

切分方式对蓝莓热风干燥特性及品质的影响

楚文靖¹, 郜海燕², 钟华玲¹, 赵 灿¹, 吴永祥¹

(¹黄山学院 生命与环境科学学院 安徽黄山 245041

²浙江省农业科学院食品科学研究所 农业农村部果品采后处理重点实验室
全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室 杭州 310021)

摘要 为提高蓝莓干燥效率及产品品质,研究不同切分方式(整果、1/2 果、1/4 果、果浆)及干燥温度(50,60,70,80 ℃)对蓝莓干燥特性和品质的影响。结果表明:切分处理使蓝莓的干燥时间缩短,干燥速率增加,热风温度越高,干燥时间越短;同一温度下,干燥速率从大到小顺序为果浆>1/4 果>1/2 果>全果。通过模型拟合发现,Page 模型能准确描述蓝莓热风干燥过程中水分的变化。切分能显著降低蓝莓干燥的活化能(E_a),提高有效水分扩散系数(D_{eff})。不同切分方式蓝莓的 E_a 在 40.8587~53.2154 kJ/mol 范围,具体排序为全果(53.2154 kJ/mol)>1/2 果(50.0641 kJ/mol)>1/4 果(44.2528 kJ/mol)>果浆(40.8587 kJ/mol)。相比于全果直接干燥制得的果粉,切分处理能显著提高蓝莓果粉的 L^* 、 a^* 、总酚和花色苷含量,而 DPPH 自由基清除力有所降低。本研究旨在为蓝莓粉生产前的切分处理提供一定的参考依据。

关键词 蓝莓;切分;热风干燥;干燥特性;品质

文章编号 1009-7848(2025)02-0270-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.02.024

蓝莓风味独特,营养丰富,是名贵果品中的重要小浆果,堪称“浆果之王”^[1]。脱水干燥是食品生产加工常用的方法之一,脱水干燥后的蓝莓干制品可长期保藏。然而,蓝莓具有较厚的角质层且蜡质含量高,在一定程度上阻碍了干燥过程蓝莓中水分向表面的转移。有研究表明不同预处理可以提高蓝莓的干燥效率,如李原等^[2]对比打孔和划痕预处理对蓝莓真空冷冻干燥的品质影响,发现打 36 孔和 16 道划痕处理后干燥时间分别减少了 6 h 和 4 h,提高了干燥效率。Munzenmayer 等^[3]研究了二氧化碳激光穿孔对蓝莓冷冻干燥品质的影响,得出扎 9 个孔时,干燥时间显著缩短,蓝莓的破碎率从 53%降至 14%,有效提高了蓝莓的干燥效率和品质。Shi 等^[4]研究了蓝莓体积和蜡质层对干燥速度的影响,发现蓝莓红外干燥速率随蓝莓体积的增大而降低,在 93 ℃下处理 5 s 后能破坏蓝莓表皮蜡质层,使表面通透性增强,蓝莓干燥速率和水分扩散率得到提高。张波等^[5]研究发现切成两半(半切)的葡萄比正常状态的葡萄干燥时间缩短数倍,半切葡萄缩短了干燥时间和能耗。Russo

等^[6]研究发现去除枸杞表面的蜡质,有效扩散系数提高 3~4 倍,有效缩短了干燥时间。

蓝莓蜡质富含熊果酸、齐墩果酸等三萜类化合物^[7-8],具有较强的生理活性。在尽量不减少蜡质的条件下对蓝莓进行处理,提高干燥效率是亟待解决的问题。本试验探究不同切分方式对蓝莓热风干燥特性的影响及,并对干燥过程进行模型拟合,对比不同切分方式和干燥温度下蓝莓的品质特性,以期为蓝莓热风干燥参数的优化及干燥工艺研究和生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蓝莓购于当地蓝莓采摘园,选取大小、成熟度一致,无损伤的新鲜蓝莓为试验材料。

乙醇、Folin-Ciocalteu 试剂、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、磷酸盐缓冲液、盐酸,国药集团化学试剂有限公司,试剂均为国产分析纯级。

1.2 仪器与设备

UV1700PC 型紫外-可见分光光度计,上海奥析科学仪器有限公司;CR-10plus 型手持色差仪,日本柯尼卡美能达公司;DX612C 型定温干燥箱,重庆雅玛拓科技有限公司;80-2 台式电动离心

收稿日期: 2024-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001760)

第一作者: 楚文靖,女,博士,副教授

E-mail: chuwenjing58@126.com

机,金坛市杰瑞尔电器有限公司;SB-5200DTD 型超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 蓝莓的干燥 取新鲜蓝莓,清洗,用不锈钢水果刀对新鲜蓝莓进行切分处理,在蓝莓中间切一刀、横竖分别一刀即得到 1/2 果、1/4 果,不进行切分处理的即为全果,使用破壁机将蓝莓进行破壁处理得到果浆。取 16 份质量均为 200 g 的蓝莓进行切分预处理(整果、1/2 果、1/4 果、果浆),每个处理 4 份,分散于不锈钢烘盘上;分别在干燥温度为 50、60、70、80 °C 的电热恒温鼓风干燥箱中进行干燥,每隔 1 h 测定样品质量,直至样品干燥至恒重。将其进行磨粉,然后将蓝莓粉放置于干燥器中待测品质指标。

1.3.2 干燥特性指标的测定 干燥过程中蓝莓干基水分含量参考《食品安全国家标准 食品中水分的测定》(GB 5009.3-2016) 中的直接干燥法进行测定,计算方法如式(1)所示。

$$C_t(\text{g/g}) = (m_t - m) / m \quad (1)$$

式中: C_t 为 t 时刻蓝莓的干基水分含量, g/g; m_t 为 t 时刻蓝莓的质量, g; m 为蓝莓干燥后的质量, g。

不同干燥时间蓝莓的水分比按式(2)计算。

$$\text{MR}[\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})] = (C_t - C_e) / (C_0 - C_e) \quad (2)$$

