DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.16.012

超声波辅助酶法提取山葡萄花色苷及降解动力学分析

弭昊[1],高琰楠[1],罗喆慧[1],刘鹏[1*],邵信儒[2*]
(1.通化师范学院 医药健康学院,吉林 通化 134002;2.吉林医药学院 公共卫生学院,吉林 吉林 132013)

摘　要:该文以山葡萄皮渣为原料,以花色苷得率为考察指标,通过单因素和正交试验优化超声波辅助酶法提取花色苷的工艺,并研究山葡萄花色苷降解动力学,探讨不同温度、光照对花色苷保留率的影响。结果表明,超声波辅助酶法提取山葡萄花色苷最佳工艺参数为果胶酶添加量4.5 g、液料比20∶1(mL/g)、酶解温度40 ℃、超声功率200 W。在该条件下,花色苷得率为(2.071 5±0.325 0) mg/g。在室内避光条件下山葡萄花色苷的降解行为符合二级动力学模型,而在室内自然光条件下符合一级动力学模型;山葡萄花色苷在40、50、70 ℃时符合二级动力学模型,60 ℃时符合一级动力学模型,80 ℃时符合零级动力学模型。与室内自然光相比,室内避光条件下花色苷稳定性更高;在40~80 ℃内,随着温度升高,花色苷的降解速率常数加速增长,半衰期缩短,活化能为118.104 9 kJ/mol。

关键词:山葡萄皮渣;超声波辅助酶法;果胶酶;花色苷;降解动力学

Ultrasonic-Assisted Enzymatic Extraction of Anthocyanins from *Vitis amurensis* Pomace and Its Degradation Kinetics Analysis

MI Hao[1],GAO Yannan[1],LUO Zhehui[1],LIU Peng[1*],SHAO Xinru[2*]
(1. School of Pharmacy and Health Sciences,Tonghua Normal University,Tonghua 134002,Jilin,China;
2. College of Public Health,Jilin Medical University,Jilin 132013,Jilin,China)

Abstract: Using *Vitis amurensis* pomace as raw material, single-factor and orthogonal experiments were conducted to optimize the ultrasonic-assisted enzymatic extraction process of anthocyanins with anthocyanins yield as the evaluation index. Meanwhile, the degradation kinetics of anthocyanins was analyzed, and the impacts of different temperatures and light conditions on anthocyanin retention rate were investigated. The results indicated that the optimal parameters for ultrasonic-assisted enzymatic extraction were determined as follows: pectinase dosage of 4.5 g, liquid-solid ratio of 20∶1 (mL/g), enzymatic hydrolysis temperature of 40 ℃ and ultrasonic power of 200 W. Under these conditions, the anthocyanin yield reached (2.071 5±0.325 0) mg/g. Anthocyanin degradation conformed to the second-order kinetic model under indoor dark environment, while fitting the first-order kinetic model under indoor natural light. For thermal degradation, anthocyanins followed the second-order kinetic model at 40, 50 ℃ and 70 ℃, the first-order kinetic model at 60 ℃, and the zero-order kinetic model at 80 ℃. The under indoor dark conditions was higher than that under indoor natural light stability of anthocyanin. Within the temperature range of 40–80 ℃, elevated temperature accelerated the degradation rate constant and shortened the half-life of anthocyanins, with the activation energy calculated to be 118.104 9 kJ/mol.

Key words: *Vitis amurensis* pomace; ultrasonic-assisted enzymatic method; pectinase; anthocyanins; degradation kinetics

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20260601063RC)

作者简介:弭昊(2003—),女(汉),本科,研究方向:天然产物研究与开发。
*通信作者:刘鹏(1994—),男(汉),讲师,硕士,研究方向:农产品精深加工;邵信儒(1981—),女(汉),教授,博士,研究方向:食品天然产物提取及其功能性。

引文格式：
弭昊，高琰楠，罗喆慧，等 . 超声波辅助酶法提取山葡萄花色苷及降解动力学分析[J]. 食品研究与开发，2026，47(16)：97-103.
MI Hao，GAO Yannan，LUO Zhehui，et al. Ultrasonic-Assisted Enzymatic Extraction of Anthocyanins from *Vitis amurensis* Pomace and Its Degradation Kinetics Analysis[J]. Food Research and Development，2026，47(16)：97-103.

