

基于主成分分析法的9个品种蓝莓品质评价

梁钰梅, 李可, 林籽汐, 李晓梅, 周劲松, 廖茂雯, 林昊然, 朱永清, 李华佳, 刘刚

Quality Evaluation of Nine Varieties of Blueberry Based on Principal Component Analysis

LIANG Yumei, LI Ke, LIN Zixi, LI Xiaomei, ZHOU Jinsong, LIAO Maowen, LIN Haoran, ZHU Yongqing, LI Huajia, and LIU Gang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050072>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于主成分分析的不同品种小米品质评价

Quality Evaluation of Different Varieties Millet Based on Principal Components Analysis

食品工业科技. 2019, 40(9): 49-56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.09.010>

基于主成分分析的芹菜品质评价

Quality Evaluation of Celery Based on Principal Component Analysis

食品工业科技. 2020, 41(3): 308-314,320 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.051>

基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价

Quality Evaluation of Different Varieties of Oat Based on Principal Components Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2020, 41(13): 85-91 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.014>

基于聚类分析和主成分分析法的杨梅营养品质评价研究

Evaluation of nutritional quality of red bayberry based on cluster analysis and principal component

食品工业科技. 2017(01): 278-280 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.01.047>

基于相关性分析和主成分分析的米豆腐品质评价

Evaluation of Rice Tofu Quality Based on Correlation Analysis and Principal Component Analysis

食品工业科技. 2018, 39(17): 33-39,45 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.17.006>

基于主成分分析的鲜海带营养品质评价

Nutritional Quality Evaluation of Fresh Kelp based on Principal Component Analysis

食品工业科技. 2018, 39(19): 220-224,231 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.039>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

梁钰梅, 李可, 林籽汐, 等. 基于主成分分析法的 9 个品种蓝莓品质评价 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 235–244. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050072

LIANG Yumei, LI Ke, LIN Zixi, et al. Quality Evaluation of Nine Varieties of Blueberry Based on Principal Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 235–244. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050072

· 分析检测 ·

基于主成分分析法的 9 个品种蓝莓品质评价

梁钰梅^{1,2}, 李 可², 林籽汐², 李晓梅², 周劲松³, 廖茂雯², 林昊然¹, 朱永清², 李华佳^{2,*}, 刘 刚^{1,*}

(1.四川师范大学生命科学学院, 四川成都 610000;

2.四川省农业科学院农产品加工研究所, 四川成都 610000;

3.四川省葡萄酒与果酒行业协会, 四川成都 610000)

摘要:为了解不同品种蓝莓的品质特性, 本文以 9 个品种蓝莓为研究对象, 分别从外观、理化及糖酸组成等方面对果实品质进行差异分析, 采用相关性分析分析了不同指标之间的相关性, 并采用主成分分析对蓝莓的品质性状进行综合评价。结果表明: 不同品种蓝莓外观、理化和糖酸组成等指标均表现出丰富的多样性, 多个指标如葡萄糖和果糖 ($r=0.93$)、FRAP 和 DPPH ($r=0.755$) 之间存在较高的相关性; 柠檬酸、pH、 b^* 、总酚、DPPH、黄酮、出汁率是评价蓝莓综合品质的关键性指标。‘灿烂’、‘莱格西’、‘双丰’果形指数优 (>0.73)、固酸比适中为 6.12~9.57, 适合鲜食。‘巴尔德温’、‘都克’、‘微三’糖酸含量高、抗氧化能力较好, 适合果汁、果酒等产品开发。‘微三’、‘都克’的黄酮 (1.95、1.62 mg/g)、总酚 (1.34、1.38 mg/g) 含量高, 适宜于功能性产品开发。该研究结果可作为不同用途蓝莓品种筛选的重要参考依据。

关键词: 蓝莓, 加工适宜性评价, 抗氧化性, 主成分分析

中图分类号: TS255.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)09-0235-10

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2023050072](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050072)

本文网刊:



Quality Evaluation of Nine Varieties of Blueberry Based on Principal Component Analysis

LIANG Yumei^{1,2}, LI Ke², LIN Zixi², LI Xiaomei², ZHOU Jinsong³, LIAO Maowen², LIN Haoran¹,
ZHU Yongqing², LI Huajia^{2,*}, LIU Gang^{1,*}

(1. College of Life Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610000, China;

2. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences,

Chengdu 610000, China;

3. Sichuan Wine and Fruit Wine Industry Association, Chengdu 610000, China)

Abstract: To investigate the quality characteristics of different varieties of blueberry, the quality differences on appearance, physicochemical properties, and sugar and acid composition were analyzed. At the same time, correlation analysis was employed to analyze the correlation of different indexes and principal component analysis was employed to evaluate the quality characteristics of 9 varieties of blueberry. The results showed that different varieties of blueberry exhibited rich diversity in appearance, physicochemical properties, and sugar and acid composition. There was a high correlation between multiple indicators such as glucose and fructose ($r=0.93$), FRAP and DPPH ($r=0.755$). PCA results indicated that citric acid, pH, b^* , total phenol, DPPH, flavonoid and juice yield were key indicators for evaluating the quality of blueberry, and the quality characteristics of 'Canlan', 'Laigexi' and 'Shuangfeng' were excellent fruit shape index (>0.73), good solid to acid ratio of 6.12~9.57 and suitable for fresh consumption. The quality characteristics of 'Baerdewen', 'Duke' and 'Weisan'

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 四川省农业科学院 1+9 揭榜挂帅项目-功能食品核心技术攻关 (1+9KJGG007); 四川省科技计划重点研发项目 (2020YFN0149)。

作者简介: 梁钰梅 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: 1569399343@qq.com。

* 通信作者: 李华佳 (1982-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬贮藏加工, E-mail: huajia611@163.com。

刘刚 (1968-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品微生物、功能食品, E-mail: rh682@sohu.com

included the high in sugar, acid and antioxidant capacity, suitable for juice and wine and other products development. The flavonoid contents of 'Weisan' and 'Duke' were 1.95 and 1.62 mg/g, and the total phenol contents were 1.34 and 1.38 mg/g, respectively. The quality characteristics of 'Weisan' and 'Duke' were high content of total phenol and flavonoid, suitable for functional product development. The results above will serve an important reference to screen blueberry varieties for different purposes.

Key words: blueberry; processing suitability evaluation; antioxidant activity; principal component analysis

蓝莓(*Vaccinium* spp.)又称越橘,富含总酚、黄酮等功能活性成分,具有抗氧化、抗癌和抑菌等多种功效,已被联合国粮农组织列为人类五大健康食品之一^[1]。蓝莓具有很高的种植效益和巨大的市场潜力,已成为全球第二大浆果^[2-3]。我国蓝莓产业发展起步较晚,但发展速度最快,商业化栽培由 2000 年的 10 hm² 陡增至 2020 年的 6.64 万 hm²,总产量 34.72 万吨,占全球的 29.24%,目前我国引进的蓝莓品种有 150 多种,除用于鲜食外,其加工果比例高达 53.9%^[2-4]。

原料是加工的第一车间,蓝莓的表型性状和营养品质特性决定了其用途及加工性能,而品种是决定原料质量的决定性因素。因此,不同品种蓝莓加工适宜性各不相同。花青素含量高的适宜于花青素产品开发,酸甜适口的果实适宜于鲜食以及果干、果膏等产品加工,香气突出、糖度较高的果实适宜于果酒等加工,出汁率较高、有机酸含量低的适宜于果汁或复合饮料加工^[5-7]。因此,对蓝莓品质质量进行综合评价是蓝莓资源开发利用的基础。目前已有部分研究开展了相关研究,并对品种进行了分类。如张素敏等^[8]通过果实外观、营养品质及加工性能指标的观测与分析,对 12 个辽南露地栽培蓝莓品种果实加工性能评价,并筛选出‘日出’、‘蓝金’、‘北卫’为理想的加工原料。朱诗慧等^[9]对辽宁主栽的 10 个品种蓝莓理化和营养指标进行测定分析,并结合聚类分析对其加工适应性进行了评价,明确了‘杜克’、‘日出’适宜鲜食;‘伯克利’、‘北陆 1’和‘北青’适宜加工果汁果酒;‘圣云’、‘北陆 3’适宜加工果酱,以上研究为蓝莓种植和精深加工品种选择提供了可参考的科学依据。

