

温欣, 肖亚冬, 聂梅梅, 等. 基于主成分分析的不同品种蓝莓脆粒品质综合评价 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 208–217. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110019

WEN Xin, XIAO Yadong, NIE Meimei, et al. Evaluation of Crispy Grain Quality of Different Varieties of Blueberries Based on Principal Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 208–217. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110019

· 分析检测 ·

基于主成分分析的不同品种蓝莓脆粒品质综合评价

温欣^{1,2}, 肖亚冬^{1,*}, 聂梅梅¹, 李大婧¹, 刘春菊¹, 牛丽影¹, 包怡红², 唐冬妹^{3,*}

(1.江苏省农业科学农产品加工研究所, 江苏南京 210014;

2.东北林业大学生命科学学院, 黑龙江哈尔滨 150040;

3.苏州优尔食品有限公司, 江苏苏州 215105)

摘要: 为了筛选适宜加工蓝莓脆粒的品种, 开展了冻干蓝莓脆粒品质评价研究。该研究以江苏省内 8 个南高丛和兔眼蓝莓品种果实为原料, 采用真空冷冻干燥技术制备为蓝莓脆粒, 测定含水率、总糖、DPPH 自由基清除率、硬度等共 18 项品质指标, 并采用主成分分析方法进行脆粒品质综合评价。结果表明: 不同品种蓝莓脆粒的品质指标中糖酸比和总酸变异系数较大, 其变异系数分别为 57.89% 和 40.25%。通过主成分分析确定葡萄糖含量、花色苷含量、总黄酮含量、总抗氧化活性 AEAC、干样含水率、产出率和硬度可作为评价蓝莓脆粒品质的代表性指标; 建立综合品质评价模型, 并依据各品种的综合品质得分进行排序, 得分排名前三位的蓝莓品种分别为莱克西、灿烂和顶峰, 其余品种得分均为负值, 说明这三种蓝莓较适宜进行干制加工, 其中莱克西品种最适宜加工为蓝莓脆粒。研究结果为江苏省内蓝莓干制加工专用品种筛选和品质分析提供了依据。

关键词: 蓝莓脆粒, 主成分分析, 品种, 评价模型

中图分类号: TS255

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)21-0208-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110019

本文网刊:



Evaluation of Crispy Grain Quality of Different Varieties of Blueberries Based on Principal Component Analysis

WEN Xin^{1,2}, XIAO Yadong^{1,*}, NIE Meimei¹, LI Dajing¹, LIU Chunju¹, NIU Liying¹,
BAO Yihong², TANG Dongmei^{3,*}

(1. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

2. College of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

3. Youi Food Co., Ltd., Suzhou 215105, China)

Abstract: In order to select the varieties suitable for processing blueberry crispy, the quality evaluation of freeze-dried blueberry crispy was carried out. In this study, eight Highbush blueberries and Rabbiteye blueberries varieties in Jiangsu Province were used as raw materials, and were prepared as blueberry crispy by vacuum freeze-drying, and 18 quality indexes such as water content, total sugar, scavenging ability of DPPH free radical, hardness, etc, were determined, and the quality of the blueberry crispy was comprehensively evaluated by principal component analysis. The results showed that the coefficients of variation of sugar-acid ratio and total acid of different varieties of blueberry crispy were larger, with the value of 57.89% and 40.25%, respectively. Principal component analysis showed that the glucose content, anthocyanoside content, total flavonoid content, total antioxidant activity of AEAC, moisture content of dry samples, output rate and

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 江苏省现代农业-重点及面上项目 (BE2020338); 江苏省农业自主创新项目 (CX(21)2026)。

作者简介: 温欣 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: wx99074@163.com。

* 通信作者: 肖亚冬 (1988-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: xiaoyadong2016@163.com。

唐冬妹 (1974-), 女, 本科, 工程师/总经理, 研究方向: 食品加工, E-mail: Helen@youi.cn。

hardness were determined as representative indexes for the evaluation of the quality of blueberry brittle grains. Then, the comprehensive quality evaluation model was established. Based on the comprehensive quality score of each variety, the top three blueberry varieties were Legacy, Brightwell and Climax, and the others varieties had negative scores. This indicated that these three kinds of blueberries were more suitable for dry processing as blueberry crispy, among which the Legacy variety was the better. The results of the study provide a basis for the screening and quality analysis of blueberry varieties for dry processing.

Key words: blueberries crisp; principal component analysis (PCA); assortment; assessment model

蓝莓(*Vaccinium* spp.)是杜鹃花科越橘属植物,在亚洲和欧洲等地均有引种^[1]。蓝莓富含多种营养成分,如维生素、花青素、黄酮类、多酚类成分^[2-4],有“浆果之王”的美称。研究表明蓝莓花青素是很好的抗氧化剂^[5],有抗肿瘤增殖能力、降血糖和降血脂的作用^[6-7],还可以改善肠道健康^[8],有益于人类的认知能力和情绪^[9]。2020 年,我国蓝莓产量达到 28.5 万吨居全球第三,且蓝莓需求量巨大,极具生产潜力和经济价值^[10]。

蓝莓鲜果皮薄多汁,易受机械损伤,导致其受病原菌侵害,引起腐烂变质,影响蓝莓的综合品质,从而影响储藏及销售^[11]。干燥技术是使果蔬降低水分、延长贮藏期的加工方式之一^[12],真空冷冻干燥(freeze drying, FD)是新型的干燥技术,利用低温低压下水分由固态直接升华原理实现干燥,有着更高的干燥效率,更好地保持食品感官品质和营养成分^[13]。本研究团队最新研究报道了不同真空冷冻干燥程序中的温度设定对蓝莓干制特性和品质的影响,确定较优真空冷冻干燥程序为:0 ℃(2 h)→5 ℃(2 h)→10 ℃(2 h)→20 ℃(2 h)→30 ℃(2 h)→40 ℃(2 h)→50 ℃(12 h),在此条件下获得蓝莓脆粒收缩率最小,营养成分保留率较高^[14]。

蓝莓脆粒干制品的品质受很多因素的影响,包括品种、外观色泽、理化性质和加工特性等,因此针对此问题,通过蓝莓脆粒干制品综合评价,筛选适宜加工的品种尤为重要。目前,主成分分析方法已广泛应用于果蔬原料甄选和各类食品加工品质评价的研究中^[15]。主成分分析通过降维处理多个指标,从中筛选出较少的指标进行整体产品品质评价^[16]。乌凤章等^[17]以 26 个高丛蓝莓品种果实为对象,使用主成分分析筛选出优质的蓝莓品种。宋江峰等^[18]以 18 个菜用大豆品种为对象,使用主成分分析和聚类分析筛选出优质的菜用大豆品种。Zhang 等^[19]通过主成分分析探究三种干燥方式对猕猴桃的理化指标和能耗的影响,结果表明真空冷冻干燥与热风干燥联合处理时间短耗能低,且使猕猴桃保持优秀的感官品质。然而,不同品种选择对冻干蓝莓脆粒品质影响的研究还未报道。

因此,本研究以江苏省内 8 个南高丛和兔眼蓝莓品种果实为原料,采用真空冷冻干燥技术制备蓝莓脆粒,测定其 18 项品质指标,比较分析了不同品种蓝莓脆粒品质特性,确定代表性品质指标,采用主成