山葡萄起源于我国东北、华北区域，并在朝鲜以及俄罗斯远东地区广泛分布。作为葡萄属植物中耐寒性最为突出的品种，山葡萄在东北地区葡萄酒酿造产业中占据重要地位[1]，是当地生产葡萄酒的核心原料。葡萄皮渣含有丰富的生物活性物质，其中包括花色苷、多酚类化合物、维生素以及超氧化物歧化酶(superoxide dismutase，SOD)等，这些活性成分使葡萄皮渣成为极具潜力的天然活性成分原料库。当前，有效开发利用这一酿酒副产物，并将其转化为高附加值产品，已成为科研领域的重点研究方向。

花色苷是葡萄皮渣中极具价值的功能性成分，其特殊的化学结构赋予了其抗氧化、抗炎、抗细胞癌变、心血管保护及视觉功能强化等多重生物活性[2-3]。花色苷作为天然食用色素应用于食品添加剂领域，具有重要的科学价值与产业意义。花色苷的提取方法主要包括溶剂浸提法[4]、微波辅助萃取法[5]、超声波辅助萃取法[6]以及酶解法[7]等。超声波辅助萃取技术作为天然产物的提取方法，具有高效、快速、操作便捷等优势，展现出良好应用前景。例如，张秀娟等[8]采用超声波辅助酶提取技术提取蓝莓果渣花色苷，结果显示花色苷得率可达(10.571±0.080) mg/g，这充分证实了以果胶酶为介质，超声波辅助提取花色苷的有效性与可行性。此外，周然等[9]通过优化山葡萄皮渣花色苷提取工艺，进一步验证了超声波辅助提取法的应用潜力。相较于其他方法，果胶酶可特异性分解果胶，降低提取体系黏度，有利于目标成分溶出，超声波可进一步强化传质效果，提高提取率，且提取条件温和，能够减少热敏性成分损失。然而，在花色苷的实际应用中，环境 pH 值波动[10]、光照条件[11]、温度变化[12]、氧气接触[13]及酶活性[14]等均可能导致花色苷结构改变。尤其是食品加工环节的热处理工序，极易造成花色苷大量损失，严重限制其在食品、药品产业中的推广应用。因此，有效控制山葡萄花色苷在加工过程中的降解已成为关键。

本研究采用超声波辅助酶解法提取山葡萄花色苷，并优化其提取工艺，通过建立花色苷降解的动态模型，系统分析其在多种环境参数下的稳定性变化规律与内在机制，以期为山葡萄资源的深度开发与利用奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

山葡萄：吉林省通化市集安市葡萄园；三水合乙酸钠、乙酸、氯化钾(均为分析纯)：国药集团化学试剂有限公司；果胶酶(酶活 20 000U/g，食品级)：南宁庞博生物工程有限公司；RW 葡萄酒果酒专用酵母：安琪酵母股份有限公司。

1.2 仪器与设备

752 型紫外-可见分光光度计：上海精科实业有限公司；PHS-3G 型 pH 计：上海仪电科学仪器股份有限公司；HHS-256 型恒温恒湿箱：深圳市科力易翔仪器设备有限公司；KQ-2200E 型超声波清洗器：昆山市超声仪器有限公司；LGJ-50FD 型真空冷冻干燥机：河南兄弟仪器设备有限公司；LQ-A3002 型电子天平：深圳市飞亚衡器有限公司；TD-80 型低速离心机：上海安亭科学仪器厂；BILON-650Y 型超声波信号发生器：上海比朗仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 山葡萄皮渣粉的制备

山葡萄经机械压榨后将葡萄汁(含糖量 36%)与葡萄渣一起发酵。发酵条件：RW 葡萄酒果酒专用酵母添加量 300 mg/L、发酵温度 18 ℃、发酵时间 21 d，于−18 ℃冷冻处理终止发酵，解冻后立即澄清过滤，得发酵皮渣。称取适量的发酵皮渣，置于 60 ℃的恒温恒湿箱中干燥 24 h，粉碎后过 0.25 mm 筛，得到山葡萄皮渣粉。

1.3.2 山葡萄花色苷的提取

精确称取 1.00 g 山葡萄皮渣粉，加入适量蒸馏水及果胶酶，在一定温度下酶解 30 min，酶解完成后于适宜条件下进行超声辅助提取 30 min，随后以 3 000 r/min 离心 10 min，上清液即为山葡萄花色苷提取液，置于离心管中 4 ℃冷藏保存备用。

1.3.3 花色苷得率的测定

用 pH 示差法测定花色苷得率，以蒸馏水为空白对照，利用紫外-可见分光光度计分别测定山葡萄花色苷在 pH4.5 CH_3COOH-CH_3COONa 缓冲液和 pH1.0 KCl-HCl 缓冲液 510、700 nm 处的吸光度[15-16]。花色苷得率(H，mg/g)计算公式如下。

$$H = \frac{\Delta A \times M_w \times D_F \times V}{\varepsilon \times L \times m}$$

式中：$\Delta A=(A_{510}-A_{700})_{pH1.0}-(A_{510}-A_{700})_{pH4.5}$，其中 $(A_{510}-A_{700})_{pH1.0}$ 为在 pH1.0 KCl-HCl 缓冲液 510 nm 与 700 nm 处的吸光度差值，$(A_{510}-A_{700})_{pH4.5}$ 为在 pH4.5 CH_3COOH-CH_3COONa 缓冲液 510 nm 与 700 nm 处吸光度差值；ε 为摩尔消光系数，26 900 L/(mol·cm)；L 为光程，1 cm；M_w 为主要花色苷的摩尔质量，449.2 g/mol；D_F 为稀释因子，5；V 为提取液体积，mL；m 为样品质量，g。

