

花青素与大豆不溶性膳食纤维稳定体系 优化构建及评价

孙肖振, 陈冬霞, 郭文睿, 安玲玉, 石镇铭, 刘宇恒, 贺阳*, 文连奎*
(吉林农业大学 食品科学与工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要: 以山葡萄榨汁后皮渣中提取的花青素纯化物 (purified anthocyanins, ACN)、大豆副产物豆渣中提取的大豆不溶性膳食纤维 (soybean insoluble dietary fiber, SIDF) 为原料, 以吸光度和沉淀离心率为评价指标, 构建 ACN 与 SIDF 稳定体系, 并以花青素保存率为指标评价该体系的热、光稳定性。结果表明: 构建稳定体系的最优参数为 ACN 与 SIDF 质量比 1:30、SIDF 粒径 300 目、乳化温度 30 ℃、乳化时间 50 min。稳定体系在 100 ℃ 水浴中热处理 100 min 和室温 (20±2) ℃ 下光照 30 d 后, 花青素保存率分别为 72.66% 和 71.45%。综合表明, 优化构建的 ACN 与 SIDF 稳定体系中花青素的热、光稳定性明显提高。

关键词: 花青素; 大豆不溶性膳食纤维; 稳定体系; 构建; 评价

Construction Optimization and Evaluation of Anthocyanin and Soybean Insoluble Dietary Fiber Stable System

SUN Xiao-zhen, CHEN Dong-xia, GUO Wen-rui, AN Ling-yu, SHI Zhen-ming,
LIU Yu-heng, HE Yang*, WEN Lian-kui*

(School of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China)

Abstract: The purified anthocyanins (ACN) extracted from the skin residue of *Vitis amurensis* Rupr. and the soybean insoluble dietary fiber (SIDF) extracted from the bean dregs were taken as raw materials. The ACN-SIDF stable system was constructed with absorbance and sedimentation eccentricity as evaluation indicators. The thermal and light stabilities of the stable system were evaluated by the retention rate of ACN. The results showed that the optimum conditions of the stable system were determined as follows: ACN-SIDF mass ratio of 1:30, the SIDF particle size of 300 mesh, the emulsification temperature of 30 ℃, and the emulsification time of 50 min. After heat treatment in a water bath at 100 ℃ for 100 min and sunlight treatment at (20±2) ℃ for 30 d, the retention rates of ACN were 72.66% and 71.45%, respectively. The experimental results showed that the thermal and light stabilities of ACN in the optimized ACN-SIDF stable system significantly improved.

Key words: anthocyanin; soybean insoluble dietary fiber; stable system; construction; evaluation

引文格式:

孙肖振, 陈冬霞, 郭文睿, 等. 花青素与大豆不溶性膳食纤维稳定体系优化构建及评价[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(5):29-34.

SUN Xiaozhen, CHEN Dongxia, GUO Wenrui, et al. Construction Optimization and Evaluation of Anthocyanin and Soybean Insoluble Dietary Fiber Stable System[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5):29-34.

花青素是存在于葡萄、蓝莓、紫甘蓝等果蔬的水溶性多酚类天然色素^[1-3], 基本结构单元为 3,5,7-三羟

基金项目: 吉林省科技发展规划项目 (20210202105NC)

作者简介: 孙肖振 (1999—), 男 (汉), 本科, 研究方向: 食品加工新技术与长白山野生资源开发利用。

* 通信作者: 贺阳 (1986—), 女 (汉), 讲师, 博士, 研究方向: 食品加工新技术与长白山野生资源开发利用; 文连奎 (1962—), 男 (汉), 教授, 博士, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程。

基-2-苯基并吡喃,其3、5、7位上的羟基可以与一个或多个单糖(葡萄糖、半乳糖等)、二糖(芸香糖等)或三糖等连接^[4],多以糖苷键形式存在,故又称花色苷^[5]。花青素具有抗氧化、抗癌、降脂减肥及调节肠道菌群等功效^[6-7],但由于骨架上多个酚羟基的存在,使花青素易受温度、光照、pH值、氧气、抗坏血酸、金属离子等影响,出现褪色、变色、沉淀等现象,使其稳定性和生理活性降低,限制了花青素的应用,因此,提高花青素的稳定性尤为重要^[8]。

