

干燥方式对蓝莓花青素降解特性及抗氧化能力的影响

Effects of different drying methods on degradation characteristics of anthocyanins and antioxidant capacity in blueberries

赵 伟¹ 黄佳琪²

ZHAO Wei¹ HUANG Jia-qi²

(1. 吉林省经济管理干部学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林省产品质量监督检验院, 吉林 长春 130012)

(1. Jilin Province Economic Management Cadre College, Changchun, Jilin 130012, China;

2. Jilin Province Product Quality Supervision and Inspection Institute, Changchun, Jilin 130012, China)

摘要:目的:降低干燥过程中蓝莓花青素类物质的降解。方法:将远红外干燥应用于蓝莓的干燥中,并与传统热风干燥进行对比,探究不同干燥方式下蓝莓中主要花青素的降解特性、PPO 酶活性及抗氧化能力变化。结果:远红外干燥下的蓝莓中两种主要花青素(D3G 及 C3G)保留率较高,二阶数学模型能够更好地模拟其降解过程。与热风干燥相比,远红外干燥蓝莓花青素的动力学速率常数 k 值及熵 ΔS 值更小,半衰期 $t_{1/2}$ 值、活化能 E_a 值及焓 ΔH 值更大。两种干燥方式对 PPO 酶活性产生了相似的影响,但干燥 4 h 后远红外干燥组酶活性总体低于热风干燥组。此外远红外 60 °C 干燥条件下观察到了蓝莓干果最高的花青素保留率及自由基清除能力。结论:相同干燥温度条件下,远红外干燥相较于传统热风干燥能够减少蓝莓在干燥过程中花青素类物质的降解,提高干燥品质。**关键词:**蓝莓;热风干燥;远红外干燥;花青素;降解特性;抗氧化能力

Abstract: Objective: Reducing the degradation of anthocyanins in blueberry during drying. Methods: The far infrared drying was applied to the drying of blueberries, and compared with traditional hot air drying to explore the degradation characteristics of major anthocyanins and the changes of PPO enzyme activity and antioxidant capacity of blueberries under different drying methods. Results: High retention of two major anthocyanins (D3G and C3G) in blueberries under far-infrared drying, and the second-order mathematical model could better simulate their degradation process. Compared with hot-air

drying, the rate constants (k) and entropy values (ΔS) of far-infrared dried blueberry anthocyanins were smaller, and the half-life values ($t_{1/2}$), activation energy values (E_a) and enthalpy values (ΔH) were larger. The two drying methods produced similar effects on PPO enzyme activity, but the enzyme activity of the far-infrared drying group was generally lower than that of the hot-air drying group after 4 h. In addition, the highest anthocyanin retention and free radical scavenging ability of dried blueberry fruits were observed under far-infrared 60 °C drying conditions. Conclusion: Under the same drying temperature, far-infrared drying can reduce the degradation of anthocyanins and improve the drying quality of blueberries compared with traditional hot air drying.

Keywords: blueberry; hot-air drying; far-infrared drying; anthocyanins; degradation properties; antioxidant capacity

蓝莓,学名越橘,原产于北美洲。蓝莓是花青素类物质的重要来源,相关研究^[1]表明富含花青素的蓝莓提取物具有较强的抗氧化能力且可改善儿童的学习能力和记忆力。Si 等^[2]的研究结果表明富含花青素的蓝莓提取物能够预防人类氧化损伤和神经退行性变。Cheng 等^[3]的研究也表明蓝莓提取物能够很大程度减少机体 DNA 损伤并有效抑制癌细胞增殖,防止机体组织癌变。但蓝莓含水量较高,采摘后贮藏时间较短,因此干制是维持其品质,提高其贮藏期的有效手段。目前热风干燥方法常用于蓝莓的干制加工,虽然热风干燥仪器设备成本较低,操作较为简便但研究^[4]表明此法干燥后的蓝莓品质较差,尤其是花青素类物质降解严重、活性降低。其他干燥方式如真空冷冻干燥,产品品质较好,但耗能较大,维护成本较高,仪器设备操作复杂因而不适用于果蔬制品的大规模生产加工^[5]。

基金项目:吉林省经济管理干部学院食药监测分析科研平台基金项目(编号:KYPT202102)

