

白及花花青素微波提取方法的优化

王 祯^{1,2}, 王 洁^{1,2}, 项海萍², 樊泽鹏², 孙诚蔓², 邢丙聪^{1,2}, 邵清松^{1,2}

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】采用响应面法对白及 *Bletilla striata* 花中花青素的提取方法进行优化。【方法】采用微波萃取和 pH 示差法提取和测定白及花中花青素, 在通过单因素法获得微波功率、甲醇体积分数、提取时间和料液比 4 个单因素最佳参数的基础上, 利用响应面分析法建立二次回归方程, 优化花青素最佳提取参数。【结果】所得优化模型条件与实际提取拟合度良好。pH 示差法调整为: 测定波长 530 nm, 溶液平衡时间 80 min。本研究范围内, 4 个因素对提取量影响从大到小顺序为微波功率、料液比、甲醇体积分数、微波时间。在微波功率 640 W, 甲醇体积分数 90%, 微波时间 22 min 和料(g)液(mL)比 1:48 的条件下, 白及花中总花青素提取量为 $6.68 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与理论预测值 $6.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 基本一致。【结论】优化所得方法可用作白及花中花青素的提取制备, 为日后白及花的综合开发利用提供依据。图 8 表 2 参 22

关键词: 白及花; 花青素; pH 示差法; 微波萃取; 响应面

中图分类号: Q946.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)05-1020-07

Optimization of microwave-assisted extraction of anthocyanins from *Bletilla striata* flowers

WANG Zhen^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, XIANG Haiping², FAN Zepeng², SUN Chengman², XING Bingcong^{1,2}, SHAO Qingsong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

2. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study is aimed at the optimization of microwave-assisted extraction of anthocyanins from *Bletilla striata* flowers. [Method] With anthocyanins in *B. striata* flowers determined and extracted via microwave-assisted extraction and pH Differential Method and the optimum parameters of the four single factors of microwave power, methanol concentration, extraction time and solid-liquid ratio obtained, the study has managed to obtain the optimal extraction parameters of anthocyanins with the quadratic regression equation model established using the Response Surface Methodology (RSM). [Result] (1) The conditions of the optimal model fit well with actual extraction; (2) The pH differential method was adjusted to a measured wavelength of 530 nm and a solution equilibration time of 80 min; (3) The impact of the four factors of microwave power, material to liquid ratio, methanol concentration and microwave time on the amount of extraction decrease in a progressive order; (4) With the microwave power at 640 W, the methanol concentration as 90%, the microwave time set for 22 min, and the ratio of material (g) to liquid (mL) adjusted as 1:48, the total anthocyanin extraction in *B. striata* flower was $6.68 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, which was basically consistent with the theoretical prediction value of $6.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. [Conclusion] The optimized method can be employed for the

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2020-03-05

基金项目: 浙江省农业新品种选育重大科技专项(2016C02058); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201910341059X)

作者简介: 王祯, 从事中药资源利用研究。E-mail: 971392247@qq.com。通信作者: 邵清松, 教授, 博士, 从事药用植物栽培与育种研究。E-mail: sqszjfc@126.com

extraction and preparation of anthocyanins in *B. striata* flowers, providing a basis for the comprehensive development and utilization of *B. striata* flowers. [Ch, 8 fig. 2 tab. 22 ref.]

Key words: *Bletilla striata* flower; anthocyanins; pH differential method; microwave-assisted extraction; response surface methodology

