

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110198

XU Wenjing, CHEN Changlin, DENG Sha, et al. Comprehensive Evaluation of Blueberry Quality Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 311–319. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110198

· 分析检测 ·

基于主成分分析和聚类分析的 蓝莓品质综合评价

许文静¹, 陈昌琳², 邓莎^{1,3}, 刘怡君¹, 吕远平^{1,3,*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065;

2. 四川省农业科学院经济作物育种栽培研究所, 四川成都 610300;

3. 四川大学健康食品科学评价体系研究中心, 四川成都 610065)

摘要: 目的: 探究蓝莓的综合品质特性。方法: 利用全自动氨基酸分析仪、气相色谱-质谱联用仪等仪器, 测定四川地区 6 个品种蓝莓的感官形态、营养功能、游离氨基酸、挥发性风味物质等 20 个指标, 并结合主成分分析法及聚类分析评价其综合品质。结果: 不同品种蓝莓各项指标间存在差异, 布里吉塔的单果重 (2.06 g) 最重, 横径 (14.39 mm) 最大, 但胶粘性 (151.96 N) 和总酚含量 (1.64 mg/g) 最低; 密斯梯的游离氨基酸含量最高 (453.72 mg/100 g), 鲜味氨基酸和甜味氨基酸占比较大; 绿宝石的游离氨基酸含量最低 (122.93 mg/100 g) 且种类最少; 园蓝的硬度适中, 糖酸比 (28.23)、花青素 (2.09 mg/g)、总酚 (5.78 mg/g) 及挥发性风味物质 (14.60 μg/g) 含量最高。结论: 根据主成分分析得到的最优品种为园蓝; 根据聚类分析将蓝莓分为三类, 适宜鲜食品种为园蓝和莱格西; 加工鲜食皆宜品种为绿宝石、布里吉塔和密斯梯, 蓝雨品种加工优势突出。

关键词: 蓝莓, 品种, 品质评价, 主成分分析, 聚类分析

中图分类号: TS255

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)13-0311-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110198



本文网刊:

Comprehensive Evaluation of Blueberry Quality Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

XU Wenjing¹, CHEN Changlin², DENG Sha^{1,3}, LIU Yijun¹, LÜ Yuanping^{1,3,*}

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Industrial Crop Research Institute-Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610300, China;

3. Healthy Food Evaluation Research Center, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Objective: To explore the comprehensive quality characteristics of blueberries. Methods: 20 indexes including sensory morphology, nutritional function, free amino acids and volatile flavor substance content of six varieties of blueberries in Sichuan were detected by automatic amino acid analyzer and gas chromatography-mass spectrometry and other instruments. Furthermore, its comprehensive quality was evaluated by the principal component analysis and cluster analysis. Results: There were differences among different blueberry varieties. The single fruit weight (2.06 g) and transverse diameter (14.39 mm) of Brigita were the highest, while the gumminess (151.96 N) and total phenol content (1.64 mg/g) were the lowest; Mistry had the highest free amino acid content (453.72 mg/100 g), and the proportion of umami and sweet amino acids was higher; Emerald had the lowest free amino acid content (122.93 mg/100 g) and the least variety; Gardenblue had moderate hardness, its sugar-acid ratio (28.23), anthocyanin content (2.09 mg/g), total phenol

收稿日期: 2021-11-17

基金项目: 四川省科技计划项目 (重点研发项目 2020YFN0149); 四川省重点研发项目 (省院省校科技合作), 蓝莓冷链保鲜与精深加工技术研究 (2022YFSY0031)。

作者简介: 许文静 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品工程, E-mail: 1054243824@qq.com。

* 通信作者: 吕远平 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: 364943477@qq.com。

content (5.78 mg/g) and flavor substances content (14.60 $\mu\text{g/g}$) were the highest. Conclusions: According to principal component analysis, the optimal variety was Gardenblue. Cluster analysis divided blueberries into three categories, suitable for fresh-eating varieties including Gardenblue and Legacy; suitable for both processing and fresh-eating varieties were Emerald, Brigitta and Misty; while Bluerain had outstanding processing advantages.