近年来,提高花青素稳定性的研究已成为食品领域的研究热点,主要方法有微胶囊法、糖基酰化或与生物大分子之间通过相互作用形成复合物^[9-13]。在花青素中添加蛋白质、淀粉、膳食纤维、果胶等大分子,通过氢键、疏水、金属配位、 π - π 堆积、静电和共价键相互作用与大分子结合^[14],形成较稳定的结构,可以起到对花青素的保护作用。

大豆不溶性膳食纤维(soybean insoluble dietary fiber, SIDF)含量约占豆渣(大豆榨油和传统豆制品加工主要副产物)干物质的45%,可占大豆豆渣总膳食纤维的90%。有研究表明膳食纤维能够与多酚类物质相互作用,提高其稳定性^[15-16]。本文构建花青素纯化物(purified anthocyanins, ACN)与SIDF稳定体系并进行评价,以期为花青素稳定性研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

山葡萄(品种为“北冰红”);通化市柳河县山葡萄产业服务中心;豆渣:山东嘉华保健品公司。

乙酸、乙醇、盐酸(均为分析纯):北京化工厂;D101大孔树脂(分析纯):天津市光复精细化研究所;高峰 α -淀粉酶(40 000 U/g)、中性蛋白酶(60 000 U/g)、淀粉葡萄糖苷酶(100 000 U/g):北京索莱宝科技有限公司;柠檬酸、磷酸氢二钠(均为食品级):江苏瑞多生物工程有限公司。

1.2 仪器与设备

数显恒温磁力搅拌器(HJ-3B):博纳科技有限公司;紫外可见分光光度计(T6):北京普析通用仪器有限责任公司;电子分析天平(CPA-125):德国Sartorius公司;真空冷冻干燥机(LG0.2):新阳速冻设备制造有限公司;离心机(KL04-A):美国Agilent公司;高速冷冻离心机(JXN-26):美国MARCAREG有限公司;电热恒温水浴锅(H.HS21.6):上海医疗器械三厂;pH计(PHS-3D):上海精科仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 材料预处理

1.3.1.1 ACN的制备

参考贺阳^[17]的方法制备ACN。山葡萄500 g打浆,

用65%乙醇-1%盐酸提取剂进行提取[提取液:山葡萄液料比5:1(mL/g)],在55℃下以100 r/min振荡30 min后,收集上清液,在45℃~50℃进行减压浓缩得到花青素粗提物。花青素粗提物通过D101大孔树脂进行纯化,洗脱速率为1.5 BV/h,洗脱剂为75%乙醇-0.01%盐酸。洗脱后的液体在45℃~50℃进行减压浓缩后得到花青素纯化物。采用pH示差法测定ACN(总花青素含量) $\geq 25\%$ 。

1.3.1.2 SIDF的制备

参照Wang等^[18]方法制备SIDF。取干豆渣10 g,加入蒸馏水进行稀释,料液比为1:50(g/mL),然后进行连续的酶消化,首先加入1 mL热稳定的 α -淀粉酶(0.25 g/mL),在95℃~100℃条件下水浴35 min,然后加入3 mL中性蛋白酶(0.125 g/25 mL),60℃水浴振荡30 min后,加入100 mL乙酸溶液(3 mol/L)调节pH值至4.5,最后加入4 mL淀粉葡萄糖苷酶(0.25 g/12.5 mL)进行30 min酶解。酶解完成后加入70℃蒸馏水静置2 h,在3 500 r/min条件下离心20 min,用5倍体积的95%乙醇沉淀12 h后进行真空抽滤,残留物进行冷冻干燥。选用100目~500目筛网对SIDF进行过筛,获取不同粒径的SIDF。