白及 *Bletilla striata* 为兰科 Orchidaceae 白及属 *Bletilla* 多年生草本植物, 主产于安徽、浙江、江西、贵州等地^[1], 以干燥块茎入药, 又名甘根、白及、白芨等^[2]。具有收敛止血, 消肿生肌的功效, 对于咯血、吐血、疮疡肿毒、皮肤皲裂等有效^[3]。因白及以其干燥块茎入药, 故国内外对白及花的研究较少。白及花期为每年 4~5 月, 花序具花 3~10 朵, 花色为紫红色、粉红色^[4], 具有较高的观赏价值, 还富含多种花青素等活性成分, 其水提物具有较好的抗氧化能力, 可作为饮品进行开发利用^[5]。花青素 (anthocyanidins) 为水溶性天然色素, 属于多酚化合物中的类黄酮化合物, 是由花色苷水解得到的有颜色的苷元^[6~7], 但在自然界中很少以游离的苷元而多以糖苷的形式存在^[8]。花青素不仅是植物中的主要呈色物质, 还具有抗氧化^[9]、降血脂^[10]、抗癌^[11]、抑制神经炎症、改善血管功能^[12]、平衡肠道微生物群落^[13]、减缓与肝功能及结构有关的衰老恶化^[14]与改善轻度至中度痴呆老年人的特定认知结果^[15]等功效。花青素稳定性差, 在提取纯化过程中易发生降解^[16]。微波法对天然色素的提取具有色素产率高、色价高、节省溶剂、节省时间等优点^[17]。pH 示差法和高效液相色谱法 (HPLC) 是定量测定花青素的常用方法, 两者具有很高的相关性^[18], 其中 pH 示差法被农业化学家协会 (AOAC) 正式作为研究实验室和食品工业中各种水果和蔬菜总花青素的基本测量方法^[19~20]。本研究采用微波法进行响应面优化白及花花青素提取, 并采用 pH 示差法测定白及总花青素, 以期为白及花中花青素的综合开发提供理论依据。

1 材料与仪器

白及花采于浙江省湖州市安吉县上墅乡白及基地。采摘盛花期的白及花, 去除花茎部分后, 于烘箱 50 ℃ 烘干至恒量 (± 0.005 g), 打粉后过 24 目筛。于-20 ℃ 避光储存, 备用。氯化钾 (西陇化工股份有限公司)、无水乙酸钠 (西陇化工股份有限公司)、盐酸 (上海凌峰化学试剂有限公司)、无水甲醇 (浙江汉诺化工科技有限公司) 均为分析纯。pH 计 FE20[梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司], AK-1000A 500 克摇摆式中药粉碎机 (温岭市奥力中药机械有限公司), DHG-9031A 电热恒温干燥箱 (上海精宏实验设备有限公司), FA2204 电子分析天平 (上海力辰仪器科技有限公司), NJL07-3 型实验微波炉 (南京杰全微波设备有限公司), RE-2000A 旋转蒸发器 (上海亚荣生化仪器厂), TDL-50C 低速离心机 (上海安亭科学仪器厂), Epoch2 酶标仪 (美国 BioTek 仪器有限公司)。

2 方法

2.1 总花青素的提取

取白及花粉末加入甲醇溶液 (以体积分数为 1% 盐酸作溶剂) 进行微波萃取, 离心取上清液, 残渣进行再次提取, 合并 2 次上清液于 35 ℃ 旋蒸 1 h 后用提取剂定容至 10 mL, -20 ℃ 避光保存直至测定。

2.2 pH 示差法测定花青素条件优化

2.2.1 吸收波长的确定 因深色花色苷在可见光区的吸收波长范围为 465~560 nm^[7], 所以取花青素提取液 0.2 与 0.6 mL 的 pH 1.0 缓冲液混匀, 于 450~600 nm 波长范围内以步长 5 nm 进行扫描, 以确定最大吸收波长。

2.2.2 平衡时间的确定 分别取花青素提取液 0.2 与 0.6 mL 的 pH 1.0 缓冲液或 pH 4.5 缓冲液混匀, 室温下避光反应 0~120 min, 每隔 10 min 测定 $D(530)$ 、 $D(700)$, 以确定最佳平衡时间。

2.3 提取次数的确定

精确称取样品, 在料液比为 1:40(料单位为 g, 溶液单位为 mL)、体积分数为 80% 的甲醇溶液 (以体积分数为 1% 盐酸稀释)、微波功率 400 W 的条件下提取 10 min, 冷却至室温后 4 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 取上清液于 35 ℃ 旋蒸, 用提取剂定容至 10 mL, 为第 1 次提取液。将残渣重复上述操作, 为第 2 次提

