doi：10.12301/spxb202200460 文章编号：2095-6002(2023)02-0175-12
引用格式：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 Yuan, BI Jinfeng, MA Youchuan, 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.

# 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

李 原， 毕金峰， 马有川， 冯舒涵， 郭玉霞， 易建勇*
（中国农业科学院 农产品加工研究所/农业农村部农产品加工综合性重点实验室，北京 100193）

**摘 要：**真空冷冻干燥能够较好地保留蓝莓中花色苷、维生素等营养功能物质，但蓝莓内部水分在真空冷冻干燥过程中难以透过表皮的致密蜡质层向外扩散，进而引发结构塌陷，导致产品存在表皮皱缩、空心、汁液流失等严重缺陷，限制了真空冷冻干燥技术在蓝莓干燥领域的应用。为改善真空冷冻干燥后的蓝莓品质，研究了 $Na_2CO_3$ 溶液浸泡时间（3、10、30 min）、削皮部位（顶部、底部、顶部和底部）、打孔数目（12、14、36 孔）和划痕数目（2、8、16 道）对真空冷冻干燥蓝莓干燥特性、吸湿性及质构、色泽和香气等感官品质的影响。结果表明：与未预处理的真空冷冻干燥蓝莓相比，打孔和划痕预处理均可有效避免蓝莓组织塌陷和皱缩，但 $Na_2CO_3$ 溶液浸泡和削皮处理组品质较差；打孔（36 孔）和划痕（16 道）处理的真空冷冻干燥蓝莓外观及其微观结构保持完整，干燥时间分别减少 6 h 和 4 h，脆度分别提高 31.55% 和 4.06%，外观及内部结构均无明显皱缩和塌陷，色泽和香气接近新鲜蓝莓。研究旨在为真空冷冻干燥技术制备高品质蓝莓整果粒提供一定的参考依据。

**关键词：**真空冷冻干燥；蓝莓；预处理；质构；多孔结构
**中图分类号：**TS255.42 **文献标志码：**A

蓝莓（*Vaccinium corymbosum* L.）是杜鹃花科（Ericaceae）越橘属（*Vaccinium*）植物[1]。2020 年底，我国蓝莓栽培面积 6.64 万 ha，总产量 34.72 万 t，全球排名第 5[2]。蓝莓富含花色苷（1 297.3～5 281.2 mg/kg）、多酚等功能成分，具有保护视力、抗氧化等功能[3-4]。蓝莓果实柔软多汁，采后不易保存，易受到机械损伤或微生物侵染，产生软化、腐烂、品质劣变等问题，限制了蓝莓的货架期[5]。

真空冷冻干燥（freeze drying, FD）利用低温低压下水分由固态直接升华原理实现干燥，产品营养物质保留率较高[6-8]，保质期较长[9]。近年来，FD 技术被广泛用于加工猕猴桃[10]、蓝莓[11]、草莓[12]、蔓越莓[13]等高价值水果，产品深受消费者青睐。蓝莓表皮较厚，并且存在一层白色蜡质[14]，FD 过程中，蓝莓表皮阻碍了内部水蒸气迁移，造成内部组织塌陷、表皮皱缩、汁液外流等现象，影响 FD 蓝莓的感官品质和商品价值[15]。

提高蓝莓表皮的通透性包括穿孔、超声波、碱液浸泡等预处理手段。Chen 等[16]采用 $CO_2$ 激光穿孔、超声波和冻融处理，发现可以使干燥时间减少1～3 h，皱缩

收稿日期：2022－04－29
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD1600700）；中国农业科学院科技创新工程项目（CAAS-ASTIP-2020-IFST-04）。
Foundation: National Key Research and Development Program of China (2022YFD1600700); Agricultural Science and Technology Innovation Program, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-2020-IFST-04).
第一作者：李 原，男，硕士研究生，研究方向为果蔬产品加工。
* 通信作者：易建勇，男，副研究员，博士，主要从事果蔬干制品品质调控与营养健康方面的研究。

率从约 57% 减少到 25%。Pawar 等[17]对葡萄采用磨皮、1.5% 油酸乙酯和 2.5% 碳酸钾溶液浸泡预处理技术,发现较化学预处理,磨皮处理后葡萄干燥速率提高 27.77%。虽然穿孔、磨皮等物理处理和碱、亚硝酸盐溶液浸泡等化学处理都能提高干燥速率,但相比化学处理,物理处理不仅能有效提升干燥效率,节省干燥时间,还能避免化学残留[18]。国内外研究报道了多种预处理手段,涉及的蓝莓品种和实验条件存在差异,无法横向对比预处理方式,同时对蓝莓的硬度、脆度和吸湿性等感官理化性质的影响尚无系统研究。

本研究采用物理和化学预处理方式,探究打孔、削皮、划痕和 $Na_2CO_3$ 溶液浸泡对 FD 蓝莓干燥特性、质构、水分状态、微观结构和风味色泽的影响,旨在提出较好的预处理方式,为制备高品质 FD 果蔬产品提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

蓝莓,北京市幸福荣耀超市。无水碳酸钠、氯化钠,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

ULT1386-3-V41 型超低温冰箱,赛默飞世尔科技(中国)有限公司; BLK190613PD 型真空冷冻干燥机,江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;DHG-9140A 型电热鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;AW1000T 型水分活度测定仪,昌琨实业上海有限公司;SU8010 型扫描电子显微镜,日本日立公司;TA.HD plus 型物性测试仪,英国 Stable Micro System 公司;Nikon D700 型数码相机,日本 Nikon 公司;1.5.5.0 型电子眼色彩分析系统,美国 Lens Eye-NET 公司;PEN3.5 型电子鼻,德国 Airsense 分析有限公司;PQ001 型低场核磁共振分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

将原料中受伤、破损的蓝莓剔除,选取大小相似的蓝莓清洗、沥干后,分别进行 $Na_2CO_3$ 溶液浸泡、削皮、打孔和划痕预处理。$Na_2CO_3$ 溶液浸泡组:称取 6 g 无水碳酸钠,加入蒸馏水并定容至 100 mL 得到质量浓度为 6 g/mL 的 $Na_2CO_3$ 溶液,将清洗后的蓝莓分别在溶液中浸泡 3、10、30 min 后捞出,使用蒸馏水清洗、沥干。削皮组:使用不锈钢刀片分别将清洗后的蓝莓顶部、底部、顶部和底部的表皮削去约 1 mm。打孔组:使用 2 mL 注射器针头,在清洗后的蓝莓四周均匀打孔,打孔数目分别为 12、24、36 孔,深度约 1 mm。划痕组:使用不锈钢刀片将清洗后的蓝莓四周表皮从顶部至底部均匀划破,划痕数量分别为 2、8、16 道,深度约 1 mm。

#### 1.3.2 真空冷冻干燥处理

将经过不同预处理的蓝莓在 -60 ℃ 冰箱中预冻 12 h,取出后进行真空冷冻干燥,冷阱温度为 -55 ℃,真空度为 15 Pa,干燥程序为 -20 ℃ 干燥 53 h,-20 ℃ 至 20 ℃ 升温 4 h,20 ℃ 干燥 12 h,共干燥 69 h。

#### 1.3.3 水分含量测定

水分含量按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中直接干燥法进行测定[19]。

#### 1.3.4 水分活度测定

在 25 ℃ 环境中使用过饱和盐溶液和水分活度小于 0.1 的干燥硅胶对水分活度仪进行校准,取少量的破碎 FD 蓝莓平铺至塑料盒底,放入水分活度仪内进行测定,测定完成后取出。每组样品进行 3 次平行测定。