式中:MR 为蓝莓的水分比; C_t 为 t 时刻蓝莓的干基水分含量, g/g; C_0 为初始时刻蓝莓的干基水分含量, g/g; C_e 为干燥平衡时蓝莓的干基水分含量, g/g。

干燥速率按式(3)计算。

$$\text{DR}[\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})] = (C_1 - C_2) / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

式中:DR 为蓝莓的干燥速率, g/(g·h); C_1 和 C_2 分别为干燥到 t_1 和 t_2 时刻蓝莓的干基水分含量, g/g。

1.3.3 有效水分扩散系数的计算 有效水分扩散系数(D_{eff})可以通过线性变化后的菲克第二定律来计算,见式(4)。

$$\ln \text{MR} = \ln(8/\pi^2) - (\pi^2 D_{\text{eff}} / 4L^2) t \quad (4)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/s ; L 为物料厚度的一半, m, 即全果、1/2 果、1/4 果的 L 分别是蓝莓的半径、1/2 半径、1/4 半径; t 为干燥时间, s。

1.3.4 活化能的计算 干燥活化能(E_a)可用于衡量物料干燥的难易程度。其计算如式(5)所示。

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - [E_a / R(T + 273.15)] \quad (5)$$

式中: D_0 为扩散常数, m^2/s ; E_a 为干燥活化能, kJ/mol; R 为气体摩尔常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为蓝莓的干燥温度, °C。

1.3.5 干燥动力学模型 本试验采用 Newton、Page、Henderson and Pabis、Wang and Singh、Logarithmic 5 种常见的干燥动力学模型(表 1)对蓝莓干燥时间和水分比的干燥曲线进行拟合,以决定系数(R^2)和残差平方和(RSS)作为评判模型拟合度的指标,以此判断试验数据与 5 种模型预测值的拟合程度,从而确定描述蓝莓热风干燥规律的最优模型。

表 1 5 种干燥模型及其表达式

Table 1 Five drying models and their expressions	
模型名称	模型方程
Newton	$\text{MR} = \exp(-kt)$
Page	$\text{MR} = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$\text{MR} = a \exp(-kt)$
Wang and Singh	$\text{MR} = 1 + at + bt^2$
Logarithmic	$\text{MR} = a \exp(-kt) + c$

1.3.6 色泽测定 用色差仪测定蓝莓粉的色泽,记录明度值 L^* 、红绿值 a^* 、黄蓝值 b^* 。

1.3.7 总酚含量的测定 采用 Folin-Ciocalteu 法测定,具体步骤参考文献[9]。

1.3.8 花色苷含量的测定 采用 pH 示差法测定^[10]蓝莓花色苷含量。

1.3.9 DPPH 自由基清除能力的测定 采用比色法测定^[11]蓝莓 DPPH 自由基清除能力。

1.4 数据统计与分析

试验数据以平均值±标准差表示。用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,采用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平设为 0.05。用 Origin 2020 软件进行模型拟合和图形绘制。