1.3.2 ACN-SIDF稳定体系构建流程

将适量ACN与SIDF按一定质量比,用pH3.0磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液定容至100 mL(最终总花青素含量为12 mg/100 mL),按试验设计构建ACN-SIDF稳定体系,未经稳定处理的ACN溶液为对照。以吸光度和沉淀离心率为指标评价体系稳定效果。测定溶液沉淀30 min后在最大吸收波长521 nm处吸光度;同时称量离心管的质量,量取5 mL稳定溶液,加入离心管中,常温下6 000 r/min离心20 min,离心后倒掉上层液体,再将离心管倒置5 min后称重,按照下列公式测定稳定溶液的沉淀离心率。

$$\text{沉淀离心率}/\% = (W_2 - W_1) / (W_3 - W_1) \times 100$$

式中: W_1 为离心管质量,g; W_2 为离心倒置后离心管加沉淀物的质量,g; W_3 为离心前样品加离心管的质量,g。

1.3.3 ACN-SIDF稳定体系构建单因素试验

在pH3.0的磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液中加入适量ACN和SIDF,分别以ACN与SIDF质量比(1:10、1:20、1:30、1:40、1:50)、SIDF粒径(100、200、300、400、500目)、乳化温度(20、30、40、50、60℃)、乳化时间(10、20、30、40、50 min)为考察因素,最终用pH3.0的磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液定容至100 mL(最终总花青素含量为12 mg/100 mL),每个因素水平试验时,其他因素以中间水平值为定值,避光恒温磁力搅拌后,将溶液静置30 min,测定 $\lambda_{521\text{nm}}$ 处的吸光度,常温下6 000 r/min离心20 min后,以吸光度和沉淀离心率为

指标来评价体系稳定效果。

1.3.4 ACN-SIDF 稳定体系构建正交试验

在单因素基础上,选取 ACN 与 SIDF 质量比、SIDF 粒径、乳化温度、乳化时间 4 个因素进行 $L_9(3^4)$ 正交试验,以吸光度及沉淀离心率作为指标评价稳定效果,计算吸光度和沉淀离心率的权重系数,用于数据分析。

1.3.5 ACN-SIDF 稳定体系稳定性评价

1.3.5.1 热稳定性

将 ACN-SIDF 稳定体系与 ACN 溶液分别置于玻璃管中用锡纸包裹,在 $(100 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水浴中热处理 100 min,每隔 20 min 从水浴中取出后,立即放入冰水中冷却,在最大吸收波长处测定吸光度,以花青素保存率 (retention rate, R) 为指标,评价热稳定效果。根据下列公式计算花青素保存率。

$$R/\% = A_1/A \times 100$$

式中: A_1 为热、光处理后花青素的吸光度; A 为热、光处理前花青素的吸光度。

1.3.5.2 光稳定性

将 ACN-SIDF 稳定体系与 ACN 溶液密封在玻璃瓶中,在室温 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下光照(置于室内的窗台上,每天日照时间不少于 6 h)保存。分别于 0、5、10、15、20、25、30 d 后取出样品。在最大吸收波长处测定花青素的吸光度,根据公式计算花青素保存率。