1.3.4 单因素试验

以花色苷得率为指标，通过单因素试验探究果胶酶添加量（1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 g）、液料比[10∶1、15∶1、20∶1、25∶1、30∶1 (mL/g)]、酶解温度（30、40、50、60、70 ℃）、超声功率（100、200、300、400、500 W）4 个因素对花色苷得率的影响。

1.3.5 正交试验

根据单因素试验结果，选择 A（果胶酶添加量）、B（液料比）、C（酶解温度）、D（超声功率）作为工艺优化的因素，以花色苷得率为评价指标，进行 $L_9(4^3)$ 正交试验，正交试验因素与水平见表 1。

表 1 正交试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	A 果胶酶添加量/g	B 液料比/(mL/g)	C 酶解温度/℃	D 超声功率/W
1	2.5	15∶1	40	200
2	3.5	20∶1	50	300
3	4.5	25∶1	60	400

1.3.6 稳定性试验

1.3.6.1 花色苷保留率的计算

花色苷保留率（B，%）的计算公式如下[8]。

$$B=\frac{\rho_t}{\rho_0}\times 100$$

式中：ρ_t 为 t 时刻山葡萄花色苷的质量浓度，g/L；ρ_0 为山葡萄花色苷的初始质量浓度，g/L。

1.3.6.2 光照处理对花色苷保留率的影响

分别量取 5 mL 山葡萄花色苷提取液于 10 mL 离心管中，用 pH1.0、pH4.5 的缓冲液配制色素稀释液，分别在室内避光与室内自然光照条件下保存 7.5 d，每隔 1.5 d 取样一次，测定花色苷保留率，探究不同光照处理对花色苷稳定性的影响。

1.3.6.3 不同温度处理对花色苷保留率的影响

分别量取 5 mL 山葡萄花色苷提取液于离心管中，在避光条件下，分别置于 40、50、60、70、80 ℃水浴锅中热处理 5 h，每隔 1 h 取样测定花色苷保留率，探究不同温度处理对花色苷稳定性的影响。

1.3.7 热降解动力学模型

采用尝试法建立降解动力学模型，该模型的温度参数设置为 40~80 ℃（间隔 10 ℃），时间参数为 0~5 h（间隔 1 h）。其基本原理为假设降解反应符合零级、一级或二级动力学模型，即花色苷浓度（ρ_t）与时间（t）呈线性关系，或 $\ln(\rho_t/\rho_0)$ 与 t 呈线性关系，或 $1/\rho_t$ 与 t 呈线性关系。最终所选定的动力学模型由决定系数（R^2）最高者确定，热降解动力学模型如下。

$$\rho_t-\rho_0=-k_0t$$

$$\ln\frac{\rho_t}{\rho_0}=-k_1t$$

$$\frac{1}{\rho_t}-\frac{1}{\rho_0}=-k_2t$$

式中：k_0、k_1、k_2 分别为零级、一级和二级降解速率常数，min^{-1}；t 为加热时间，h。

花色苷半衰期（$t_{1/2}$，h）计算公式如下。

$$t_{1/2}=-\ln\frac{0.5}{k}$$

式中：k 为反应速率常数，min^{-1}；0.5 表示花色苷衰减比例。

活化能利用阿伦尼乌斯（Arrhenius）方程计算，Arrhenius 方程如下。

$$\ln k=\ln A-\frac{E_a}{RT}$$

式中：E_a 为活化能，kJ/mol；R 为摩尔气体常数，8.314 J/(mol·K)；T 为绝对温度，K；A 为频率因子，h^{-1}；k 为反应速率常数，min^{-1}。

1.4 数据处理

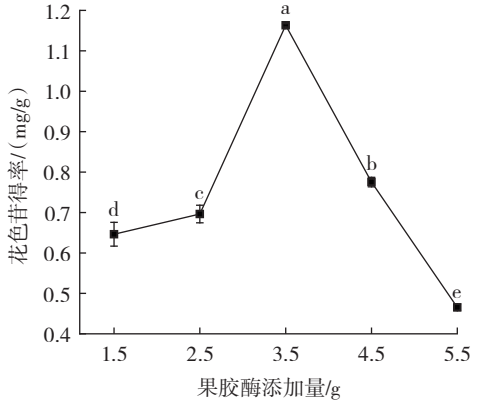
采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析，用 Origin 9.0 进行绘图和数据拟合。