分分析法建立蓝莓脆粒品质综合评价体系,为蓝莓脆粒品质合理评价和筛选适宜加工品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

同一品种选取成熟度一致、色泽均匀、无病虫害的新鲜蓝莓 来源于南京市甘露山蓝莓专业合作社,采收时间为 2023 年 6 月 15 日,采摘后及时置于实验室 4 ℃ 冷藏库备用。蓝莓品种可分为兔眼(Rab-biteye blueberries)、南高丛(Highbush blueberries) 2 个系列,样品为莱克西(Legacy)、珠宝(Jewel)、薄雾(Misty)、绿宝石(Emerald)、天后(Primadonna)、灿烂(Brightwell)、杰兔(Coastal)、顶峰(Climax)八个品种,如表 1 所示;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、Trolox 上海化成工业发展有限公司;总抗氧化能力(T-AOC)检测试剂盒 南京建成生物工程研究所;乙腈、乙酸锌、亚铁氰化钾、冰乙酸、次甲基蓝、氢氧化钠、Folin 酚试剂、乙醇、亚硝酸钠、硝酸铝、盐酸、醋酸、葡萄糖、醋酸钠 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;没食子酸 标准品,上海源叶生物科技有限公司;偏磷酸 上海麦克林生化科技有限公司;磷酸二氢钾、磷酸氢二钾 分析纯,南京荣胜达实验仪器有限公司。

表 1 蓝莓品种信息

Table 1 Blueberry varieties information

样品名称	成熟期特性	品种
莱克西(Legacy)	中晚熟	南高丛
珠宝(Jewel)	极早熟	南高丛
薄雾(Misty)	中熟	南高丛
绿宝石(Emerald)	早熟	南高丛
天后(Primadonna)	早熟	南高丛
灿烂(Brightwell)	早熟	兔眼
杰兔(Coastal)	早熟~中熟	兔眼
顶峰(Climax)	早熟	兔眼

CM-700d1 全自动色差计 日本柯尼卡美能达公司;CT3 质构仪 英国 CNS Farmell 公司;UV-6300 型紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;BLK-FD-0.5 真空冷冻干燥机 江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;DHG-907385-III 电热恒温鼓风干燥箱 上海新苗医疗器械制造有限公司;H-2050R 台式高速冷冻离心机、TG16-WS 台式高速离心机 长沙湘仪离心机仪器有限公司;BS-224-S 万

分之一分析天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; HH-8 恒温水浴锅 金坛市环保仪器厂; KH-7200-DB 型数控超声波清洗器 昆山禾创超声仪器有限公司; Epoch 全自动酶标仪 BioTek 公司; pH 计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蓝莓脆粒制作 将采摘的蓝莓鲜果清洗后,置于托盘中放-20 ℃ 冰箱预冻至少 6 h,然后经真空冷冻干燥保存备用。真空冷冻干燥流程具体如下:当冷阱温度达到-35 ℃ 时,将预冻蓝莓放入冻干仓中并关闭仓门,关闭“冷阱制冷”,打开“冻干仓制冷”;待物料温度降至-30 ℃ 后维持 2 h,关闭“冻干仓制冷”,打开“冷阱制冷”;设置干燥工艺参数^[14],待冷阱温度降至-40 ℃ 时开启“真空泵”,真空压力下降至 50 Pa 以下时,打开“加热自动”,开启“循环泵”和“加热开关”,开始干燥;待物料温度与辐射板温度一致后干燥结束。

1.2.2 鲜样百粒重 每次称取 100 个蓝莓果实质量,重复 3 次,计算平均值。

1.2.3 含水率 参照 GB 5009.3-2016,采用直接干燥法^[20]。

1.2.4 产出率 随机选取新鲜蓝莓,称取其鲜果质量 m_1 ;经过真空冷冻干燥后,称量蓝莓脆粒质量 m_2 ,冻干后与冻干前质量的百分比即为产出率^[21]。公式如下:

$$\text{产出率}(\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100$$

1.2.5 营养成分测定

1.2.5.1 葡萄糖、果糖含量 参照 GB 5009.8-2023,采用高效液相色谱法^[22]。

1.2.5.2 维生素 C 含量 参照刘胜辉等^[23]、刘霞等^[24]的方法,稍作修改,取 2.5 g 蓝莓于研钵中,加入少量 4 ℃ 预冷的 0.25% 的偏磷酸浸提,冰浴快速研磨后,将匀浆用 0.25% 的偏磷酸定容至 25 mL,在 4 ℃ 条件下 10000 r/min 离心 10 min,取上清液,上清液经微孔滤膜(水系,0.45 μm)过滤后待测。

色谱条件:色谱柱为 ZORBAX 300SB-C₁₈ (4.6 mm×250 mm, φ5 μm),流动相为 0.03 mol/L 正磷酸,流速为 0.8 mL/min,柱温 25 ℃,检测波长 240 nm,进样量为 20 μL,根据标准曲线计算样品中 V_C 的含量。

1.2.5.3 总糖含量 采用苯酚-硫酸法测定总糖含量^[25]。

1.2.5.4 总酸含量 参照 GB 12456-2021,采用 pH 计电位滴定法^[26]。

1.2.5.5 糖酸比 糖酸比用总糖含量与总酸含量之比表示。

1.2.5.6 总酚含量 采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定总酚含量^[27]。将真空冷冻干燥的蓝莓经研磨后制得蓝莓粉,准确称取蓝莓粉 5 g 加入 70% 的乙醇溶

液研磨成匀浆,80 ℃ 水浴回流提取 2 h,离心,取上清液转入 50 mL 的容量瓶中,回流提取 2 次,合并所有上清液,定容至刻度,制成样液,测定蓝莓中总多酚含量。绘制没食子酸标准曲线。将待测液适当稀释。吸取 1.0 mL 样品液于试管中。其他按标准溶液测定方法操作,测定吸光度,重复实验 3 次。总酚含量以相当没食子酸毫克数表示(mg GAE/g d.w.)。

$$\text{总酚含量}(\text{mg GAE/g d.w.}) = \frac{m_1 \times V_1 \times N \times 10^{-3}}{m_2 \times V_2 \times (1 - \omega)}$$

式中: m_1 —从标准曲线上查得样品测定液中的含量,单位为微克(μg); m_2 —样品质量,单位为克(g); V_1 —样品定容体积,单位为毫升(mL); V_2 —比色测定时所移取样品测定液的体积,单位为毫升(mL); N —稀释倍数; ω —样品含水率, %。

1.2.5.7 总黄酮含量 总黄酮含量测定采用 NaNO₂-Al(NO₃)₃-NaOH 法,参照董怡等^[28]的方法,以芦丁为标准品,绘制芦丁总黄酮标准曲线。移取浸提液 2 mL 于试管中,用 50% 乙醇补至 3 mL,加 0.5 mL 5% 亚硝酸钠溶液,混匀后静置 6 min,再加 0.5 mL 10% 硝酸铝溶液,摇匀后静置 6 min,再加 4 mL 4% 氢氧化钠溶液,加蒸馏水至 10 mL,摇匀,放置 10 min,以空白对照在 509 nm 处测定吸光值,重复实验 3 次。总黄酮含量以毫克芦丁当量表示即 mg Rutin/g d.w.。

$$\text{黄酮含量}(\text{mg Rutin/g d.w.}) = \frac{m_1 \times V_1 \times N \times 10^{-3}}{m_2 \times V_2 \times (1 - \omega)}$$