1.3.6 数据分析与处理

所有测试进行 3 次平行测定,结果取平行测定的平均值表示,使用 SPSS 23 版与 Origin 2.19 版软件对数据进行统计分析。

2 结果分析

2.1 ACN-SIDF 稳定体系构建单因素试验结果分析

2.1.1 ACN 与 SIDF 质量比对稳定体系的影响

ACN 与 SIDF 质量比对稳定体系的影响见图 1。

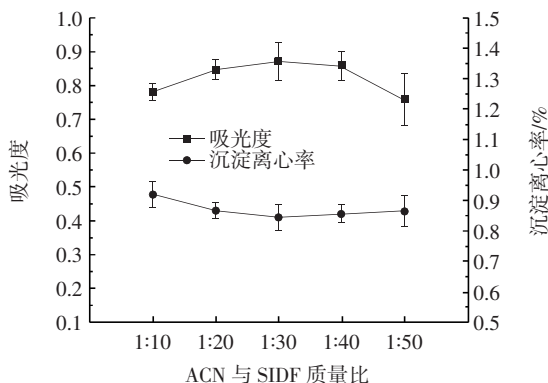


图1 ACN 与 SIDF 质量比对稳定体系的影响

Fig.1 Effect of ACN-SIDF mass ratio on the stable system

由图 1 可知,ACN 与 SIDF 质量比为 1:30 时,稳定体系在 $\lambda_{521\text{ nm}}$ 处的吸光度达到最高水平 0.872,而

心沉淀率最小 0.846%,这可能是由于 SIDF 分散在溶液中与花青素发生分子间的交互作用,形成稳定的悬浮状液体。当 SIDF 比例逐渐升高时,过量的 SIDF 无法与 ACN 结合,产生沉淀,使吸光度呈下降趋势,沉淀离心率呈上升趋势。由于正交试验需设置 3 个不同水平,考虑到综合评分结果,选择 ACN 与 SIDF 质量比为 1:20、1:30、1:40 进行正交试验。

2.1.2 SIDF 粒径对稳定体系的影响

SIDF 粒径对稳定体系的影响见图 2。

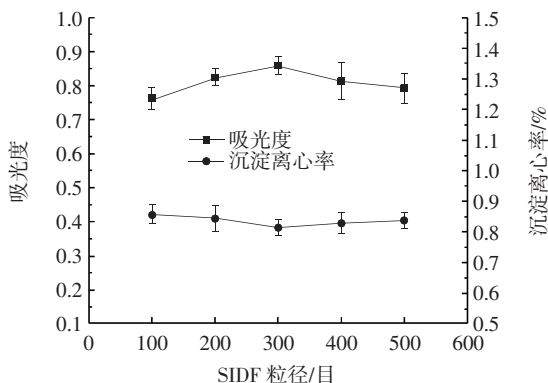


图2 SIDF 粒径对稳定体系的影响

Fig.2 Effect of SIDF particle size on the stable system

由图 2 可知,SIDF 粒径为 200 目~400 目时,稳定体系的吸光度和沉淀离心率较好。当 SIDF 粒径为 300 目时,稳定体系在 $\lambda_{521\text{ nm}}$ 处的吸光度达到较高水平,为 0.862,而离心沉淀率最小 0.815%,300 目粒径的 SIDF 稳定效果最佳,可能是由于超微粉碎使 SIDF 颗粒细微化,并增大了 SIDF 的表面积,使更多的极性基团和水结合位点暴露在周围的水中,进而增加了 SIDF 与花青素的接触面积,使它们能紧密结合,从而降低沉淀离心率并增加吸光度^[9]。当 SIDF 粒径目数逐渐增大,粉体过于细微化,出现疏水作用等排斥力,使得花青素无法与 SIDF 络合,并产生沉淀。因此,选择 SIDF 粒径为 200、300、400 目进行正交试验。

2.1.3 乳化温度对稳定体系的影响

乳化温度对稳定体系的影响见图 3。

由图 3 可知,随着乳化温度的升高,吸光度呈下降的趋势,沉淀离心率整体呈逐渐上升的趋势。当乳化温度为 30°C 时,稳定体系在 $\lambda_{521\text{ nm}}$ 处的吸光度达到较高水平,为 0.869,而离心沉淀率最小 0.818%。研究表明,疏水作用是一个吸热的过程,氢键作用是一个放热的过程,由于温度的不同,两种过程相互作用的比例也不同^[9]。温度的变化对多酚与膳食纤维之间的相互作用有一定的影响,当乳化温度由 20°C 升高到 30°C 时,ACN 与 SIDF 之间可能通过疏水相互作用结合,而当乳化温度逐渐升高,疏水键断裂,同时产生氢键相互作用^[9]。因此,选择乳化温度为 20、30、 40°C 进行正交试验。