#### 1.3.5 水分状态测定

参考 Zhang 等[20]的方法并稍作修改,分别在 4、16、28 h 时取出蓝莓,采用低场核磁共振仪测定样品横向弛豫时间($T_2$),参数设置为采样频率 100.00 kHz,等待时间 2 000.0 ms,回波个数 12 000,回波时间 0.3 ms,累加次数 16,每组样品进行 5 次平行测定,检测完成后保存数据。

#### 1.3.6 干燥特性测定

参考宋慧慧等[21]和马有川等[22]的方法。干燥速率(drying rate, DR)表示物料的脱水速率,单位为 g/(g·h),计算见式(1)。

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_1 - t_2} \quad 。 \tag{1}$$

式(1)中,$M_{t_1}$ 和 $M_{t_2}$ 为干燥过程中 $t_1$ 和 $t_2$ 时蓝莓的干基含水率,g/g。

水分比(moisture ratio, MR)在一定条件下,可以表示物料水分剩余率,还可以反映物料的干燥速率,计算见式(2)。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad 。 \tag{2}$$

式(2)中，$MR$，g/g；$M_0$为蓝莓初始干基含水率，g/g；$M_e$为蓝莓干燥平衡时干基含水率，g/g；$M_t$为蓝莓在干燥 $t$ 时刻的干基含水率，g/g。

由于蓝莓 $M_e$远小于 $M_0$和 $M_t$，故式(2)可简化为式(3)。

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad 。 \tag{3}$$

为更好模拟和预测 FD 蓝莓的干燥特性，采用 Page 模型，按式(4)对干燥曲线进行拟合。

$$MR = e^{(-k \times t^a)} \quad 。 \tag{4}$$

式(4)中，$t$ 为干燥时间，min；$k$、$a$ 为干燥时间系数。

**1.3.7　吸湿率测定**

取大小相似的 FD 蓝莓，称重后放入干燥器，在室温(25 ℃)下均湿 24 h 后，放入洗净烘干的样品皿，并将其放置在盛有饱和氯化钠溶液的玻璃干燥器中，保证干燥器内相对湿度在 75%[23]。放置 0、1、3、8、12、24、48、96 h 时进行称重，吸湿性(hygroscopic，H)表示 100 g 干物质吸收水分的质量，每组样品进行 3 次平行测定，按式(5)进行计算。

$$H = \frac{M - M_i}{M} \times 100\% \quad 。 \tag{5}$$

式(5)中，$M$ 是蓝莓脆果的初始质量，g；$M_i$是蓝莓脆果在 $i$ 时刻的质量，g。

**1.3.8　硬度和脆度测定**

参考杜茜茜等[24]的方法，选取使用 HDP/BSW 探头，具体测试条件设置为测试前速度和测试后速度均为 2.00 mm/s，测试速度为 1.00 mm/s，触发力为 0.049 N，检测距离为 25.00 mm，每组样品平行测定 5 次。其中最大力表示 FD 蓝莓硬度，力越大，硬度越高；峰个数表示蓝莓脆度，峰数越多，脆度越高。

**1.3.9　微观结构观察**

在样品台贴上双面导电胶，将干燥后的 FD 蓝莓进行切片，选取果肉中心部位，放置在导电胶上，进行喷金处理后，再利用扫描电子显微镜在 50 倍下进行观察。

**1.3.10　色泽测定**

采用电子眼对样品色泽进行测定分析。测定 FD 蓝莓的明度值 $L^*$、红绿值 $a^*$、黄蓝值 $b^*$，每组样品进行 6 次平行测定，并计算总色差值 $\Delta E$。$\Delta E$ 根据式(6)计算[25]。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad 。 \tag{6}$$

式(6)中，$L_0$、$a_0$、$b_0$分别表示新鲜蓝莓的亮度、红度和黄度；$L^*$、$a^*$、$b^*$分别表示 FD 蓝莓的亮度、红度和黄度。

**1.3.11　香气测定**

采用电子鼻进行香气测定。参考薛友林等[26]方法，称取 FD 蓝莓 3.0 g 置于 20 mL 顶空进样瓶中，并用聚四氟乙烯隔垫密封，盖上瓶盖，将顶空进样瓶在常温(约 25 ℃)下静置 10 min，使瓶内气体达到平衡后进行测定。测定条件为冲洗次数 2 次，进样流量为 600 mL/min，响应信号检测时间为 60 s，每组样品进行 3 次平行测定，信号由系统采集并记录，测试完成后，进行主成分分析(principal component analysis，PCA)。

**1.4　数据处理**

使用 SPSS 26.0 对数据进行统计分析，使用单因素(ANOVA)检验进行显著性和差异性分析，使用 Origin 2021b 进行绘图和曲线拟合。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同预处理对 FD 蓝莓干燥特性的影响

物料的干燥特性通常可通过干燥曲线和干燥速率反映[22]。不同预处理蓝莓的干燥曲线如图 1。较未处理组而言，其他处理明显改变了蓝莓的干燥时间。在不同的预处理组中，经过顶部和底部削皮处理的蓝莓最早(16 h)达到恒重，而未处理组最晚达到恒重(26 h)。相较于其他组而言，削皮处理组除去的表皮面积最大，降低了蓝莓内部水蒸气扩散到表面的阻力，因此缩短了干燥时间，削皮(顶部和底部)、打孔(36 孔)和划痕(16 道)分别可减短约

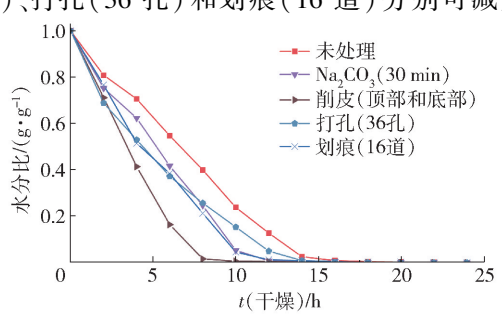



图 1　不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的干燥曲线

Fig. 1　Drying curve of freeze-dried blueberries with different pretreatments

10、6、4 h 的干燥时间;而 $Na_2CO_3$浸泡 30 min 组只降低了约 2 h。这可能是由于碱液浸泡虽然能够除去蓝莓外表皮的蜡质层,提高水分流失速度,但是较直接对蓝莓表皮进行破坏的预处理而言,其对水分流失速度的影响还是较小,从而无法明显地提高干燥速率。

不同预处理蓝莓的 Page 拟合结果见表 1,各干燥曲线的 $R^2$ 均大于 0.99,说明拟合结果均表现较好,可以用 Page 模型来表示不同预处理后蓝莓干燥过程的水分变化情况[27]。

表 1 不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的 Page 模型拟合结果

Tab. 1 Page model fitting results of freeze-dried blueberries with different pretreatments

| 组别 | $R^2$ | *RMSE* | *RSS* | Page | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | *k* | *a* |
| 未处理 | 0.997 | 0.017 5 | 0.001 84 | 0.068 7 | 1.18 |
| $Na_2CO_3$(30 min) | 0.999 | $5.749\,1\times10^{-3}$ | $1.983\,1\times10^{-4}$ | 0.034 5 | 1.57 |
| 削皮(顶部和底部) | 1.000 | $2.177\,6\times10^{-3}$ | $3.700\,3\times10^{-8}$ | 0.058 6 | 1.62 |
| 打孔(36 孔) | 1.000 | $3.295\,6\times10^{-4}$ | $6.516\,5\times10^{-7}$ | 0.034 5 | 1.90 |
| 划痕(16 道) | 1.000 | $7.823\,3\times10^{-4}$ | $3.672\,2\times10^{-6}$ | 0.033 6 | 1.88 |