果实品质评价是选育优良品种的关键性因素。研究发现,蓝莓果实品质性状的变异与基因型密切相关,还与气候、地区、生长条件、土壤质量等有关^[10]。品种选择区域化特征明显,北方地区经过十几年的品种布局优化,品种选择趋于稳定成熟,而南方产区依然表现为多品种种植的生产状态。目前关于南方产区蓝莓品质综合评价研究所包含的品种和地区较少,综合品质特征侧重点也不一样。且对于四川地区引种蓝莓的综合质量评价鲜有报道,仅有许文静等^[11]研究四川地区蓝莓‘园蓝’、‘蓝雨’、‘莱格西’等 6 个品种的综合评价,陈昌琳等^[12]研究表明四川地区南方高丛蓝莓“春高”及“法新”综合品质优于其他 4 个品种这两项报道。因此,本文以四川省主栽的 9 个蓝莓品种为研究对象,对外形、理化、风味物质组成、

功能活性成分及抗氧化活性等方面进行解析,并进一步通过主成分分析综合评判明确不同品种的加工适应性及用途,为南方区域蓝莓品种合理布局以及精深加工原料选择提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

本研究样品‘双丰’、‘莱格西’、‘微三’、‘巴尔德温’、‘都克’、‘博尼法西’、‘薄雾’、‘灿烂’、‘晚秋’9 个品种的蓝莓果实 均采集自四川省巴中市通江县安优生态农业有限公司有机蓝莓种植基地,于商品成熟期采收;3,5-二硝基水杨酸(DNS)试剂、福林酚试剂、无水碳酸钠、三氯化铝、葡萄糖标准品等 成都市科隆化学品有限公司;ABTS 法、FRAP 法、DPPH 法总抗氧化能力试剂盒 苏州科铭生物技术有限公司;琥珀酸、柠檬酸、乳酸、酒石酸、奎尼酸、苹果酸、乙酸、葡萄糖、蔗糖、果糖标准品 上海源叶生物科技有限公司。

A11 分析研磨机 德国艾卡公司;855 型全自动滴定仪 瑞士万通公司;PHS-3C pH 计 上海雷磁公司;HROMA METEA CR-400 色差仪 柯尼卡美能达;1260 HPLC 高效液相色谱 美国安捷伦技术公司;Intuvo900-597b 气质联用色谱仪 日本岛津公司;PAL-1 手持型糖度计 日本爱拓公司;DHG-9070 电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同品种蓝莓外观特征的测定 果实密度:采用密度法测量,密度为质量与体积之比。

果形指数:每个品种蓝莓随机选取 30 颗无机械损伤的果实,利用游标卡尺测定果实的横、纵径,通过横纵径计算果形指数。

$$\text{果形指数} = \frac{\text{纵径}}{\text{横径}}$$

单果重:采取直接称重法,每个品种蓝莓随机选取 30 个新鲜无机械损伤的果实,计算单果重,结果取平均值。

出汁率:参照马艳弘等^[13]的方法并做些许修改,将蓝莓果实用分析研磨机打碎后,将果浆离心(4000 r/min, 20 min)后过滤备用,称取果浆和滤液的质量计算出汁率。

$$\text{出汁率}(\%) = \frac{\text{果汁质量}}{\text{果浆质量}} \times 100$$

色差:分别选择 30 个完好的不同品种蓝莓果

实, 测定蓝莓果皮赤道线上分布均匀的三个部位的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.2.2 不同品种蓝莓理化特征的测定 还原糖、总糖: 参考孙文等^[14]的方法, 采用 3,5-二硝基水杨酸法(DNS)测定。将蓝莓果实用液氮冷冻后, 使用分析研磨机打碎为蓝莓样品备用。还原糖测定前处理: 称 0.5 g 样品, 加入 50 mL 水摇匀后, 50 °C 水浴保温 20 min, 定容至 100 mL。过滤后取滤液为还原糖样品待用。总糖测定前处理: 称取 0.5 g 蓝莓样品, 加入 6 mol/L HCl 10 mL, 蒸馏水 15 mL, 于沸水浴中水解 30 min, 冷却后加入 6 mol/L NaOH 溶液调 pH 至中性, 并定容至 100 mL, 过滤后取滤液为总糖样品待用。以葡萄糖(0.2、0.4、0.6、0.8、1 mg/mL)标准溶液为对照品作标准曲线, 检测结果以葡萄糖当量表示。然后分别向试管中加入 0.5 mL 还原糖样品、总糖样品和葡萄糖标准溶液与 0.5 mL DNS 试剂, 混合均匀后水浴加热 5 min 后加入 4 mL 蒸馏水稀释后用酶标仪在 540 nm 处测得吸光度值。葡萄糖标准曲线为: $y=0.6385x+0.0005$, $R^2=0.9998$ 。通过标准曲线计算出还原糖和总糖的含量。

可溶性固形物、总酸、pH: 将蓝莓果使用分析研磨机破碎, 经过离心(4000 r/min, 10 min), 取上清液备用。可溶性固形物采用 PAL-1 型糖度计测定, 总酸采用全自动滴定分析仪测定, pH 采用 pH 计测定, 每个品种平行测定三次, 结果取平均值。

糖组分及含量的测定: 采用高效液相色谱测定, 参照 Tina 等^[15]的方法并略作修改。取蓝莓样品 2 g 用 15 mL 水超声提取(室温 100 W)30 min 后过滤, 将三次滤液合并定容至 50 mL 后经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后得蓝莓提取液备用。将蓝莓提取液稀释 5 倍后经 0.22 μm 微孔滤膜过滤备用。标准溶液的配制: 分别称取 0.1000 g 葡萄糖、果糖, 用超纯水定容至 100 mL, 配制成 1 mg/mL 的混合糖标准储备液, 再依次稀释成 5、10、20、50、100 μg/mL 的标准使用液, 经 0.22 μm 滤膜过滤后备用。HPLC 条件: 色谱柱: Aminex/Hiplex-Ca 分析柱(300 mm×7.8 mm); 流动相: 100% UP 水; 流速: 0.6 mL/min; 进样量: 20 μL; 柱温 80 °C。蒸发光检测器条件, 氮气流速: 2 mL/min; 漂移管温度: 70 °C; 蒸发管温度: 80 °C。

有机酸组分及含量的测定: 采用高效液相色谱测定, 取上述糖组分测定配制的蓝莓提取液经 0.22 μm 滤膜过滤后备用。标准溶液的配制: 分别称取 0.10 g 苹果酸、柠檬酸、奎宁酸、琥珀酸, 用超纯水定容至 100 mL, 配制成 1 mg/mL 的混合酸标准储备液, 再依次稀释成 5、10、20、50、100 μg/mL 的标准使用液, 经 0.22 μm 滤膜过滤后备用。HPLC 条件: 色谱柱: Aminex HPX-87H 分析柱(300 mm×7.8 mm); 流动相: 100% 0.005 mol/L H₂SO₄; 流速: 0.6 mL/min; 紫外检测波长: 210 nm; 进样量: 10 μL; 柱温 30 °C。有机酸/糖对照品标准曲线方程见表 1。

表 1 有机酸/糖对照品标准曲线方程

Table 1 Standard curve equation for organic acid/sugar reference standard

有机酸/糖	回归方程	决定系数(R^2)
葡萄糖(Glucose)	$y=10.352x-396.79$	0.9902
果糖(Fructose)	$y=7.3732x-277.57$	0.9913
柠檬酸(Citric acid)	$y=1020.5x-1.43$	0.9999
苹果酸(Malic acid)	$y=792.97x-5$	1
奎宁酸(Quinic acid)	$y=58.7x-0.47$	0.9998
琥珀酸(Succinic acid)	$y=578.63x-4.02$	0.9982