作者简介:赵伟(1975—),男,吉林省经济管理干部学院讲师,硕士。E-mail:1423561490@qq.com

收稿日期:2022-07-11 **改回日期:**2022-09-14

远红外干燥是一种优良的果蔬干燥方法^[6],该法通过远红外辐射产生电磁波使物料表面升温,由于物料内部温度较低而产生温度梯度差,水分由内向外快速扩散从而使果蔬水分快速蒸发。研究拟将远红外干燥技术应用于蓝莓的干燥中,并与传统热风干燥进行对比,探究不同干燥方式下蓝莓主要花青素的降解特性、多酚氧化酶(PPO)酶活性及抗氧化能力变化,以期提高蓝莓干燥品质,减少干燥过程中花青素类物质的降解。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

蓝莓:于 2021 年 7 月采自山东威海,品种为北高丛蓝莓品种“蓝丰”,采摘时遵循随机性原则选取无病虫害、无机械损伤、全紫成熟期蓝莓,采摘完毕后迅速预冷并带回实验室进行品质分析及后续干燥试验;

乙醇、氯化钠、磷酸二氢钾、盐酸、甲酸、磷酸氢二钾、邻苯二酚、聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)及曲拉通 X-405(TritonX-405):分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

水溶性维生素 E(Trolox)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)及 2,2-二苯基-1-吡啶并胍基(DPPH):色谱纯,美国 Sigma 公司。

1.2 主要仪器与设备

鼓风干燥箱:DHG-9140 型,上海亿恒有限公司;

远红外辐射干燥装置:YHG-300-S 型,上海博泰试验设备有限公司;

超高效液相色谱串联质谱仪:Thermo Vanquish 型,美国赛默飞世尔科技公司;

紫外—可见分光光度计:UV-mini1240 型,日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 干燥条件 取 500 g 蓝莓分别放置于热风干燥箱及远红外辐射干燥箱中进行干燥,设置热风干燥温度为 60 ℃ 或 70 ℃,风速为 2 m/s;远红外干燥温度与风速皆与热风干燥相同,每隔 1 h 取样测量花青素含量,干燥终点为蓝莓含水量在 10% 以内。

1.3.2 蓝莓果实花青素含量测定 蓝莓果实中花青素类物质的提取参考 Zhou 等^[7]的方法并稍作修改。取 50 g 蓝莓分别添加 1.5 g 纤维素酶及 1.5 g 果胶酶并在 4 ℃ 下充分研磨,混合物于黑暗环境放置 2 h 后加入 50 mL 含有 0.1% 柠檬酸的 75% 乙醇溶液,混合物在 4 ℃、8 000×g 条件下离心后收集上清液,残渣重复上述提取步骤 3 次,合并上清液在 40 ℃ 下旋转蒸发,残留物使用 50 mL 含有 0.1% 柠檬酸的 75% 乙醇溶液溶解,测定前将其置于 4 ℃ 黑暗条件下保存。

利用高效液相色谱串联质谱法对蓝莓中的花青素进行定性及定量分析,流动相 A 为水—甲酸—乙腈($V_{\text{水}}:V_{\text{甲酸}}:V_{\text{乙腈}}=87:10:3$),流动相 B 为水—甲酸—乙腈

($V_{\text{水}}:V_{\text{甲酸}}:V_{\text{乙腈}}=40:10:50$),使用如下梯度程序进行洗脱:0~4 min,10%~14% B;4~6 min,14%~20% B;6~10 min,20%~30% B;10~15 min,30%~10% B,流速为 1.0 mL/min,色谱柱为反相 C₁₈ 色谱柱(1.8 μm, 2.1 mm×100 mm),进样量为 2.0 μL,柱温为 35 ℃。电喷雾电离分析设置为正离子模式,氮气为碰撞气体。质谱参数设置参考 Li 等^[8]研究方法。

1.3.3 动力学参数计算 一阶方程[式(1)]、二阶方程[式(2)]及半衰期方程[式(3)]常用来描述果蔬加工过程中花青素类物质的降解过程,其计算公式^[9]:

$$c = c_0 \exp(-kt), \quad (1)$$

$$\frac{1}{c} - \frac{1}{c_0} = kt, \quad (2)$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{kc_0}, \quad (3)$$

式中:

t ——干燥时间, h;

c_0, c ——蓝莓鲜果及干燥至 t 时刻蓝莓果实的花青素含量, mg/g DW;

k ——速率常数。

1.3.4 热力学参数计算 不同干燥条件下蓝莓花青素降解活化能按式(4)计算^[10]。

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (4)$$

式中:

E_a ——蓝莓花青素降解活化能, kJ/mol;

k_1, k_2 ——60, 70 ℃ 下干燥速率常数;

T_1, T_2 ——60, 70 ℃ 的开尔文摄氏度值;

R ——常数, 其值为 8.314 J/(mol·K)。

干燥过程花青素降解的焓(ΔH , kJ/mol)、吉布斯自由能(ΔG , kJ/mol)及熵(ΔS , kJ/mol/K)值计算式分别为式(5)、式(6)及式(7)。

$$\Delta H = E_a - RT, \quad (5)$$

$$\Delta G = -RT \ln \left(\frac{kh}{k_B t} \right), \quad (6)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T}, \quad (7)$$

式中:

h ——普朗克常数, 其值为 6.626×10^{-34} J·s;

k_B ——玻尔兹曼常数, 其值为 1.380×10^{-23} J/K。

1.3.5 多酚氧化酶的测定 PPO 的提取与测定参考 Terefe 等^[11]的方法, 并稍作修改。将 2 g 蓝莓样品与 2 mL 0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲液(pH 6.5)充分混合, 磷酸盐缓冲液中含有 1 mol/L 的 NaCl 及体积分数为 1% 的曲拉通 X-100。混合物充分震荡后离心(14 000×g, 4 ℃)。收集上清液, 残渣重复提取两次, 合并上清液进行 PPO 酶活性分析。

取 100 μL PPO 酶提取物加入到 3 mL 0.05 mol/L

的磷酸钠缓冲液(pH 6.5)中,此磷酸盐缓冲液含有0.07 mol/L的邻苯二酚。空白对照组为0.2 mol/L的磷酸盐缓冲液(pH 6.5)代替PPO酶提取物,混合物利用紫外分光光度计在420 nm处连续测定10 min内混合物的吸光度变化。PPO活性定义为每克样品每分钟内吸光度增加0.01为1个酶活力单位(U)。

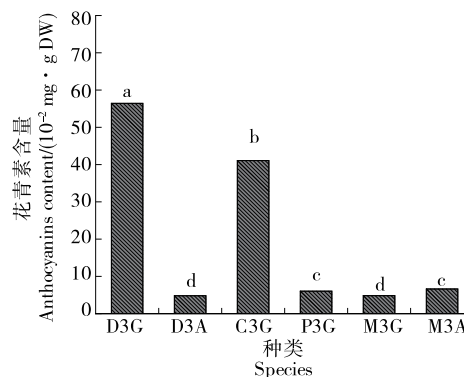
1.3.6 抗氧化能力测定 蓝莓果实的抗氧化能力以DPPH自由基清除能力及ABTS⁺自由基清除能力表示,蓝莓果实抗氧化物质的提取步骤:取10 g蓝莓加入50 mL 80%的甲醇充分匀浆后超声处理20 min。后将其置于10 000×*g*下离心(4℃),收集上清液,重复提取步骤两次后合并上清液,在45℃下对混合溶液进行真空蒸发,残余物重新溶解于80%甲醇中,最终体积为25 mL。测定前将提取液置于-20℃黑暗环境下保存。蓝莓提取物抗氧化能力测定参考具体步骤参考张存艳等^[12]的方法。

1.3.7 数据分析 使用SPSS 18.0进行数据分析,所有数据来自3个独立试验,并表示为平均值±标准差。Tukey检验用于分析平均值之间的差异及所得数据之间的相关性。 $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 蓝莓果实花青素含量

如图1所示,共检测到6种花青素类物质,包括2种飞燕草类、1种矢车菊素类、1种矮牵牛素类及2种锦葵色素类。飞燕草素-3-*O*-半乳糖苷(D3G)及矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷(C3G)为蓝莓中最主要的单体花青素,这也与Lin等^[13]的研究结果一致,其中蓝莓中D3G与C3G的含量分别达到了56.30,40.98 mg/100 g,这2种花青素含量总和占所检测到的所有花青素含量的81.4%,此外还检测到较低含量的飞燕草素-3-*O*-阿拉伯糖苷(D3A)、矮牵牛素-3-*O*-葡萄糖苷(P3G)、锦葵色素-3-*O*-半乳糖苷(M3G)及锦葵色素-3-*O*-阿拉伯糖苷(P3A)。鉴于D3G与C3G在蓝莓果实中含量较高,因此将其作为后续干燥过程花青素类物质降解的主要指标进行测定。