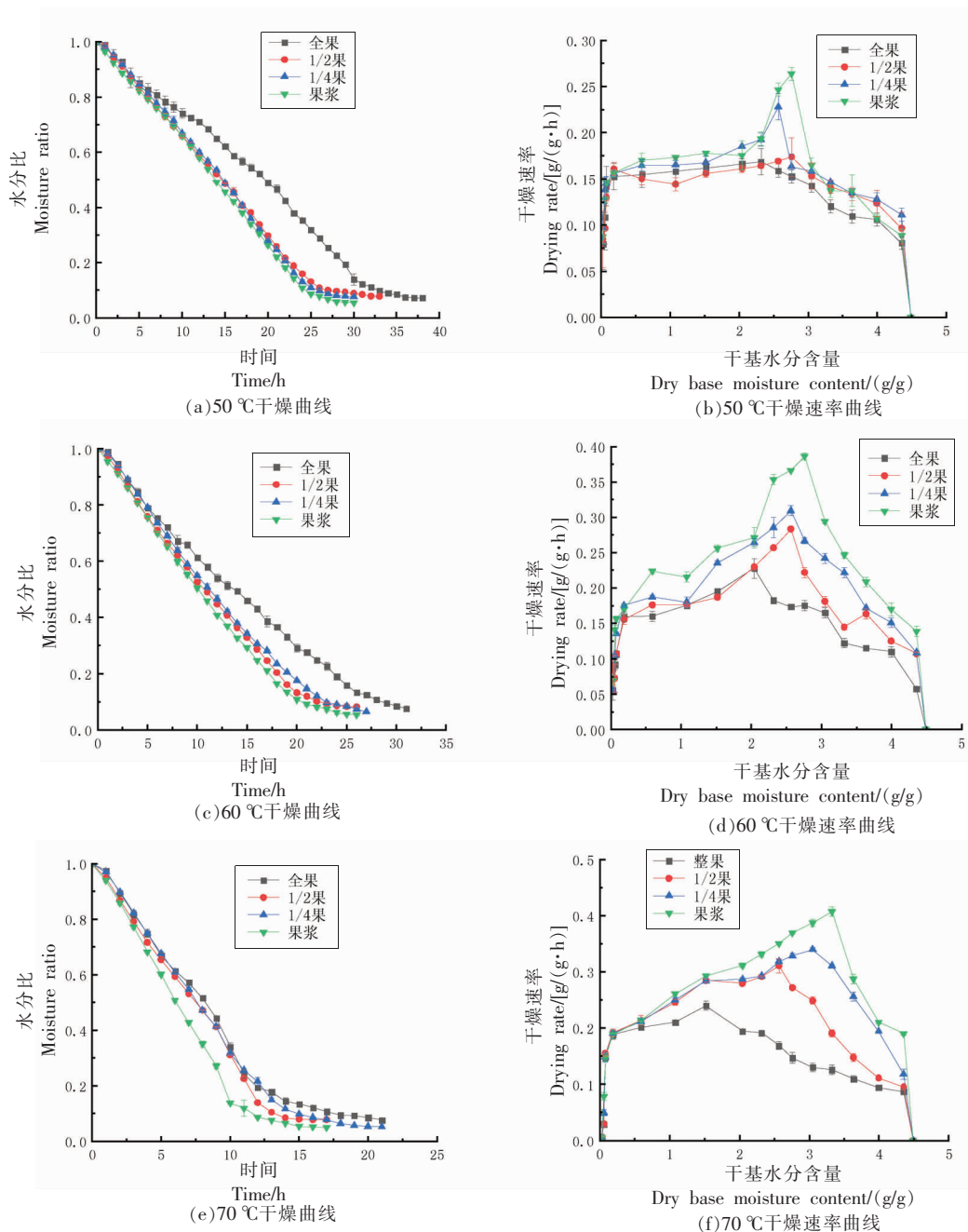
2 结果与讨论

2.1 切分方式对蓝莓干燥特性的影响

不同切分方式的蓝莓在不同干燥温度下的干燥曲线和干燥速率曲线如图 1 所示。从水分比随

时间的变化(图 1a、1c、1e、1g)来看,干燥温度为 50,60 °C 时,全果的干燥时间分别为 35,30 h,明显高于 1/2 果、1/4 果和果浆;70,80 °C 时,全果达到恒重的时间分别为 20,14 h,与其它 3 组相差不大。从干燥速率曲线(图 1b、1d、1f、1h)可以看出,果浆的干燥速率比其它 3 组的高,且随着温度的升高,最大干燥速率增加。50,60,70,80 °C 果浆的最大干燥速率分别为 0.27,0.38,0.40,0.50 g/(g·h)。同一温度下,果浆干燥所需时间最短,是因为热风干燥接触面积大,传热和传质阻力小,脱水干

燥的速率快,干燥过程缩短。干燥速率从大到小顺序为果浆>1/4 果>1/2 果>全果,是因为蓝莓表皮蜡质层的存在,一定程度上阻碍了干燥过程中蓝莓果皮内的水分向外界环境的转移,降低了干燥速率。干燥初期,蓝莓中水分快速向周围空气蒸发,干燥速率快速上升到最大值,随着表面水分减少,水分从表面蒸发到周围空气的速率以及从蓝莓内部迁移到表面的速率也随之降低,进入降速干燥阶段。该过程与香菇^[12]、马铃薯^[13]、枸杞^[14]等干燥特性相似。



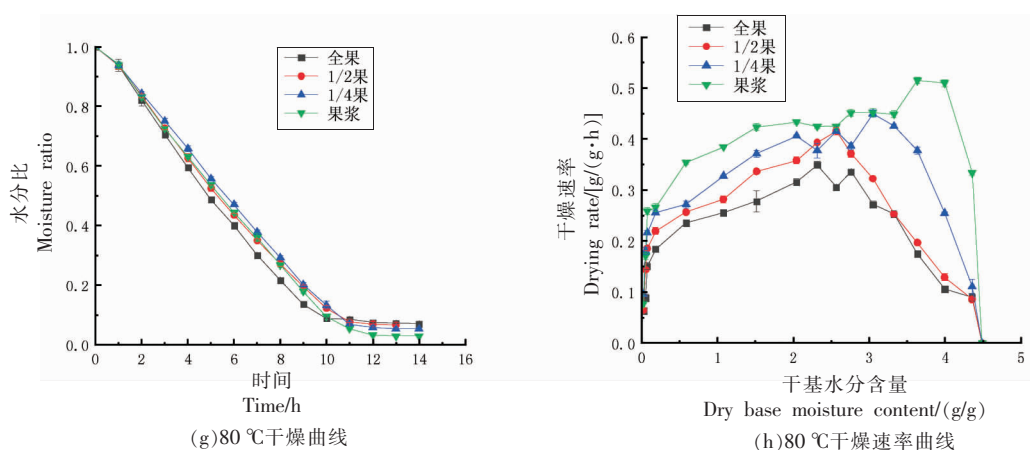


图 1 不同切分方式的蓝莓在不同干燥温度下的干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.1 Drying curve and drying rate curve of blueberry with different cutting methods at different drying temperatures

2.2 蓝莓热风干燥数学模型的建立

不同切分方式和温度下蓝莓热风干燥的水分变化数据与 5 种模型拟合结果见表 2。决定系数 (R^2) 作为检验模型方程与试验数据拟合优度的指标, R^2 ($0 \leq R^2 \leq 1$) 的值越接近 1, 表示拟合度越好, 能够较好地描述蓝莓热风干燥水分变化的过程。残差平方和 (RSS) 反映试验数值偏离回归拟合值的大小, RSS 越小, 表明试验数据与模型方程越接近, 拟合越理想。通过比较分析, Page 模型与蓝莓热风干燥试验数据的拟合程度最优, 在各切分方式和温度下 Page 模型的 R^2 均大于 0.97, RSS 均在 0.065 以下。Newton, Henderson and Pabis、Wang and Singh 模型拟合度次之, 这 3 种模型的 R^2 虽然大体上与 1 很接近, 但有些切分方式和温度下 3 个模型 $R^2 < 0.90$, $RSS > 0.201$, 说明在拟合度和偏离度上 3 个模型都不及 Page 模型。Logarithmic 模型的拟合程度较差, R^2 值与 1 相差较大, 且 RSS 数值较大, 不适合用来描述蓝莓干燥过程。由此可见, Page 模型是描述蓝莓热风干燥水分变化过程的最优模型, 在橘皮^[15]、红枣^[16]等干燥过程中也有类似的结果。