总酚含量的测定: 采用福林酚比色法对酚类物质含量进行检测, 具体参考 Sung 等^[16]方法略有改动。取蓝莓样品 0.5 g 加入 30 mL 80% 的甲醇溶液超声提取 30 min 后过滤, 将样品重复提取三次, 将滤液合并定容至 100 mL。取提取液 250 μL 和 250 μL 福林酚混匀反应 5 min 后加入 500 μL 水和 250 μL 7.5% 无水碳酸钠避光反应 30 min 后再在 740 nm 处测定吸光度。以没食子酸(0、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06 mg/mL)为对照品作标准曲线, 检测结果以没食子酸当量表示。总酚标准曲线为 $y=15.51x+0.0582$, $R^2=0.999$ 。

黄酮含量的测定: 用 AlCl₃ 显色法^[17] 测定, 取蓝莓样品 0.5 g 加入 3 mL 无水乙醇超声提取 30 min 后过滤, 将三次滤液合并定容至 10 mL。取 1 mL 提取液加入 300 μL 亚硝酸钠(5 g/100 mL)和 4 mL 蒸馏水混匀, 5 min 后加入 1 mL 三氯化铝(10 g/100 mL)溶液, 混匀放置 5 min, 加入 2 mL(4 g/100 mL)的 NaOH 和 2.4 mL 的蒸馏水, 25 °C 条件下振荡混匀 2 min, 10 min 后在 510 nm 处检测吸光度, 以(0、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 mg/mL)芦丁为标品绘制标准曲线, 总黄酮标准曲线为 $y=0.6183x+0.0494$, $R^2=0.9998$ 。

抗氧化能力的测定: 蓝莓总抗氧化能力按照抗氧化试剂盒(DPPH 法、ABTS 法、FRAP 法)说明书进行测定。Trolox 作为标准品进行抗氧化能力检测, 样品的抗氧化能力用 Trolox 浓度(μmol/mL)来表示。

1.3 数据处理

使用 Excel 2013 和 IBM.SPSS Statistics 23.0 进行数据处理。采用 IBM.SPSS Statistics 23.0 进行单因素方差分析、Duncan 差异显著性分析($P<0.05$ 为显著), Pearson 相关性分析($P<0.05$ 为显著相关)以及主成分分析。数据用平均值±标准差表示, 采用 Graphpad prism7.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同品种蓝莓的外观特征分析

果实的外观特征包括果实密度、果形指数、果实色泽等特征, 是果实综合评价的基本要素。由表 2 可知, 不同蓝莓品种的密度、果形指数、 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值、单果重、出汁率等指标表现出较为明显的差异。

表2 不同蓝莓品种的外观特征
Table 2 Appearance characteristics of different blueberry varieties

蓝莓品种	密度(g/cm ³)	果形指数	果形	单果重(g)	出汁率(%)	L*	a*	b*
双丰	1.05±0.02 ^a	0.73±0.03 ^f	扁圆形	1.37±0.04 ^c	48.81±0.86 ^d	30.62±1.69 ^b	-1.44±0.31 ^c	-1.65±0.86 ^e
莱格西	1.04±0.02 ^a	0.77±0.05 ^{cd}	扁圆形	1.09±0.09 ^d	57.44±1.49 ^{ab}	27.19±1.00 ^{ef}	-1.05±0.47 ^c	0.76±0.78 ^{bc}
博尼法西	1.03±0.02 ^a	0.75±0.04 ^e	扁圆形	0.91±0.04 ^f	44.47±1.80 ^f	32.40±1.37 ^a	-0.54±1.30 ^{bc}	-1.06±0.67 ^{de}
薄雾	1.01±0.01 ^{abc}	0.78±0.05 ^c	扁圆形	0.96±0.09 ^f	59.38±0.41 ^a	28.64±1.17 ^{de}	-1.27±0.69 ^c	-0.03±1.14 ^{cd}
都克	1.02±0.01 ^{ab}	0.85±0.04 ^b	圆形	1.47±0.06 ^{bc}	56.25±2.03 ^{abc}	29.54±1.93 ^{bcd}	-0.25±1.54 ^{bc}	0.81±1.50 ^{bc}
巴尔德温	1.03±0.02 ^a	0.89±0.07 ^a	圆形	1.65±0.11 ^a	54.59±0.51 ^{bc}	28.12±2.28 ^{de}	-1.07±0.95 ^c	0.83±1.28 ^{bc}
灿烂	0.98±0.01 ^{bc}	0.76±0.04 ^{de}	扁圆形	1.49±0.04 ^b	54.61±1.03 ^{bc}	25.33±1.57 ^g	4.12±2.96 ^a	2.53±1.36 ^a
微三	0.98±0.02 ^c	0.79±0.04 ^c	扁圆形	0.98±0.05 ^f	48.73±2.56 ^d	25.58±3.29 ^{fg}	0.91±2.72 ^b	1.77±1.59 ^{ab}
晚秋	1.04±0.07 ^a	0.88±0.04 ^a	圆形	1.56±0.04 ^{ab}	53.81±0.73 ^c	30.08±2.86 ^{bc}	0.19±2.54 ^{bc}	-0.03±2.2 ^{cd}
变异系数(%)	3.43	9.03	/	22.31	9.01	11.07	84.26	284.23

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 表3~表4同。

性, 各项指标变异系数分别为3.43%、9.03%、11.07%、84.26%、284.23%、22.31%、9.01%, 其中色泽的品质变异系数较大, 密度变异系数最小, 除‘灿烂’、‘微三’的果实密度显著小于其他7个品种外, 其他品种之间密度大小无显著差异($P>0.05$)。

9个品种蓝莓果形指数变化范围为0.73~0.89。根据果形分类参考标准, 0.6~0.8为扁圆形, 0.8~0.9为圆形或近圆形, 0.9~1.0为椭圆形或圆锥形, 大于1.0为长圆形^[18], 可知9个蓝莓品种可分为圆形和扁圆形两类, 其中‘都克’、‘巴尔德温’、‘晚秋’为圆形, 其余6个品种都为扁圆形。陈昌琳等^[12]、王学瑛等^[19]研究结果也表明蓝莓品种主要为圆形和扁圆形, 通过对比不同研究结果可知, 相同品种果形指数研究结果高度一致, 分析其原因在于蓝莓果形指数主要是由遗传因素决定的^[20]。

单果重是反映果实的生产性能和商品性的重要指标, 在数量一致的前提下, 在一定范围内单果重越大果实的产量越高, 商品性也越佳。9个品种单果重的范围为0.91~1.65 g, 其中‘巴尔德温’的单果重最大, ‘博尼法西’的单果重最小, 为0.91 g。相较于其他研究结果^[18,21], 本研究9个品种蓝莓单果重均较偏小, 可能与种植模式(有机栽培)、种植环境等有关。出汁率可反映果实的加工性能, 研究表明不同品种蓝莓果实受果胶含量影响出汁率也各不相同^[21]。本研

究中9个蓝莓品种的出汁率在44.47%~59.38%, 其中‘双丰’、‘微三’和‘博尼法西’三个品种出汁率<50%, 更适宜于果脯、果干类加工。‘薄雾’的出汁率最高, 其次是‘莱格西’和‘都克’, 更适宜于果汁、果酒等产品加工。

研究表明, 蓝莓的色泽不仅是外观指标, 同时还与果实中功能活性成分总酚、花青素含量密切相关, L*值越低、a*、b*值越高的品种花青素含量越高^[22]。9个品种蓝莓L*值介于25.33~32.40之间, a*值的范围在-1.44~4.12之间, 不同品种之间存在明显差异。其中‘灿烂’和‘微三’与其他品种色泽品质差异较大, L*低于其他品种, a*、b*值高于其他品种, 其颜色最深, 与这两个品种花青素、总酚等含量较高有关。