2 结果与分析

2.1 山葡萄花色苷提取单因素试验结果

2.1.1 果胶酶添加量对花色苷得率的影响

果胶酶添加量对花色苷得率的影响见图 1。



不同小写字母表示差异显著（$p<0.05$）。

图 1 果胶酶添加量对花色苷得率的影响

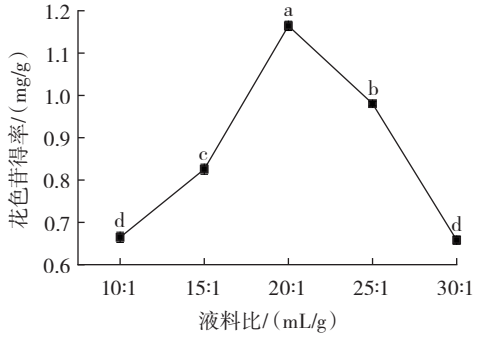
Fig.1 Effect of pectinase dosage on anthocyanin yield

如图 1 所示，花色苷得率随果胶酶添加量的增加

呈先升高后降低的变化趋势，在果胶酶添加量为 3.5 g 时，花色苷得率达到最高，为 1.166 1 mg/g；果胶酶添加量较低（1.5~3.5 g）时，花色苷得率逐步升高，这是由于随着果胶酶添加量的增加山葡萄皮渣与果胶酶的接触面积扩大，提高了花色苷的溶解度。然而，当果胶酶添加量超过 3.5 g 时，花色苷得率显著下降。这主要是由于过量的果胶酶会水解花色苷分子中的糖苷键，导致其发生降解[17]。此外，酶促反应受底物浓度的限制，当酶与底物结合达到饱和后，继续增加酶用量并不能提高提取效率，反而可能因非特异性水解作用造成花色苷的损失，从而降低花色苷得率。因此，选择果胶酶添加量 2.5、3.5、4.5 g 进行后续正交试验。

2.1.2　液料比对花色苷得率的影响

液料比对花色苷得率的影响见图 2。



不同小写字母表示差异显著（p<0.05）。

图 2　液料比对花色苷得率的影响

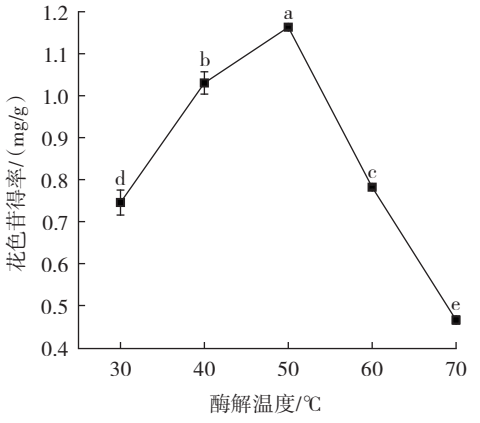
Fig.2　Effect of liquid-solid ratio on anthocyanin yield

如图 2 所示，随着溶剂添加量的增加，花色苷得率呈先升高后降低趋势，在液料比为 20∶1（mL/g）时，花色苷得率达到最高，为 1.164 0 mg/g；液料比较低[10∶1~20∶1（mL/g）]时，花色苷得率逐步提高，这是由于溶剂用量增加时，溶剂渗透扩散进入葡萄皮渣细胞，细胞内外浓度梯度逐渐扩大（浓度梯度是花色苷传质的动力）[18]；同时溶剂破坏细胞内疏水键，加快花色苷向溶剂的扩散，利于其向外释放，从而提升得率[19]。当液料比超过 20∶1（mL/g）时，花色苷得率逐渐降低，这是由于花色苷已基本溶出，再继续加大溶剂用量会稀释花色苷浓度，导致花色苷得率降低。因此，选择液料比 15∶1、20∶1、25∶1（mL/g）进行后续正交试验。

2.1.3　酶解温度对花色苷得率的影响

酶解温度对花色苷得率的影响见图 3。

如图 3 所示，随着酶解温度的升高，花色苷得率呈现先上升后下降趋势，在酶解温度为 50 ℃时，花色苷得率达到峰值，为 1.166 3 mg/g。这是因为果胶酶的适宜温度范围为 15~55 ℃，在 30~50 ℃的温度区间内，花色苷得率呈现明显的递增趋势，酶解温度升高，一方面可加快花色苷在溶剂中的溶解速度，另一方面能提升果胶酶活性；但温度过高会破坏酶活性，同时加速花色