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图1 蓝莓果实中花青素种类及含量

Figure 1 Components and content of anthocyanins in blueberry fruit

2.2 干燥过程蓝莓主要花青素降解

2.2.1 干燥过程中D3G与C3G的保留率 花青素结构不稳定极容易在热加工过程中遭到破坏而降解,使得蓝莓的活性功能下降,不同干燥方式(热风及远红外干燥)及干燥温度(60, 70℃)下蓝莓果实中2种主要花青素(D3G及C3G)的保留率如图2所示。由图2可知,2种干燥方式下花青素降解趋势类似,即在干燥初期花青素含量快速下降,后期下降趋势放缓,与Zhou等^[10]针对桑葚花青素热降解研究结果类似。相同干燥方式下,60℃干燥条件下2种主要的花青素保留率较高,Aramwit等^[14]也报道了富含花青素类的浆果干燥温度应低于70℃。在相同干燥温度下,远红外干燥蓝莓的花青素保留率更高,60℃干燥温度下D3G含量较热风干燥提高了13.9%,70℃干燥温度下D3G含量较热风干燥提高了12.6%;60℃干燥温度下C3G含量较热风干燥提高了13.7%,70℃干燥温度下C3G含量较热风干燥提高了12.4%。产生这一现象的主要原因为相同干燥温度下远红外干燥效率较高,减少了蓝莓果实与氧气的接触时间,减少了花青素类物质的氧化,因此其保留率较高。在蓝

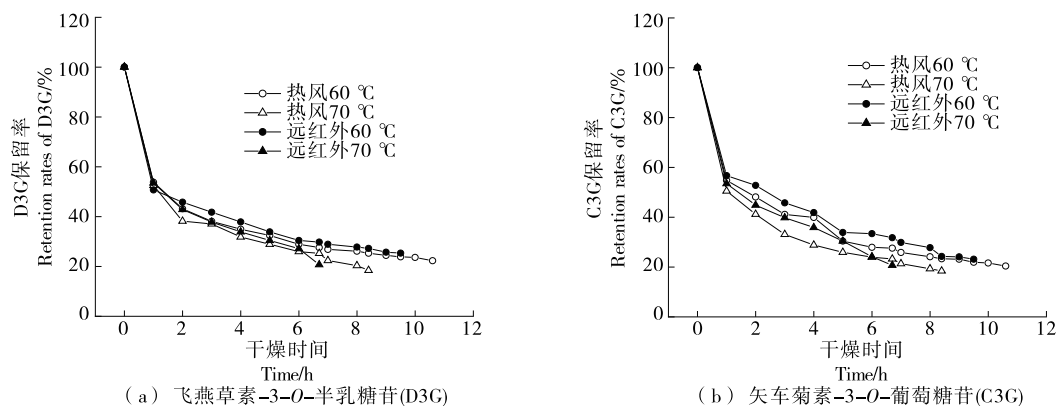


图2 不同干燥条件下蓝莓果实中D3G与C3G的保留率

Figure 2 Retention rates of D3G and C3G in blueberry fruits under different drying conditions

莓的干燥过程中无论是 D3G 还是 C3G 均在远红外 60 ℃ 干燥条件下保留率最高,分别为 25.09%,22.89%。相同条件下 C3G 的保留率略高于 D3G,这可能与其结构稳定性有关^[10]。图 2 结果显示相同干燥方式下,提升干燥温度能够降低 C3G 及 D3G 的保留率,这是由于花青素结构不稳定,遇热易分解导致^[14]。此外,结果显示热风 60 ℃ 干燥条件下 D3G 及 C3G 的保留率高于远红外 70 ℃ 干燥条件,单纯利用干燥速率快慢无法解释其产生的原因,出现这一现象的原因可能是多种因素的集合,即在 70 ℃ 干燥温度下虽然提高了干燥速率,减少了花青素类物质与氧气的接触时间,但温度过高,花青素对热敏感,高温加速了其结构的破坏^[9]。说明在所选的温度梯度内,温度较干燥方式更能影响花青素的保留,这也与 Zhou 等^[10]的研究结果类似,即温度是影响花青素降解的主要因素。