2.2 不同品种蓝莓的理化特征分析

还原糖、总糖、可溶性固形物(SSC)、pH和总酸(TA)是反映果实内在品质的基础理化指标, 多个蓝莓品种的理化特征品种间都表现出显著性差异($P<0.05$), 其中变异系数较大的是总酸(35.51%)和固酸比(61.69%), pH变异系数最小。

还原糖、总糖和可溶性固形物均常用来反映果实营养和风味品质等, 同时可溶性固形物还由于其易于实现快速检测而用于果实成熟度的判定, 是果实品质分析非常重要的指标^[19,23]。由表3可知, 还原糖含量在82.77~110.38 mg/g之间, 总糖含量在106.15~

表3 不同蓝莓品种的主要理化特征
Table 3 Main physicochemical characteristics of different blueberry varieties

蓝莓品种	还原糖(mg/g)	总糖(mg/g)	SSC(%)	TA(%)	固酸比	pH
双丰	88.95±0.47 ^c	117.38±0.64 ^d	13.16±0.05 ^b	1.42±0.31 ^c	9.57±2.06 ^{bc}	2.89±0.02 ^c
莱格西	90.60±1.99 ^f	106.67±1.29 ^f	10.30±0.00 ^e	1.51±0.04 ^c	6.84±0.20 ^c	2.83±0.01 ^d
博尼法西	82.77±1.25 ^g	106.67±0.64 ^f	11.76±0.05 ^d	2.03±0.02 ^a	5.78±0.07 ^c	2.82±0.01 ^d
薄雾	105.53±0.00 ^b	123.56±0.94 ^c	9.76±0.05 ^f	1.84±0.01 ^b	5.31±0.05 ^c	2.74±0.01 ^e
都克	110.38±2.50 ^a	135.61±1.70 ^a	12.60±0.07 ^e	0.57±0.03 ^f	22.15±1.36 ^a	2.99±0.01 ^b
巴尔德温	94.72±0.54 ^d	114.29±1.99 ^e	13.54±0.05 ^a	1.14±0.04 ^d	11.84±0.41 ^b	3.04±0.02 ^a
灿烂	90.70±1.11 ^f	106.15±1.11 ^f	9.44±0.05 ^g	1.13±0.01 ^d	6.12±3.11 ^c	2.70±0.01 ^f
微三	97.60±0.64 ^c	126.34±0.94 ^b	9.80±0.07 ^f	1.00±0.01 ^{de}	5.36±3.64 ^c	2.72±0.01 ^{ef}
晚秋	91.94±0.31 ^f	127.48±0.93 ^b	11.82±0.04 ^d	0.96±0.03 ^e	6.51±4.85 ^c	3.00±0.05 ^b
变异系数(%)	9.04	9.03	13.82	35.51	61.69	4.40

135.61 mg/g 之间, 还原糖和总糖的含量差值不大且表现出较高的一致性, 总糖含量高的一般还原糖含量也比较高, 说明蓝莓中糖主要以还原糖存在。‘都克’的总糖和还原糖含量均最高, 总糖含量最低的为‘灿烂’, 还原糖含量最低的为‘博尼法西’。SSC 范围为 9.44%~13.54%, 略低于魏鑫等^[24]的报道(10.03%~14.75%), 其中‘巴尔德温’含量最高、其次是‘双丰’, ‘灿烂’最低。

9 个品种蓝莓 TA、固酸比、pH 变化范围分别为 0.57%~2.03%、5.31~22.15、2.70~3.04。其中 TA 含量前三的分别为‘博尼法西’、‘薄雾’、‘莱格西’, 最小的为‘都克’, pH 较低的为‘薄雾’、‘灿烂’和‘微三’, 均低于 2.8, ‘巴尔德温’和‘晚秋’pH 较高, 均高于 3.0, TA 含量和 pH 之间相关性不大, 且 TA 变异系数较大但 pH 变异系数较小, 可能与蓝莓中酸主要以弱酸为主且不同品种蓝莓中酸组成有关。固酸比变异系数大主要与不同品种蓝莓酸的差异较大有关, 说明相较于 SSC, 酸可能是主导蓝莓甜酸风味变化的主要原因。

2.3 不同品种蓝莓的糖酸组分的含量比较

糖和酸的组成和含量决定果实的口感和加工性能^[25], 因此本实验进一步对糖和有机酸组成及含量进行了分析。由表 4 可以得出, 9 个品种蓝莓果实中可溶性糖主要有葡萄糖和果糖, 变化范围分别在 28.15~35.99 mg/g、39.20~54.26 mg/g 之间, 与张素敏等^[8]研究结果一致。‘都克’的葡萄糖和果糖含量都最高(35.99、54.26 mg/g), ‘博尼法西’的葡萄糖和果糖含量都最低(28.15、39.20 mg/g)。9 个蓝莓品种的葡萄糖含量除‘都克’和‘博尼法西’之间有显著性差异($P<0.05$), 其他品种之间无显著性差异($P>0.05$), 不同品种间果糖含量有显著性差异($P<0.05$), 说明果糖为影响不同种类蓝莓差异的主要物质, 是引起甜味差异的物质基础。

不同品种的蓝莓有机酸含量不同, 具有显著性差异($P<0.5$)。柠檬酸和奎宁酸的变异系数很高(>49%), 为蓝莓中最主要的酸, 与相关研究报道一致^[26]。除了‘都克’、‘微三’、‘晚秋’的 6 个蓝莓品种的柠檬酸含量都大于 6 mg/g, 为柠檬酸积累型。‘都

克’、‘微三’、‘晚秋’的奎宁酸含量最高(>45 mg/g), 显著高于其他品种(<9 mg/g), 为奎宁酸积累型。苹果酸的变化范围为 2.11~2.94 mg/g, 琥珀酸的变化范围为 2.47~4.77 mg/g, 其中‘都克’、‘微三’、‘晚秋’的苹果酸和琥珀酸含量最高, 都无显著性差异($P>0.05$), ‘莱格西’的苹果酸、奎宁酸、琥珀酸含量都是最低的。此外, 本研究的果糖含量大于葡萄糖, 与张素敏等^[8]研究辽宁的 12 种蓝莓果实果糖和葡萄糖含量相当的结果不一致。研究发现沙棘浆果的果糖、葡萄糖和总糖含量随海拔升高和纬度降低而降低, 苹果酸的含量随着海拔升高和纬度的降低而增加^[27], 营口蓝莓比威海蓝莓含糖量高, 酸含量低^[28]。由此可得出产地差异和品种多样性会影响水果的糖酸特性。

2.4 不同品种蓝莓的功能特征分析

2.4.1 不同品种蓝莓总酚、黄酮含量分析 总酚和黄酮是蓝莓最主要的功能活性成分。由图 1 可知, 不同种蓝莓总酚和黄酮的含量差异显著($P<0.05$), 黄酮的含量在 1.37~1.95 mg/g, ‘微三’的黄酮含量最高, ‘巴尔德温’的黄酮含量最低, 该研究结果高于前人的研究^[11]。‘博尼法西’的总酚含量最高(1.71 mg/g), 其次是‘灿烂’和‘晚秋’, 最低的为‘薄雾’(0.87 mg/g)。总酚的范围低于许文静等^[11](1.64~5.78 mg/g)、熊颖等^[29](1.73~4.63 mg/g)的研究, 虽然