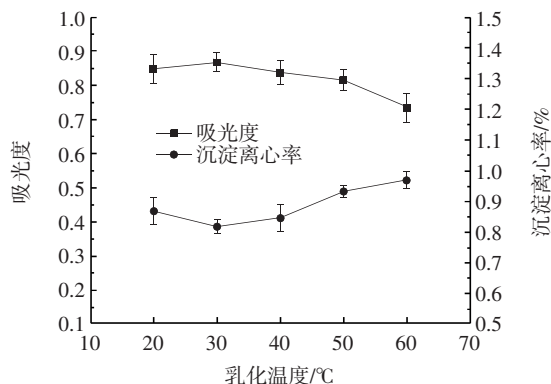


图3 乳化温度对稳定体系的影响

Fig.3 Effect of emulsification temperature on the stable system

2.1.4 乳化时间对稳定体系的影响

乳化时间对稳定体系的影响见图4。

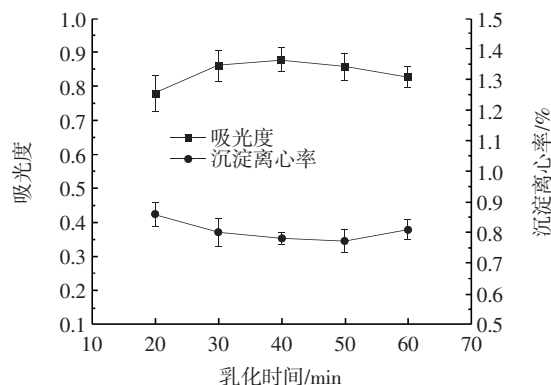


图4 乳化时间对稳定体系的影响

Fig.4 Effect of emulsification time on the stable system

由图4可知,乳化时间为30 min~50 min时,稳定体系的吸光度和沉淀离心率结果相对较好。当乳化时间为40 min时,稳定体系在 $\lambda_{521\text{ nm}}$ 处的吸光度达到较高水平0.878,而离心沉淀率最小0.782%。当反应时间为20 min~40 min时,溶液的吸光度逐渐增加,沉淀离心率逐渐减小,表明反应时间的延长有利于提高稳定体系的互作效应。当反应时间继续延长,吸光度与离心沉淀率逐渐趋于平缓,表明反应时间的延长对反应效果影响逐渐减小,使其相互作用效应达到平衡。同时考虑到经济与稳定效果,选择乳化时间为30、40、50 min进行正交试验。

2.2 ACN-SIDF 稳定体系构建正交试验结果分析

2.2.1 变异系数法分析

变异系数法是直接利用各项指标所包含的信息,通过计算得到指标的权重,是客观赋权的方法。通过赋予权重衡量稳定体系吸光度和沉淀离心率的相对重要性。

各个指标的变异系数按下列公式计算。

$$V_i = S_i / X_i$$

式中: V_i 为第*i*项指标的变异系数; S_i 为第*i*项指

标的标准差; X_i 为第*i*项指标的算术平均值。

各个指标的权重按下列公式计算。

$$W_i = V_i / \sum_{i=1}^n V_i$$

式中: W_i 为第*i*项指标的权重; V_i 为第*i*项指标的变异系数; $\sum_{i=1}^n V_i$ 为*n*项指标的和。

通过公式计算可知,吸光度的权重为0.475,沉淀离心率的权重为0.525。

采用SPSS 23版标准差标准化法将各指标标准化,结果见表1。在稳定体系指标标准化数值中,吸光度数值越大越好,沉淀离心率数值越小越好,对于指标越小越好的沉淀离心率测定值,标准化后需在数值前加负号。

表1 ACN-SIDF 稳定体系指标标准化值

Table 1 Standardized values of indicators of ACN-SIDF stable system

试验号	指标	
	吸光度	沉淀离心率
1	0.194 3	-1.313 7
2	1.184 2	-0.180 6
3	1.042 4	-0.771 8
4	1.572 5	-0.098 5
5	0.954 1	-0.180 6
6	0.600 7	-1.346 6
7	0.406 3	-1.872 1
8	0.565 4	-0.886 7
9	1.201 4	-0.706 1