由表 2 中 Page 模型的拟合结果可以看出, 相同切分方式下, 参数 n 和 k 的数值随热风干燥温度的变化而呈现较明显的规律性变化, 随着温度的升高, n 和 k 值增大, 而且 k 值的增幅较 n 值明显, 表明温度对 k 值的影响更显著。这与臭鳊鱼热风干燥^[17]结果相一致。同一干燥温度下, 切分方式对 n 和 k 值的影响较小, n 和 k 值无明显变化规

律。由此可见, Page 模型中的参数 n 和 k 值与干燥温度有关, 而与切分方式关系不大。

2.3 蓝莓热风干燥模型的验证

为检验 Page 模型的准确性, 采用 Page 模型对蓝莓热风干燥过程进行验证, 干燥温度 70 °C、1/2 果的蓝莓水分比拟合结果见图 2。由图 2 可知, 试验值与模型预测值相近, 吻合度较好, 说明 Page 模型能够较好地反映蓝莓热风干燥过程中水分比的变化规律。

2.4 蓝莓干燥过程的有效水分扩散系数和活化能

有效水分扩散系数 (D_{eff}) 反映物料在一定干燥条件下的脱水能力。 D_{eff} 与干燥温度、物料的含水率及状态等因素有关。干燥活化能 (E_a) 表示物料干燥过程中脱除单位摩尔的水分所需要的启动能量, 活化能越大表明越难干燥。由表 3 可知, 在较低的干燥温度下 (50 °C 和 60 °C), 切分方式对蓝莓的 D_{eff} 影响不明显。然而, 在较高的温度下 (70 °C 和 80 °C), 切分能显著提高蓝莓的 D_{eff} 。70 °C 时, 全果的 D_{eff} 为 $2.9873 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 3 种切分方式蓝莓 (1/2 果、1/4 果、果浆) 的 D_{eff} 均为全果 D_{eff} 的约 1.4 倍, 3 种切分方式之间 D_{eff} 差别不大。同一切分方式, D_{eff} 随干燥温度的升高而升高。

由表 3 可知, 蓝莓的 E_a 在 40.8587~53.2154 kJ/mol 范围, 全果干燥的 E_a 最高。切分方式对蓝莓的 E_a 有显著影响, 随着切面增多, 活化能降低, 其中果浆的 E_a 最低。同一样品, 随着干燥温度的升高, D_{eff} 增大, 水分迁移阻碍减少。综上所述, 蓝

表 2 不同切分方式和温度下蓝莓热风干燥的 5 种模型拟合结果

Table 2 The fitting results of five models of blueberry under different cutting methods and hot air temperature

切分方式	Newton 模型					Page 模型					Henderson and Pabis 模型					Wang and Singh 模型					Logaritimic 模型				
	R^2	RSS	n	k	R^2	RSS	a	k	R^2	RSS	a	b	R^2	RSS	a	k	R^2	RSS	a	k	c	R^2	RSS		
整果	50	0.0282	0.9897	0.1012	1.3978	0.0042	0.9702	0.0133	1.0136	0.0299	0.9941	0.1431	-0.0263	1.5256	0.9902	0.0011	0.8614	0.0365	0.1539	0.8936	6.2980				
	60	0.0473	0.9895	0.0029	1.3867	0.0211	0.9743	0.0049	1.0249	0.0506	0.9955	0.2011	-0.0411	2.7734	0.9942	0.0015	1.4364	0.0328	-0.4186	0.7996	8.9257				
	70	0.1003	0.8679	0.1378	1.4539	0.0301	0.9969	0.0058	1.0959	0.1139	0.9794	0.1154	-0.0456	-0.0025	0.9782	0.0208	1.5327	1.3981	-5.3031	0.8561	0.3567				
1/2 果	80	0.1712	0.9389	0.0867	1.5532	0.0681	0.9804	0.0046	1.1036	0.1891	0.9495	0.0657	-0.1153	0.0025	0.9952	1.0062	1.9069	0.0676	-0.8747	0.6953	0.0055				
	50	0.0413	0.9885	0.3026	1.2635	0.0236	0.9947	0.0645	1.0223	0.0442	0.9946	0.0011	-0.0337	-9.0671	0.9985	3.0516	7.1742	0.0050	-6.1657	0.7991	1.6427				
	60	0.0612	0.9870	0.2353	1.2763	0.0346	0.9973	0.0075	1.0328	0.0657	0.9937	0.1353	-0.0500	3.0612	0.9977	8.3745	2.1847	0.0251	-1.1705	0.7986	4.6406				
1/4 果	70	0.1026	0.9383	0.0553	1.3611	0.0436	0.9845	0.0369	1.0719	0.1133	0.8478	0.4356	-0.0636	-5.6049	0.9969	0.0025	1.6245	1.3321	-7.1247	0.8955	6.0324				
	80	0.1555	0.9447	0.0726	1.4898	0.0653	0.9891	0.0097	1.0989	0.1719	0.9123	0.0527	-0.1052	0.0019	0.9966	0.0041	2.0680	0.0566	-1.0383	0.9972	0.0031				
	50	0.0391	0.8825	0.1234	1.2403	0.0234	0.9998	0.0422	1.0248	0.0423	0.9903	0.0191	-0.0297	-3.5057	0.9992	1.6333	6.2802	4.9696	-6.8268	0.8989	1.9839				
果浆	60	0.0571	0.8701	0.0122	1.4100	0.0240	0.9975	0.0025	1.0475	0.0634	0.9841	0.1932	-0.0407	-4.5198	0.9962	0.0014	5.8722	8.0938	-5.7701	0.8976	8.0675				
	70	0.0971	0.9227	0.0597	1.5238	0.0352	0.9896	0.0049	1.0830	0.1097	0.9380	0.0435	-0.0538	-0.0017	0.9959	0.2846	2.8954	2.5308	-2.8851	0.8990	0.6178				
	80	0.1487	0.9275	0.0977	1.5465	0.0568	0.9977	0.0314	1.1074	0.1660	0.9404	0.0736	-0.0935	8.1758	0.8977	0.0396	3.3721	0.0304	-2.3465	0.9975	0.0028				
果浆	50	0.0423	0.8940	0.0126	1.0368	0.0396	0.9959	0.0311	1.0066	0.0432	0.9941	0.1137	-0.0371	2.1262	0.9981	3.7056	9.1302	0.0038	-8.1372	0.7984	2.7377				
	60	0.0661	0.8907	0.0883	1.1816	0.0451	0.9964	0.0025	1.0354	0.0709	0.9870	0.0054	-0.0507	6.5085	0.9993	2.6303	7.5103	0.0069	-6.5049	0.6989	2.0876				
	70	0.1245	0.9291	0.0584	1.4135	0.0595	0.9799	0.0057	1.0799	0.1384	0.9393	0.0449	-0.0733	-0.0013	0.9975	0.0019	1.8836	4.5955	-1.8734	0.8952	0.3141				
80	0.1585	0.9262	0.1041	1.5196	0.0628	0.9708	0.0263	1.1086	0.1764	0.9381	0.0801	-0.1003	0.0012	0.9971	0.0038	2.9217	0.0374	-1.8967	0.9975	0.0028					