$R^2$:决定系数;RMSE:均方根误差;RSS:残差平方和。

## 2.2 不同预处理对 FD 蓝莓水分活度、水分状态和吸湿性的影响

水分活度、水分含量、水分状态和吸湿性能够反映干燥产品的贮藏稳定性。不同预处理 FD 蓝莓的水分活度和水分含量见表 2,水分状态结果见图 2。由表 2 可知,$Na_2CO_3$溶液浸泡处理 FD 蓝莓的水分活度,要高于其他预处理方式蓝莓的水分活度;结合图 2可以发现,干燥相同时间时,$Na_2CO_3$溶液浸泡处理的蓝莓,其内部自由水含量较高,这也在一定程度上反映了 $Na_2CO_3$溶液浸泡处理组蓝莓需要在更长的时间内完成干燥[28]。

由图 2 可知,不同预处理 FD 蓝莓在不同干燥时间的水分状态主要有 3 ~4 个出峰位置,根据不同的出峰时间,可以认为不同的峰群代表着不同状态的水,1 ~10 ms 代表着结合水,10 ~100 ms 代表着不易流动水,100 ~1 000 ms 代表着自由水[29]。由图 2(a)可知,干燥 4 h 时,不同预处理方式的蓝莓出峰弛豫时间均为 100 ~1 000 ms,说明此时蓝莓中水分主要为自由水。由图 2(b)可知,干燥 16 h 后,未处理组和 $Na_2CO_3$溶液浸泡(30 min)组出峰弛豫时间仍在 100 ~1 000 ms,说明这 2 种处理的蓝莓中水分仍为自由水;削皮、打孔和划痕 3 个处理组的蓝莓在弛豫时间 10 ~100 ms 和 0.1 ~10 ms 均有出峰,说明这 3 种处理的蓝莓水分大部分为不易流动水和结合水,这可能是由于削皮、打孔和划痕 3 种预处理增加了蓝莓中水蒸气的迁移通路,加快失水速度,自由水含量变小;而碱液浸泡处理增加水蒸气迁移通路效果有限,使自由水无法快速流失[30]。由图 2(c)可知,干燥 28 h 时,未处理组和 $Na_2CO_3$溶液浸泡(30 min)组出峰弛豫时间逐渐向 10 ~100 ms 移动,说明随着干燥时长不断增加,这 2 种处理的蓝莓中自由水在不断向外扩散,水分逐渐变为不易流动水;而其他 3 种处理的蓝莓出峰弛豫时间仍在10 ~

表 2 不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的水分活度和水分含量

Tab. 2 Water activity and moisture content of freeze-dried blueberries with different pretreatments

| 组别 | | $A_w$ | $w$(水)/(g·100 g$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 鲜样 | | ND | 84.48 ±1.51 |
| 未处理 | | 0.30 ±0.01$^{bc}$ | 7.13 ±0.141$^{a}$ |
| $Na_2CO_3$溶液浸泡 | 3 min | 0.34 ±0.02$^{a}$ | 6.97 ±0.006$^{ab}$ |
| | 10 min | 0.33 ±0.03$^{ab}$ | 6.80 ±0.012$^{ab}$ |
| | 30 min | 0.34 ±0.01$^{a}$ | 5.16 ±0.012$^{bc}$ |
| 削皮 | 顶部 | 0.28 ±0.11$^{cd}$ | 7.21 ±0.008$^{a}$ |
| | 底部 | 0.30 ±0.01$^{bc}$ | 3.13 ±0.004$^{d}$ |
| | 顶部和底部 | 0.29 ±0.01$^{cd}$ | 3.60 ±0.015$^{cd}$ |
| 打孔 | 12 孔 | 0.28 ±0.01$^{cd}$ | 3.69 ±0.012$^{cd}$ |
| | 24 孔 | 0.27 ±0.01$^{def}$ | 3.74 ±0.006$^{cd}$ |
| | 36 孔 | 0.27 ±0.01$^{cdef}$ | 3.83 ±0.005$^{cd}$ |
| 划痕 | 2 道 | 0.27 ±0.01$^{cde}$ | 2.98 ±0.003$^{d}$ |
| | 8 道 | 0.24 ±0.01$^{f}$ | 3.11 ±0.003$^{d}$ |
| | 16 道 | 0.25 ±0.02$^{ef}$ | 2.82 ±0.003$^{d}$ |

同列不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)。ND 表示未测定。

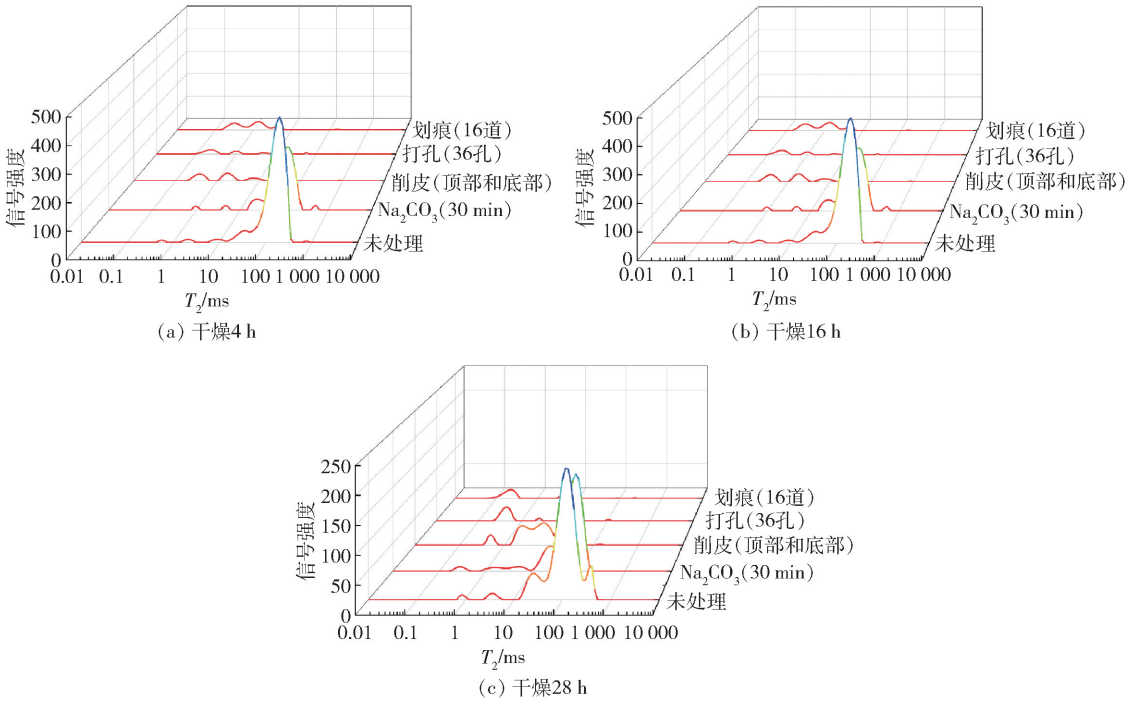



图 2　不同预处理真空冷冻干燥蓝莓不同时间的水分状态分布

Fig. 2　Distribution of water state of freeze-dried blueberries with different pretreatments at different times