式中: m_1 —从标准曲线上查得样品测定液中的含量,单位为微克(μg); m_2 —样品质量,单位为克(g); V_1 —样品定容体积,单位为毫升(mL); V_2 —比色测定时所移取样品测定液的体积,单位为毫升(mL); N —稀释倍数; ω —样品含水率, %。

1.2.5.8 花色苷含量 采用 pH 示差法^[29]。称取 1 g 蓝莓粉,用 0.1%~80% 乙醇提取液反复多次浸提、离心,保留上清液,直至样品褪成无色为止。将上清液过滤并定容到 100 mL。取 1 mL 提取液,分别用 pH1.0 和 4.5 的缓冲液,在 510 nm 和 700 nm 处测量吸光度值并计算花色苷含量。

1.2.6 抗氧化能力测定

1.2.6.1 DPPH 自由基清除率 准确称取蓝莓粉 1 g 于 50 mL 离心管中,使用 80%(v/v)的乙醇超声浸提 30 min(功率 100 W、温度为 30 ℃),8000 r/min 室温离心 15 min,重复一次,合并上清液,定容 50 mL。加 0.1 mL DPPH 80% 乙醇溶液,避光反应 30 min,在 517 nm 处测定吸光度,并以相同体积的溶剂代替蓝莓样品液为对照,结果以 DPPH 自由基清除率(%)表示^[30]。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

式中: A_0 为对照组的吸光值; A_1 为样品组的吸

光值。

1.2.6.2 ABTS⁺自由基清除率 准确称取蓝莓粉 0.5 g, 加入 5 mL 生理盐水, 冰浴条件下匀浆, 4 ℃, 12000 r/min, 离心 5 min, 取上清液测定。移取 10 μL 样品液于 96 微孔板中, 加入 20 μL 过氧化物酶应用液(由过氧化物酶, pH4.5 醋酸缓冲液组成, 测定前以 1:9 比例混合), 170 μL ABTS 工作液。室温反应 6 min, 405 nm 处测定吸光值, 并以相同体积的蒸馏水代替蓝莓样品液为对照。结果以 ABTS⁺自由基清除率(%)表示。

$$\text{ABTS}^+\text{自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

式中: A₀ 为对照组的吸光值; A₁ 为样品组的吸光值。

1.2.6.3 总抗氧化活性 AEAC 使用总抗氧化能力(T-AOC)检测试剂盒(比色法)。

1.2.7 硬度、脆度、断裂数 参考文献中方法并作适当修改^[31]。采用 CT3 质构仪对蓝莓脆粒的硬度和脆度进行测定。选用 TA4/1000 探头, 测试类型为压缩, 目标值: 5.0 mm, 测试速度: 0.5 mm/s, 以坐标图中出现的最大压力峰值表示硬度, 单位为 g; 以下压探头第一次冲向样品过程中在坐标图上出现的第一个明显压力峰值表示脆度, 单位为 g; 一次压缩循环后出现是锯齿峰的个数表示断裂数, 单位个。取 5 个平行样, 重复测定 3 次。

1.3 数据处理

使用 Excel 2016 进行数据处理, 因各评价指标具有不同的量纲及数量级, 为避免对结果造成影响, 在数据分析前须对原始数据进行标准化处理。标准化的数据通过 SPSS 22.0 进行描述性统计分析、相关性分析和主成分分析得到方差贡献分析表和经过方差极大正交旋转后的主成分载荷矩阵。如无特殊备注, 每组实验取 3 个平行样, 重复测定 3 次。

2 结果与分析

2.1 不同品种蓝莓脆粒真空冷冻干燥品质评价研究

8 种蓝莓脆粒的品质指标测定结果如表 2 所示。不同蓝莓品种鲜样百粒重差别较大, 各品种百粒重范围为 80.05~136.51 g, 其中顶峰蓝莓的百粒重量最大, 但与灿烂蓝莓的百粒重无显著性差异($P>0.05$), 薄雾、珠宝、天后均属于小型果, 百粒重较小, 且三者之间无显著性差异($P>0.05$)。

含水率作为加工品质的重要指标之一, 对产品的贮藏及口感有重要意义, 各干制产品的含水率范围为 8.72%~15.32%, 说明不同蓝莓品种真空冷冻干燥后其含水率差异较大, 其中珠宝、薄雾和绿宝石 3 个品种的水分含量超过了 10%, 可能是因为这三个品种在干燥后更易吸潮, 若取样过程中不能保证环境温度和湿度, 会导致其含水率迅速增加。