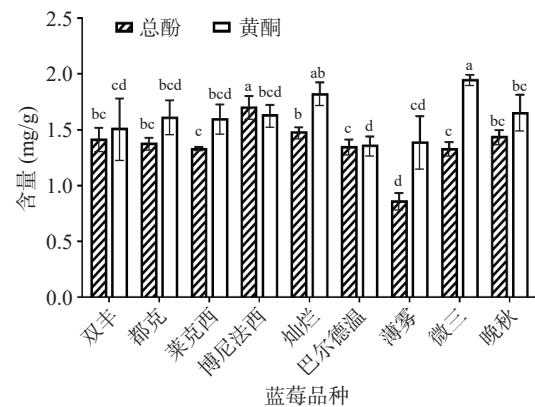


图 1 不同品种蓝莓的总酚和黄酮含量

Fig.1 Contents of total phenols and flavonoids in different varieties of blueberries

注: 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 图 2 同。

表 4 不同蓝莓品种糖酸组分的含量

Table 4 Composition and content of organic acids and sugars in different blueberry varieties

蓝莓品种	葡萄糖(mg/g)	果糖(mg/g)	柠檬酸(mg/g)	苹果酸(mg/g)	奎宁酸(mg/g)	琥珀酸(mg/g)
双丰	33.16±3.32 ^{ab}	49.88±6.07 ^{ab}	7.05±0.21 ^{bc}	2.55±0.06 ^{bcd}	7.17±0.51 ^{de}	3.86±0.49 ^b
莱格西	30.87±0.47 ^{ab}	41.85±1.47 ^{bc}	7.15±0.09 ^b	2.11±0.11 ^f	5.59±1.14 ^e	2.47±0.04 ^d
博尼法西	28.15±1.99 ^b	39.20±2.23 ^c	7.65±0.06 ^a	2.14±0.04 ^{ef}	6.41±0.10 ^{de}	3.23±0.03 ^c
薄雾	34.15±1.64 ^{ab}	46.81±2.75 ^{abc}	7.15±0.03 ^b	2.44±0.01 ^{cde}	8.20±0.16 ^d	3.20±0.06 ^c
都克	35.99±5.80 ^a	54.26±8.85 ^a	1.81±0.32 ^d	2.94±0.32 ^a	46.18±2.34 ^c	4.57±0.20 ^a
巴尔德温	32.74±0.80 ^{ab}	44.62±1.60 ^{abc}	7.19±0.12 ^b	2.40±0.03 ^{cdef}	5.95±1.05 ^e	2.66±0.04 ^d
灿烂	30.91±0.87 ^{ab}	43.39±2.26 ^{bc}	6.79±0.13 ^c	2.31±0.06 ^{def}	5.86±0.36 ^e	3.17±0.13 ^c
微三	34.94±4.10 ^{ab}	52.17±7.39 ^{ab}	1.56±0.05 ^d	2.65±0.07 ^{abc}	55.14±0.94 ^a	4.77±0.04 ^a
晚秋	33.72±5.35 ^{ab}	51.42±8.33 ^{ab}	1.61±0.17 ^d	2.79±0.32 ^{ab}	48.26±1.46 ^b	4.54±0.22 ^a
变异系数(%)	10.98	14.21	49.81	12.05	99.98	23.37

之前的研究表明野生蓝莓的总酚含量大于栽培蓝莓^[30],但莱格西(1.34 mg/g)的总酚含量高于 Ehlenfeldt 等^[31]所研究的野生蓝莓‘莱格西’(0.65 mg of GAE/g of fw)。研究表明蓝莓中的酚类化合物及其抗氧化活性取决于品种、基因型、成熟时间、植物组织类型、生长条件、收获时间及储存条件,高海拔区域蓝莓功能活性成分也较高^[32-34]。本研究中部分蓝莓品种总酚、黄酮含量高于其他研究相同品种,可能是与本研究所选取的样本生长于高海拔区域(1000~1200米)和有机种植方式有关。总的来看‘微三’、‘博尼法西’、‘灿烂’和‘晚秋’的黄酮和总酚含量都较高,抗氧化活性物质含量较高。

2.4.2 不同品种蓝莓抗氧化能力分析 通过铁离子还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)法、DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基清除能力对蓝莓果实的抗氧化能力进行评估,结果以 Trolox 浓度表示,见图 2。不同品种蓝莓果实的抗氧化能力存在显著性差异($P<0.05$)。不同方法所测的总抗氧化能力有些许的不同,三种方法所测的总抗氧化能力最高的都是‘微三’,采用 DPPH 法、FRAP 法测得‘灿烂’的抗氧化能力在 9 个蓝莓品种都较低,而 ABTS 法所测的较高。除此之外,采用 FRAP 法、ABTS 法测得‘博尼法西’的抗氧化能力显著大于‘晚秋’($P<0.05$),但 DPPH 法测得结果相反,‘晚秋’的抗氧化能力显著大于‘博尼法西’($P<0.05$)。因为三种方法采用的原理不同,且不同蓝莓品种所含有的抗氧化物质的种类与含量差异显著,因此不同方法所测得抗氧化能力有差异性。总的来看,‘微三’、‘博尼法西’、‘都克’的抗氧化能力较好,‘灿烂’、‘晚秋’的抗氧化能力较差。其中‘灿烂’(9.39 μmol/mL)的 DPPH 自由基清除能力最差,与之前的研究报道较为一致^[29]。

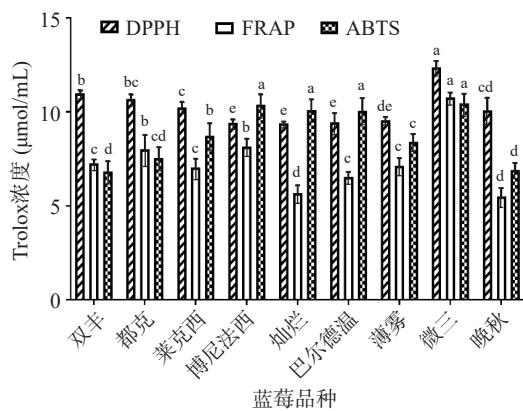


图 2 不同品种蓝莓的抗氧化活性

Fig.2 Antioxidant activities of different varieties of blueberries

研究表明蓝莓总酚含量高其抗氧化能力就高^[35]。但‘灿烂’、‘晚秋’的黄酮和总酚含量较高,抗氧化能力低。此外蓝莓的抗氧化能力不仅与抗氧化物质含量有关,还取决于其植物化学成分、结构和氧化还原电位。Buratti 等^[36]指出酚类化合物的抗氧化能力与其还原能力有关,还原能力取决于酚环上羟基或甲氧基

的数量和位置等结构因素。Dhrumit 等^[37]表明总抗氧化能力可能是各种植物化学物质的功能,共同或协同作用,并取决于各种化合物和环境因素的拮抗作用。王彦淇等^[38]还报道出总酚的组成越复杂抗氧化能力越强,因此后续可进一步分析‘灿烂’、‘晚秋’的总酚组成。

2.5 主要质量指标相关性分析

为了探究 9 个蓝莓品种的主要指标是否存在相关性,运用 Pearson 相关系数进行统计分析,皮尔逊相关系数 r 的绝对值越接近 1 则两个指标间的相关性越强,反之越接近 0 相关性越弱。结果如图 3 所示,其中红色代表正相关,蓝色代表负相关,相关系数越大其颜色越深,即指标间相关性越强。由图 3 可知,9 个蓝莓品种的 23 个指标之间相关性存在差异,果形指数与单果重(0.629)呈正相关,在苹果中也有类似研究^[39]。果形指数和 pH、TA 存在显著正相关($P<0.05$);单果重与 pH 存在显著正相关($P<0.05$),与 FRAP 存在显著负相关($P<0.05$);密度和 SSC、pH、 L^* 值存在显著正相关($P<0.05$);pH 和 SSC 存在极显著正相关($P<0.01$)、和 FRAP 存在显著负相关($P<0.05$);葡萄糖和果糖存在极显著正相关($P<0.01$),相关系数为 0.93,与张素敏等^[8]研究结果一致。柠檬酸与总糖、葡萄糖、果糖存在显著负相关($P<0.05$),与 Jia 等^[28]结果吻合,本研究结果表明‘都克’的葡萄糖、果糖和总糖含量都最高,柠檬酸含量低;‘博尼法西’的葡萄糖、果糖和总糖含量都最低,柠檬酸含量高。总酚和 a^* 呈显著负相关($P<0.05$),奎宁酸和黄酮存在极显著正相关($P<0.01$);FRAP 和 DPPH 存在显著正相关($P<0.05$);抗氧化能力与总酚、黄酮含量呈正相关,与相关文献相符^[30]。