100 ms 和 0.1 ~ 10 ms，说明这 3 种处理的蓝莓水分大部分仍然为不易流动水和结合水，这也说明削皮、打孔和划痕处理可以提高蓝莓干燥速率，且效果要优于 $Na_2CO_3$溶液浸泡[31]。

不同预处理 FD 蓝莓的吸湿率见图 3。由图 3 可知，最终吸湿率最高的为划痕(16 道)处理组，最低的为 $Na_2CO_3$溶液浸泡(10 min)处理组。这可能是由于削皮、打孔和划痕处理破坏了果皮结构，提高了蓝莓在干燥过程中失水速率，内部结构保持较好，未发生塌陷，具有较高孔隙度，然而这种高孔隙率的结构也导致 FD 蓝莓吸湿率要高于其他处理组[32]。4 种预处理的 FD 蓝莓吸湿率由高到低分别为划痕、打孔、削皮和 $Na_2CO_3$溶液浸泡。其中划痕处理组中，吸湿率由高到低分别为划痕(16 道)、划痕(8 道)和划痕(2 道)；打孔处理组中，打孔(36 孔)和打孔(24 孔)组的吸湿率接近，打孔(12 孔)组最低；削皮处理组中，吸湿率由高到低分别为顶部削皮、顶部和底部削皮、底部削皮；$Na_2CO_3$溶液浸泡处理组中，吸湿率由高到低分别为浸泡 3、30、10 min。同一种处理之间吸湿率存在差异可能是由于随着打孔、划痕数的增加，蓝莓表皮破坏程度提高，导致表皮对水分的阻隔能力下降，而内部果肉组织孔隙结构吸湿性比表皮更强，使其内部出现吸湿不均匀、结构溶解等现象，这与罗洁莹等[32]的结果相同。这就要求经过预处理的 FD 蓝莓产品在包装时，要有更好的水分阻隔包装方案。

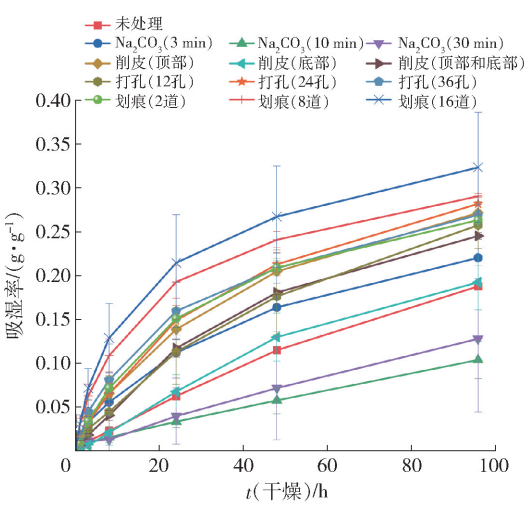



图 3　不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的吸湿率

Fig. 3　Hygroscopic rate of freeze-dried blueberries with different pretreatments

## 2.3　不同预处理对 FD 蓝莓外观的影响

外观作为产品销售过程中消费者能够接触到的最为直观的指标之一，也是食品加工过程中备受关注的一点。图 4 为不同预处理方式 FD 蓝莓的外观和内部皱缩塌陷情况。与未处理组相比，皱缩情况

从轻微到严重依次为划痕、打孔、削皮、$Na_2CO_3$溶液浸泡处理组。这可能是因为划痕和打孔预处理较其他预处理方式而言,为蓝莓提供了分布较为均匀的水分扩散通路,使蓝莓内部水分均匀且快速地升华排出,保护蓝莓内部结构和外观[32]。划痕处理组中,只有划痕(2 道)处理的样品表面发生皱缩现象,划痕(8 道)和划痕(16 道)这 2 组内部结构和表皮情况均较好。在 3 组不同程度打孔处理中,打孔(36 孔)处理的样品内部结构的崩塌和表皮的皱缩程度最小,其次为打孔(24 孔)组,而打孔(12 孔)处理组样品的外观品质劣变最严重。蓝莓削皮处理后,可以看出虽然避免了一定程度的塌陷,但是削皮(顶部)和削皮(底部)处理组的表面皱缩情况要严重于削皮(顶部和底部)组,并且皱缩程度相比划痕和打孔处理组的蓝莓也要更加严重,这可能是因为削皮处理后,升华通道分布不均匀,导致干燥后内部孔隙结构大小不一,外部皱缩[32]。对于碱液浸泡而言,虽然可以在一定程度上破坏蓝莓外表皮的蜡质层,但是其表皮未被破坏,在干燥过程中的水分升华通道仍然较少,导致内部水蒸气无法及时扩散,因此碱液处理组 FD 蓝莓出现较为严重的内部塌陷和表皮皱缩现象[33]。