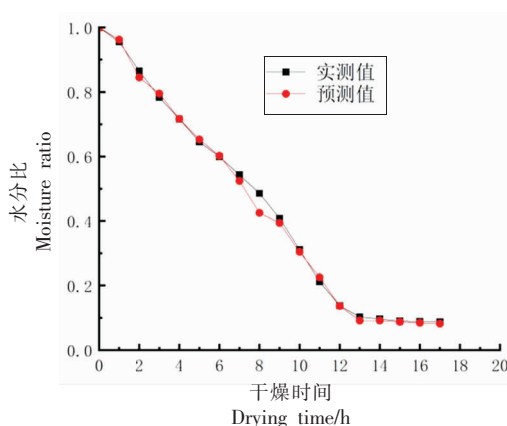


图 2 Page 模型预测值与实测值的水分比

Fig.2 Moisture ratio between the predicted value and measured value of Page model

表 3 干燥过程中蓝莓的 D_{eff} 和 E_a

Table 3 Moisture effective diffusion coefficients and activation energy during drying of blueberry

切分方式	温度/°C	D_{eff}			E_a	
		$R^2(t-\ln\text{MR})$	$K_0(\times 10^{-4})$	$D_{\text{eff}}(10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$	$R^2(1/(T+273.15)-\ln D_{\text{eff}})$	$E_d(\text{kJ/mol})$
全果	50	0.9966	-0.0300	1.1456	0.9841	53.2154
	60	0.9974	-0.0509	2.7375		
	70	0.9475	-0.1256	2.9873		
	80	0.9725	-0.3276	4.6379		
1/2 果	50	0.9947	-0.0466	1.1684	0.9678	50.0641
	60	0.9948	-0.0677	2.3346		
	70	0.9620	-0.1281	4.2485		
	80	0.9024	-0.2560	6.1735		
1/4 果	50	0.9903	-0.0455	1.2459	0.9829	44.2528
	60	0.9866	-0.0666	2.4988		
	70	0.9865	-0.1366	4.1473		
	80	0.9470	-0.2740	6.0768		
果浆	50	0.9912	-0.0462	1.6671	0.9894	40.8587
	60	0.9889	-0.0722	2.4307		
	70	0.9578	-0.1828	4.2111		
	80	0.9445	-0.2666	6.5848		