除此之外果形指数与 pH、葡萄糖与果糖、黄酮与柠檬酸等的相关系数绝对值都大于 0.5,说明指标之间相关性强,本实验所测定蓝莓的 23 个指标相互之间存在一定的相关性,表明原始数据所映射的信息有重复,因此接下来采用主成分分析进行指标简化。

2.6 主成分分析及综合评价

采用主成分分析对蓝莓的评价指标进行降维分析。由表 5 可得到特征值大于 1 的前 4 个主成分,累加贡献率为 86.92%,说明可以用这 4 个不相关的综合指标来反映蓝莓质量特征的大部分信息。主成分载荷矩阵反映了各指标在主成分中的作用方向及大小程度。见表 6,PC1 的贡献率为 37.25%,柠檬酸的负向载荷权数最大,总糖、苹果酸的正向载荷权数最大,主要与糖酸有关,而糖酸与蓝莓消费者的偏好密不可分,所以果实风味可作为第一主成分;而柠檬酸和总糖、苹果酸存在显著负相关性($P<0.05$),因此可将柠檬酸作为第一主成分的代表性指标。PC2 的贡献率为 24.69%,SSC、pH、果实密度、 L^* 的正向载荷权数最大,FRAP、 a^* 、 b^* 的负向载荷权数最大,可选取果实表观特征为第二主成分;而 pH 与 SSC、密

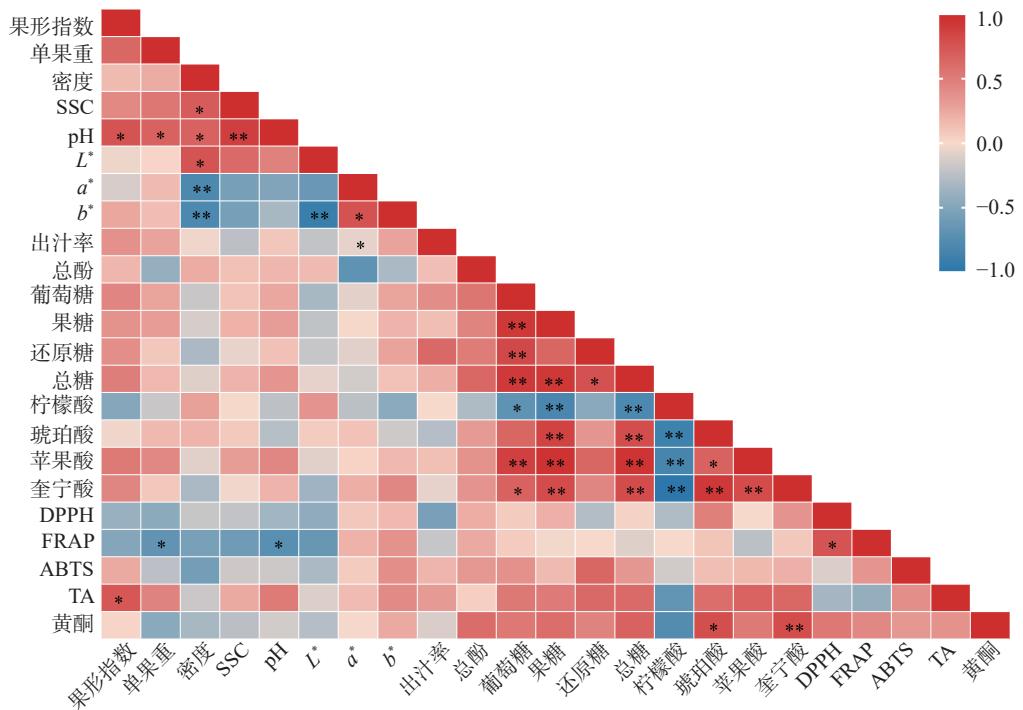


图 3 9 个蓝莓品种的感官特征、理化特征、加工特征的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of sensory characteristics, physicochemical characteristics and processing characteristics of 9 varieties of blueberries

注: *表示 $P<0.05$ 为显著相关, **表示 $P<0.01$ 为极显著相关。

表 5 主成分的特征值、贡献率和累加贡献率

Table 5 Eigenvalue of the principal components and their contribution rates and cumulative contribution rates

成分	起始特征值			提取平方和载入值		
	特征值	方差贡献率(%)	累加贡献率(%)	特征值	方差贡献率(%)	累加贡献率(%)
1	8.567	37.248	37.248	8.567	37.248	37.248
2	5.679	24.693	61.942	5.679	24.693	61.942
3	3.350	14.564	76.505	3.350	14.564	76.505
4	2.396	10.419	86.924	2.396	10.419	86.924
5	1.042	4.529	91.453			
6	0.978	4.254	95.707			
7	0.729	3.170	98.877			
8	0.258	1.123	100.000			

度存在显著正相关性($P<0.05$),与 FRAP 存在显著负相关性($P<0.05$), b^* 与 a^* 存在显著正相关($P<0.05$),与 L^* 存在极显著负相关($P<0.01$),因此可将 pH、 b^* 作为第二主成分的代表性指标。PC3 的贡献率为 14.56%,总酚、DPPH 与黄酮的正向载荷权数最大,其值分别为 0.680、0.584、0.483,单果重的负向载荷权数最大,其值为-0.620,可知正向作用大于负向作用,因此果实功能特征为第三主成分,而总酚、DPPH、黄酮之间不存在显著相关性($P>0.05$),所以它们为第三主成分的核心指标。PC4 的贡献率为 10.42%,出汁率的正向载荷权数最大,其与果实加工密切相关,所以可将加工特征作为第四主成分,出汁率为第四主成分的代表性指标。基于此,蓝莓质量评价的核心质量指标为柠檬酸、pH、 b^* 、总酚、DPPH、黄酮、出汁率。

$$F_1=0.323X_1+0.316X_2+0.313X_3+\cdots+0.134X_{23}$$

$$F_2=0.07X_1+0.1X_2+0.036X_3+\cdots-0.126X_{23}$$

$$F_3=0.103X_1+0.017X_2+0.084X_3+\cdots-0.073X_{23}$$

$$F_4=-0.034X_1-0.075X_2-0.176X_3+\cdots+0.336X_{23}$$

式中, X 为原始变量标准化处理后数值。

以各主成分对应的贡献率作为权重,对各主成分得分进行加权求和得到综合评分: $F=0.372F_1+0.246F_2+0.146F_3+0.104F_4$,通过计算得到不同品种蓝莓得分如表 7,得分高低反映蓝莓综合品质的高低,综合评分由高到低依次为‘巴尔德温’>‘双丰’>‘微三’>‘都克’>‘薄雾’>‘灿烂’>‘博尼法西’>‘莱格西’>‘晚秋’。同时,通过主成分分析结果和王香君等^[5]和韩斯等^[40]研究结果可知,‘莱格西’、‘灿烂’和‘双丰’ F_2 得分排名较高,果实外观品质好、固酸比适中、出汁率较高而酸度低,适合鲜食^[28,41-42]。‘巴尔德温’、‘都克’、‘微三’果实风味优、抗氧化能力较好,加工品质好,综合排名高,适合加工成果汁果酒类产品^[43]。除此之外‘微三’、‘都克’的黄酮、总酚含量高,抗氧化能力也较高,具有开发潜力,适宜于功能性产品开发。

表6 主成分的特征矢量与载荷矩阵
Table 6 Eigenvectors and loading matrices of principal components