Key words: blueberry; variety; quality evaluation; principal component analysis; cluster analysis

蓝莓(*Vaccinium* spp.)又名越橘,是杜鹃花科越橘属植物,已被全球公认为是一种能促进健康的重要饮食来源,近年来其产量和消费量均大幅增加^[1]。蓝莓营养丰富,富含花青素、多酚、黄酮等天然抗氧化物,可用于对抗某些人类癌症、调节血糖水平、降低器官氧化应激、调节肠道菌群、调节炎症反应以及改善儿童认知表现等^[2-4]。

随着蓝莓产量的增加,不同品种蓝莓的形态特征、质地组成和营养特性各不相同,导致种植者难以科学地选择栽培品种;同时消费者对蓝莓的要求更加具体,表现在外观品质(果实大小、色泽、质构)、香气滋味(糖、酸、挥发性风味物质)及营养功能(花青素、总酚)上。目前,国内外对蓝莓品质的评价研究多集中在营养指标、抗氧化能力分析上,对品种间差异及加工适应性的研究稍有不足。如刘笑宏等^[5]对胶东地区 4 个品种蓝莓的 11 个理化指标及芳香物质进行分析,但缺少质构及色差等指标分析;温靖等^[6-8]探讨了 7 个蓝莓品种的品质特性,充分分析了其感官品质、理化指标及抗氧化能力,但欠缺对蓝莓氨基酸组成的分析。

目前对山东、广东等地区的引种蓝莓研究较多,因此,本文测定了四川地区 6 个蓝莓品种的感官形态、色泽质构、营养功能指标、氨基酸组成及风味物质含量等指标,全面评价蓝莓的综合品质,同时利用主成分分析^[9]和聚类分析^[10]等方法进行比较分类,能客观有效的反映品种间差异,对品种选育、市场推广和采后加工具有生产指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

供试 6 个蓝莓品种(莱格西、绿宝石、密斯梯、蓝雨、布里吉塔、园蓝) 四川省农业科学院经济作物育种栽培研究所。经原料验收,果实大小一致、无病、虫害,部分贮藏于 4 $^{\circ}\text{C}$ 用于感官形态品质指标及水分含量测定,部分置于-20 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏备用;DNS(二硝基水杨酸) 厦门海标科技有限公司;2-辛醇 上海麦克林生化科技有限公司;没食子酸、芦丁、福林酚、盐酸、硫酸、氯化钾 成都市科隆化学品有限公司;以上试剂均为分析纯。

CM-5 型色度色差仪 日本柯尼卡美能达;TA-XT plus 型质构仪 英国 SMS;A300 全自动氨基酸分析仪 德国曼默博尔;QP2010SE 气相色谱质谱联用仪 日本岛津。

1.2 实验方法

1.2.1 不同品种蓝莓感官品质测定 单果重:每个品

种随机选取 30 个果实,称重后计算单果重,重复测定 3 次^[6];果形指数:每个品种随机选取 20 个果实用游标卡尺测量横径与纵径,重复测定 3 次,果形指数=纵径/横径^[7];色度:采用色度色差仪测定不同品种蓝莓 L^* 、 a^* 、 b^* 值,平行测 12 次;质构:采用 TPA(全质构测试)分析,测定时样品果柄处向上,平行测定 15 次。使用直径 75 mm(P36R)圆形探头,仪器参数设置为测前速度 0.5 mm/s,测试速度 1 mm/s,测后速度 0.5 mm/s,压缩程度 30%,2 次压缩停顿时间为 5 s,触发力 5 g^[11]。

1.2.2 不同品种蓝莓营养功能指标测定 水分含量:采用 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》第一法直接干燥法测定;可溶性固形物(total soluble solid, TSS)含量:参照 NY/T 2637-2014《水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法》测定;总酸含量:采用 GB 12456-2021《食品中总酸的测定》第二法 pH 计电位滴定法测定;还原糖含量:依照 GB 5009.7-2016《食品中还原糖的测定》进行测定;可溶性糖含量:采用 NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法》测定。