不同小写字母表示差异显著（p<0.05）。

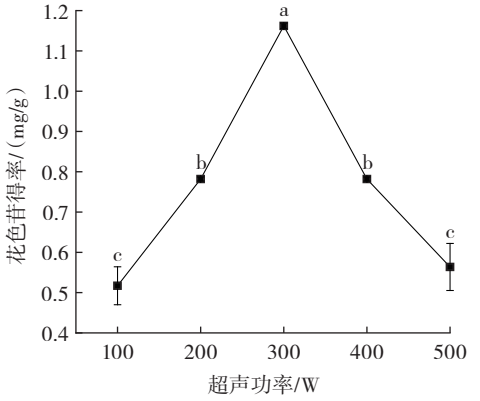
图 3　酶解温度对花色苷得率的影响

Fig.3　Effect of enzymatic hydrolysis temperature on anthocyanin yield

苷降解，导致得率下降。选取适宜温度，既能达成高效酶法提取，又可规避花色苷与酶的降解[20]。因此，选择酶解温度 40、50、60 ℃进行后续正交试验。

2.1.4　超声功率对花色苷得率的影响

超声功率对花色苷得率的影响见图 4。



不同小写字母表示差异显著（p<0.05）。

图 4　超声功率对花色苷得率的影响

Fig.4　Effect of ultrasonic power on anthocyanin yield

如图 4 所示，随着超声功率的增加，花色苷得率呈现先上升后下降趋势，在超声功率为 300 W 时，花色苷得率达到最大值，为 1.166 2 mg/g；在 100~300 W 区间内，随着超声功率的增加花色苷得率持续上升，这是由于前期超声波辅助可破坏细胞壁，利于花色苷浸出[21]；当超声功率超过 300 W 时，超声波的高能量会破坏花色苷分子结构，导致分子结构改变，难以被提取液萃取。此外，过大的超声功率还可能会促使花色苷自身降解，其降解产物可能与酶分子结合，进而降低得率。因此，选择超声功率 200、300、400 W 进行后续正交试验。

2.2　正交试验结果

正交试验结果见表 2。

由表 2 可知，各因素对山葡萄花色苷提取效果的

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

序号	A 果胶酶添加量	B 液料比	C 酶解温度	D 超声功率	花色苷得率/(mg/g)
1	1	1	1	1	1.359 7
2	1	2	2	2	1.574 7
3	1	3	3	3	1.603 1
4	2	1	3	2	1.312 5
5	2	2	1	3	1.687 7
6	2	3	2	1	1.624 0
7	3	1	2	3	1.275 0
8	3	2	3	1	1.809 1
9	3	3	1	2	1.840 4
k_1	4.537 5	3.947 2	4.887 8	4.792 8	
k_2	4.624 2	5.071 5	4.473 7	4.727 6	
k_3	4.924 5	5.067 5	4.724 7	4.565 8	
R	0.387 0	1.124 3	0.414 1	0.227 0	

影响顺序为 B(液料比)>C(酶解温度)>A(果胶酶添加量)>D(超声功率)。通过 K 值分析确定最优提取条件为 $A_3B_2C_1D_1$,即液料比 20∶1(mL/g)、酶解温度 40 ℃、超声功率 200 W,果胶酶添加量 4.5 g,此条件下花色苷得率可达(2.071 5±0.325 0) mg/g,高于正交试验中最优组合($A_3B_3C_1D_2$)的花色苷得率,表明此条件具有可行性。

2.3 稳定性试验结果

2.3.1 光照处理对花色苷的影响及动力学分析

不同光照条件对花色苷保留率的影响见图 5。

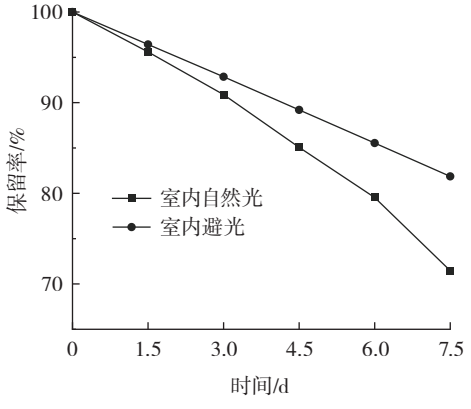


图 5 不同光照条件对花色苷保留率的影响

Fig.5 Effect of different lighting conditions on anthocyanin retention rate

由图 5 可知,山葡萄花色苷对室内自然光较为敏感,储存 7.5 d 后山葡萄花色苷保留率为 71.46%,但在室内避光的情况下保留率为 81.87%。这表明光照加速了花色苷的降解过程,而黑暗环境更有利于花色苷保持稳定。这一现象或归因于光照引发的光催化降解作用。光照促使花色苷分子发生分解,致使花色苷丧失颜色与生物活性,最终导致花色苷含量下降[22]。从降解机制来看,长时间光照会促使花色苷生成中间产物——C2 位水解开环且 C4 位带有羟基化合物,该中间产物会进一步转化为查耳酮[23]。查耳酮继续分解为取代苯甲酸、2,4,6-三羟基苯甲醛等物质,在这一系列反应过程中,花色苷结构被破坏,颜色逐渐消退[24]。由此可知,光照是推动花色苷降解的关键因素,若要维持山葡萄皮渣中花色苷的稳定性,避光保存是更为适宜的条件。宋鹏等[25]研究发现,在日光灯照射和避光条件下,吸光度分别下降 13% 和 8%。这一结果与本试验结果一致,均证实了光照会加速花色苷的降解过程。由此可见,采取避光措施能够有效提升花色苷的稳定性,因此在实际生产加工与储存环节中,应当尽量避免山葡萄花色苷暴露于光照环境。