指标	载荷				特征矢量			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
总糖	0.946	0.168	0.189	0.114	0.323	0.07	0.103	-0.034
苹果酸	0.925	0.239	0.031	-0.161	0.316	0.1	0.017	-0.075
果糖	0.917	0.087	0.153	-0.127	0.313	0.036	0.084	-0.176
柠檬酸	-0.916	0.095	-0.034	0.317	-0.313	0.04	-0.019	-0.032
奎宁酸	0.905	-0.148	0.121	-0.298	0.309	-0.062	0.066	0.068
葡萄糖	0.901	0.058	0.037	0.213	0.308	0.024	0.02	-0.193
琥珀酸	0.818	-0.100	0.279	-0.420	0.28	-0.042	0.153	0
还原糖	0.750	0.028	-0.138	0.600	0.256	0.012	-0.075	-0.032
TA	0.734	0.258	-0.416	0.011	0.251	0.108	-0.227	0.235
黄酮	0.704	-0.377	0.483	0.028	0.24	-0.158	0.264	0.114
果形指数	0.554	0.509	-0.403	0.052	0.189	0.213	-0.22	0.123
pH	0.287	0.894	-0.055	-0.133	0.098	0.375	-0.03	0.071
SSC	0.071	0.856	0.166	-0.211	0.024	0.359	0.09	0.111
FRAP	-0.003	-0.855	0.345	0.161	-0.001	-0.359	0.189	-0.033
果实密度	-0.294	0.827	0.367	-0.041	-0.1	0.347	0.2	-0.115
L^*	-0.328	0.750	0.361	0.035	-0.112	0.315	0.197	0.138
a^*	0.400	-0.625	-0.611	-0.077	0.137	-0.262	-0.334	0.024
b^*	0.090	-0.623	-0.604	-0.427	0.031	-0.262	-0.33	0.016
总酚	0.459	0.124	0.680	0.505	0.157	0.052	0.372	-0.015
单果重	0.234	0.583	-0.620	-0.335	0.08	0.245	-0.339	-0.144
DPPH	0.115	-0.568	0.584	-0.387	0.039	-0.238	0.319	-0.068
出汁率	0.222	0.137	-0.499	0.646	0.076	0.057	-0.273	-0.282
ABTS	0.393	-0.301	-0.134	0.594	0.134	-0.126	-0.073	0.336

‘薄雾’可溶性固形物含量低、糖酸比低、果实口感不佳；‘博尼法西’的果实风味和功能成分得分排名最低；‘晚秋’的果实外观品质不好、抗氧化能力差，综合排名最低，这三个品种鲜食特性和加工特性均不突出。

表7 不同品种蓝莓的主成分得分和综合评估
Table 7 Principal component scores and comprehensive scores in different varieties of blueberries

蓝莓品种	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F	排名
双丰	2.73	11.428	-0.608	-1.019	12.531	2
莱格西	-33.303	8.553	-37.092	-13.385	-75.227	8
博尼法西	-34.897	156.187	-201.233	36.432	-43.511	7
薄雾	-6.114	-2.954	3.507	4.356	-1.205	5
都克	4.022	-0.673	-2.261	-1.022	0.066	4
巴尔德温	424.002	-6.108	4.851	-288.285	134.46	1
灿烂	-5.675	1.571	-2.885	-3.331	-10.32	6
微三	5.618	-1.372	-1.314	2.421	5.353	3
晚秋	13.204	-53.86	-75.132	3.467	-112.321	9

3 结论

果实品质评价是对不同品种果实品质特性的解析,为生产者和消费者品种选择提供科学依据,是育种工作中的重要一环。通过对9个品种蓝莓的外观指标、理化指标及甜酸风味物质组成进行比较分析,并结合相关性分析和主成分分析,对9个品种综合品质进行了评价。结果表明,9个品种蓝莓的品质特征存在差异,且不同指标之间存在一定的相关性。通

过主成分分析提取的4个主成分,筛选出蓝莓品质评价的核心质量指标为柠檬酸、pH、 b^* 、总酚、DPPH、黄酮、出汁率,并通过综合评价解析了不同品种特性及适宜的用途。‘莱格西’、‘灿烂’和‘双丰’适合鲜食,‘巴尔德温’、‘都克’、‘微三’适宜于果汁和果酒等液态类产品开发,‘微三’、‘都克’适宜于功能性产品开发。‘薄雾’、‘博尼法西’、‘晚秋’相较于其它品种综合评分较低。该研究为消费者根据需求选择适宜的蓝莓品种以及栽培、贮藏保鲜等提供科学参考。