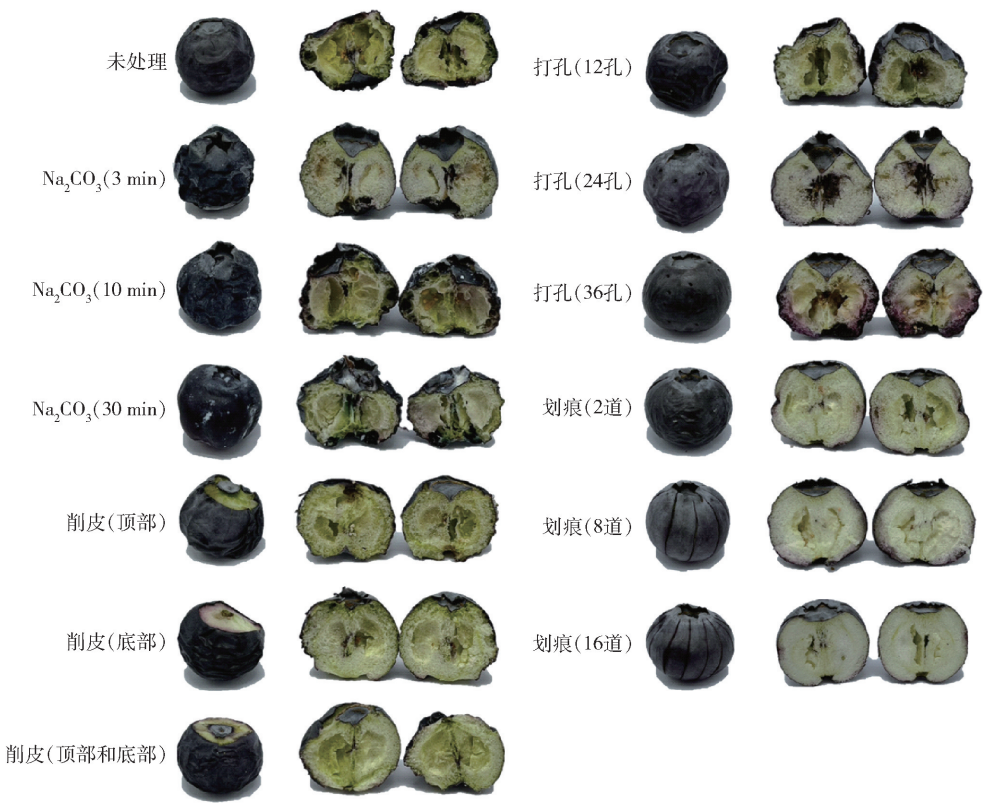


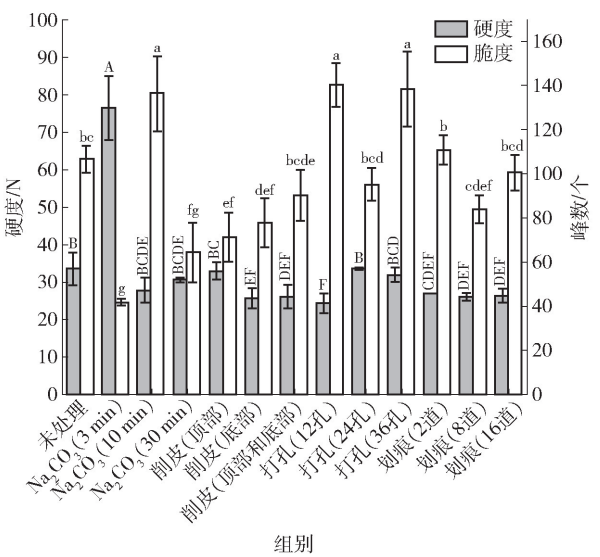

图 4 不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的外观

Fig. 4 Appearance of freeze-dried blueberries with different pretreatments

## 2.4 不同预处理对 FD 蓝莓质构的影响

硬度和脆度是描述干制品品质的常用参数。不同预处理对 FD 蓝莓硬度和脆度的影响如图 5。由图 5 可知,$Na_2CO_3$溶液浸泡(3 min)的蓝莓硬度最大,为 76.38 N,与未处理组相比升高了 127.70%;而打孔(12 孔)FD 蓝莓的硬度最小,为 24.41 N,与未处理组相比降低了 27.30%。打孔(12 孔)、打孔(36 孔)和 $Na_2CO_3$浸泡(10 min)的 FD 蓝莓脆度均较大,正峰个数分别为 140.30、138.30、136.30 个,与未处理组相比最大升高了 31.55%;$Na_2CO_3$浸泡(3 min)组脆度最小,正峰个数为 42.00 个,与未处理组相比降低了 77.50%。划痕处理的 3 组硬度较为相似,不存在显著性差异($P>0.05$);脆度从大到小分别为划痕(2 道)、划痕(16 道)和划痕(8 道),其中划痕(8 道)和划痕(16 道)之间不存在显著性差异($P>0.05$),与未处理组相比划痕(16 道)处理蓝莓的脆度提高了 4.06%。打孔(36 孔)和打孔(24 孔)的硬度较为接近,二者不存在显著性差异($P>0.05$),打孔(12 孔)硬度最小;而打孔(12 孔)和打孔(36 孔)的脆度较大且不存在显著性差异

($P>0.05$)，打孔(24 孔)的脆度最小。削皮处理中，顶部削皮的硬度最大，其他 2 组的硬度较小且不存在显著性差异($P>0.05$)；顶部削皮、底部削皮以及顶部和底部削皮组的脆度呈递增趋势。$Na_2CO_3$ 溶液浸泡的 3 组处理中，浸泡 3 min 样品硬度最大，浸泡10 min 和 30 min 硬度相似，不存在显著性差异($P>0.05$)；浸泡 10 min 的脆度最大，浸泡 3 min 和 30 min 的脆度较小，并且不存在显著性差异($P>0.05$)。这可能是由于 $Na_2CO_3$ 浸泡(3 min)处理的 FD 蓝莓内部水蒸气无法正常向外部扩散，造成蓝莓细胞组织内部的细胞基质和可溶性固形物发生融化，无法起到正常的支撑和填充作用，结构崩塌，形成较大孔隙，导致硬度升高，脆度降低[34]。打孔和划痕预处理，对蓝莓表皮外蜡质层和表皮进行了不同程度的破坏，蓝莓内部具有足够的水分迁移通路，组织内细胞能够保持原有结构[35]，在一定程度上避免了样品在干燥过程中的塌陷和皱缩，从而降低硬度，提升脆度。




不同大写字母和小写字母分别表示组间硬度和脆度差异显著($P<0.05$)。

图 5　不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的质构特征

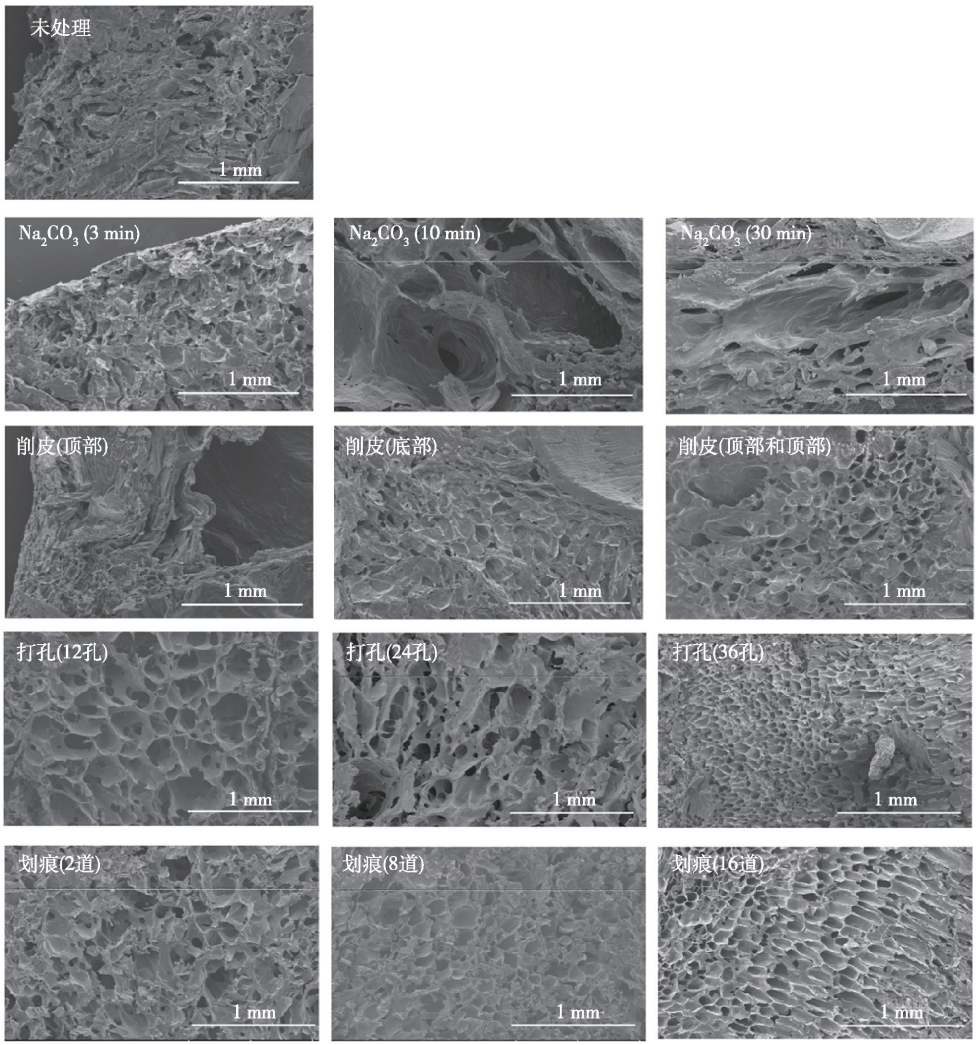
Fig. 5　Exture properties of freeze-dried blueberries with different pretreatments