2.2.2 正交试验结果

将标准化后的数值与对应的权重相乘,计算各个指标的总合,得到各样品的综合评分,计算正交试验综合评分。正交试验因素水平及试验结果见表2。

表2 正交试验结果分析

Table 2 Orthogonal experiment results

试验号	A ACN与SIDF质量比	B SIDF粒径/目	C 乳化温度/℃	D 乳化时间/min	吸光度	沉淀离心率/%	综合评分
1	1(1:20)	1(200)	1(20)	1(30)	0.757	0.805	-0.597
2	1	2(300)	2(30)	2(40)	0.830	0.736	0.610
3	1	3(400)	3(40)	3(50)	0.805	0.772	0.090
4	2(1:30)	1	2	3	0.835	0.731	0.692
5	2	2	3	1	0.800	0.736	0.358
6	2	3	1	2	0.780	0.807	-0.421
7	3(1:40)	1	3	2	0.796	0.839	-0.790
8	3	2	1	3	0.778	0.779	-1.970
9	3	3	2	1	0.814	0.768	0.200
K_1	0.10	-0.70	-1.22	-0.04			
K_2	0.63	0.77	1.50	-0.60			
K_3	-0.79	-0.13	-0.34	0.59			
R	0.47	0.49	0.91	0.40			

由表2可知,ACN与SIDF质量比(A)、SIDF粒径(B)、乳化温度(C)和乳化时间(D)对花青素稳定效果的综合评分最高组合为 $A_2B_1C_2D_3$ (综合评分为0.692)。由正交试验中极差R可知,各因素对ACN-SIDF稳定体系影响程度为 $C>B>A>D$,由K值可知,最优组合为 $A_2B_2C_2D_3$,但考虑到较小的粒径能够提高SIDF的持水能力和比表面积,降低表面张力,并可以将更多的极性基团暴露在周围的水中,从而与花青素纯化物紧密结合,因此将稳定体系的最优组合调整为 $A_2B_2C_2D_3$,即ACN与SIDF质量比1:30、SIDF粒径300目、乳化温度30℃、乳化时间50 min。

稳定体系正交试验结果进行方差分析,结果见表3。

表3 方差分析
Table 3 Analysis of variance

项目	离差平方和	自由度	均方	F值	显著性
A ACN与SIDF质量比	0.34	2	0.17	4.37	*
B SIDF粒径	0.36	2	0.18	4.66	*
C 乳化温度	1.28	2	0.64	16.40	**
D 乳化时间	0.23	2	0.12	3.00	
误差	0.23	6	0.04		

注:*表示差异显著($P<0.05$);**表示差异极显著($P<0.01$)。

由表3方差分析可知,乳化温度对稳定体系有极显著影响($P<0.01$),ACN与SIDF质量比、SIDF粒径对稳定体系影响显著($P<0.05$)。

2.3 ACN-SIDF稳定体系稳定性评价结果与分析

2.3.1 热稳定性评价结果与分析

热处理对花青素保存率的影响见图5。

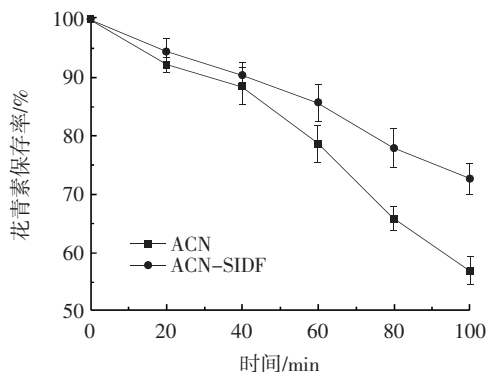


图5 热处理对花青素保存率的影响

Fig.5 Effect of heat treatment on retention rate of anthocyanin

由图5可知,在100℃加热100 min后ACN-SIDF稳定体系与ACN溶液的花青素保存率分别为72.66%和56.85%,ACN-SIDF稳定体系的花青素保存率较ACN溶液提高了15.81%。结果表明,ACN-SIDF稳定体系具有较高的热稳定性,分析可能是生物大分子与酚类物质之间存在相互作用,如范德华力、氢键、静电