莓干燥前的切分处理能显著降低 E_a , 增加 70 °C 和 80 °C 的 D_{eff} , 使物料越容易干燥。

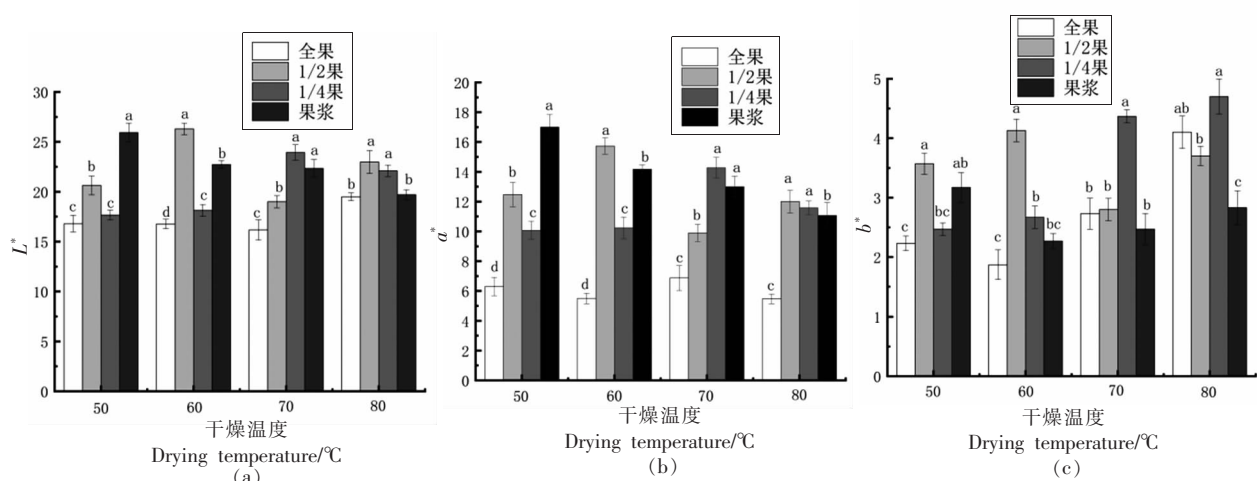
2.5 切分方式对蓝莓粉色泽的影响

色泽是影响蓝莓产品感官品质的重要因素之一。由图 3 可知, 各温度下, 切分处理得到的果粉比全果粉都有相对较高的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。50, 60, 70 °C 干燥条件下, 各切分处理得到的蓝莓粉 L^* 、 a^* 均显著高于全果粉 ($P < 0.05$), 说明相比于全果, 蓝莓切分处理能显著提高果粉的亮度和红色。在 80 °C 下, 果浆粉 a^* 值较其它温度小, 可能是由于高温引

起色素的降解, 从而导致色泽变化较大^[18-19]。

2.6 切分方式对蓝莓粉总酚和花色苷含量的影响

由图 4 可知, 相比于全果直接干燥制得的果粉, 其它 3 种切分处理均能显著地提高蓝莓粉的总酚和花色苷含量 ($P < 0.05$), 可能因为切分处理使蓝莓的干燥时间缩短, 减少了高温对总酚和花色苷的破坏时间。60, 70, 80 °C 下果浆粉的总酚含量最高, 可能是因为细胞内的酚酸游离出导致测得的总酚含量较高^[20], 较低温度 (50 °C) 干燥时多



注:同一温度下不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

图3 不同切分方式的蓝莓在不同干燥温度下的色泽

Fig.3 Color of blueberries with different cutting methods at different drying temperatures

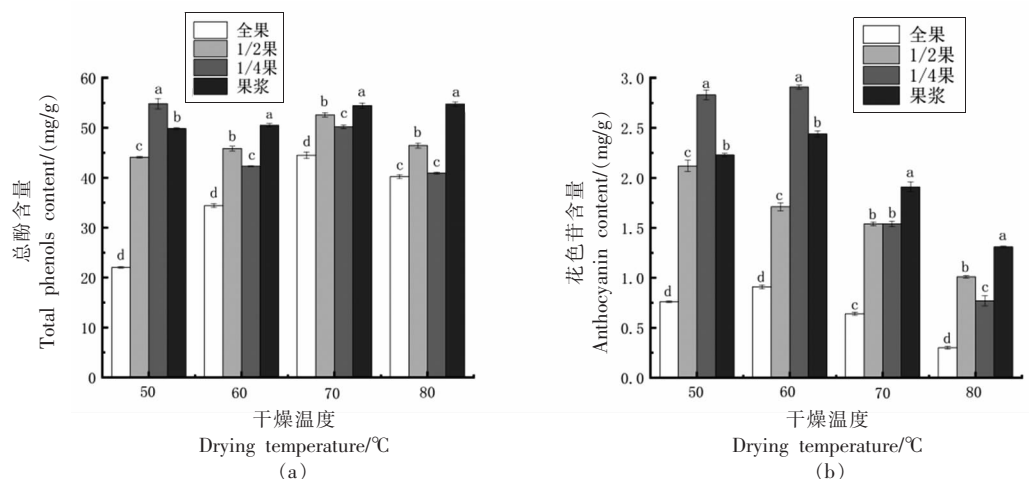


图4 不同切分方式的蓝莓在不同干燥温度下的总酚和花色苷含量

Fig.4 Total phenol and anthocyanin content of blueberries with different cutting methods at different temperatures

酚氧化酶未完全失活,导致酚类物质分解较多。在80 °C干燥过程中,总酚含量较70 °C低,可能因为在高温下酚类物质发生分解、聚合等反应从而总酚含量降低^[21]。50,60 °C下1/4果粉花色苷含量最高,而随着温度的升高花色苷含量呈现下降趋势,70,80 °C下的花色苷含量比50,60 °C下的花色苷含量低,这可能与高温破坏花色苷物质,导致含量降低有关^[22]。

2.7 切分方式对蓝莓粉 DPPH 自由基清除能力的影响

由图5可知,全果直接干燥制得的蓝莓粉 DPPH 自由基清除力显著高于其它3种切分处理

($P < 0.05$),果浆组的 DPPH 自由基清除力最低。DPPH 自由基清除力是抗氧化能力的主要指标之一,除了跟物料的总酚和花色苷含量有关外,还和其它抗氧化物质的种类和含量有关。蓝莓全果的蜡质层和果皮保留较完整,生理活性物质含量较高,这或许是其 DPPH 自由基清除力较高的原因。

3 结论

本试验通过研究不同切分方式和干燥温度对蓝莓干燥特性和品质影响可知,切分处理使蓝莓的干燥时间缩短,干燥速率增加;同一温度下,干燥速率从大到小顺序为果浆>1/4果>1/2果>全