花青素含量:采用 pH 示差法^[12-13]测定:即 1 g 蓝莓研磨后加入 12 mL 80% 甲醇振荡提取 20 min 后 6000 r/min 离心 15 min 得提取液。分别取 1 mL 提取液于 2 支 25 mL 具塞试管中,分别用 pH 为 1.0 和 4.5 的缓冲溶液定容至 10 mL,在 40 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中平衡 50 min 后测定 535、700 nm 吸光度值计算花青素含量,以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷计。

总酚含量:采用 Folin-Ciocalteu 法^[14]测定,即 1 g 蓝莓加入 4 mL 70% 乙醇研磨后转入离心管中 70 $^{\circ}\text{C}$ 水浴提取 10 min,4200 r/min 离心 15 min 后收集上清液至 10 mL 容量瓶,残渣反复提取至刻度。取 1 mL 提取液于 10 mL 棕色容量瓶中,分别加入 1 mL 福林酚试剂、3 mL 7.5% Na_2CO_3 后定容,避光显色 1 h 后测定 760 nm 吸光度值,以没食子酸为标准品,结果以没食子酸当量表示(mg/g)。

黄酮含量:参考邵盈盈^[15]的方法进行测定,以芦丁为标准品,结果以芦丁当量表示(mg/g)。

1.2.3 不同品种蓝莓游离氨基酸组成测定 采用氨基酸自动分析仪测定游离氨基酸含量,样品前处理依据 GB 30987-2020《植物中游离氨基酸的测定》进行,分离柱为阳离子交换树脂 2619(4.6 mm $\times$ 60 mm, 3 μm),柱温 57 $^{\circ}\text{C}$,反应柱温度 135 $^{\circ}\text{C}$,检测波长 570、440 nm,缓冲溶液流速 0.40 mL/min,茚三酮流速 0.35 mL/min,进样量 20 μL ^[16]。

1.2.4 不同品种蓝莓挥发性风味物质分析 采用顶

空固相微萃取和气相色谱-质谱联用仪对 6 个品种蓝莓进行香气检测与分析。根据 Ke 等^[17]的处理方法并加以改动:称取研磨后的蓝莓 5 g 于 20 mL 顶空瓶中,加入 0.1 g NaCl 与 15 μ L 内标物质(40 mg/L 2-辛醇)后密封。样品先在 40 $^{\circ}$ C 下平衡 20 min,再将填充有 65 μ m PDMS/DVB 材料的萃取头插入顶空瓶中萃取 30 min,最后插入 GC 进样口,解析 3 min,以 2-辛醇为内标对风味物质进行定量分析。

GC 条件:参照吴林等^[18]的方法稍作修改,色谱柱 DB-5MS(30 m $\times$ 250 μ m, 0.25 μ m),进样口温度 250 $^{\circ}$ C,色谱柱起始温度 50 $^{\circ}$ C,升温程序为以 50 $^{\circ}$ C 保持 2 min,以 5 $^{\circ}$ C/min 升至 100 $^{\circ}$ C 保持 5 min;8 $^{\circ}$ C/min 升至 180 $^{\circ}$ C 保持 4 min;15 $^{\circ}$ C 升至 230 $^{\circ}$ C 保留 2 min。载气为高纯 He,流量 1.0 mL/min。MS 条件:离子源温度 200 $^{\circ}$ C,接口温度 250 $^{\circ}$ C;离子源:EI;电子能量:70 eV;扫描范围:35~625 amu。

1.3 数据处理

所有数据以平均值 $\pm$ 标准差表示,采用 SPSS 26 软件对数据进行 Duncan's 差异显著性分析, $P<0.05$ 时显著;通过 SPSS 26 软件进行主成分分析、聚类分析;采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同品种蓝莓感官形态指标比较