产出率对产品的成本和市场价值有重要影响, 优质的产品通常具有较高的产出率。各产品的产出

表 2 不同品种蓝莓冻干脆粒品质指标

Table 2 Quality indexes of different varieties freeze-dried blueberry crisps

品种	莱克西	顶峰	薄雾	绿宝石	天后	灿烂	杰兔	珠宝
鲜样百粒重(g)	111.56±3.92 ^b	136.51±2.90 ^a	84.76±5.04 ^d	92.08±2.44 ^c	80.14±6.57 ^d	134.28±4.73 ^a	107.84±3.34 ^b	80.05±5.57 ^d
产出率(%)	15.71±0.13 ^{cd}	18.96±0.13 ^b	13.38±0.13 ^e	16.10±0.02 ^c	15.35±0.13 ^d	21.18±0.13 ^a	18.62±0.04 ^b	15.43±0.13 ^d
含水率(%)	9.17±0.08 ^c	9.61±0.10 ^d	12.29±0.01 ^b	11.92±0.13 ^c	8.72±0.10 ^f	9.10±0.23 ^c	9.32±0.12 ^d	15.32±0.50 ^g
葡萄糖含量(g/100 g)	34.69±2.69 ^a	31.71±1.26 ^{bc}	30.31±0.69 ^{cd}	28.27±1.17 ^d	32.19±1.62 ^{abc}	28.36±0.16 ^d	24.17±0.81 ^e	34.07±1.66 ^{ab}
果糖含量(g/100 g)	33.53±1.65 ^a	31.19±0.83 ^b	30.69±0.31 ^b	28.33±0.64 ^c	33.95±0.33 ^a	28.67±0.85 ^c	24.04±0.25 ^d	32.79±0.88 ^a
维生素C含量(mg/100 g)	602.53±20.46 ^c	484.69±26.23 ^f	666.45±26.23 ^d	757.33±26.23 ^c	742.19±26.23 ^c	802.77±26.23 ^b	893.65±26.23 ^a	560.43±26.23 ^e
总糖含量(g/100 g)	93.80±7.23 ^a	93.75±2.94 ^a	90.63±0.50 ^a	89.77±0.97 ^a	94.28±1.69 ^a	74.02±6.69 ^b	54.05±3.51 ^c	76.90±10.06 ^b
总酸含量(g/100 g)	2.61±0.18 ^c	4.32±0.32 ^d	7.09±0.49 ^b	7.95±0.18 ^a	2.51±0.49 ^e	4.12±0.18 ^d	5.81±0.37 ^c	6.88±0.32 ^b
糖酸比	36.08±4.62 ^a	21.75±0.94 ^b	12.81±0.84 ^{cd}	11.30±0.16 ^d	38.61±7.68 ^a	18.07±2.11 ^{bc}	9.35±1.14 ^d	11.24±1.94 ^d
总酚含量(mg GAE/g)	12.11±0.03 ^b	11.63±0.01 ^c	11.51±0.03 ^d	12.23±0.01 ^a	10.83±0.02 ^g	11.26±0.03 ^e	11.22±0.04 ^{ef}	11.19±0.01 ^f
总黄酮含量(mg Rutin/g)	28.27±0.99 ^a	24.10±0.42 ^c	24.73±0.91 ^c	26.97±0.65 ^b	17.44±0.33 ^e	21.03±0.72 ^d	24.27±0.74 ^c	17.35±0.23 ^e
花色苷含量(mg/g)	7.88±0.03 ^a	6.32±0.08 ^d	4.70±0.10 ^g	6.17±0.04 ^e	6.64±0.05 ^c	4.69±0.03 ^g	4.94±0.05 ^f	6.96±0.16 ^b
DPPH自由基清除率(%)	72.59±4.69 ^a	61.51±1.92 ^b	60.18±6.43 ^b	55.53±8.87 ^b	41.47±3.93 ^c	57.84±4.28 ^b	54.74±3.32 ^b	53.54±2.90 ^b
ABTS ⁺ 自由基清除率(%)	92.26±0.85 ^b	93.02±0.19 ^a	92.80±0.09 ^{ab}	92.64±0.25 ^{ab}	92.59±0.28 ^{ab}	93.02±0.09 ^a	92.91±0.00 ^{ab}	92.80±0.34 ^{ab}
AEAC(mg AA/100 g)	966.07±3.96 ^a	768.71±72.05 ^{bc}	956.67±17.40 ^a	813.05±46.68 ^b	780.71±17.60 ^b	713.63±9.83 ^{cd}	746.84±20.37 ^{bcd}	684.23±6.51 ^d
硬度(g)	2222.46±284.80 ^b	1583.29±440.38 ^d	1836.29±532.09 ^{cd}	1697.00±443.85 ^{cd}	1636.56±468.99 ^{cd}	2659.43±647.77 ^a	1964.53±339.23 ^{bc}	1629.13±254.94 ^{cd}
脆度(g)	1189.23±607.82 ^b	720.86±470.97 ^c	808.43±670.70 ^{bc}	856.00±482.78 ^{bc}	719.44±323.14 ^c	1609.43±646.86 ^a	1052.80±566.37 ^{bc}	754.00±464.04 ^c
断裂数(个)	17.2±3.8 ^{bc}	19.5±2.2 ^{ab}	15.1±3.3 ^c	15.4±3.6 ^c	18.2±2.5 ^{ab}	20.6±2.1 ^a	19.4±3.2 ^{ab}	8.8±3.9 ^d

注: 同行相同字母表示差异不显著, 不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

率范围为 13.38%~21.18%，其中，灿烂的输出率最高，其次为顶峰和杰兔，薄雾产出率最低。

葡萄糖和果糖是蓝莓中主要的还原糖组分，莱克西、天后和珠宝三个蓝莓品种中葡萄糖、果糖的含量较高，且各品种之间无显著性差异($P>0.05$)，杰兔品种中二者含量最低。与冷冻干燥后的野生蓝莓相比，葡萄糖的含量较低，果糖含量差别不大，这可能是由于不同的生长环境所致^[32]。与还原糖含量不同，有 5 个蓝莓品种中的总糖含量无显著性差异($P>0.05$)，分别为天后、莱克西、顶峰、薄雾和绿宝石，杰兔品种总糖含量最低，剩余两个品种总糖含量分别为 74.02 g/100 g 和 76.90 g/100 g。

不同品种蓝莓脆粒总酸含量差异较大，含量最高的为绿宝石，7.95 g/100 g，其次为薄雾、珠宝和杰兔；含量最低的为天后，2.51 g/100 g，与莱克西蓝莓脆粒总酸含量无显著性差异($P>0.05$)。天后蓝莓脆粒糖酸比最大，莱克西蓝莓次之，二者之间无显著性差异($P>0.05$)；杰兔蓝莓糖酸比最低，且与薄雾、绿宝石和珠宝蓝莓脆粒之间无显著性差异($P>0.05$)，说明不同品种蓝莓脆粒糖酸比表现出与其总糖含量呈正比、与总酸含量呈反比的关系。

酸甜口感是影响消费者选择一种水果干制产品的重要指标，主要通过其总糖含量、总酸含量和糖酸比来反映。由表 2 可知，不同品种蓝莓脆粒总糖含量范围为 54.05~94.28 g/100 g、总酸含量范围为 2.51~7.95 g/100 g、糖酸比含量范围为 9.35~38.61。其中，天后总糖含量最高，莱克西、顶峰、薄雾、绿宝石与其含量无显著性差异($P>0.05$)，杰兔总糖含量最低；总酸含量与总糖含量之间并无明显的反比关系，绿宝石总酸含量最高，其次为薄雾和珠宝，莱克西和天后总酸含量较低，二者之间无显著性差异($P>0.05$)；糖酸比最高的为天后，莱克西与其无显著性差异($P>0.05$)，然后依次为顶峰和灿烂，其余品种糖酸比之间无显著性差异($P>0.05$)。综上，天后和莱克西品种属于糖含量高、酸含量低，甜酸度高的品种，绿宝石则为糖含量高、酸含量高，糖酸度却较低品种。

不同品种蓝莓脆粒总酚含量范围为 10.83~12.23 mg GAE/g，其中，绿宝石总酚含量最高，莱克西次之，天后总酚含量最低，不同品种之间具有显著性差异($P<0.05$)。不同品种蓝莓脆粒总黄酮含量范围为 17.35~28.27 mg Rutin/g，莱克西总黄酮含量最高，绿宝石次之，天后和珠宝含量最低。不同品种蓝莓脆粒花色苷含量范围为 4.69~7.88 mg/g，莱克西中花色苷含量最高，珠宝次之，薄雾和灿烂品种中花色苷含量最低。综上可知，8 个蓝莓品种中莱克西生物活性物质含量整体较高。

理论上，生物活性物质含量越高，果蔬产品的抗氧化活性越强。由表 2 可知，在不同测定方式下获得的不同蓝莓品种抗氧化活性清除率略有不同。DPPH 自由基清除率最高的为莱克西，天后最低，其

余品种无显著性差异($P>0.05$)；不同品种之间 ABTS⁺自由基清除率差异较小。总抗氧化活性结果表明，莱克西 AEAC 最高，薄雾次之，且二者之间无显著性差异($P>0.05$)；珠宝最低，与灿烂、杰兔之间无显著性差异($P>0.05$)。这之前报道一致，真空冷冻干燥能较好地保留蓝莓干制品抗氧化活性^[33]。