相互作用和疏水作用等。这些相互作用使生物大分子与酚类物质结合,因此提高了酚类物质的热稳定性^[22]。也可能是膳食纤维具有网状结构,能够吸附多酚类物质,从而保护多酚类物质在加热条件下的稳定性^[22]。

2.3.2 光稳定性评价结果与分析

光照对花青素保存率的影响见图6。

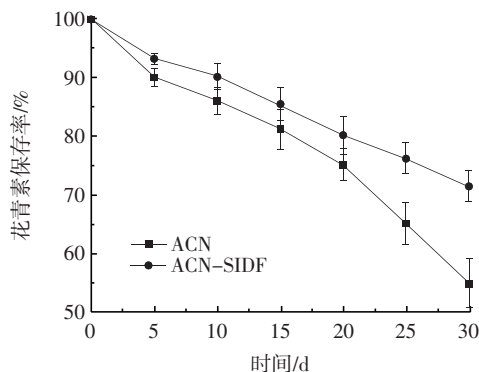


图6 光照对花青素保存率的影响

Fig.6 Effect of sunlight on retention rate of anthocyanin

由图6可知,在日光照射条件下贮藏30 d后,ACN-SIDF稳定体系和ACN溶液的花青素保存率分别为71.45%和54.89%。综合表明,SIDF可以延长花青素在日光条件下的保存时间,相较于ACN溶液,ACN-SIDF稳定体系的花青素保存率提高了16.56%。环境条件对花青素稳定性具有重要的作用,SIDF对花青素有良好的保护效果。

3 结论

本试验通过正交试验,优化构建ACN-SIDF稳定体系并对其稳定性进行了评价,表明构建ACN-SIDF稳定体系的最优参数为ACN与SIDF质量比1:30、SIDF粒径300目、乳化温度30℃、乳化时间50 min。在100℃水浴中热处理100 min,ACN-SIDF稳定体系花青素保存率为72.66%,较比ACN溶液提高了15.81%。在室温(20 ± 2)℃、光照30 d条件下,稳定体系花青素保存率为71.45%,比ACN溶液提高了16.56%。综合试验结果表明,ACN-SIDF稳定体系中由于SIDF的加入明显提高了花青素的热稳定性和光稳定性。

参考文献:

- [1] WANG X J, ZHANG Y Y, LI Y B, et al. Insoluble dietary fibre from okara (soybean residue) modified by yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134: 110252.
- [2] XU H Y, LIU M H, LIU H M, et al. Anthocyanins from purple corn ameliorated obesity in high fat diet-induced obese mice through activating hepatic AMPK[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 84: 104582.
- [3] KURAMBHATTI C, KUMAR D, RAUSCH K D, et al. Improving technical and economic feasibility of water based anthocyanin recov-