2.1.1 不同品种蓝莓单果质量、横径、纵径、果形指数比较 由表 1 可知,蓝莓果实单果重为 0.85~2.06 g,高于 2.00 g 的有莱格西和布里吉塔,果实较重;单果质量最轻的为蓝雨,仅为 0.85 g,且各品种间差异显著($P<0.05$)。判定果实形状的直观标准是果形指数,通常果形指数在 0.6~0.8 为扁圆形,0.8~0.9 为圆形,0.9~1.0 为椭圆形或圆锥形,1.0 以上为长圆形^[19]。蓝雨果实小且呈椭圆形,园蓝则为圆形代表,其余品种皆为扁圆形,这主要受蓝莓遗传基因的影响。由单果质量和横、纵径可判断出布里吉塔和莱格西属于大果型蓝莓,密斯梯、蓝雨和园蓝为中小果形蓝莓。

表 1 不同品种蓝莓形态指标比较

Table 1 Comparison of morphological indexes of different varieties of blueberries

品种	单果质量(g)	横径(mm)	纵径(mm)	果形指数	果实形状
莱格西	2.01 $\pm$ 0.03 ^a	13.44 $\pm$ 0.77 ^b	10.25 $\pm$ 0.59 ^b	0.76 $\pm$ 0.04 ^c	扁圆形
绿宝石	1.86 $\pm$ 0.09 ^b	13.00 $\pm$ 0.86 ^c	9.86 $\pm$ 0.75 ^b	0.76 $\pm$ 0.05 ^c	扁圆形
密斯梯	1.35 $\pm$ 0.06 ^c	11.21 $\pm$ 0.77 ^d	8.13 $\pm$ 0.60 ^d	0.72 $\pm$ 0.03 ^d	扁圆形
蓝雨	0.85 $\pm$ 0.02 ^e	9.69 $\pm$ 0.52 ^e	8.90 $\pm$ 0.44 ^e	0.92 $\pm$ 0.04 ^a	椭圆形
布里吉塔	2.06 $\pm$ 0.07 ^a	14.39 $\pm$ 0.50 ^a	11.32 $\pm$ 0.90 ^a	0.79 $\pm$ 0.05 ^c	扁圆形
园蓝	1.09 $\pm$ 0.08 ^d	10.85 $\pm$ 0.51 ^d	8.99 $\pm$ 0.63 ^e	0.83 $\pm$ 0.05 ^b	圆形

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$),表2~表5同。

2.1.2 不同品种蓝莓色度比较 颜色是食品重要的外观指标之一,色差仪中 L^* 值表示样品的明暗度, a^* 值表示红绿度, b^* 值表示黄蓝度^[20]。不同品种蓝莓色度参数见表 2,莱格西、绿宝石 L^* 值较高,说明这两个品种果皮明亮度高,与其余品种差异显著($P<$

0.05)。 a^* 值密斯梯最大(1.74), b^* 值绿宝石最小(-6.10)。所有品种蓝莓 a^* 值均大于 0,说明果皮颜色偏红, b^* 值均小于 0,表明蓝莓颜色偏蓝,整体呈现明亮的蓝紫色。

表 2 不同品种蓝莓色度比较

Table 2 Comparison of chroma of different blueberries

品种	L^*	a^*	b^*
莱格西	41.74 $\pm$ 4.6 ^a	1.18 $\pm$ 0.11 ^{bc}	-6.09 $\pm$ 1.42 ^b
绿宝石	42.86 $\pm$ 3.46 ^a	1.49 $\pm$ 0.51 ^{ab}	-6.10 $\pm$ 1.17 ^b
密斯梯	37.07 $\pm$ 4.03 ^b	1.74 $\pm$ 0.10 ^a	-5.99 $\pm$ 0.95 ^b
蓝雨	28.75 $\pm$ 2.52 ^c	1.02 $\pm$ 0.25 ^c	-4.84 $\pm$ 0.75 ^a
布里吉塔	25.30 $\pm$ 1.98 ^d	1.43 $\pm$ 0.95 ^{ab}	-4.63 $\pm$ 1.36 ^a
园蓝	35.13 $\pm$ 2.79 ^b	0.65 $\pm$ 0.06 ^d	-5.19 $\pm$ 0.84 ^{ab}