硬度、脆度是产品口感的重要指标，优质的产品具有酥脆的口感。硬度越大，样品越有嚼劲，但硬度过大则口感变差，脆度峰值越小表示口感越脆^[34]。各个品种中，硬度值的范围为 1583.29~2659.43 g，不同品种之间具有显著性差异($P<0.05$)，其中，灿烂硬度值最大，莱克西次之，顶峰最小。不同品种蓝莓脆粒脆度值范围为 719.44~1609.43 g，与硬度值一致，灿烂脆度值也最大，莱克西次之，而其余品种脆度值之间无显著性差异($P>0.05$)。质构指标中的断裂数能够直观反映其酥脆性，不同品种蓝莓脆粒的断裂数范围为 8.8~20.6 个，说明各品种蓝莓脆粒酥脆性差异较大，其中灿烂断裂数最多，顶峰、杰兔、天后三个品种蓝莓脆粒的断裂数与之无显著性差异($P>0.05$)，珠宝断裂数最少，其余品种之间无显著性差异($P>0.05$)。

2.2 冻干蓝莓脆粒评价指标筛选

2.2.1 冻干蓝莓脆粒评价指标主成分分析 每个主成分的方差即特征值，表示对应成分能够描述原有信息的多少。按主成分理论分析，若前 r 个主成分的累计贡献率达到了 80% 的原则，则这 r 个主成分即能反映足够的信息。由表 3 可知，第一主成分贡献率为 27.024%，第二主成分贡献率为 19.244%，第三主成分贡献率为 18.969%，第四主成分贡献率为 14.182%，第五主成分贡献率为 14.133%，累计贡献率为 93.552%，满足了达到 80% 的原则，可以用前 5 个主成分代替原来 19 个指标评价冻干蓝莓脆粒的理化和感官品质，达到了减少评价指标的目的。结果如表 3、表 4 所示。

表 3 方差贡献分析
Table 3 Variance contribution analysis

成分	提取平方和载入			旋转平方和载入		
	特征根	方差百分比(%)	累计(%)	特征根	方差百分比(%)	累计(%)
1	6.158	34.211	34.211	4.864	27.024	27.024
2	4.497	24.985	59.196	3.464	19.244	46.268
3	3.122	17.346	76.541	3.414	18.969	65.236
4	1.769	9.826	86.368	2.553	14.182	79.418
5	1.293	7.184	93.552	2.544	14.133	93.552

注：提取方法：主成分分析，旋转方法：具有 Kaiser 标准化的正交旋转法，表 4 同。

如表 4 所示，依据主成分载荷矩阵，可以看出第一主成分以还原糖含量的影响为主，其次为 V_C 含量和花色苷含量，第一主成分主要指向蓝莓脆粒的营养品质；第二主成分以活性物质和抗氧化活性的影响为主，主要指向产品的功能成分；第三主成分以含水率、总酸含量影响为主，主要指向产品的感官品质；第四主成分以产品的鲜样百粒重影响为主，其次为产

表 4 主成分载荷矩阵
Table 4 Principal component load matrix

评价指标	成分				
	1	2	3	4	5
鲜样百粒重	-0.030	0.295	0.415	0.789	0.341
含水率	0.127	-0.077	-0.965	-0.095	-0.179
产出率	-0.280	-0.126	0.322	0.755	0.423
葡萄糖含量	0.978	0.006	-0.115	-0.143	-0.045
果糖含量	0.932	-0.121	0.042	-0.241	-0.126
V _C 含量	-0.817	-0.218	0.241	-0.309	0.320
总糖含量	0.675	0.306	0.209	-0.180	-0.403
总酸含量	-0.485	0.173	-0.794	-0.012	-0.279
糖酸比	0.639	-0.069	0.708	-0.286	0.054
总酚含量	0.098	0.923	-0.124	-0.029	0.002
总黄酮含量	-0.186	0.965	0.132	-0.050	0.030
花色苷含量	0.809	0.116	0.010	-0.228	-0.071
DPPH自由基清除率	0.251	0.835	-0.063	0.193	0.365
ABTS ⁺ 自由基清除率	-0.458	-0.333	-0.148	0.754	-0.102
AEAC	0.177	0.716	0.187	-0.518	-0.061
硬度	-0.160	0.135	0.240	0.098	0.916
脆度	-0.209	0.113	0.222	0.172	0.916
断裂数	-0.326	0.124	0.871	0.305	0.149

出率和 ABTS⁺自由基清除率, 主要指向产品的加工成本和价值; 第五主成分以硬度值和脆度值的影响为主, 表明产品的质构品质。结合各主成分的贡献率, 表明对冻干蓝莓脆粒品质影响较大的指标有葡萄糖含量、果糖含量、花色苷含量、V_C 含量、总黄酮含量、总酚含量、DPPH 自由基清除率、总抗氧化活性 AEAC、干样含水率、总酸含量、鲜样百粒重、产出率、ABTS⁺自由基清除率、硬度和脆度。

2.2.2 蓝莓脆粒品质指标描述性和相关性分析 变异系数的差异反映了生物主要性状在进化保守性或

遗传可塑性方面的不同, 在进行品种资源评价及筛选时应作为重要因素予以考虑。采用 SPSS 22.0 对 8 种冻干蓝莓脆粒的 18 项品质指标数据进行统计分析, 变异系数公式如下:

变异系数(%) = 标准差/平均值×100

由表 5 可知, 除总酚含量和 ABTS⁺自由基清除率外, 其余品质指标的变异系数均大于 10%, 说明不同品种蓝莓脆粒的品质指标差别较大。其中, 糖酸比的变异系数最大, 为 57.89%, 说明不同品种的风味特征差异很大; 总酸的变异系数为 40.25%, 说明不同品种蓝莓风味特征中的酸含量差异较大; 另外, 不同品种蓝莓脆粒的鲜样百粒重、含水率、脆度和断裂数的变异系数均大于 20%, 说明各品种间感官品质差异也很大。蓝莓脆粒的产出率最小值为 13.38%, 最大值为 21.18%, 表明不同品种蓝莓经过真空冷冻干燥制作为脆粒休闲食品之后, 产品的产出率具有明显的差异, 而产出率是评价加工品质的重要指标。

为确定各评价指标间可能存在的相关性, 对冻干蓝莓脆粒的各品质评价指标进行相关性分析。由于不同品质评价指标的量纲不一致, 在数据分析之前需将原始数据进行标准化, 然后用 SPSS 22.0 软件进行相关性分析, 结果如表 6 所示。

由表 6 可知, 产出率与鲜样百粒重呈极显著正相关($P<0.01$), 说明蓝莓鲜果的重量高低显著影响其干制产品的产出率, 这是评价其加工品质的重要指标; 果糖含量与葡萄糖含量呈极显著正相关($P<0.01$), V_C 含量与葡萄糖含量呈显著负相关($P<0.05$), 总糖含量与果糖含量呈显著正相关($P<0.05$), 表明蓝莓脆粒中还原糖含量在总糖含量中占比较高, 可直接反映蓝莓中的总糖含量, 并且两种主要还原糖含量具有一

表 5 冻干蓝莓脆粒品质指标测定数据分布
Table 5 Data distribution of blueberry crisps quality evaluation indexes