取液。共进行4次提取，按2.4分别进行总花青素质量浓度测定，以确定最佳提取次数。

2.4 总花青素质量浓度测定

参考李文峰等^[21]总花青素质量浓度测定方法并略作调整。取0.2 mL花青素提取液，分别与0.6 mL的pH 1.0氯化钾缓冲液、pH 4.5醋酸钠缓冲液混匀。室温下避光静置80 min后测定D(530)、D(700)。3次重复，取平均值。总花青素(T_{AC})质量分数以矢车菊素-3-O-葡萄糖昔(C3G)的含量为标准进行计算，计算公式^[22]为： $T_{AC} = \{[D(530)_{pH1.0} - D(700)_{pH1.0}] - [D(530)_{pH4.5} - D(700)_{pH4.5}]\}M_W D_F / (\epsilon L)$ 。其中， T_{AC} 青素质量浓度(g·L⁻¹)，D为各pH值下不同波长对应的吸光度， M_W 为C3G的分子量(449.2)， D_F 为稀释倍数， ϵ 为C3G的克分子吸光率常数(26 900)，L为比色皿光程(1 cm时，L=1)。再将总花青素质量浓度换算成质量分数进行对比分析。

2.5 单因素实验

以微波功率、甲醇体积分数、提取时间和料液比为单因素，分别进行参数范围的确定，考察不同因素对总花青素提取量的影响。精确称取样品，在甲醇体积分数为80%、料液比(溶质单位为g，溶剂单位mL)1:40、提取20 min的条件下，进行微波功率(160、240、320、400、480、560、640 W，误差为±5 W)的范围确定；在微波功率560 W、料液比1:40、提取20 min的条件下，确定甲醇体积分数(20%、40%、60%、80%、100%)的区间范围；在微波功率560 W、甲醇体积分数80%、料液比1:40的条件下，考察微波时间(2、5、10、20、30 min)的影响；在微波功率560 W、提取20 min、体积分数为80%甲醇的条件下，进行料液比(1:10、1:20、1:30、1:40、1:50、1:60)的范围确定。按2.4分别进行总花青素提取量的计算。

2.6 响应面实验

为获得白及花中花青素的最佳提取工艺条件，在单因素结果的基础上，以总花青素提取量为响应值，选取微波功率(A)、甲醇体积分数(B)、微波时间(C)和料液比(D)为自变量，应用Design-Expert.V8.0.6.1软件，按照Box-Behnken中心组合设计原理，设计4因素3水平的响应面实验。设计因素与水平如表1所示。

表1 响应面实验因素与水平

Table 1 Coded levels and corresponding actual levels of independent variables used in Box-Behnken design

水平	微波功率 A/W	甲醇体积 分数B/%	微波时间 C/min	料液比 D
-1	480	70	10	1:30
0	560	80	20	1:40
1	640	90	30	1:50

3 结果与分析

3.1 pH示差法测定花青素条件优化

由图1所示：溶液吸光度在450~530 nm区间逐渐升高，在530 nm处达最大值(0.37)，当波长继续增加溶液吸光度逐渐下降。因此白及花中花青素在可见光谱范围内的最大吸收波长为530 nm。

由图2所示：D(530)随着时间的延长而降低，50 min后吸光度变化平稳，并在80~100 min范围内

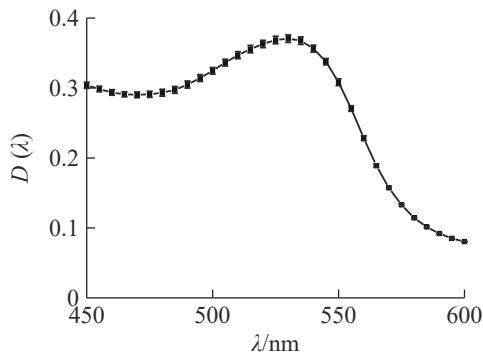


图1 白及花中花青素的可见光图谱

Figure 1 Visible light spectrum of anthocyanins of *B. striata* flowers

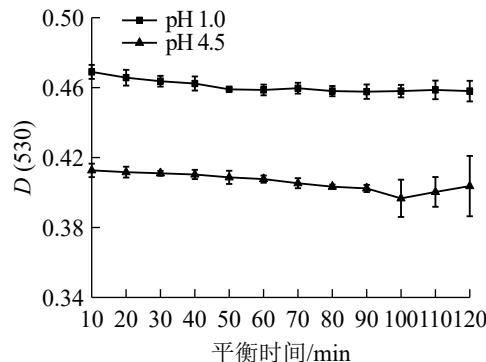


图2 白及花中花青素在缓冲液中随时间的吸光度变化

Figure 2 Change in absorbance of anthocyanins in *B. striata* flower over time in buffer solution