## 2.5　不同预处理对 FD 蓝莓微观结构的影响

微观结构可以进一步说明不同预处理方式对 FD 蓝莓质构的影响。不同预处理 FD 蓝莓微观结构如图 6。由图 6 可知，与未处理组相比，经过预处理的蓝莓微观孔隙大小和数量均发生了不同程度的改变。这是因为碱液浸泡、削皮、打孔和划痕均在一定程度上增加了蓝莓在干燥过程中的升华通道，降低水蒸气迁移阻力，降低塌陷程度，对 FD 蓝莓微观结构产生影响[36]。$Na_2CO_3$ 溶液浸泡(3 min)的蓝莓内部孔隙变小，孔隙结构被破坏，发生闭合现象，$Na_2CO_3$ 溶液浸泡(10 min)和浸泡(30 min)处理的蓝莓均有较大的孔隙，孔壁变厚。这可能是因为碱液浸泡无法完全破坏蓝莓表皮的蜡质层，内部水分聚集，导致内部孔隙结构被破坏。削皮(顶部)和削皮(底部)的 2 组蓝莓内部孔隙结构均被破坏，发生闭合现象；削皮(顶部和底部)处理组蓝莓虽然有部分孔隙结构大小均一，且未发生闭合现象，但同样存在较大和闭合的孔隙结构。打孔(12 孔)组蓝莓虽然孔隙未发生闭合现象，但是大小不均一；打孔(24 孔)组蓝莓孔隙大小不均一、分布不均匀，且部分发生闭合现象；而打孔(36 孔)的样品孔隙结构较小、大小均一且未发生闭合现象。划痕(2 道)和(8 道)处理中，蓝莓内部组织细胞出现大小相似的孔隙结构，但存在部分孔隙被破坏并发生闭合的现象；在划痕(16 道)处理中，蓝莓孔隙结构大小均一，分布均匀，且未发生闭合现象。其中打孔(36 孔)和划痕(16 道)对蓝莓内部孔隙结构保护效果最好。由此可见，同种预处理之间，对蓝莓表皮的破坏程度越大，越有利于水分向外扩散，对内部孔隙结构保留效果越好，从图 6 也可看出，打孔(36 孔)和划痕(16 道)处理组孔隙结构最完整。结合图 5 可发现，$Na_2CO_3$ 溶液浸泡(3 min)处理组的硬度最高、脆度最低，说明微观结构的改变显著影响样品的硬度和脆度。Liu 等[37]和金玮玲等[38]研究同样表明，内部孔隙结构关系到干制品的脆度，对质构特性能够产生相应的影响。

## 2.6　不同预处理对 FD 蓝莓色泽的影响

不同预处理方式 FD 蓝莓的色泽见表 3。$L^*$ 值越大表明颜色越白，反之越黑；$a^*$ 值大于 0 表示红色，小于 0 表示绿色；$b^*$ 大于 0 表示黄色，小于 0 表示蓝色，二者均为绝对值越大，色泽越深。由表 3 可知，与未处理组对比，不同预处理均对 FD 蓝莓的 $L^*$ 值有降低作用，这可能是由于孔隙结构变多，多孔结构增加光的散射，$L^*$ 值降低。对于 $a^*$ 值而言，所有结果均为正值，说明整体偏红，且经过不同预处理之后，也都有下降。而对于 $b^*$ 值，绝大部分结果均为负值，整体均为蓝色，在不同预处理后，均有提高，其中削皮(顶部和底部)组提高最大且为正值。表 3 中 $\Delta E$ 表示不同预处理对样品总色差的影响，




扫描电子显微镜放大倍数为 50 倍。

图 6 不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的微观结构

Fig. 6 Microstructure of freeze-dried blueberries with different pretreatments

由 $\Delta E$ 结果可知,打孔(12 孔)对样品色泽的影响程度最小,而划痕(8 道)影响程度最大。色泽发生的一系列变化,可能是由于预处理过程中,蓝莓表皮被破坏,汁液流出,花青素等色素成分流失,使样品颜色变浅[39]。

## 2.7 不同预处理方式对 FD 蓝莓香气的影响

电子鼻是使用气味传感器来模拟动物的嗅觉系统,可以对样品香气的差异性进行分析。图 7(a)为不同预处理 FD 蓝莓的风味雷达图。其中传感器 W1C 对应芳香成分,W5S 对应氮氧化合物,W3C 对应氨水/芳香成分,W6S 对应氢气成分,W5C 对应烷烃芳香成分,W1S 对应甲烷成分,W1W 对应硫化物,W2S 对应乙醇成分,W2W 对应有机硫化物成分,W3S 对应烷烃成分[26]。由图 7(a)可知,所有样品对 W1C、W3C、W6S、W5C 和 W3S 传感器的响应值较高,均大于 0.8,对 W1S 和 W2S 传感器的响应值均接近 0.8,对 W2W 传感器的响应值小于 0.8。所有样品在 W5S 和 W1W 传感器响应值有所区别,对 2 种成分响应值最高的均为打孔(12 孔)组蓝莓,最低响应值均出现在底部削皮组,说明氮氧化合物和硫化物的贡献率是影响 FD 蓝莓香气的主要原因。

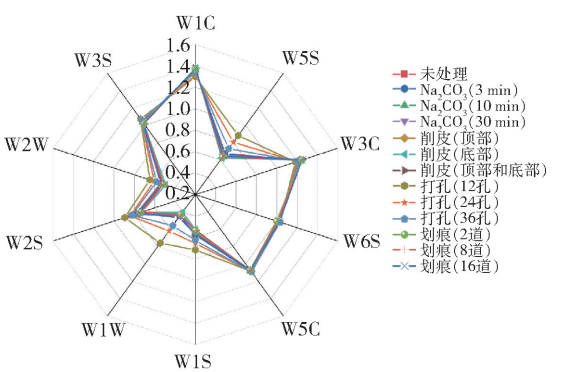
PCA 可以对多维度样品之间的差异进行解释和分析,进一步说明多样品之间的主要影响因子[40]。不同处理的 PCA 结果见图 7(b),其中第一主成分(PC1)的贡献率为 95.34%,第二主成分(PC2)的贡献率为 3.16%,总贡献率之和为 98.40%,能够反映样品整体信息,差异主要体现在 PC1 上。

表 3　不同预处理真空冷冻干燥蓝莓的色泽

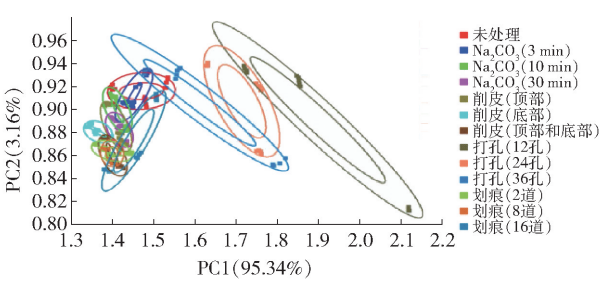
Tab. 3　Color of freeze-dried blueberries with different pretreatments