2.2.2 干燥过程中 D3G 与 C3G 的降解动力学模型 为了进一步阐明不同干燥方式下蓝莓中主要花青素的降解特性的差异,计算不同干燥条件下蓝莓果实花青素降解的一阶及二阶模型拟合值,结果见表 1。一阶模型的拟合值 R^2 为 0.668 9~0.886 5,明显低于二阶模型的拟合值 (0.914 5~0.945 6)。因此相较于一阶模型,二阶模型的拟合效果更好,能够更好地描述蓝莓在不同干燥条件下花青素的降解过程。

2.2.3 干燥过程中 D3G 与 C3G 的二阶降解模型参数计算 基于二级动力学模型,经计算得到了不同干燥方式下蓝莓干燥过程中 D3G 及 C3G 降解的动力学速率常数 (k) 和半衰期 ($t_{1/2}$) 值,结果见表 2。由表 2 可知,D3G 和

C3G 降解的 k 值分别为 1.070~1.692,1.104~2.001 L/(mol·h);D3G 和 C3G 降解的 $t_{1/2}$ 值分别为 1.05~1.66,1.22~2.21 h;D3G 和 C3G 均在 60 ℃ 远红外干燥条件下得到最低的 k 值及最高的 $t_{1/2}$ 值;相同干燥方式,70 ℃ 干燥条件下 D3G 及 C3G 的 k 值较高, $t_{1/2}$ 值较低,与 Qiu 等^[15]关于紫薯在不同干制温度下花青素降解规律一致,产生这一现象的主要原因为花青素对热较为敏感,高温促进花青素快速分解。此外,关于蓝莓在固体基质干燥过程中的降解动力学研究较少且集中于液体基质蓝莓汁中花青素的降解,研究^[16]表明在液体基质中花青素降解遵循一阶数学模型,而不是试验所得的二阶模型,产生这一现象的原因可能为固体基质与液体基质中花青素热降解模式存在差异。Patras 等^[17]研究结果表明液体样品中的花青素降解是在等温条件下进行的,但固体或半固体食物(如水果、蔬菜、果渣和谷物)中的花青素降解过程不是等温的。蓝莓在不同干燥方式下不同部位的温度受热不均匀,导致蓝莓不同部位的花色苷降解速率不一致。此外,蓝莓是一个具有细胞结构的固体体系,花青素被包裹在液泡中,这也与花青素在液体中的分散状态不同。随着干燥时间的延长和含水量的降低,细胞结构逐渐被破坏,孔隙率增加,这可能是导致花青素在固体基质中与液体基质中存在降解差异的主要原因^[18]。

2.2.4 干燥过程中 D3G 与 C3G 的降解热力学参数 由表 3 可知,不同干燥方式下蓝莓果实的 E_a 值之间存在显著性差异 ($P<0.05$),并且无论是 D3G 还是 C3G,经远红外干燥后它们的 E_a 值较高(D3G 为 37.4 kJ/mol,C3G 为

表 1 不同干燥方式下 D3G 及 C3G 降解的一阶及二阶模型的 R^2 值

Table 1 The R^2 values obtained for D3G and C3G degradations according to first-and second-order kinetic equations

干燥方式	温度/℃	一阶模型 R^2 值		二阶模型 R^2 值	
		D3G	C3G	D3G	C3G
热风	60	0.856 3	0.821 6	0.914 5	0.916 4
	70	0.836 5	0.802 4	0.945 6	0.924 8
远红外	60	0.886 5	0.702 5	0.921 6	0.930 8
	70	0.793 8	0.668 9	0.942 5	0.935 8

表 2 不同干燥方式下 D3G 及 C3G 降解的二阶模型参数值[†]

Table 2 Parameters of the second-order model for D3G and C3G degradations

干燥方式	温度/℃	$k/(L \cdot mol^{-1} \cdot h^{-1})$		$t_{1/2}/h$	
		D3G	C3G	D3G	C3G
热风	60	1.217±0.04 ^c	1.238±0.02 ^c	1.46±0.02 ^b	1.97±0.02 ^b
	70	1.692±0.05 ^a	2.001±0.03 ^a	1.05±0.01 ^d	1.22±0.03 ^d
远红外	60	1.070±0.02 ^d	1.104±0.04 ^d	1.66±0.03 ^a	2.21±0.03 ^a
	70	1.586±0.01 ^b	1.863±0.02 ^b	1.12±0.02 ^c	1.31±0.03 ^c

† 同列小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 不同干燥方式下 D3G 及 C3G 降解的热力学参数值[†]