最为平稳；在 pH 4.5 缓冲液中，随着时间的增加， $D(530)$ 逐渐降低，在 80~90 min 时，吸光度相对处于稳定状态。因此，80 min 为花青素在缓冲液中的平衡时间。

3.2 花青素的提取次数

由图 3 所示：白及花中花青素随提取次数增加而降低。第 1 次提取所得总花青素的提取量最大，第 2 次提取的提取量约为第 1 次的 16.90%，第 3、4 次提取的提取量约为第 1 次的 0.70%、0.17%。因此，为尽可能对样品提取完全，且提高提取效率不造成溶剂浪费，选择对样品进行 2 次提取。

3.3 单因素实验结果

3.3.1 微波功率对总花青素提取量的影响 由图 4 所示：当微波功率为 160~560 W 时，总花青素的提取量随着微波功率的增大而提高；微波功率为 560 W 时出现顶点，而后随着功率增大出现了下降趋势。这是因为在一定范围内，随着微波功率的增大对细胞的破坏力也逐步增强，花青素溶出物增多；但功率过高使得温度升高，对花青素造成了一定程度的破坏，使得提取量降低。因此依据结果选择微波功率 480、560 和 640 W 进行响应面实验。

3.3.2 甲醇体积分数对总花青素提取量的影响 由图 5 所示：当甲醇体积分数为 20%~60% 时，总花青素的提取量没有明显变化；当甲醇体积分数为 60%~80% 时，提取量随着甲醇体积分数的增加而提高，在 80% 处达到最大值，随后逐渐下降。说明在一定范围内，提高甲醇体积分数有利于花青素的提取。因此依据实验结果选择甲醇体积分数为 70%、80% 和 90% 进行响应面实验。

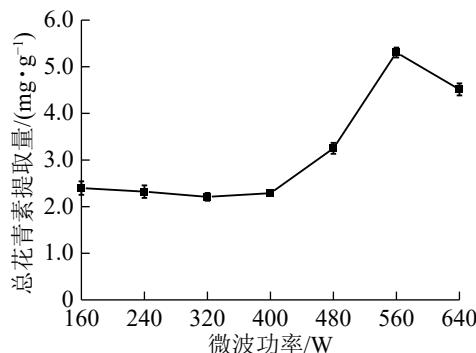


图 4 微波功率对总花青素提取量的影响

Figure 4 Effect of microwave power on the extraction amount of total anthocyanidins

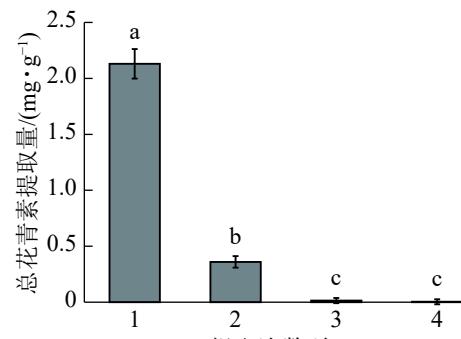


图 3 白及花中花青素不同提取次数的提取量差异

Figure 3 Difference in extraction amount of different extraction times of *B. striata* flower anthocyanin solution

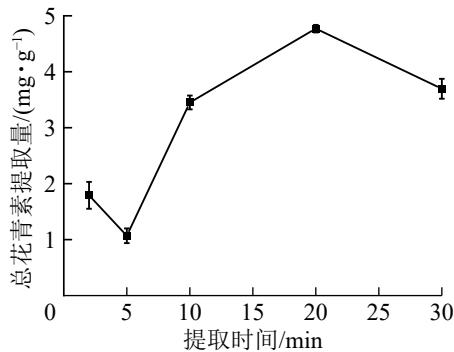


图 6 微波时间对总花青素提取量的影响

Figure 6 Effect of microwave time on the extraction amount of total anthocyanidins