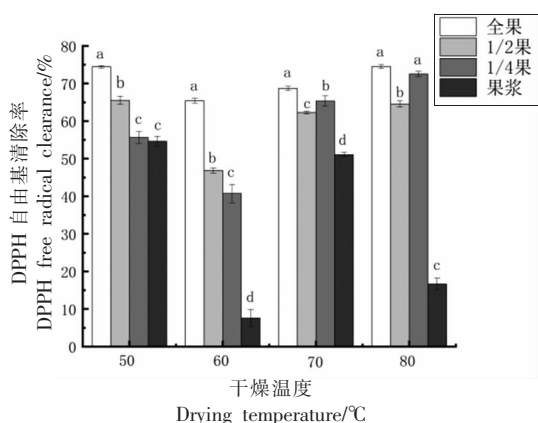


图 5 不同切分方式的蓝莓在不同干燥温度下的 DPPH 自由基清除率

Fig.5 DPPH free radical clearance of blueberries with different cutting methods at different temperatures

果。将不同样品的热风干燥数据与 Newton、Page、Henderson and Pabis、Wang and Singh、Logarithmic 5 种经验模型拟合发现, Page 模型最适合用于预测不同切分方式和干燥温度下蓝莓热风干燥过程的水分变化, Page 模型中的参数 n 和 k 值与干燥温度有关, 而与切分方式关系不大。切分能显著提高蓝莓 70, 80 °C 干燥的 D_{eff} ; 同一切分方式, D_{eff} 随干燥温度的升高而升高。切分能降低蓝莓 E_a , 不同切分方式蓝莓的 E_a 在 40.8587~53.2154 kJ/mol 范围, 从大到小顺序为全果>1/2 果>1/4 果>果浆。相比于全果直接干燥制得的果粉, 切分处理能显著提高蓝莓果粉的亮度、红色、总酚和花色苷含量, 降低 DPPH 自由基清除力。

参 考 文 献

- [1] DUAN Y M, TARAFDAR A, CHAURASIA D, et al. Blueberry fruit valorization and valuable constituents: A review[J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 381: 109890.
- [2] 李原, 毕金峰, 马有川, 等. 打孔和划痕预处理对蓝莓粒真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(2): 175-186.
LI Y, BI J F, MA Y C, et al. Effects of punching and cutting epidermis pretreatment on freeze drying characteristics and qualities of blueberry[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(2): 175-186.
- [3] MUNZENMAYER P, ULLOA J, PINTO M, et al. Freeze-drying of blueberries: Effects of carbon dioxide (CO_2) laser perforation as skin pretreatment to improve mass transfer, primary drying time, and quality[J]. Foods, 2020, 9(2): 211.
- [4] SHI J, PAN Z, MCHUGH T H, et al. Effect of berry size and sodium hydroxide pretreatment on the drying characteristics of blueberries under infrared radiation heating[J]. Journal of Food Science, 2009, 73(6): 259-265.
- [5] 张波, 姬长英, 徐伟悦, 等. 不同预处理下无核厚皮葡萄热泵式分段干燥特性及品质比较[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1144-1152.
ZHANG B, JI C Y, XU W Y, et al. Heat-pump stage-changed drying characteristics and product quality in comparison for seedless thick-skinned grapes under different pretreatment conditions [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(5): 1144-1152.
- [6] RUSSO P, ADILETTA G, DI MATTEO M, et al. The effect of abrasive pretreatment on the drying kinetics and phenolic compounds in goji berries (*Lycium barbarum* L.) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(12): e14933.
- [7] CHU W J, GAO H Y, CAO S F, et al. Composition and morphology of cuticular wax in blueberry (*Vaccinium* spp.) fruits[J]. Food Chemistry, 2017, 219: 436-442.
- [8] CHU W J, GAO H Y, CHEN H J, et al. Changes in cuticular wax composition of two blueberry cultivars during fruit ripening and postharvest cold storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 2870-2876.
- [9] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 150-155.
CHU W J, SHENG D M, ZHANG N, et al. Hot-air drying of red-fleshed pitaya: Kinetic modelling and quality changes [J]. Food Science, 2019, 40(17): 150-155.
- [10] CHU W J, GAO H Y, CHEN H J, et al. Effects of cuticular wax on the postharvest quality of blueberry fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 68-74.
- [11] 楚文靖, 叶双双, 张付龙, 等. 超声处理对蓝莓汁杀菌效果和品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020,