© 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] 韩鹏祥,张蓓,冯叙桥,等.蓝莓的营养保健功能及其开发利用[J].食品工业科技,2015,36(6):370-375,379. [HAN P X, ZHANG B, FENG X Q, et al. Nutrition and health function of blueberry and its development and utilization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(6): 370-375,379.]
- [2] 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.]
- [3] 李亚东,裴嘉博,孙海悦.全球蓝莓产业发展现状及展望[J].吉林农业大学学报,2018,40(4):421-432. [LI Y D, PEI J B, SUN H Y. Status and prospect of global blueberry industry[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(4): 421-432.]
- [4] 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.]
- [5] 王香君, 吴劲轩, 夏川林, 等. 不同品种桑椹加工品质比较研究 [J]. 中国酿造, 2019, 38(3): 139–143. [WANG X J, WU J X, XIA C L, et al. Comparison of processing quality of different mulberry varieties [J]. China Brewing, 2019, 38(3): 139–143.]
- [6] 宋志姣, 樊金欣, 李德焕, 等. 不同果桑品种加工质量评价 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 134–139. [SONG Z J, FAN J X, LI D H, et al. Evaluation of processing qualities of different mulberry varieties [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 134–139.]
- [7] 焦艺, 刘璇, 毕金峰, 等. 蟠桃品种用于加工鲜榨汁的适宜性评价 [J]. 食品科学, 2015, 36(1): 41–45. [JIAO Y, LIU X, BI J F, et al. Suitability evaluation of flat peach cultivars for fresh juice processing [J]. Food Science, 2015, 36(1): 41–45.]
- [8] 张素敏, 杨巍, 魏鑫, 等. 基于原料与果汁质量的蓝莓果实加工性能评价 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 319–327. [ZHANG S M, YANG W, WEI X, et al. Evaluation of blueberry fruit processing performance based on raw materials and juice quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 319–327.]
- [9] 朱诗慧, 孟宪军, 颜廷才, 等. 辽宁主栽蓝莓品种加工适应性的研究 [J]. 食品科学, 2014, 35(21): 79–83. [ZHU S H, MENG X J, YAN T C, et al. Studies on processing adaptability of main blueberry cultivars in Liaoning Province [J]. Food Science, 2014, 35(21): 79–83.]
- [10] SKROVANKOVA S, SUMCZYNSKI D, MLCEK J, et al. Bioactive compounds and antioxidant activity in different types of berries [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16: 24673–24706.
- [11] 许文静, 陈昌琳, 邓莎, 等. 基于主成分分析和聚类分析的蓝莓品质综合评价 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 311–319. [XU W J, CHEN C L, DANG S, et al. Comprehensive evaluation of blueberry quality based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(13): 311–319.]
- [12] 陈昌琳, 孙小钦, 钟程操, 等. 四川地区不同蓝莓品种的品质评价及香气成分分析 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 264–271. [CHEN C L, SUN X Q, ZHONG C Z, et al. Quality evaluation and aroma composition analysis of different blueberry varieties in Sichuan [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 264–271.]
- [13] 马艳弘, 田丽敏, 孙小华, 等. 无花果酶解制汁工艺优化及抗氧化活性 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 111–117. [MA Y H, TIAN L M, SUN X H, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis for production of fig juice and antioxidant activity [J]. Food Research and Development, 2019, 40(1): 111–117.]
- [14] 孙文, 巢志茂, 王淳, 等. 瓜蒌饮片中总糖及还原糖的含量测定 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(9): 96–99. [SUN W, CHAO Z M, WANG C, et al. Determination of total sugar and reducing sugar in processed fructus trichosanthis [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(9): 96–99.]
- [15] TINA S, ROBERT V, METKA H, et al. Pot and ridge production of three highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) cultivars under high tunnels [J]. Agriculture, 2022, 12(4): 438.
- [16] SUNG Y J, AE I K, GIL S L, et al. Influence of production systems on phenolic characteristics and antioxidant capacity of highbush blueberry cultivars [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(7): 2949–2961.
- [17] PEKAL A, PYRZYN SKA K. Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content assay [J]. Food Analytical Methods, 2014, 7(9): 1776–1782.
- [18] 付燕, 杨芩, 王江. 基于主成分分析的蓝莓优良品种引种试验综合评价 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50(4): 38–41. [FU Y, YANG Q, WANG J. Comprehensive evaluation of blueberry fine variety introduction test based on principal component analysis [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 38–41.]
- [19] 王学瑛, 高智翔, 王子迎, 等. 不同品种蓝莓果实质量指标比较和综合评价 [J]. 合肥师范学院学报, 2020, 38(3): 11–15. [WANG X Y, GAO Z X, WANG Z Y, et al. Comparison and comprehensive evaluation of fruit quality indexes of different varieties of blueberry [J]. Journal of Hefei Normal University, 2020, 38(3): 11–15.]
- [20] WU S, ZHANG B, KEYHANINEJAD N, et al. A common genetic mechanism underlies morphological diversity in fruits and other plant organs [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4734.
- [21] 成柯, 闫俊, 严晓雪, 等. 湖北地区不同品种蓝莓果汁加工质量特征及抗氧化活性评价 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 146–151. [CHENG K, YAN J, YAN X X, et al. Evaluation of juice quality and antioxidation activity of different blueberry cultivars in Hubei Province [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9): 146–151.]
- [22] 刘艺, 王圳伊, 张晶, 等. 蓝莓果实色度值与化学成分含量的相关性研究 [J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(12): 189–194. [LIU Y, WANG Z Y, ZHANG J, et al. Correlation analysis of blueberry active ingredient content and its chroma value based on chroma analysis principle [J]. China Food Additives, 2019, 30(12): 189–194.]
- [23] 刘丙花, 孙锐, 王开芳, 等. 不同蓝莓品种果实质量比较与综合评价 [J]. 食品科学, 2019, 40(1): 70–76. [LIU B H, SUN R, WANG K F, et al. Comparison and comprehensive evaluation of fruit quality of different blueberry (*Vaccinium* spp.) varieties [J]. Food Science, 2019, 40(1): 70–76.]
- [24] 魏鑫, 郭丹, 王宏光, 等. 不同品种蓝莓果实品质和香气物质差异分析 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43(6): 149–156. [WEI X, GUO D, WANG H G, et al. Fruit quality and aroma substances of different blueberry cultivars [J]. Food Research and Development, 2022, 43(6): 149–156.]
- [25] 何志刚, 李维新, 林晓姿, 等. 枇杷果实成熟和贮藏过程中有机酸的代谢 [J]. 果树学报, 2005, 22(1): 23–26. [HE Z G, LI W X, LIN X Z, et al. Organic acids metabolism of loquat fruit during maturity and storage [J]. Journal of Fruit Science, 2005, 22(1): 23–26.]
- [26] MENGIST M F, BOSTAN H, YOUNG E, et al. High-density linkage map construction and identification of loci regulating fruit quality traits in blueberry [J]. Horticulture Research, 2021, 8(1): 169.
- [27] ZHENG J, KALLIO H, LINDERBORG K, et al. Sugars, sugar alcohols, fruit acids, and ascorbic acid in wild Chinese sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* ssp. *sinensis*) with special reference to influence of latitude and altitude [J]. Food Research International, 2011, 44(7): 2018–2026.
- [28] JIA Z, JI Y N, JING L, et al. Evaluation of sugar and organic acid composition and their levels in highbush blueberries from two regions of China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(9): 2352–2361.
- [29] 熊颖, 禹霖, 柏文富, 等. 不同品种蓝莓果实质量特征和抗氧化能力及总酚组成的比较 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022,

- 42(2): 119–128. [XIONG Y, YU L, BAI W F, et al. Evaluation of quality characteristics, antioxidant ability and polyphenol composition of different blueberry cultivars[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(2): 119–128.]
- [30] GOYALI C J, IGAMBERDIEV A U, DEBNATH S C, et al. Propagation methods affect fruit morphology and antioxidant properties but maintain clonal fidelity in lowbush blueberry[J]. *Hort Science*, 2015, 50(6): 888–896.
- [31] EHLENFELDT M K, PRIOR R L. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentrations in fruit and leaf tissues of highbush blueberry[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2001, 49(5): 2222–2227.
- [32] DEBNATH C S, GOYALI C J, MORENO A D, et al. *In vitro* propagation and variation of antioxidant properties in micropropagated *vaccinium* berry plants—A review[J]. *Molecules*, 2020, 25(4): 788.
- [33] DEBNATH S C, BHATT D, GOYALI J C. DNA-based molecular markers and antioxidant properties to study genetic diversity and relationship assessment in blueberries[J]. *Agronomy*, 2023, 13(6): 1518.
- [34] MABEL G, KATHERINE P, ANDREA B, et al. Influence of altitudes and development stages on the chemical composition, antioxidant, and antimicrobial capacity of the wild andean blueberry (*Vaccinium floribundum* Kunth)[J]. *Molecules*, 2022, 27(21): 7525.
- [35] GIOVANELLI G, BURATTI S. Comparison of polyphenolic composition and antioxidant activity of wild Italian blueberries and some cultivated varieties[J]. *Food Chemistry*, 2009, 112(4): 903–908.
- [36] BURATTI S, BENEDETTI S, COSIO M. Evaluation of the antioxidant power of honey, propolis and royal jelly by amperometric flow injection analysis[J]. *Talanta*, 2007, 71(3): 1387–1392.
- [37] DHRUMIT S B, SAMIR C D. Genetic diversity of blueberry genotypes estimated by antioxidant properties and molecular markers[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(3): 458.
- [38] 王彦淇, 郭玉蓉, 王永涛, 等. 不同品种苹果非浓缩还原汁的总酚组成及与抗氧化能力的关系[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 74–83. [WANG Y Q, GUO Y R, WANG Y T, et al. Analyses of phenolic composition and antioxidant activities of NFC apple juices from different cultivars[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2020, 20(5): 74–83.]
- [39] 王海波, 李慧峰, 何平, 等. 苹果不同果形果实性状及其相关性分析[J]. *北方园艺*, 2013, 282(3): 22–25. [WANG H B, LI H F, HE P, et al. Analysis on characters and their correlations of apple with different fruit shapes[J]. *Northern Horticulture*, 2013, 282(3): 22–25.]
- [40] 韩斯, 孟宪军, 汪艳群, 等. 不同品种蓝莓质量特性及聚类分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(6): 140–144. [HAN S, MENG X J, WANG Y Q, et al. Quality properties and cluster analysis of different blueberry cultivars[J]. *Food Science*, 2015, 36(6): 140–144.]
- [41] 宋明华, 黄力, 李彩. 蓝雨和莱格西蓝莓在重庆涪陵的引种表现及栽培技术[J]. *中国南方果树*, 2019, 48(2): 165–166, 170. [SONG M H, HUANG L, LI C. Introduction and cultivation techniques of blue rain and legxi blueberry in Fuling, Chongqing[J]. *South China Fruits*, 2019, 48(2): 165–166, 170.]
- [42] 杨雅涵, 李建宾, 和加卫, 等. 不同蓝莓品种果实花青素苷研究[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(8): 1769–1777. [YANG Y H, LI J B, HE J W, et al. Content of anthocyanins in fruits of different blueberry varieties[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(8): 1769–1777.]
- [43] 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.]