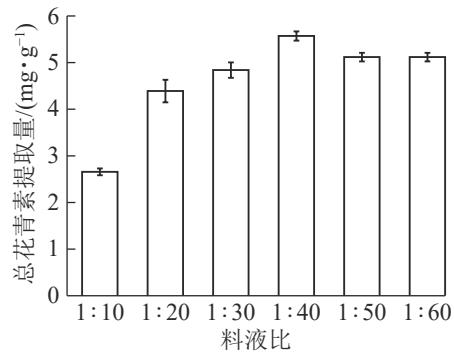


图 7 料液比对总花青素提取量的影响

Figure 7 Effect of solid-liquid ratio on extraction amount of total anthocyanidins

3.4 响应面优化结果

3.4.1 响应面实验设计及结果分析 在单因素实验结果的基础上,设计4因素3水平的响应面实验,以总花青素提取量(Y)为响应值,微波功率(A)、甲醇体积分数(B)、微波时间(C)和料液比(D)为自变量,共进行29次实验,其中5次为验证实验。将结果运用Design-Expert.V8.0.6.1软件进行多元回归拟合,得到回归方程模型: $Y = -10.77463 - 0.01717A + 0.15327B + 0.38288C + 0.17519D + 0.00078AB + 0.00019AC + 0.00078AD - 0.00240BC + 0.00145BD + 0.00023CD - 0.00006A^2 - 0.00345B^2 - 0.00670C^2 - 0.00843D^2$ 。

从表2可知:模型项为极显著,其中单项因素 A 、 B 、 C 、 D 与交叉项 AB 、 AD 及二次项 C^2 、 D^2 对总花青素提取量的影响达到极显著水平($P < 0.01$),二次项 A^2 、 B^2 达到显著水平($P < 0.05$),其余项因素不显著($P > 0.05$)。该模型失拟项不显著,表明该模型建模成功。其中决定系数 R^2 为0.95,校正系数 R^2_{Adj} 为0.90,表明建立的模型与实际情况拟合度较好,可用来进行分析与预测。由表2中 F 值可知:

表2 回归模型方差分析

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
样本	30.65	14	2.19	19.85	<0.0001	***
A	11.98	1	11.98	108.61	<0.0001	***
B	2.89	1	2.89	26.18	0.0002	***
C	1.52	1	1.52	13.83	0.0023	**
D	4.16	1	4.16	37.70	<0.0001	***
AB	1.56	1	1.56	14.16	0.0021	**
AC	0.09	1	0.09	0.80	0.3872	
AD	1.57	1	1.57	14.19	0.0021	**
BC	0.23	1	0.23	2.09	0.1703	
BD	0.08	1	0.08	0.76	0.3982	
CD	0.00	1	0.00	0.02	0.8920	
A^2	0.97	1	0.97	8.83	0.0101	*
B^2	0.77	1	0.77	6.99	0.0193	*
C^2	2.91	1	2.91	26.42	0.0002	***
D^2	4.61	1	4.61	41.81	<0.0001	***
残差	1.54	14	0.11			
失拟项	1.19	10	0.12	1.35	0.4133	
纯误差	0.35	4	0.09			
总离差	32.19	28				
$R^2=0.95$	$R^2_{Adj}=0.90$					

说明: *表示显著($P < 0.05$), **表示极显著($P < 0.01$), ***表示极显著($P < 0.001$)