不同光照条件下花色苷降解的动力学参数见表 3。

表 3 不同光照条件下花色苷降解的动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of anthocyanin degradation under different light conditions

光照条件	零级		一级		二级		$t_{1/2}$/d
	k_0/min^{-1}	R^2	k_1/min^{-1}	R^2	k_2/min^{-1}	R^2	
室内避光	1×10^{-5}	0.961 7	1.8×10^{-5}	0.984 4	3×10^{-5}	0.993 9	26.7
室内自然光	1×10^{-5}	0.941 4	2.5×10^{-5}	0.952 0	5×10^{-5}	0.945 7	19.3

由表 3 可知,各降解速率常数的变化趋势与图 5 中山葡萄花色苷的降解规律一致。通过比较决定系数(R^2)对反应级数进行判别,结果表明,在室内避光条件下山葡萄花色苷的降解行为均符合二级动力学模型,而在室内自然光条件下符合一级动力学模型。

2.3.2 不同温度条件对花色苷的影响及动力学分析

不同温度条件对花色苷保留率的影响见图 6。

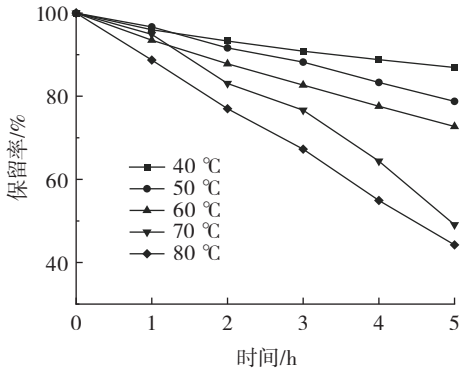


图 6 不同温度条件对花色苷保留率的影响

Fig.6 Effect of different temperatures on anthocyanin retention rate

由图 6 可知,加热 5 h 后,山葡萄皮渣中的花色苷在 40~80 ℃范围内的保留率分别为 86.92%、78.76%、72.72%、49.08% 和 44.25%,山葡萄花色苷的热降解进程受温度影响明显。在低温环境下,花色苷热降解较为缓慢;随着温度逐步升高,其降解速率呈快速上升趋

势。这是由于苯并吡喃阳离子发生的水合与开环反应均为吸热过程，温度升高加速了这些反应的进行。当温度达到 70 ℃后，花色苷的稳定性出现断崖式下降。因此，在实际应用山葡萄花色苷时，应尽量避免高温环境及长时间加热处理，以减少花色苷的降解损失[26]。

不同温度条件下花色苷降解动力学参数见表 4。

表 4　不同温度条件下花色苷降解的动力学参数

Table 4　Kinetic parameters of anthocyanin degradation under different temperatures

温度/℃	零级		一级		二级		$t_{1/2}$/h	活化能/(kJ/mol)
	k_0/min^{-1}	R^2	k_1/min^{-1}	R^2	k_2/min^{-1}	R^2		
40	3.0×10^{-4}	0.920 9	5.5×10^{-4}	0.926 2	1×0^{-3}	0.952 6	1 260	118.104 9
50	4.0×10^{-4}	0.913 3	7.0×10^{-4}	0.970 2	1×10^{-3}	0.988 4	990	
60	7.0×10^{-4}	0.950 2	1.1×10^{-4}	0.981 8	2×10^{-3}	0.771 3	630	
70	8.0×10^{-4}	0.790 1	1.6×10^{-4}	0.901 5	3×10^{-3}	0.905 9	433	
80	1.0×10^{-3}	0.949 4	2.3×10^{-3}	0.942 1	5×10^{-3}	0.945 1	303	

由表 4 可知，山葡萄花色苷的降解速率常数随温度升高而明显增大，表明温度加速了降解进程。结合 R^2 分析，山葡萄花色苷在 40、50、70 ℃时符合二级动力学模型，60 ℃时符合一级动力学模型，80 ℃时符合零级动力学模型。温度升高不仅导致零级速率常数加速增长，同时半衰期缩短。该反应活化能为 118.104 9 kJ/mol，处于典型花色苷降解活化能区间（35~125 kJ/mol）。较高的活化能表明花色苷热稳定性较强，降解所需能量阈值较高。值得注意的是，降解动力学类型受处理方式影响显著。Wu 等[27]发现矢车菊素-3-葡萄糖苷在声光联合处理中遵循零级动力学特征，而单一光解时则符合一级动力学特征。此外，花色苷稳定性受共存化合物调控，Sui 等[28]发现去除糖类及酚酸后，因共色素作用减弱[29]，其热降解速率反而加快。