Table 3 Thermodynamic parameters for D3G and C3G degradations

干燥方式	温度/℃	$E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$		$\Delta H/(kJ \cdot mol^{-1})$		$\Delta G/(kJ \cdot mol^{-1})$		$\Delta S/(kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	
		D3G	C3G	D3G	C3G	D3G	C3G	D3G	C3G
热风	60	31.3±1.4 ^b	45.6±1.1 ^b	30.8±1.3 ^b	45.1±1.8 ^b	111.1±0.9 ^a	111.7±1.2 ^a	-241.9±8.2 ^a	-200.1±8.3 ^a
	70			30.7±1.6 ^b	45.1±1.1 ^b	113.6±1.2 ^a	114.3±0.9 ^a	-242.3±9.3 ^a	-201.8±8.5 ^a
远红外	60	37.4±1.6 ^a	49.7±1.5 ^a	36.9±1.8 ^a	49.2±1.2 ^a	104.9±1.1 ^b	106.1±0.4 ^b	-204.2±7.2 ^b	-170.9±7.2 ^b
	70			36.8±1.5 ^a	49.2±1.1 ^a	106.8±1.3 ^b	110.2±1.5 ^a	-204.1±8.1 ^b	-177.8±7.6 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

49.7 kJ/mol),表明远红外干燥蓝莓花青素的降解反应更难被激活。如表3所示,所有干燥组的 ΔH 值皆为正数,这验证了花青素降解是吸热反应^[19]。高温为花青素降解提供了更多的能量,加速了其降解产物的形成过程,缩短了到达能量屏障所需的时间。但在此研究中提升干燥温度并不能显著提高反应的 ΔH 值,与 Mercali 等^[20]的研究结果一致。经远红外干燥的D3G及C3G的 ΔH 值明显高于热风干燥组的(D3G组提高了19.8%,C3G组提高了9.1%),表明干燥方式能够显著影响花青素降解的 ΔH 值,这也与 Zhou 等^[10]的研究结果一致。研究中所有干燥组花青素降解的 ΔG 值均为正数且数值较为接近,表明不同干燥方式处理蓝莓其花青素的降解是非自发反应。相同干燥方式下,升高温度对D3G及C3G降解过程的 ΔS 值无明显影响。相同干燥温度下经远红外干燥的蓝莓花青素的 ΔS 值的绝对值显著低于热风干燥组的,表明远红外干燥组中花青素降解产物的结构自由度低于反应前,经远红外干燥后初始体系与热力学平衡之间的距离被缩短,花青素降解的反应性相对较低。这也解释了为何远红外干燥组花青素保留率较高。

2.3 干燥过程蓝莓果实 PPO 酶的变化

选取花青素保留率较高的60℃作为代表性温度探究干燥方式对蓝莓果肉中PPO酶的影响,结果见图3。由图3可知,不同干燥方式下蓝莓果肉中PPO酶活性随干燥时间的变化趋势类似,在干燥时间为3h时远红外干燥PPO酶活性达到最大值,随后迅速下降,而热风干燥组PPO酶活性到达最高点的时间相对延后(4h),出现这一现象的主要原因是前期果实温度升高激活了PPO酶,相同干燥温度下远红外干燥升温快速,因此其酶活到达最高点的时间较短^[15]。Zhou 等^[10]针对桑葚的干燥研究也得到了类似的结论。干燥后期酶活下降的主要原因可能为随着干燥过程的持续,蓝莓果实细胞失水皱缩,PPO酶与氧气接触量降低^[21]。远红外处理组蓝莓干燥4h后PPO酶活总体低于热风处理组,出现这一现象的主要原

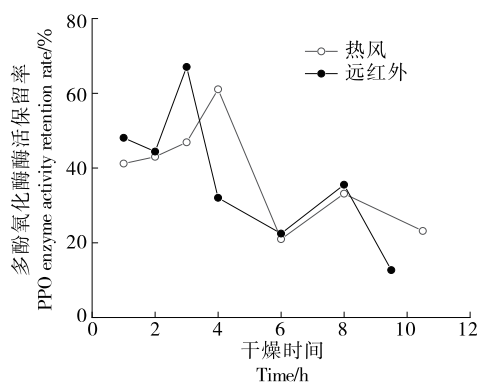


图3 干燥方式对蓝莓中PPO酶活性的影响
Figure 3 Effects of different drying methods on PPO enzyme activity in blueberry