品质指标	最小值	最大值	均值	极差	标准差	变异系数(%)
鲜样百粒重(g)	80.05	136.51	103.40	56.46	22.98	22.23
产出率(%)	13.38	21.18	16.84	7.8	2.52	14.97
含水率(%)	8.72	15.32	10.68	6.6	2.31	21.60
葡萄糖含量(g/100 g)	24.17	34.69	30.47	10.52	3.47	11.39
果糖含量(g/100 g)	24.04	33.95	30.40	9.91	3.31	10.88
V _C 含量(mg/100 g)	484.69	893.65	688.76	408.96	135.53	19.68
总糖含量(g/100 g)	54.05	94.28	83.40	40.23	14.23	17.07
总酸含量(g/100 g)	2.51	7.95	5.16	5.44	2.08	40.25
糖酸比	9.35	38.61	19.90	29.26	11.52	57.89
总酚含量(mg GAE/g)	10.83	12.23	11.50	1.4	0.48	4.16
总黄酮含量(mg Rutin/g)	17.35	28.27	23.02	10.92	4.07	17.69
花色苷含量(mg/g)	4.69	7.88	6.04	3.19	1.17	19.31
DPPH自由基清除率(%)	41.47	72.59	57.18	31.12	8.74	15.28
ABTS ⁺ 自由基清除率(%)	92.26	93.02	92.76	0.76	0.25	0.27
总抗氧化活性AEAC(mg AA/100 g)	684.23	966.07	803.74	281.84	105.03	13.07
硬度(g)	1583.29	2659.43	1903.59	1076.17	372.85	19.59
脆度(g)	719.44	1609.43	963.77	889.99	310.32	32.20
断裂数(个)	8.8	20.6	16.78	11.80	3.77	22.47

表 6 冻干蓝莓脆粒标准化数据间的相关系数
Table 6 Correlation coefficients of standardized data of freeze-dried blueberry crisps

品质指标	鲜样百粒重	含水率	产出率	葡萄糖含量	果糖含量	V _C 含量
鲜样百粒重	1					
含水率	-0.564	1				
产出率	0.846**	-0.490	1			
葡萄糖含量	-0.204	0.260	-0.457	1		
果糖含量	-0.283	0.147	-0.494	0.960**	1	
V _C 含量	-0.075	-0.348	0.273	-0.810*	-0.700	1
总糖含量	-0.131	-0.017	-0.476	0.699	0.776*	-0.622
总酸含量	-0.371	0.753*	-0.258	-0.367	-0.447	0.097
糖酸比	0.047	-0.581	-0.127	0.579	0.689	-0.225
总酚含量	0.195	0.064	-0.129	0.097	-0.038	-0.242
总黄酮含量	0.318	-0.234	-0.036	-0.194	-0.300	0.005
花色苷含量	-0.182	0.087	-0.338	0.783*	0.703	-0.581
DPPH自由基清除率	0.492	-0.063	0.063	0.223	0.029	-0.385
ABTS ⁺ 自由基清除率	0.411	0.072	0.592	-0.513	-0.511	0.112
AEAC	-0.148	-0.141	-0.584	0.265	0.270	-0.175
硬度	0.530	-0.420	0.535	-0.222	-0.249	0.409
脆度	0.577	-0.419	0.633	-0.290	-0.329	0.448
断裂数	0.698	-0.942**	0.639	-0.463	-0.361	0.398
品质指标	总糖含量	总酸含量	糖酸比	总酚含量	总黄酮含量	花色苷含量
鲜样百粒重						
含水率						
产出率						
葡萄糖含量						
果糖含量						
V _C 含量						
总糖含量	1					
总酸含量	-0.255	1				
糖酸比	0.582	-0.895**	1			
总酚含量	0.369	0.245	-0.070	1		
总黄酮含量	0.151	0.134	-0.073	0.870**	1	
花色苷含量	0.505	-0.382	0.596	0.303	0.028	1
DPPH自由基清除率	0.154	-0.068	0.018	0.716*	0.755*	0.201
ABTS ⁺ 自由基清除率	-0.470	0.309	-0.606	-0.424	-0.322	-0.721*
AEAC	0.529	-0.099	0.327	0.548	0.677	0.170
硬度	-0.318	-0.325	0.072	0.054	0.190	-0.309
脆度	-0.386	-0.288	0.014	0.072	0.182	-0.303
断裂数	-0.090	-0.551	0.318	-0.043	0.278	-0.355
品质指标	DPPH自由基清除率	ABTS ⁺ 自由基清除率	AEAC	硬度	脆度	断裂数
鲜样百粒重						
干样含水率						
产出率						
葡萄糖含量						
果糖含量						
V _C 含量						
总糖含量						
总酸含量						
糖酸比						
总酚含量						
总黄酮含量						
花色苷含量						
DPPH自由基清除率	1					
ABTS ⁺ 自由基清除率	-0.252	1				
AEAC	0.571	-0.631	1			
硬度	0.404	0.029	0.066	1		
脆度	0.366	0.082	-0.053	0.986**	1	
断裂数	0.080	0.211	0.047	0.459	0.473	1

注: *表示在0.05水平上(双侧)显著相关; **表示在0.01水平上(双侧)极显著相关。

致性关系; 蓝莓脆粒中糖酸比与总酸含量呈极显著负相关($P<0.01$), 说明不同蓝莓品种中糖含量总体较高, 其总酸含量能够决定其糖酸比。总黄酮含量与总酚含量呈极显著正相关($P<0.01$), DPPH 自由基清除率与总黄酮含量呈显著正相关($P<0.05$), 表明不同蓝莓品种中其总黄酮含量越高, DPPH 自由基清除率也越高, 但并未获得黄酮或总酚含量与蓝莓脆粒总抗氧化活性之间的相关性。

休闲脆粒产品质构参数是其加工品质的重要评价指标, 不同品种蓝莓经干燥后制作为脆粒休闲食品, 其硬度值和脆度值之间具有显著差异(见表 2), 且二者之间呈极显著正相关($P<0.01$), 这与其他果蔬休闲食品结果有所不同; 蓝莓脆粒的断裂数与其干样含水率呈极显著负相关($P<0.01$), 说明若蓝莓脆粒的含水率高, 则其酥脆性就会较差。另外, 本研究通过标准化数据获得不同品种蓝莓脆粒产品的总酸含量其与干样含水率呈显著正相关($P<0.05$)。

根据表 6 可知, 多数加工品质指标之间具有显著的关系, 表明有些指标可以用与之显著相关的指标代替。根据目前休闲干制品的品质评价现状, 主要考虑冻干蓝莓脆粒的营养品质、生物活性和质构等方面的指标。根据产品的营养品质, 选择具有代表性的葡萄糖含量作为核心指标, 根据产品的质构和加工成本, 将干样含水率、产出率和硬度作为核心指标, 同时考虑到产品的活性物质含量和抗氧化能力, 选择花色苷含量、总黄酮含量及总抗氧化活性作为核心指标。

综上所述, 结合主成分与相关性分析结果, 选择 7 个评价指标作为冻干蓝莓脆粒品质评价的核心指

标, 即葡萄糖含量、花色苷含量、总黄酮含量、总抗氧化活性、干样含水率、产出率和硬度。

2.2.3 冻干蓝莓脆粒核心指标评价标准建立 根据葡萄糖含量、花色苷含量、总黄酮含量、总抗氧化活性 AEAC、干样含水率、产出率和硬度这 7 个核心指标数值的分布情况, 考虑实际应用的需求, 以平均值为中心将各指标相应划分为 4 个级别, 其中 I 级为优, II 级为良, III 级为中, IV 级为差, 建立蓝莓脆粒加工品质指标评价标准, 具体见表 7。