在 40~80 ℃温度区间内，温度直接影响降解反应的供能水平，低温环境可有效延缓降解产物生成速率，通过延长反应体系达到活化能阈值的时间，而减少花色苷损耗。

3　结论

本研究优化山葡萄花色苷最佳提取工艺为果胶酶添加量 4.5 g、液料比 20∶1（mL/g）、酶解温度 40 ℃、超声功率 200 W。在此条件下，花色苷得率为（2.071 5±0.325 0）mg/g。通过对山葡萄花色苷降解动力学的研究可知：避光条件和降低储藏温度有利于保持山葡萄花色苷结构的稳定性，热降解为非自发反应，在适宜的条件下保存可以有效防止山葡萄花色苷降解。未来，可对山葡萄花色苷组分进行定性和定量分析，探索花色苷降解主要组分；通过提高花色苷稳定性，为山葡萄花色苷深度开发与应用奠定理论与技术基础。

参考文献：

[1] LI P H, JIA Y L, CAI D L, et al. Study on the relationship between flavor components and quality of ice wine during freezing and brewing of 'beibinghong' grapes[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101016.

[2] CHIHI S, RAHIM O, DOUADI A, et al. Antioxidant activity and bioactive compounds of extracts from the Algerian plant *Moltkia ciliata*[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1204(1): 012001.

[3] 古春梅, 余鳗游, 夏陈, 等 . 黑青稞麸皮花青素分离鉴定及其生物活性研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(9): 47-53.
GU Chunmei, YU Manyou, XIA Chen, et al. Isolation and identification of anthocyanins from black barley bran and analysis of its biological activity[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(9): 47-53.

[4] 国田, 张娜, 符群, 等 . 几种辅助提取方式对蓝莓原花青素浸提效果及抗氧化活性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(9): 139-148.
GUO Tian, ZHANG Na, FU Qun, et al. Effects of several assisted extraction methods on extraction effect and antioxidant activity of proanthocyanins from blueberry[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(9): 139-148.

[5] 于清华 . 蓝靛果花色苷超声波-微波辅助提取纯化及微胶囊化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
YU Qinghua. Research on ultrasonic-microwave assisted extraction, purification and microencapsulation of anthocyanin from *Lonicera edulis*[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[6] 管颖 . 紫五加功效成分提取与纯化及生物活性研究[D]. 昆明: 昆明医科大学, 2018.
GUAN Ying. Study on extraction, purification and biological activity of the efficacy components from the Purple *Acanthopanax senticosus*[D]. Kunming: Kunming Medical University, 2018.

[7] 马玉婷, 李进, 陈敏, 等 . 酶解法提取黑果枸杞酒渣花色苷的工艺研究[J]. 食品科技, 2011, 36(7): 182-186.
MA Yuting, LI Jin, CHEN Min, et al. Extraction optimization of anthocyanin from *Lycium ruthenicum* Murr. wine pomace by enzyme solution[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(7): 182-186.

[8] 张秀娟, 刘治廷, 杨诗涵, 等 . 超声波辅助酶法提取蓝莓果渣花色苷的工艺优化及降解动力学[J]. 精细化工, 2022, 39(10): 2069-2077, 2098.
ZHANG Xiujuan, LIU Zhiting, YANG Shihan, et al. Condition optimization and degradation kinetics of anthocyanins from blueberry pomace by ultrasonic-assisted enzymatic extraction[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(10): 2069-2077, 2098.

[9] 周然, 孙海涛, 邵信儒, 等 . 响应面优化超声辅助提取山葡萄皮渣花色苷[J]. 北方园艺, 2024(9): 86-93.
ZHOU Ran, SUN Haitao, SHAO Xinru, et al. Response surface op-

timization ultrasound-assisted extraction of mountain grape skin pomace proanthocyanidins[J]. Northern Horticulture, 2024(9): 86-93.

[10] 杨培青, 王文欣, 王永涛, 等 . 花色苷的稳定性及其与蛋白质相互作用研究进展: 基于花色苷在不同 pH 条件下的多态性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 480-491.
YANG Peiqing, WANG Wenxin, WANG Yongtao, et al. Research progress on the stability of anthocyanins and their interactions with proteins: A perspective based on the pH-dependent multistate system of anthocyanins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 480-491.

[11] 付东艳, 汪蕾, 张龙生 . 遮阳对马瑟兰葡萄花色苷组分及合成相关基因表达的影响[J]. 果树学报, 2025, 42(1): 30-47.
FU Dongyan, WANG Lei, ZHANG Longsheng. Effects of Sun shading on anthocyanin components and the expression of genes related to anthocyanin synthesis in Marselan grape[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(1): 30-47.

[12] 郝天翊, 杨思玲, 杨海婷, 等 . 高温下不同品种葡萄离体果实着色变化特征的比较分析[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(5): 1023-1032.
HAO Tianyi, YANG Siling, YANG Haiting, et al. Comparative analysis of coloration characteristics of different varieties of grape fruit *in vitro* under high temperature[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(5): 1023-1032.

[13] 程思琦, 李生保, 曲措, 等 . 氧化处理对黑珍珠和赤霞珠葡萄酒颜色及花色苷稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(20): 215-220.
CHENG Siqi, LI Shengbao, QU Cuo, et al. Effect of oxidation treatment on the color and anthocyanin stability of Black Pearl and Cabernet Sauvignon[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(20): 215-220.