2.1.3 不同品种蓝莓质构比较 由表 3 可知,不同品种蓝莓硬度在 408.37~805.67 g 范围内,莱格西与绿宝石硬度相当,与其余品种间差异显著($P<0.05$)。弹性代表蓝莓受到挤压后在一段时间内恢复原形的能力^[21],可以理解为蓝莓在第一次咬合后与第二次咬合间恢复的高度。蓝莓的弹性除绿宝石外,其余品种差异不大;蓝雨和莱格西的胶粘性最大,分别为 296.48 N 和 280.33 N,最小的为布里吉塔(151.96 N);咀嚼性反映蓝莓果实对咀嚼的持续抵抗力,蓝雨的咀嚼性最大,咀嚼韧性好,脆而不烂,其次为莱格西,最小为布里吉塔。

表 3 不同品种蓝莓质构比较

Table 3 Texture comparison of different blueberry varieties

品种	硬度(g)	弹性(mm)	胶粘性(N)	咀嚼性(mJ)
莱格西	715.31 $\pm$ 90.61 ^b	0.69 $\pm$ 0.03 ^a	280.33 $\pm$ 41.8 ^a	183.67 $\pm$ 26.75 ^a
绿宝石	741.75 $\pm$ 120.21 ^b	0.63 $\pm$ 0.07 ^b	246.59 $\pm$ 36.6 ^b	162.55 $\pm$ 24.19 ^b
密斯梯	439.41 $\pm$ 80.36 ^d	0.69 $\pm$ 0.03 ^a	170.33 $\pm$ 15.88 ^d	114.44 $\pm$ 12.06 ^c
蓝雨	805.67 $\pm$ 68.21 ^a	0.65 $\pm$ 0.02 ^{ab}	296.48 $\pm$ 24.82 ^a	193.86 $\pm$ 19.31 ^a
布里吉塔	408.37 $\pm$ 58.17 ^d	0.66 $\pm$ 0.06 ^{ab}	151.96 $\pm$ 20.40 ^d	102.58 $\pm$ 13.49 ^c
园蓝	510.65 $\pm$ 55.66 ^c	0.69 $\pm$ 0.09 ^a	225.74 $\pm$ 20.53 ^c	155.33 $\pm$ 19.93 ^b

2.2 不同品种蓝莓营养功能指标比较

2.2.1 水分、可溶性固形物(TSS)、还原糖、可溶性糖及总酸含量比较 由表 4 可知,6 个品种蓝莓水分含量为 80.83%~88.11%。园蓝的 TSS、可溶性糖含量最高;最低的为蓝雨,其 TSS 和可溶性糖含量仅有园蓝的 70% 和 71%。园蓝的总酸含量最低(0.45%),布里吉塔、密斯梯、莱格西之间差异不显著($P>0.05$)。园蓝的糖酸比最高(28.23),莱格西、绿宝石、布里吉塔糖酸比接近,蓝雨果实糖酸比最低。从水分含量、可溶性糖和总酸含量来看,初步认为除蓝雨外其余品种高糖低酸、高水分含量^[22],都可以作为鲜食品种销售。

2.2.2 花青素、总酚及黄酮含量比较 从表 5 可知,园蓝和蓝雨的花青素含量较高,分别为 2.09 mg/g、1.36 mg/g,与其余品种蓝莓差异显著($P<0.05$),这与园蓝和蓝雨相对较厚的果皮有关,果皮中含有大量的花青素。园蓝的总酚和黄酮含量最高;总酚最低的为布里吉塔,仅有园蓝的 28%,黄酮含量最少的为蓝雨

表 4 不同品种蓝莓的水分含量、TSS、还原糖、可溶性糖、总酸及糖酸比

Table 4 Water content, TSS, reducing sugar, soluble sugar, total acid and sugar-acid ratio of different blueberries