4个自变量在本研究实验范围内对提取量影响从大到小依次为A(微波功率)、D(料液比)、B(甲醇体积分数)、C(微波时间)。

3.4.2 响应面交互作用结果分析 由图8可知: 微波功率对提取量的影响最为显著。微波功率与甲醇体积分数和料液比, 两两之间交互作用较强, 表现为响应面坡度较陡。随着微波功率的增大, 花青素的提取量逐渐增加。其余因素间, 交互作用相对较弱, 即响应面坡度较缓。根据所建立的响应面拟合方程进行参数最优分析, 所得预测最佳工艺条件为: 微波功率 640 W, 甲醇体积分数 90%, 微波时间 22.14 min, 料液比 1:48.10, 在此条件下总花青素提取量为 $6.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。结合模型预测最佳条件和实际情况, 采用优化条件: 微波功率 640 W, 甲醇体积分数 90%, 微波时间 22 min, 料液比 1:48。进行3组平行验证试验, 其平均提取量为 $(6.68 \pm 0.13) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与理论预测值 $6.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 基本一致, 表明模型与实际拟合情况较好。因此响应面法对白及花中花青素提取工艺的优化具有可行性。

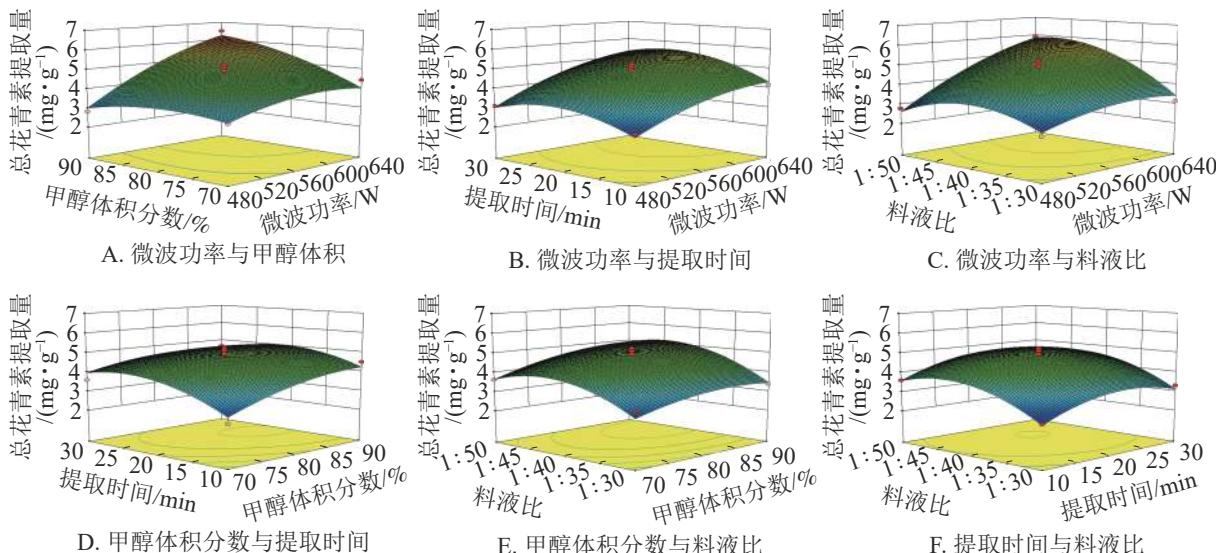


图8 各因素交互作用对总花青素提取量影响的响应面图

Figure 8 Response surface plots showing the interactive effects of factors on total anthocyanin extraction

4 结论

本研究采用微波萃取法进行白及花中花青素的提取。在单因素实验的基础上, 采用响应面分析法进行提取条件的优化, 并建立了微波功率、甲醇体积分数、提取时间和料液比对总花青素提取量的二次回归方程模型。得到最佳的提取工艺条件为: 微波功率 640 W, 甲醇体积分数 90%, 微波时间 22.14 min, 料液比 1:48.10。结合实际情况调整参数为: 微波功率 640 W, 甲醇体积分数 90%, 微波时间 22 min, 料液比 1:48。在此条件下, 白及花中总花青素的提取量为 $(6.68 \pm 0.13) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与预测值 $6.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 基本吻合。

5 参考文献

- [1] 李钦. 生药学 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2016.
- [2] 程超寰. 本草释名考订 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2013.
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2015年版一部) [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [4] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 吕婉婉, 赵明, 秦慧存, 等. 白及花花青素测定与体外抗氧化活性研究 [J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(12): 5269–5276.
- LÜ Wanwan, ZHAO Ming, QIN Huicun, et al. Study on determination of anthocyanin from *Bletilla striata* flower and antioxidant activity in vitro [J]. *Genomics Appl Biol*, 2017, 36(12): 5269–5276.
- [6] 赵立仪. 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的月桂酸酰化、结构分析及性质评价 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- ZHAO Liyi. Acylation Reaction of Cyanidin-3-O-glucoside with Lauric Acid, Its Structure Analysis and Property