| 组别 | | 色泽 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | $\Delta E$ |
| 鲜样 | | 23.67 ± 0.66$^{abc}$ | 0.93 ± 0.02$^{bc}$ | −2.36 ± 0.19$^{e}$ | NA |
| 未处理 | | 25.26 ± 0.93$^{ac}$ | 1.49 ± 0.62$^{a}$ | −2.23 ± 0.20$^{de}$ | 1.89 |
| $Na_2CO_3$溶液浸泡 | 3 min | 23.16 ± 1.83$^{abd}$ | 0.73 ± 0.13$^{bc}$ | −1.54 ± 0.37$^{bcd}$ | 0.99 |
| | 10 min | 20.39 ± 1.94$^{ef}$ | 0.72 ± 0.27$^{bc}$ | −1.61 ± 0.40$^{bcd}$ | 3.37 |
| | 30 min | 23.89 ± 2.64$^{ab}$ | 0.84 ± 0.24$^{bc}$ | −1.48 ± 0.47$^{bc}$ | 0.91 |
| 削皮 | 顶部 | 21.02 ± 1.70$^{def}$ | 0.92 ± 0.12$^{bc}$ | −2.20 ± 0.65$^{cde}$ | 2.65 |
| | 底部 | 21.04 ± 0.92$^{cdef}$ | 0.94 ± 0.20$^{bc}$ | −1.89 ± 0.38$^{bcde}$ | 2.67 |
| | 顶部和底部 | 22.00 ± 1.90$^{bcdef}$ | 1.05 ± 0.33$^{b}$ | 0.25 ± 1.39$^{a}$ | 3.10 |
| 打孔 | 12 孔 | 24.28 ± 2.47$^{ab}$ | 0.92 ± 0.16$^{bc}$ | −1.81 ± 0.23$^{bcde}$ | 0.82 |
| | 24 孔 | 24.59 ± 0.85$^{ab}$ | 0.89 ± 0.25$^{c}$ | −1.96 ± 0.13$^{bcde}$ | 1.00 |
| | 36 孔 | 23.61 ± 1.26$^{abcd}$ | 0.75 ± 0.20$^{bc}$ | −1.53 ± 0.16$^{bcd}$ | 0.85 |
| 划痕 | 2 道 | 22.73 ± 2.43$^{abcde}$ | 0.63 ± 0.11$^{c}$ | −1.41 ± 0.26$^{b}$ | 1.37 |
| | 8 道 | 20.01 ± 2.38$^{f}$ | 0.62 ± 0.12$^{c}$ | −1.30 ± 0.22$^{b}$ | 3.82 |
| | 16 道 | 22.66 ± 1.90$^{abcde}$ | 0.90 ± 0.17$^{bc}$ | −1.70 ± 0.41$^{bcde}$ | 1.21 |

同列不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)。NA 表示不适用。




(a) 电子鼻传感器响应值雷达图




(b) 香气主成分分析

图 7　不同预处理真空冷冻干燥蓝莓香气特征

Fig. 7　Aroma of freeze-dried blueberries with different pretreatments

## 3　结　论

本研究分析了碱液浸泡、削皮、打孔和划痕的预处理方式对蓝莓真空冷冻干燥特性和质构、色泽等品质的影响。通过预处理破坏蓝莓表皮外蜡质层和表皮完整性，可使蓝莓干燥时间缩短 2 ~ 10 h，产品品质显著提升。打孔(36 孔)和划痕(16 道)处理后的真空冷冻干燥蓝莓孔隙结构较为均匀，内部组织结构无明显坍塌，较好地保持了蓝莓原有组织结构和外观特征，同时有效保持了蓝莓干燥后的果皮色泽，综合品质显著优于碱液浸泡、削皮的预处理工艺。综合考虑干燥效率和产品品质，打孔和划痕预处理可作为真空冷冻干燥蓝莓较优的预处理方式，相关结果旨在为表皮致密型果蔬物料的干制工艺优化提供参考。

**参考文献：**

[1]　吴炜俊，程丽娜，肖更生，等. 不同组合渗透与冷冻前处理对蓝莓干燥品质的影响[J]. 食品科学技术学报，2021，39(2)：126 − 133.
WU W J, CHENG L N, XIAO G S, et al. Effects of different combination of osmosis and freezing pretreatment on drying characteristics of blueberry[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(2): 126 − 133.

[2]　李亚东，裴嘉博，陈丽，等. 2020 中国蓝莓产业年度报告[J]. 吉林农业大学学报，2021，43(1)：1 − 8.
LI Y D, PEI J B, CHEN L, et al. China blueberry industry report 2020[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021, 43(1): 1 − 8.

[3]　周继芬，兰武，王军，等. 蓝莓营养及独特保健功能

研究[J]. 北方园艺, 2020(21): 138 – 145.
ZHOU J F, LAN W, WANG J, et al. Nutritional ingredients of blueberry and research on its unique health-care function[J]. Northern Horticulture, 2020(21): 138 – 145.

[4] 刘莉莉, 姜传福. 蓝莓的营养成分及其保健功能研究[J]. 农业科技与装备, 2013(9): 62 – 63.
LIU L L, JIANG C F. Nutrition and health function of blueberry[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2013(9): 62 – 63.

[5] CHEA S, YU D J, PARK J, et al. Preharvest β-aminobutyric acid treatment alleviates postharvest deterioration of 'Bluecrop' highbush blueberry fruit during refrige-rated storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 95 – 103.

[6] ZIELINSKA M, MICHALSKA A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 671 – 680.

[7] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫,等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报, 2022, 36(2):414 – 421.
BI J F, FENG S H, JIN X, et al. Current status and development trend of freeze drying technology and industry[J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2022, 36(2):414 – 421.

[8] ZHANG L H, LIAO L, QIAO Y, et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying[J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125386.

[9] 邵春霖, 孟宪军, 毕金峰, 等. 不同干燥方式对蓝莓品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(11): 109 – 113.
SHAO C L, MENG X J, BI J F, et al. Effect of different drying methods on the quality of blueberry[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(11): 109 – 113.

[10] HUANG L L, LIAN M M, DUAN X, et al. Studies on the quality and moisture distribution of kiwifruit dried by freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(1): e13581.

[11] 李斌, 谢旭, 孙希云, 等. 国内外蓝莓加工技术与功能性成分研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(5): 16 – 22.
LI B, XIE X, SUN X Y, et al. Research progress on blueberry processing technology and functional components in domestic and abroad[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(5): 16 – 22.

[12] SEMENOV G V, KRASNOVA I S, KHVYLIA S I, et al. Freezing and freeze-drying of strawberries with an additional effect of micro-vibrations[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(8): 3192 – 3198.

[13] CHEN F Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Comparative analysis of composition and hygroscopic properties of infrared freeze-dried blueberries, cranberries and raspberries[J]. Drying Technology, 2021, 39(9): 1261 – 1270.

[14] 郜海燕, 杨帅, 陈杭君, 等. 蓝莓外表皮蜡质及其对果实软化的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 102 – 108.
GAO H Y, YANG S, CHEN H J, et al. Epicuticular wax's effect on fruit softening of blueberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(2): 102 – 108.

[15] HUANG C C, WU J S B, WU J S, et al. Effect of novel atmospheric-pressure jet pretreatment on the drying kinetics and quality of white grapes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(11): 5102 – 5111.

[16] CHEN F Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Comparative evaluation of the properties of deep-frozen blueberries dried by vacuum infrared freeze drying with the use of $CO_2$ laser perforation, ultrasound, and freezing-thawing as pretreatments[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10): 1805 – 1816.

[17] PAWAR D A, GIRI S K, SHARMA A K, et al. Effect of abrasive pre-treatment on drying rate of grape berries and raisin quality[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): e15746.

[18] DENG L Z, MUJUMDAR A S, ZHANG Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: effects on drying characteristics and quality attributes: a comprehensive review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(9): 1408 – 1432.

[19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[20] ZHANG L H, QIAO Y, WANG C, et al. Influence of high hydrostatic pressure pretreatment on properties of vacuum-freeze dried strawberry slices[J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127203.