品种	水分含量(%)	TSS(%)	还原糖(%)	可溶性糖(%)	总酸(%)	糖酸比
莱格西	85.96±0.16 ^{bc}	10.7±0.12 ^d	9.66±1.49 ^{ab}	10.63±0.77 ^b	1.02±0.1 ^b	10.48±1.38 ^{bc}
绿宝石	88.11±0.83 ^a	11.3±0.23 ^c	7.81±0.45 ^{cd}	11.04±1.26 ^{ab}	1.14±0.01 ^a	9.66±2.87 ^c
密斯梯	86.53±0.51 ^b	11.9±0.12 ^b	9.99±0.07 ^a	11.70±1.84 ^{ab}	1.00±0.10 ^b	11.74±1.89 ^b
蓝雨	85.28±0.15 ^c	10.5±0.12 ^e	7.37±0.32 ^d	8.93±0.07 ^c	1.18±0.03 ^a	7.59±0.18 ^d
布里吉塔	87.72±0.35 ^a	11.1±0.12 ^c	8.38±0.87 ^{bcd}	10.51±0.40 ^{bc}	1.07±0.01 ^{ab}	9.86±0.41 ^{bc}
园蓝	80.83±0.53 ^d	14.9±0.12 ^a	8.99±0.42 ^{abc}	12.61±0.48 ^a	0.45±0.02 ^c	28.23±0.46 ^a

仅有 0.33 mg/g。蓝雨果实较小,糖酸比较低,鲜食销售优势不大,但功能成分花青素、总酚含量可观,更适宜加工。

表 5 不同品种蓝莓花青素、总酚、黄酮含量比较
Table 5 Comparison of anthocyanins, total phenols and flavonoids contents in different blueberries

品种	花青素(mg/g)	总酚(mg/g)	黄酮(mg/g)
莱格西	0.84±0.23 ^c	2.35±0.2 ^c	0.68±0.06 ^b
绿宝石	0.97±0.18 ^c	2.54±0.25 ^c	0.58±0.02 ^b
密斯梯	1.05±0.17 ^c	3.07±0.13 ^b	0.65±0.01 ^b
蓝雨	1.36±0.11 ^b	3.01±0.07 ^b	0.33±0.03 ^d
布里吉塔	0.92±0.14 ^c	1.64±0.04 ^d	0.45±0.04 ^c
园蓝	2.09±0.10 ^a	5.78±0.39 ^a	0.99±0.13 ^a

2.3 不同品种蓝莓游离氨基酸组成分析

不同品种蓝莓游离氨基酸组成及含量见表 6。6 个品种蓝莓共检测出 18 种游离氨基酸,其中,包含苏氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、赖氨酸 6 种人体必需氨基酸,缺乏甲硫氨酸与色氨酸。

不同蓝莓品种氨基酸组成相似,但含量差异较大,这与严红光等^[23]的研究结果相似。游离氨基酸总量含量最多的为密斯梯(435.720 mg/100 g),布里吉塔和绿宝石游离氨基酸总量低于 200 mg/100 g,仅有密斯梯的 46% 和 28%。检测出的 18 种氨基酸中含量比较高的有 Glu、Ala、GABA、Lys、Arg、Pro,含量较低的为 Gly、Ile、Phe、Leu。有研究指出氨基酸的生物合成途径在果蔬和食用菌中完全不同,且其代谢途径的转录表达调控水平导致了代谢系统的稳定差异^[24],不同蓝莓品种氨基酸含量差异可能与其遗传差异、氨基酸代谢途径中酶活力差异相关。

根据游离氨基酸呈味的特点,参考侯娜等^[25]和刘伟等^[26]的分类并稍作修改,将所检测出的氨基酸分为 5 类:鲜味氨基酸(Asp、Glu、Gly、Ala、Lys)、甜味氨基酸(Ser、Thr、His、Pro)、芳香族氨基酸(Tyr、Phe)、苦味氨基酸(Arg、Val、Leu、Ile)和其他(Asn、GABA、(Cys)₂)。由图 1 可知,不同品种蓝莓呈味氨基酸差异较大:相较于其他呈味氨基酸,蓝雨和园