- Evaluations [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [7] 陈敏. 食品化学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [8] 丁芳林. 食品化学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- [9] MENG Lingshuai, ZHU Jinyan, MA Yan, et al. Composition and antioxidant activity of anthocyanins from Aronia melanocarpa cultivated in Haicheng, Liaoning, China [J]. *Food Biosci*, 2019, **30**: 100 – 113.
- [10] 张慢, 潘丽军, 姜绍通, 等. 紫薯花青素降血脂及抗氧化效果[J]. *食品科学*, 2014, **35**(19): 246 – 250.
ZHANG Man, PAN Lijun, JIANG Shaotong, et al. Hypolipidemic and antioxidant effects of anthocyanins from purple sweet potato in rats [J]. *Food Sci*, 2014, **35**(19): 246 – 250.
- [11] THIBADO S P, THORNTHWAITE J T, BALLARD T K, et al. Anticancer effects of bilberry anthocyanins compared with nutra nano sphere encapsulated bilberry anthocyanins [J]. *Molec Clin Oncol*, 2018, **8**(2): 330 – 335.
- [12] MEDINA D S N, BERILLI B P, BATISTA Â G, et al. Current evidence on cognitive improvement and neuroprotection promoted by anthocyanins [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2019, **26**: 71 – 78.
- [13] TIAN Lingmin, TAN Yisha, CHEN G W, et al. Metabolism of anthocyanins and consequent effects on the gut microbiota [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, **59**(34): 1 – 10.
- [14] WEI Jie, ZHANG Guokun, ZHANG Xiao, et al. Anthocyanins delay ageing-related degenerative changes in the liver [J]. *Plant Food Human Nutr*, 2017, **72**(4): 1 – 7.
- [15] KENT K, CHARLTON K, ROODENRYS S, et al. Consumption of anthocyanin-rich cherry juice for 12 weeks improves memory and cognition in older adults with mild-to-moderate dementia [J]. *Eur J Nutr*, 2017, **56**(1): 333 – 341.
- [16] HURTADO N H, MORALES A L, GONZÁLEZ-MIRET M L, et al. Colour, pH stability and antioxidant activity of anthocyanin rutinosides isolated from tamarillo fruit (*Solanum betaceum* Cav.) [J]. *Food Chem*, 2009, **117**(1): 88 – 93.
- [17] 韩谢, 吴元欣, 邵开元. 微波萃取技术在天然产物提取中的应用[J]. *微波化学*, 2017, **1**(1): 3 – 7.
HAN Xie, WU Yuanxin, SHAO Kaiyuan. Application of microwave assisted extraction in natural product [J]. *J Microwave Chem*, 2017, **1**(1): 3 – 7.
- [18] LEE J, RENNAKER C, WROLSTAD R E. Correlation of two anthocyanin quantification methods: HPLC and spectrophotometric methods [J]. *Food Chem*, 2008, **110**(3): 782 – 786.
- [19] GIUSTI M M, WROLSTAD R E. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy [J]. *Curr Protoc Food Anal Chem*, 2001(1): 1 – 13.
- [20] JUNGMIN L, DURS R W, WROLSTAD R E. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study [J]. *J Aoac Int*, 2005, **88**(5): 1269 – 1278.
- [21] 李文峰, 肖旭霖. 不同干燥方法对紫薯干燥效率及品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(7): 1397 – 1408.
LI Wenfeng, XIAO Xulin. Effect of different drying methods on drying efficiency and quality of purple sweet potato [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, **47**(7): 1397 – 1408.
- [22] TRUONG V D, HU Z, THOMPSON R L, et al. Pressurized liquid extraction and quantification of anthocyanins in purple-fleshed sweet potato genotypes [J]. *J Food Compos Anal*, 2012, **26**(1/2): 96 – 103.