[21] 宋慧慧, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 干燥方式及碱液处理对鲜枸杞干燥特性和品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 197 – 206.
SONG H H, CHEN Q Q, BI J F, et al. Effects of different drying methods and alkali pretreatment on drying

characteristics and quality of fresh goji berries (*Lycium barbarum*)[J]. Food Science, 2018, 39(15): 197 – 206.

[22] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 241 – 250.
MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effects of pre-freezing on the drying characteristics and quality parameters of freeze drying apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 241 – 250.

[23] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预干燥方式和水分转换点对真空冷冻联合干燥苹果脆片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 110 – 120.
MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effects of pre-drying methods and moisture conversion point on the quality of freeze dried apple chips[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 110 – 120.

[24] 杜茜茜, 易建勇, 毕金峰, 等. 细胞壁多糖对真空冷冻干燥再造型苹果脆片质构的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 144 – 154.
DU Q Q, YI J Y, BI J F, et al. Effects of cell wall polysaccharides on the texture of vacuum freeze-dried restructured apple chips[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 144 – 154.

[25] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 预处理方式对真空冷冻干燥苹果片品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 126 – 130.
WANG H O, FU Q Q, CHEN S J, et al. Effects of different pretreatment methods on the quality of freeze-dried apple slices[J]. Food & Machinery, 2018, 34(11): 126 – 130.

[26] 薛友林, 董立超, 张鹏, 等. 电子鼻结合 GC-MS 分析不同处理蓝莓货架期间果实的挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 297 – 303.
XUE Y L, DONG L C, ZHANG P, et al. Analysis of the volatile components of blueberry fruits with different treatments during shelf life by GC-MS combined with electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(19): 297 – 303.

[27] FOERST P, MELO DE CARVALHO T, LECHNER M, et al. Estimation of mass transfer rate and primary drying times during freeze-drying of frozen maltodextrin solutions based on X-ray μ-computed tomography measurements of pore size distributions[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 260: 50 – 57.

[28] ZHAO Y Y, BI J F, YI J Y, et al. Evaluation of sensory, textural, and nutritional attributes of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) as prepared by five types of drying methods[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(4): e13029.

[29] 姜秀丽, 孔保华, 夏秀芳, 等. 不同烘干时间对猪肉脯水分分布与品质相关性的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 67 – 71.
JIANG X L, KONG B H, XIA X F, et al. Effect of different drying time on the relationship between water distribution and quality of dried pork slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(23): 67 – 71.

[30] 覃焱婷, 段振华, 韦珍珍, 等. 微波功率对月柿果片微波间歇干燥中水分迁移及品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 1 – 5.
QIN Y T, DUAN Z H, WEI Z Z, et al. Effects of microwave power on moisture migration and quality of persimmon slices during microwave intermittent drying[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 1 – 5.

[31] 孙江丽, 李瑞, 朱洪梅. 基于低场核磁的紫薯片真空冷冻干燥过程中水分变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 9 – 14.
SUN J L, LI R, ZHU H M. Water changes of purple sweet potato slices using low-field NMR during vacuum freeze drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 9 – 14.

[32] 罗洁莹, 汤梅, 柳建良, 等. 蓝莓真空冷冻干燥工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(3): 91 – 95.
LUO J Y, TANG M, LIU J L, et al. Blueberry vacuum freeze-drying process optimization[J]. Food Research and Development, 2018, 39(3): 91 – 95.

[33] FLOROS J D, WETZSTEIN H Y, CHINNAN M S. Chemical (NaOH) peeling as viewed by scanning electron microscopy: pimiento peppers as a case study[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(5): 1312 – 1316.

[34] 周頔, 王海鸥, 孙艳辉, 等. 不同前处理和冻结方式对苹果片真空冷冻干燥效率及干制品品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 218 – 224.
ZHOU D, WANG H O, SUN Y H, et al. Effects of reprocessing and freezing methods on the efficiency of vacuum freeze-drying and quality of freeze-dried apple slices[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(12): 218 – 224.

[35] ESMAIILI M, SOTUDEH-GHAREBAGH R, CRONIN K, et al. Grape drying: a review[J]. Food Reviews International, 2007, 23(3): 257 – 280.

[36] MARTÍN-GÓMEZ J, ÁNGELES VARO M, MÉRIDA J, et al. The influence of berry perforation on grape drying kinetics and total phenolic compounds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(9):

4260 – 4266.

[37] LIU Y, ZHANG Z Y, HU L D. High efficient freeze-drying technology in food industry[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(12): 3370 – 3388.

[38] 金玮玲, 高虹, 范秀芝, 等. 不同预处理方法对真空冷冻干燥香菇脆片感官品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 108 – 112.
JIN W L, GAO H, FAN X Z, et al. Effect of different pretreatment methods on the sensory quality of *Lentinus edodes* chips produced by vacuum freeze-drying[J]. Food Science, 2017, 38(13): 108 – 112.

[39] 刘小莉, 胡根河, 陆卿卿, 等. 热处理条件对蓝莓汁中花色苷和加工特性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(1): 161 – 166.
LIU X L, HU G H, LU Q Q, et al. Effect of heating treatment on the anthocyanins contents and processing properties of blueberry juice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(1): 161 – 166.

[40] 谢跃杰, 王仲明, 王强, 等. 不同品种和成熟度蓝莓理化特性的主成分分析评价[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 94 – 99.
XIE Y J, WANG Z M, WANG Q, et al. Assessment of the differences in physical, chemical and phytochemical properties of different blueberry cultivars harvested at different dates using principal component analysis[J]. Food Science, 2017, 38(23): 94 – 99.

# Effects of Punching and Cutting Epidermis Pretreatment on Freeze Drying Characteristics and Qualities of Blueberry

LI Yuan, BI Jinfeng, MA Youchuan, FENG Shuhan, GUO Yuxia, YI Jianyong*

(*Institute of Food Science and Technology*, *Chinese Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Agro-Products Processing*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100193, *China*)

**Abstract**: Freeze drying can better retain nutritional and functional substances in blueberries such as anthocyanins and vitamins. However, it is difficult for internal water to diffuse outward through the dense waxy layer of the blueberry epidermis during the freeze drying process, which triggers structural collapse as well as a series of serious quality defects of products, including epidermis shrink, hollowness, and juice loss. These limited the application of the freeze drying technology in the field of blueberry drying. To improve the quality of freeze-dried blueberries, the influence of pretreatment with soaking in $Na_2CO_3$ solution (3, 10, 30 min), peeling (top, bottom, top and bottom), punching (12, 14, 36 holes), and cutting epidermis (2, 8, 16 incisions) on the drying characteristics, hygroscopicity, and sensory qualities such as texture, color and aroma of freeze-dried blueberry were investigated. The results indicated that compared with non-pretreated freeze-dried blueberries, both punching and cutting epidermis treatment could effectively avoid the collapse and shrink of freeze-dried blueberries, which obtained better quality than the treatment of soaking in $Na_2CO_3$ solution and peeling. Among them, the freeze-dried blueberries with punching (36 holes) and cutting epidermis (16 incisions) remained their intact appearance and microstructure with reduced drying time by 6 h and 4 h, respectively. Meanwhile, the brittleness was increased by 31.55% and 4.06%, respectively. There was no obvious shrink and collapse of epidermis and interior structure in these two processed blueberries, and the color and aroma were closer to the fresh blueberries than that of other treatments. This study aimed to provide a guiding reference for the preparation of high-quality whole blueberry fruits by freeze drying.

**Keywords**: freeze drying; blueberry; pretreatment; texture; porous structure

(责任编辑:张逸群)