2.3 蓝莓脆粒品质评价模型建立

2.3.1 核心指标权重确定 根据方差贡献表、主成分载荷值, 将筛选的核心评价指标葡萄糖含量、花色苷含量、总黄酮含量、总抗氧化活性 AEAC、干样含水率、产出率和硬度进行标准化, 计算出在综合得分模型中的系数, 然后采用归一化法确定各个指标的权重。各指标的权重如表 8 所示。由表可知, 核心指标葡萄糖含量、花色苷含量、总黄酮含量、总抗氧化活性 AEAC、干样含水率、产出率和硬度的权重系数分别为 0.223、0.207、0.215、0.154、-0.280、0.218、0.263, 说明干样含水率对产品的影响最大, 其次为硬度、葡萄糖含量、产出率和总黄酮含量。

2.3.2 评价模型建立 将蓝莓脆粒的核心指标经过标准化处理后, 得到数学模型:

$$Z=0.223\times\text{葡萄糖含量}+0.207\times\text{花色苷含量}+0.215\times\text{总黄酮含量}+0.154\times\text{AEAC}-0.280\times\text{干样含水率}+0.218\times\text{产出率}+0.263\times\text{硬度}$$

蓝莓脆粒品质的综合得分如表 9 所示。莱克西的得分为 1.4240, 综合得分最高, 其次为灿烂。得分

表 7 冻干蓝莓脆粒加工品质评价标准
Table 7 Processing quality evaluation standards of freeze-dried blueberry crisps

分类	分类值						
	葡萄糖含量 (g/100 g)	花色苷含量 (g/mg)	总黄酮含量 (mg Rutin/g)	AEAC (mg AA/100 g)	含水率 (%)	产出率 (%)	硬度 (g)
I	≥32.58	≥6.96	≥25.64	≥884.90	≤9.7	≥19.01	≥2281.51
II	30.47~32.58	6.04~6.96	23.02~25.64	803.74~884.90	9.7~10.68	16.84~19.01	1903.59~2281.51
III	27.32~30.47	5.36~6.04	20.18~23.02	743.98~803.74	10.68~13	15.11~16.84	1743.44~1903.59
IV	≤27.32	≤5.36	≤20.18	≤743.98	≥13	≤15.11	≤1743.44

注: 以平均值为中心, 最大值=(平均值+最大值)/2, 最小值=(平均值+最小值)/2。

表 8 冻干蓝莓脆粒核心指标权重分布
Table 8 Distribution for main indexes of freeze-dried blueberry cirpsps

核心评价指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5	综合系数	指标权重
葡萄糖含量	0.978	0.006	-0.115	-0.143	-0.045	0.098	0.223
花色苷含量	0.809	0.116	0.01	-0.228	-0.071	0.092	0.207
总黄酮含量	-0.186	0.965	0.132	-0.05	0.03	0.095	0.215
AEAC	0.177	0.716	0.187	-0.518	-0.061	0.068	0.154
干样含水率	0.127	-0.077	-0.965	-0.095	-0.179	-0.124	-0.280
产出率	-0.28	-0.126	0.322	0.755	0.423	0.096	0.218
硬度	-0.16	0.135	0.24	0.098	0.916	0.116	0.263
特征值	4.864	3.464	3.414	2.553	2.544		
贡献率	27.024	19.244	18.969	14.182	14.133		

为正的品种还有顶峰,其余得分均为负值。根据综合得分可以初步确定蓝莓脆粒中具有良好品质的品种为莱克西和灿烂。

表9 蓝莓脆粒品质综合得分
Table 9 Comprehensive quality scores of freeze-dried blueberry crisps

品种	得分	排名
莱克西	1.4240	1
顶峰	0.2227	3
薄雾	-0.4752	7
绿宝石	-0.2559	6
天后	-0.1903	4
灿烂	0.4880	2
杰兔	-0.2553	5
珠宝	-0.9580	8

3 结论

本研究通过冷冻干燥处理蓝莓鲜果,测定八种不同品种蓝莓的 18 项品质指标及加工指标,结合主成分与相关性分析的结果,建立蓝莓脆粒核心指标评价标准,为蓝莓鲜果深加工的品种筛选提供了理论依据。结论如下:

糖酸比和总酸的变异系数较大,为 57.89% 和 40.25%,说明不同品种的风味特征差异很大。且除总酚含量和 ABTS⁺自由基清除率外,其余品质指标的变异系数均大于 10%,其中糖酸比说明不同品种蓝莓脆粒的品质指标差别较大。产出率与鲜样百粒重、果糖含量与葡萄糖含量、总黄酮含量与总酚含量、硬度值和脆度值呈极显著正相关($P<0.01$),蓝莓脆粒中糖酸比与总酸含量、断裂数与其干样含水率呈极显著负相关($P<0.01$)。

结合主成分与相关性分析结果,选择 7 个评价指标作为冻干蓝莓脆粒品质评价的核心指标,即葡萄糖含量、花色苷含量、总黄酮含量、总抗氧化活性、干样含水率、产出率和硬度。将 7 个指标进行标准化,发现干样含水率对产品影响最大,将蓝莓脆粒的核心指标经过标准化处理后,建立数学模型,莱克西的得分最高为 1.4240,其次是灿烂和顶峰,其余得分均为负值。其中莱克西品种最适宜加工为蓝莓脆粒。研究结果为江苏省内蓝莓干制加工专用品种筛选和品质分析提供了依据。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 张卫明. 一带一路经济植物[M]. 南京: 东南大学出版社, 2017: 392. [ZHAGN W M, Economic plants in one belt and one road[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2017: 392.]
- [2] 李殿鑫, 戴远威, 陈伟, 等. 蓝莓的营养价值及保健功能研究进展[J]. 农产品加工, 2018(4): 69-70, 74. [LI D X, DAI Y W,

CHEN W, et al. Research progress on nutritional value and health function of blueberry[J]. Farm Products Processing, 2018(4): 69-70, 74.]

[3] 李亚东, 张志东, 吴林. 蓝莓果实的成分及保健机能[J]. 中国食物与营养, 2002(1): 27-28. [LI Y D, ZHANG Z D, WU L. Blueberry fruit composition and health functions[J]. Food and Nutrition in China, 2002(1): 27-28.]

[4] WU Y Q, HAN T Y, YANG H, et al. Known and potential health benefits and mechanisms of blueberry anthocyanins: A review[J]. Food Bioscience, 2023, 55: 103050.

[5] ZORITA D, LOREDANA F L, DUMITRITA O R, et al. Antiproliferative and antioxidant properties of anthocyanin rich extracts from blueberry and blackcurrant juice[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(2): 2352-2365.

[6] DANIELA H B, CHAI Z, HUTABARAT R P, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of blueberry anthocyanins by AMPK activation: In vitro and in vivo studies[J]. Redox Biology, 2021, 46: 102100.

[7] AZARI H, MOROVATI A, BAHGRAM P G, et al. Beneficial effects of blueberry supplementation on the components of metabolic syndrome: A systematic review and meta-analysis[J]. Food Function, 2022, 13: 4875-4900.