表 6 不同品种蓝莓游离氨基酸组成

Table 6 Free amino acid composition of different blueberries

游离氨基酸(mg/100 g)	莱格西	绿宝石	密斯梯	蓝雨	布里吉塔	园蓝
天冬氨酸Asp	8.128±0.78 ^b	8.319±0.63 ^b	10.989±0.71 ^a	8.767±1.34 ^{ab}	7.240±0.84 ^b	9.128±0.77 ^{ab}
苏氨酸Thr	1.690±0.62 ^b	1.971±0.78 ^{ab}	3.103±0.70 ^a	2.108±0.71 ^{ab}	1.84±0.57 ^b	2.688±0.65 ^a
丝氨酸Ser	5.019±0.72 ^a	6.735±1.40 ^a	5.882±1.41 ^a	6.025±1.40 ^a	6.1±1.48 ^a	5.382±0.64 ^a
天冬酰胺Asn	1.752±0.70 ^c	4.115±0.74 ^b	29.074±1.40 ^a	4.843±1.39 ^b	4.135±1.40 ^b	4.681±2.14 ^b
谷氨酸Glu	10.556±0.70 ^c	16.072±1.41 ^b	28.187±0.71 ^a	14.889±2.11 ^b	14.339±1.42 ^b	30.914±1.35 ^a
甘氨酸Gly	0.443±0.44 ^b	—	—	0.353±0.21 ^c	—	0.576±0.35 ^a
丙氨酸Ala	12.722±1.41 ^a	12.560±2.11 ^a	11.155±0.08 ^a	11.797±1.41 ^a	12.566±1.34 ^a	7.364±0.91 ^b
缬氨酸Val	3.710±1.41 ^b	3.071±0.64 ^c	4.058±1.49 ^a	—	2.825±0.85 ^d	—
异亮氨酸Ile	0.730±0.27 ^a	—	—	—	—	0.717±0.33 ^a
亮氨酸Leu	0.772±0.28 ^a	—	—	—	—	0.760±0.26 ^a
γ-氨基丁酸GABA	27.944±0.28 ^a	28.626±2.12 ^a	17.028±2.11 ^d	24.561±1.38 ^{ab}	19.897±1.56 ^{cd}	22.158±0.77 ^{bc}
组氨酸His	1.761±0.82 ^b	2.675±2.12 ^{ab}	5.030±1.43 ^a	1.549±0.76 ^b	0.929±0.05 ^b	0.639±0.50 ^b
赖氨酸Lys	36.874±1.41 ^b	38.052±1.41 ^a	42.145±2.05 ^a	30.590±1.40 ^c	19.015±0.64 ^d	5.970±1.45 ^c
精氨酸Arg	60.693±0.79 ^c	—	212.721±3.54 ^a	51.791±2.13 ^d	24.516±1.34 ^c	89.471±1.28 ^b
脯氨酸Pro	73.090±1.41 ^b	—	66.349±1.42 ^c	66.575±1.43 ^c	83.612±1.40 ^a	45.865±2.22 ^d
苯丙氨酸Phe	—	0.737±0.27	—	—	—	—
胱氨酸(Cys) ₂	—	—	—	3.810±1.40 ^a	1.995±0.84 ^c	3.450±0.73 ^b
酪氨酸Tyr	—	—	—	—	—	7.876±1.41
必需氨基酸占比(%)	17.800±0.21 ^b	35.650±0.40 ^a	11.320±0.33 ^d	14.360±0.30 ^c	11.900±0.20 ^d	4.260±0.03 ^c
游离氨基酸总量	245.880±4.13 ^b	122.930±3.21 ^f	435.720±4.33 ^a	227.660±5.16 ^d	199.010±2.18 ^e	237.640±3.25 ^c