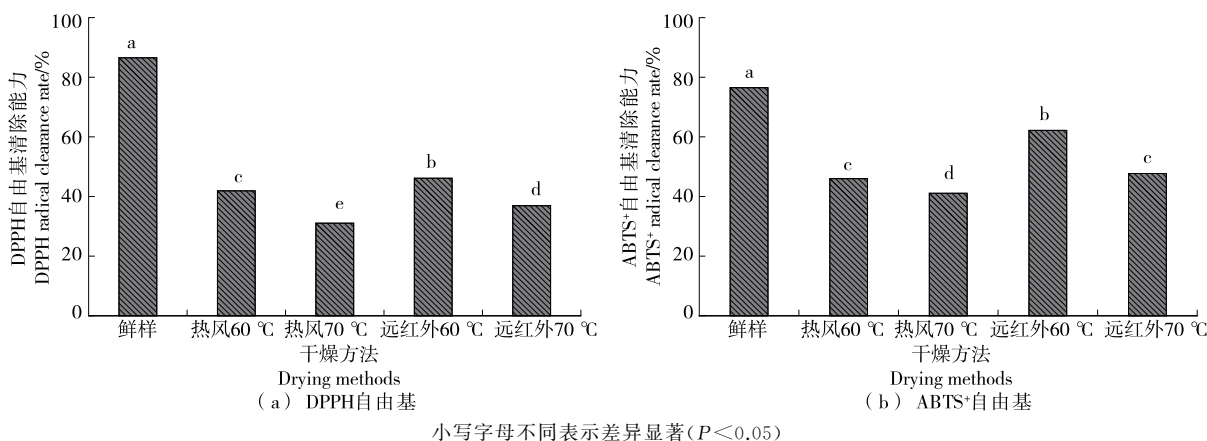
因可能为红外辐射促进了蓝莓细胞内部水分快速排出,导致细胞皱缩较热风干燥更为严重,PPO酶与氧气接触量较低,PPO酶活性降低,这也是其花青素保留率较高的主要原因^[22]。

2.4 不同干燥处理下蓝莓抗氧化能力变化

由图4可知,不同干燥方式处理后蓝莓果实的抗氧化能力显著降低。不同干燥方式对蓝莓果实DPPH及ABTS⁺自由基清除能力的影响趋势类似,均在远红外60℃时观察到了蓝莓干果最高的DPPH及ABTS⁺自由基清除能力,分别为46.0%及62.1%。此外,不同干燥条件下蓝莓果实清除DPPH及ABTS⁺自由基能力与其花青素保留趋势类似。综上,远红外60℃条件下干燥蓝莓果实可能是维持其活性功效的良好条件。

3 结论

蓝莓果实中共检测到6种花青素类物质,其中飞燕草素-3-O-半乳糖苷(D3G)及矢车菊素-3-O-葡萄糖苷(C3G)为蓝莓中最主要的单体花青素,这2种花青素在干燥过程含量迅速下降,60℃远红外干燥条件下2种花青素的保留率最高;动力学模型拟合结果表明二阶模型能



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图4 干燥方式对蓝莓抗氧化能力的影响

Figure 4 Effects of different drying methods on antioxidant capacity of blueberry

够更好地模拟其降解过程。热力学参数分析结果表明,远红外干燥蓝莓花青素降解的降解活化能及焓值更大,熵值更小。2 种干燥方式对多酚氧化酶活性产生了相似的影响,但干燥 4 h 后远红外干燥组酶活总体低于热风干燥组,这可能是花青素保留率较高的主要原因。对于干燥前后蓝莓果实的抗氧化能力进行分析可知远红外 60 ℃ 时观察到了蓝莓干果最高的 DPPH 及 ABTS⁺ 自由基清除能力。综上,相同干燥温度条件下远红外干燥对蓝莓花青素降解动力学、热力学及多酚氧化酶活性具有积极影响,可考虑应用至蓝莓干制加工中,以降低花青素类物质的降解。

