-121.
- [12] HANNAN J M A, ROKEYA B, FARUQUE O, et al. Mainous III: Effect of soluble dietary fibre fraction of *Trigonella foenum graecum* on glyceemic, insulinemic, lipidemic and platelet aggregation status of Type 2 diabetic model rats[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2003, 88: 73-77.
- [13] GUO Wei-wei, BETA Trust. Phenolic acid composition and antioxidant potential of insoluble and soluble dietary fibre extracts derived from select whole-grain cereals[J]. *Food Research International*, 2013, 51: 518-525.
- [14] 任志远, 李鹏飞. 麦麸可溶性膳食纤维提取及在乳品中的应用[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 30(4): 305-308.
- [15] ZHANG Juan, WANG Zheng-wu. Soluble dietary fiber from *Canna edulis* Ker by-product and its physicochemical properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013(92): 289-296.
- [16] 郑慧, 陈希平, 常新利, 等. 响应面优化蜂花粉可溶性膳食纤维提取工艺[J]. *湖南中医药大学学报*, 2015, 35(2): 20-24.
- [17] 郑慧, 陈希平, 胡熙, 等. 蜂花粉可溶性膳食纤维碱提工艺[J]. *食品科技*, 2015(9): 222-226.
- [18] 贾冬英, 朗黄英, 姚开, 等. 柚中果皮水不溶性膳食纤维对胆固醇的吸附研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2008, 40(3): 86-90.
- [19] 王庆玲, 董娟, 汪继亮. 豆渣中可溶性膳食纤维提取工艺的研究[J]. *中国酿造*, 2011(3): 135-138.
- [20] 伍善广, 冯学珍, 陈颖, 等. 高效液相色谱法测定金钱菇多糖的单糖组成[J]. *广西植物*, 2014, 34(2): 179-182.
- [21] 陈小举, 吴学风, 姜绍通, 等. 响应面法优化半纤维素酶提取梨渣中可溶性膳食纤维工艺[J]. *食品科学*, 2015, 36(6): 18-23.
- [22] 王亚敏, 汪洪捷, 张卓勇. 松花粉的红外光谱、扫描电镜和 X 射线能谱仪分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(11): 1 797-1 800.
- [23] 王多加, 周向阳, 金同铭, 等. 近红外光谱检测技术在农业和食品分析上的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(4): 447-450.
- [10] 程健, 申文忠, 刘以红. 天然产物超临界 CO₂ 萃取[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009: 136-137.
- [11] SANTAMARI' A R I, REYES-DUARTE M D, BA' RZANA E, et al. Selective enzyme-mediated extraction of capsaicinoids and carotenoids from chili guajillo puya (*Capsicum annum L.*) using ethanol as solvent [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2000, 48(7): 3 063-3 067.
- [12] CHUICHULCHERM S, PROMMAKORT S, SRINOPHA-KUN P, et al. Optimization of capsaicin purification from *Capsicum frutescens* Linn. with column chromatography using Taguchi design [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 44: 473-479.
- [13] 俞灵芳, 沈勇根, 上官新晨, 等. 超声波辅助提取辣椒碱的工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(1): 157-163.
- [14] 范兆军. 微波提取辣椒素工艺条件的研究[J]. *中国调味品*, 2015(4): 55-58.
- [15] 周书栋, 杨博智, 马艳青, 等. 干椒中辣椒素快速提取工艺研究[J]. *中国调味品*, 2015(5): 52-56.
- [16] BARBERO G F, PALMA M, BARROSO C G. Determination of capsaicinoids in peppers by microwave-assisted extraction-high-performance liquid chromatography with fluorescence detection [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 578(2): 227-233.
- [17] FERNÁNDEZ-RONCO M P, ORTEGA-NOBLEJAS C, GRACIA I, et al. Supercritical fluid fractionation of liquid oleoresin capsicum; Statistical analysis and solubility parameters [J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2010, 54(1): 22-29.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会. GB 1886.34—2015 食品安全国家标准食品添加剂辣椒红[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [19] 刘自琴, 黄惠华. 茶叶浸提液微波辅助萃取过程中溶剂选择的差异[J]. *食品工业科技*, 2011(3): 100-102.
- [20] 丁云龙, 雷永良, 金丽萍. 职业性急性甲醇中毒合并中毒性脑病 1 例报告[J]. *浙江预防医学*, 2015(3): 306-307.
- [21] 李淑芬, 姜忠义. 高等制药分离工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 14-15.
- [22] 王绍霞. 辣椒红色素与辣椒碱的分离及工艺过程开发的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008: 29-30.

(上接第 178 页)