[8] TRAVICA N, NATHAN M D, NENAD N, et al. The effect of blueberry interventions on cognitive performance and mood: A systematic review of randomized controlled trials[J]. Brain Behavior and Immunity, 2020, 85: 96-105.

[9] DELLA L C M, OLIVEIRA L A, DIAS K A, et al. Scientific evidence for the beneficial effects of dietary blueberries on gut health: A systematic review[J]. Molecular Nutrition Food Research, 2023, 67: 15.

[10] 李亚东, 盖禹含, 王芳, 等. 2021 年全球蓝莓产业数据报告[J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44(1): 1-12. [LI Y D, GAI Y H, WANG F, et al. Global blueberry industry report 2021[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2022, 44(1): 1-12.]

[11] 刘宇航, 陈影影, 曹玉婷, 等. 蓝莓鲜果采后病害类型及保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(11): 144-150. [LIU Y H, CHEN Y Y, CAO Y T, et al. Research progress on postharvest disease types and preservation technology of blueberry fruit[J]. Storage and Process, 2021, 21(11): 144-150.]

[12] FENG L, XU Y Y, XIAO Y D, et al. Effects of pre-drying treatments combined with explosion puffing drying on the physico-chemical properties, antioxidant activities and flavor characteristics of apples[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128015.

[13] XU Y Y, XIAO Y D, CAMEL L, et al. A comparative study of drying methods on physical characteristics, nutritional properties and antioxidant capacity of broccoli[J]. Drying Technology, 2020, 38(10): 1378-1388.

[14] 于蕊, 杨慧珍, 李大婧, 等. 真空冷冻干燥不同升温程序对蓝莓干燥特性及品质影响[J]. 核农学报, 2024, 38(1): 84-92. [YU R, YANG H Z, LI D J, et al. Effects of different heating procedures on the drying characteristics and quality of blueberry during vacuum freeze drying[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(1): 84-92.]

[15] 秦力悦, 石萍萍, 李荣辉, 等. 基于主成分分析和聚类分析的烘烤类澳洲坚果果仁综合品质评价[J]. 食品工业科技, 2022, 44(18): 331-341. [QIN L Y, SHI P P, LI R H, et al. Comprehensive quality evaluation of roasted kernels in macadamia nuts based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 44(18): 331-341.]

- [16] 邹雪梅,卜庆状,张馨予,等. 蓝莓果实品质分析与评价研究进展[J]. *辽宁农业科学*, 2023(5): 66–71. [ZHOU X M, BU Q Z, ZHANG X Y, et al. Progress in analyzing and of fruit quality of blueberry[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2023(5): 66–71.]
- [17] 乌凤章,张润梅,尹泽宇,等. 基于主成分分析的高丛蓝莓品种果实品质综合评价[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 262–269. [WU F Z, ZHANG R M, YIN Z Y, et al. Comprehensive quality evaluation of highbush blueberry cultivars based on principal component analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(22): 262–269.]
- [18] 宋江峰,刘春泉,姜晓青,等. 基于主成分与聚类分析的莱用大豆品质综合评价[J]. *食品科学*, 2015, 36(13): 12–17. [SONG J F, LIU C Q, JIANG X Q, et al. Comprehensive evaluation of vegetable soybean quality by principal component analysis and cluster analysis[J]. *Food Science*, 2015, 36(13): 12–17.]
- [19] ZHANG L H, QIAO Y, WANG C, et al. Effects of freeze vacuum drying combined with hot air drying on the sensory quality, active components, moisture mobility, odors, and microstructure of kiwifruits[J]. *Journal of Food Quality*, 2019, 19: 1–11.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National standards for food safety Determination of moisture in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [21] 邓婷婷,肖亚冬,刘春泉,等. 不同品种冻干无核葡萄脆粒品质评价[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(2): 298–306. [DENG T T, XIAO Y D, LIU C Q, et al. Quality evaluation of different varieties of freeze-dried seedless grape crisp[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(2): 298–306.]
- [22] 国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. GB 5009.8-2023 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.8-2023 Determination of fructose, glucose, sucrose, maltose, lactose in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.]
- [23] 刘胜辉,臧小平. 高效液相色谱法测定水果中的抗坏血酸[J]. *生命科学仪器*, 2005, 3(4): 38–40. [LIU S H, ZANG X P. The determination of the ascorbic acid in fruits by HPLC[J]. *Life Science Instruments*, 2005, 3(4): 38–40.]
- [24] 刘霞,江宁,刘春泉,等. 不同干燥方式对黑毛豆仁品质的影响[J]. *食品科学*, 2011, 32(18): 59–62. [LIU X, JIANG N, LIU C Q, et al. Effects of drying methods on the quality of black edamame[J]. *Food Science*, 2011, 32(18): 59–62.]
- [25] 郭金龙,陈有君,孙国琴,等. 苯酚-硫酸法测定杏鲍菇多糖方法的研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(12): 555–558. [GUO J L, CHEN Y J, SUN G Q, et al. Study on phenol-sulfuric acid method for determination of polysaccharide content in *Pleurotus eryngii*[J]. *Food Science*, 2008, 29(12): 555–558.]
- [26] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. GB 12456-2021 食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 12456-2021 National standards for food safety Determination of total acid in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.]
- [27] 李静,聂继云,毋永龙. Folin-Ciocalteus 法测定马铃薯中的总多酚[J]. *中国马铃薯*, 2014, 28(1): 27–30. [LI J, NIE J Y, WU Y L. Determination of total polyphenols in potato using folin-ciocalteus method[J]. *Chinese Potato Journal*, 2014, 28(1): 27–30.]
- [28] 董怡,林恋竹,赵谋明. 光果甘草叶总黄酮测定方法[J]. *食品科学*, 2014, 28(1): 27–30. [DONG Y, LIN L Z, ZHAO M M. Determination of total flavonoids in leaves of *Glycyrrhiza glabra* L. by spectrophotometry[J]. *Food Science*, 2014, 28(1): 27–30.]
- [29] FANG Y L, MENG J F, ZHANG A, et al. Influence of shriveling on berry composition and antioxidant activity of cabernet sauvignon grapes from Shanxi vineyards[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(4): 749–751.
- [30] RAMIERZ J E, ZAMBRANO R, SEPULVDA B, et al. Anthocyanins and antioxidant capacities of six chilean berries by HPLC–HR-ESI-TOF-MS[J]. *Food Chemistry*, 2015, 176: 106–114.
- [31] GUO J, LIU C J, LI Y, et al. Effect of sucrose and citric acid on the quality of explosion puffing dried yellow peach slices[J]. *Drying Technology*, 2021, 40: 2783–2793.
- [32] SHAIMA A H, ZAHIR A A, MOSTAFA W, et al. Polyphenol and flavonoid stability of wild blueberry (*Sideroxylon mascatense*) during air-and freeze-drying and storage stability as a function of temperature[J]. *Foods*, 2023, 12(4): 871.
- [33] 许文静,陈昌琳,邓莎,等. 不同前处理方式对冻干蓝莓粉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(6): 89–95. [XU W J, CHEN C L, DENG S, et al. Effects of different pretreatment methods on quality characteristics of freeze-dried blueberry powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(6): 89–95.]
- [34] 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.]