参考文献

- [1] TRAN P H L, TRAN T T D. Blueberry supplementation in neuronal health and protective technologies for efficient delivery of blueberry anthocyanins[J]. *Biomolecules*, 2021, 11(1): 102.
- [2] SI X, BI J, CHEN Q, et al. Effect of blueberry anthocyanin-rich extracts on peripheral and hippocampal antioxidant defensiveness: The analysis of the serum fatty acid species and gut microbiota profile[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(12): 3 658-3 666.
- [3] CHENG Z, LIN J, GAO N, et al. Blueberry malvidin-3-galactoside modulated gut microbial dysbiosis and microbial TCA cycle KEGG pathway disrupted in a liver cancer model induced by HepG2 cells [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2020, 9(3): 245-255.
- [4] LIU Z L, XIE L, ZIELINSKA M, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying of blueberry by altering micro-, ultrastructure and water status and distribution[J]. *LWT*, 2021, 142: 111013.
- [5] 金山. 乙醇联合超声波预处理对远红外干燥苹果片干燥特性及品质的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(6): 83-89.
JIN S. Effect of ethanol combined with ultrasonic pretreatment on drying characteristics and quality of far infrared dried apple slices [J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(6): 83-89.
- [6] 陈思奇, 顾苑婷, 王霖岚, 等. 刺梨不同干燥模型建立及综合品质分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 47-54.
CHEN S Q, GU Y T, WANG L L, et al. Drying modeling and comprehensive quality analysis of *Rosa roxburghii* Tratt fruit[J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 47-54.
- [7] ZHOU Y, LONG S, XU Q, et al. Optimization and application of HPLC for simultaneous separation of six well-known major anthocyanins in blueberry [J]. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2021, 51(10): 961-970.
- [8] LI D, LI B, MA Y, et al. Polyphenols, anthocyanins, and flavonoids contents and the antioxidant capacity of various cultivars of highbush and half-high blueberries[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 62: 84-93.
- [9] ZHANG Y, SUN Y, ZHANG H, et al. The degradation rules of anthocyanins from eggplant peel and antioxidant capacity in fortified model food system during the thermal treatments[J]. *Food Bioscience*, 2020, 38: 100701.
- [10] ZHOU M, CHEN Q, BI J, et al. Degradation kinetics of cyanidin 3-O-glucoside and cyanidin 3-O-rutinoside during hot air and vacuum drying in mulberry (*Morus alba* L.) fruit: A comparative study based on solid food system[J]. *Food Chemistry*, 2017, 229: 574-579.
- [11] TEREFE N S, YANG Y H, KNOERZER K, et al. High pressure and thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in strawberry puree [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(1): 52-60.
- [12] 张存艳, 魏蔼玲, 岳茂林, 等. 不同干燥方式对松露多糖含量及其抗氧化活性的影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(12): 214-218.
ZHANG C Y, WEI A L, YUE M L, et al. Effects of different drying methods on polysaccharide content and its antioxidant activity from truffle[J]. *Food Technology*, 2020, 41(12): 214-218.
- [13] LIN Y, HUANG G, ZHANG Q, et al. Ripening affects the physicochemical properties, phytochemicals and antioxidant capacities of two blueberry cultivars[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 162: 111097.
- [14] ARAMWIT P, BANG N, SRICHANA T. The properties and stability of anthocyanins in mulberry fruits [J]. *Food Research International*, 2010, 43(4): 1 093-1 097.
- [15] QIU G, WANG D, SONG X, et al. Degradation kinetics and antioxidant capacity of anthocyanins in air-impingement jet dried purple potato slices[J]. *Food Research International*, 2018, 105: 121-128.
- [16] CASTAGNINI J M, BETORET N, BETORET E, et al. Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 1 289-1 296.
- [17] PATRAS A, BRUNTON N P, O'DONNELL C, et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(1): 3-11.
- [18] TSAMI E, KATSIOTI M. Drying kinetics for some fruits: Predicting of porosity and color during dehydration[J]. *Drying Technology*, 2000, 18(7): 1 559-1 581.
- [19] SILVA N L, CRISPIM J M S, VIEIRA R P. Kinetic and thermodynamic analysis of anthocyanin thermal degradation in acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(4): e13053.
- [20] MERCALI G D, GURAK P D, SCHMITZ F, et al. Evaluation of non-thermal effects of electricity on anthocyanin degradation during ohmic heating of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) juice [J]. *Food Chemistry*, 2015, 171: 200-205.
- [21] CAVALCANTI R N, SANTOS D T, MEIRELES M A A. Non-thermal stabilization mechanisms of anthocyanins in model and food systems—An overview[J]. *Food Research International*, 2011, 44(2): 499-509.
- [22] HUANG D, YANG P, TANG X, et al. Application of infrared radiation in the drying of food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110(5): 765-777.