- 46(13): 203-208.
- CHU W J, YE S S, ZHANG F L, et al. Effects of ultrasonic treatment on the sterilization and quality of blueberry juice[J]. Food Fermentation and Industry, 2020, 46(13): 203-208.
- [12] 杨伊琳, 丁俊雄, 吴小华, 等. 香菇热风干燥特性及动力学模型[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 135-144.
- YANG Y L, DING J X, WU X H, et al. Characteristics of *Lentinus edodes* hot-air drying and its kinetic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 135-144.
- [13] 刘海波, 王佳倩, 李耀, 等. 马铃薯片热泵干燥动力学研究及其干燥工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 106-115.
- LIU H B, WANG J Q, LI Y, et al. Study on drying kinetics of potato chips by heat pump and optimization of drying process[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 106-115.
- [14] 赵丹丹, 陈冬, 彭郁, 等. 枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析[J]. 中国食品学报, 2018, 18(3): 114-124.
- ZHAO D D, CHEN D, PENG Y, et al. Dynamic model and quality analysis of *Lycium barbarum* during hot air drying[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(3): 114-124.
- [15] 牛坡, 张良, 王攀, 等. 橘皮的干燥特性研究与品质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(20): 205-214.
- NIU P, ZHANG G, WANG P, et al. Study on drying characteristics and quality of orange peel[J]. Food Fermentation and Industry, 2023, 49(20): 205-214.
- [16] 王立霞, 兰昊, 郑倩雨, 等. 红枣气体射流冲击干燥特性及干燥模[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(2): 131-140.
- WANG L X, LAN H, ZHENG Q Y, et al. Drying characteristics and model of jujube in air jet impingement[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(2): 131-140.
- [17] 吴永祥, 俞昌浩, 刘刚, 等. 黄山臭鳊鱼热风干燥动力学及其品质特性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(8): 286-295.
- WU Y X, YU C H, LIU G, et al. Hot-air drying kinetics and quality characteristics of Huangshan stinky mandarin fish[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(8): 286-295.
- [18] 金鑫, 段续, 任广跃, 等. 不同干燥方式对无花果干燥特性及品质的影响 [J/OL]. 食品与发酵工业, (2023-06-06)[2023-11-08]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7fc2yiS_nyD4fTDZjN4QsvyaVITZJ5t8x2vPJqXVyuUtD97xjYegq6gAy5POtC4DZ6PNFbRbGnNf71YCLIZtE9aCozztf-WnR-zOIygC4Zsa9Kin_VAKwFmH7EwRJHDb7Ifxg_tmVUI_sKNYhC4J8td56eSDJ0tQw&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG.
- JIN X, DUAN X, REN G Y, et al. Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of figs [J/OL]. Food Fermentation and Industry, (2023-06-06)[2023-11-08]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7fc2yiS_nyD4fTDZjN4QsvyaVITZJ5t8x2vPJqXVyuUtD97xjYegq6gAy5POtC4DZ6PNFbRbGnNf71YCLIZtE9aCozztf-WnR-zOIygC4Zsa9Kin_VAKwFmH7EwRJHDb7Ifxg_tmVUI_sKNYhC4J8td56eSDJ0tQw&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG.
- [19] 刘贵阁, 乔勇进, 陈冰洁, 等. 不同干燥方式对黄桃果粉品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(10): 2456-2464.
- LIU G G, QIAO Y J, CHEN B J, et al. Effect of drying methods quality of yellow peach powder[J]. Zhejiang Agricultural Journal, 2023, 35(10): 2456-2464.
- [20] 岳天义, 杨萍, 许青莲, 等. 不同干燥方式对茄子理化性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(23): 48-54.
- YUE T Y, YANG P, XU Q L, et al. Effects of different drying methods on physicochemical properties of eggplant[J]. Food Research And Development, 2022, 43(23): 48-54.
- [21] 袁林, 梁旭娟, 程瑞华, 等. 高静压和热预处理对真空冷冻干燥重组果蔬块品质的影响[J/OL]. 食品科学, (2023-09-25)[2023-11-08]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7fc2yiS_nyBhULVUQP4a-CfSgel0WoHmhbQCs9jxC_0fxyLL100ZLXGZhyDIYWSJSL2Pvy4tGpWGMdGeGm4GqMS8MU-tEk0xn0byxeYemn0Xjh3VN9neMnZFKSe7v7FDG1iGjh5ewFtFWpiJDo-JpFHJ1znwftFN&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG.
- YUAN L, LIANG X J, CHENG R H, et al. Effect

of high hydrostatic pressure and thermal pre-treatment on the quality of vacuum freeze-dried reconstituted fruit and vegetable cubes[J]. Food Science, (2023 -09 -25) [2023 -11 -08]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7fc2yiS_nyBhULVUQPb4a-CfSgel0WoHmhbQCs9jxC_0fxyLL100ZLXGZhyDIYWSJSL2Pvy4tGPwGMDGeGm4GqMS8MU-tEk0xn0byxeYe

mn0Xjh3VN9neMnZFKSe7v7FDG1iGjh5cwFtFWpiJDo-JpFHJ1zwnwTFN&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG.

[22] WU W L, XIAO G S, YU Y S, et al. Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice[J]. Food Control, 2021, 130: 108293.

Effects of Cutting Method on Hot-air Drying Characteristics and Quality of Blueberry

CHU Wenjing¹, GAO Haiyan², ZHONG Hualing¹, ZHAO Can¹, WU Yongxiang¹

(¹College of Life and Environment Sciences, Huangshan University, Huangshan 245041, Anhui

²Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Post-harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Food Logistic and Processing, Hangzhou 310021)

Abstract In order to improve the drying efficiency and product quality of blueberries, the influence of different cutting methods (whole fruit, 1/2 fruit, 1/4 fruit and fruit pulp) and drying temperature (50, 60, 70, 80 °C) on the drying characteristics and quality of blueberries were studied. The results showed that the cutting treatment shortened the drying time and increased the drying rate of blueberry, and the higher the hot air temperature, the shorter the drying time. At the same temperature, the order of drying rate was pulp > 1/4 fruit > 1/2 fruit > whole fruit. Through the model fitting, it was found that the Page model could accurately describe the moisture change of blueberry during hot air drying. Cutting could significantly reduce the activation energy (E_a) of blueberry drying and increase the effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}). The E_a of blueberry with different cutting methods ranged from 40.8587 kJ/mol to 53.2154 kJ/mol, and the order of E_a was whole fruit (53.2154 kJ/mol) > 1/2 fruit (50.0641 kJ/mol) > 1/4 fruit (44.2528 kJ/mol) > pulp (40.8587 kJ/mol). Compared with the fruit powder prepared by drying of whole fruit, cutting treatment could significantly increase values of L^* , a^* , the contents total phenols and anthocyanins in blueberry fruit powder, however, the DPPH free radical scavenging ability is reduced. The purpose of this study was to provide some reference for the cutting treatment of blueberry powder production.

Keywords blueberry; cutting; hot-air drying; drying characteristics; quality