- ery from purple corn using staged extraction approach[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 158: 112976.
- [4] 曾茜茜, 雷琳, 赵国华, 等. 花青素加工贮藏稳定性的改善及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 269–275.
- ZENG Xixi, LEI Lin, ZHAO Guohua, et al. Improving the stability of anthocyanins during processing and storage: A review[J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 269–275.
- [5] ZHANG Y, CHEN S, QI B K, et al. Complexation of thermally-denatured soybean protein isolate with anthocyanins and its effect on the protein structure and *in vitro* digestibility[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 619–625.
- [6] HAN F L, YANG P, WANG H, et al. Digestion and absorption of red grape and wine anthocyanins through the gastrointestinal tract[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 83: 211–224.
- [7] POPOVIĆ D, KOCIĆ G, KATIĆ V, et al. Protective effects of anthocyanins from bilberry extract in rats exposed to nephrotoxic effects of carbon tetrachloride[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2019, 304: 61–72.
- [8] OLIVEIRA H, PEREZ-GREGÓRIO R, DE FREITAS V, et al. Comparison of the *in vitro* gastrointestinal bioavailability of acylated and non-acylated anthocyanins: Purple-fleshed sweet potato vs red wine[J]. *Food Chemistry*, 2019, 276: 410–418.
- [9] ZHANG R, ZHOU L, LI J, et al. Microencapsulation of anthocyanins extracted from grape skin by emulsification/internal gelation followed by spray/freezing-drying techniques: Characterization, stability and bioaccessibility[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 123: 109097.
- [10] ZHAO C L, YU Y Q, CHEN Z J, et al. Stability-increasing effects of anthocyanin glycosyl acylation[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 119–128.
- [11] PEANPARKDEE M, PATRAWART J, IWAMOTO S. Physicochemical stability and *in vitro* bioaccessibility of phenolic compounds and anthocyanins from Thai rice bran extracts[J]. *Food Chemistry*, 2020, 329: 127157.
- [12] REN S, GIUSTI M M. The effect of whey protein concentration and preheating temperature on the color and stability of purple corn, grape and black carrot anthocyanins in the presence of ascorbic acid[J]. *Food Research International*, 2021, 144: 110350.
- [13] TACHIBANA N, KIMURA Y, OHNO T. Examination of molecular mechanism for the enhanced thermal stability of anthocyanins by metal cations and polysaccharides[J]. *Food Chemistry*, 2014, 143: 452–458.
- [14] LUIZA KOOP B, NASCIMENTO DA SILVA M, DINIZ DA SILVA F, et al. Flavonoids, anthocyanins, betalains, curcumin, and carotenoids: Sources, classification and enhanced stabilization by encapsulation and adsorption[J]. *Food Research International*, 2022, 153: 110929.
- [15] JAKOBEC L, MATIĆ P. Non-covalent dietary fiber-Polyphenol interactions and their influence on polyphenol bioaccessibility[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 83: 235–247.
- [16] 陈冬霞, 贺阳, 薛海, 等. 大豆不溶性膳食纤维促花青素稳态化初探[J]. *农产品加工*, 2020(14): 1–4, 7.
- CHEN Dongxia, HE Yang, XUE Hai, et al. Preliminary study on the promotion of stabilization of anthocyanin by soybean insoluble dietary fiber[J]. *Farm Products Processing*, 2020(14): 1–4, 7.
- [17] 贺阳. 山葡萄花青素提取、结构鉴定及稳态化机理研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- HE Yang. Studies on extraction, structure identification and stabilization mechanism of anthocyanins of *Vitis amurensis* rupr[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017.
- [18] WANG B X, YU H S, HE Y, et al. Effect of soybean insoluble dietary fiber on prevention of obesity in high-fat diet fed mice via regulation of the gut microbiota[J]. *Food & Function*, 2021, 12(17): 7923–7937.
- [19] ZHAO G H, ZHANG R F, DONG L H, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 450–456.
- [20] ZHANG D X, ZHU J F, YE F Y, et al. Non-covalent interaction between ferulic acid and Arabinan-rich pectic polysaccharide from rapeseed meal[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 103: 307–315.
- [21] LE BOURVELLEC C, GUYOT S, RENARD C M G C. Non-covalent interaction between procyanidins and apple cell wall material: Part I. Effect of some environmental parameters[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2004, 1672(3): 192–202.
- [22] 刘甜甜, 吴晓娟, 吴伟. 多酚-膳食纤维相互作用及其影响多酚生物利用率研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 179–187.
- LIU Tiantian, WU Xiaojuan, WU Wei. Research progress of polyphenol-dietary fiber interaction and its effects on the bioavailability of polyphenols[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(7): 179–187.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2022-05-30