[14] 王政 . 刺葡萄花色苷酶促酰化反应条件的优化及光稳定性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
WANG Zheng. Optimization of enzymatic acylation reaction conditions and light stability study of *Vitis* anthocyanins[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.

[15] LIU Y H, SUN Y, XIE A G, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of anthocyanin content of purple-fleshed sweet potato slices during drying process[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(12): 3836-3846.

[16] PENG J, WANG K, MA C, et al. Determination of anthocyanin and moisture content of purple sweet potatoes during drying process by their optical properties in the 400 – 1050 nm range[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129811.

[17] 郑覃, 王青霞, 李建颖 . 酶法辅助提取黑果枸杞花色苷工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(8): 35-40.
ZHENG Qin, WANG Qingxia, LI Jianying. Process optimization for enzymatic assisted extraction of anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr.[J]. Food Research and Development, 2018, 39(8): 35-40.

[18] 许丹妮, 杨海玲, 范丽丽, 等 . 遗传算法优化双水相法提取葡萄皮渣花色苷工艺及其组分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 168-174, 193.
XU Danni, YANG Hailing, FAN Lili, et al. Optimization of extraction process and component analysis of anthocyanins from grape pomace in aqueous two-phase extraction with genetic algorithm[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 168-174, 193.

[19] 卢鹏飞, 高志强, 孙敏, 等 . 响应面法优化超声波辅助提取黑小麦花色苷的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(4): 69-76.
LU Pengfei, GAO Zhiqiang, SUN Min, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction of anthocyanins from black wheat by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2020, 41(4): 69-76.

[20] 洪佳敏, 林宝妹, 何炎森, 等 . 红香蕉果皮花色苷提取工艺优化及其稳定性研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(4): 132-137.
HONG Jiamin, LIN Baomei, HE Yansen, et al. Optimization of extraction process of anthocyanins from red banana peel and analysis of their stability[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(4): 132-137.

[21] 张芷瑜, 张天伟, 杨馥菡, 等 . 蓝莓果渣花色苷提取纯化工艺研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(3): 175-181.
ZHANG Zhiyu, ZHANG Tianwei, YANG Fuhan, et al. Study on extraction and purification process of anthocyanins from blueberry residue[J]. China Condiment, 2024, 49(3): 175-181.

[22] LI X S, YUAN K L, ZHANG Y L, et al. The promising stability of carboxylpyranocyanidin-3-O-glucoside during food processing and simulated digestion and its bioavailability research[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(4): 2372-2382.

[23] 谢雨婷, 李明智, 蒋海伟, 等 . 超声波辅助提取紫茄皮花色苷工艺及其稳定性研究[J]. 食品工业, 2015, 36(11): 43-48.
XIE Yuting, LI Mingzhi, JIANG Haiwei, et al. Response surface methodology for optimization of ultrasonic-assisted extraction and the stability of anthocyanins from eggplant-peel[J]. The Food Industry, 2015, 36(11): 43-48.

[24] 谢程程, 王勇, 宫立晶 . 天然食用色素紫甘薯花青素的稳定性研究[J]. 食品工业, 2012, 33(6): 99-102.
XIE Chengcheng, WANG Yong, GONG Lijing. Study on the stability of natural edible pigment anthocyanin from purple sweet potato [J]. The Food Industry, 2012, 33(6): 99-102.

[25] 宋鹏, 丁彦芬, 徐子涵, 等 . 丝棉木叶片花色苷的提取、稳定性和成分研究[J]. 北方园艺, 2019(24): 81-87.
SONG Peng, DING Yanfen, XU Zihan, et al. Studies on extraction, stability and composition of anthocyanins from leaves of *Euonymus maackii*[J]. Northern Horticulture, 2019(24): 81-87.

[26] 王秀菊, 杜金华, 马磊, 等 . 蓝莓酒渣中花色苷提取工艺的优化及其稳定性的研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(9): 151-156.
WANG Xiuju, DU Jinhua, MA Lei, et al. Anthocyanin from blueberry wine pomace: Extraction optimization and stability test[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(9): 151-156.

[27] WU X H, LIN Q W, BELWAL T, et al. Effect of advanced/hybrid oxidation process involving ultrasonication and ultraviolet radiation (sonophotolysis) on anthocyanin stability: Degradation kinetics and mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131083.

[28] SUI X N, BARY S, ZHOU W B. Changes in the color, chemical stability and antioxidant capacity of thermally treated anthocyanin aqueous solution over storage[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 516-524.

[29] BI Y H, CHI X W, ZHANG R, et al. Highly efficient extraction of mulberry anthocyanins in deep eutectic solvents: Insights of degradation kinetics and stability evaluation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102512.

加工编辑:张昱
收稿日期:2025-08-28