注:同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),表7同。

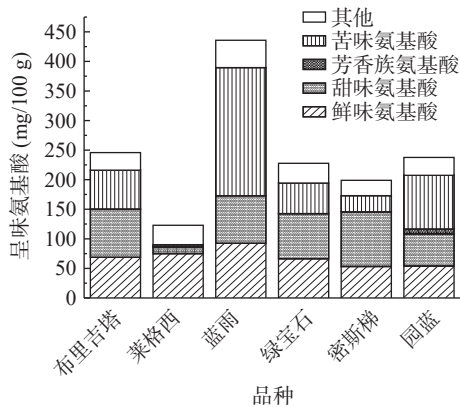


图 1 不同蓝莓游离氨基酸滋味特征

Fig.1 Flavor characteristics of free amino acids in different blueberries

蓝的苦味氨基酸含量丰富;绿宝石和密斯梯的甜味氨基酸含量较多;布里吉塔所含鲜味、甜味、苦味氨基酸含量基本持平;莱格西则含有较多的鲜味氨基酸。

2.4 不同品种蓝莓挥发性风味分析

不同品种蓝莓的挥发性风味成分见表 7。6 个品种蓝莓共检测 73 种挥发性风味成分,其中,园蓝、绿宝石分别检测出 36、35 种香气成分,莱格西和蓝雨检测出 31 种香气成分,布里吉塔和密斯梯分别检测出 23、26 种香气成分,不同品种蓝莓香气成分的种类和含量差异较大。挥发性风味成分总量及种类最多的为园蓝(14604.72 ng/g),其次为绿宝石(7052.68 ng/g),莱格西香气成分总量最低,仅有园蓝的 11%。

表 7 不同品种蓝莓挥发性风味物质组成(ng/g)

Table 7 Composition of volatile flavor compounds in different varieties of blueberries (ng/g)

类别	CAS号	化合物	品种					
			布里吉塔	莱格西	蓝雨	绿宝石	密斯梯	园蓝
醇类	470-82-6	桉叶油醇	593.93±9.59	—	—	—	—	—
	78-70-6	芳樟醇	1123.29±10.13 ^c	124.92±4.10 ^f	629.74±7.81 ^e	1454.75±12.10 ^b	949.27±9.12 ^d	6621.32±15.21 ^a
	98-55-5	alpha-松油醇	31.58±1.02 ^d	—	—	278.88±3.34 ^b	201.95±1.23 ^c	581.89±4.66 ^a
	7341-17-5	2-乙基己基硫醇	—	159.65±1.02 ^b	203.29±3.41 ^a	52.56±0.46 ^d	—	61.77±0.82 ^c
	97-99-4	四氢糠醇	—	—	34.27±0.11	—	—	—
	18409-18-2	反式-2-癸烯醇	—	—	—	52.04±0.13	—	—
	536-59-4	紫苏醇	—	—	—	26.17±0.09	—	—
	7786-44-9	2,6-壬二烯醇	—	—	—	—	666.71±10.21 ^b	1329.42±13.20 ^a
	5921-73-3	2-壬炔-1-醇	—	—	—	—	—	1257.75±16.21
	34995-77-2	三甲基-5-乙炔基四氢化-2-呋喃甲醇	—	—	—	—	—	210.22±2.46
	74962-98-4	反-2-十三烯醇	—	—	—	—	—	32.22±0.21
	112-53-8	十二醇	—	—	—	—	—	22.85±0.34
	100-52-7	苯甲醛	179.07±1.23 ^b	63.25±0.43 ^c	172.37±1.66 ^b	280.74±3.25 ^a	—	—
	2548-87-0	反-2-辛烯醛	52.37±0.45	—	—	—	—	—
醛类	124-19-6	壬醛	216.30±2.71 ^a	205.13±1.96 ^b	—	206.29±3.77 ^b	—	—
	557-48-2	反,顺-2,6-壬二烯醛	21.73±0.70	—	—	—	—	—
	18829-56-6	反式-2-壬烯醛	56.55±0.45 ^c	—	—	116.21±1.21 ^a	—	73.58±0.48 ^b
	112-31-2	癸醛	90.85±1.02 ^f	150.79±2.70 ^d	119.19±0.98 ^c	223.01±4.21 ^b	169.68±2.33 ^c	269.42±3.22 ^a
	60784-31-8	反-2-壬烯醛	—	44.79±0.22 ^c	94.67±1.09 ^a	78.86±0.37 ^b	42.15±0.34 ^c	—
	124-13-0	正辛醛	—	—	101.10±0.77	—	—	—
	112-54-9	十二醛	—	—	44.64±0.34	—	—	—
	141-27-5	顺-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	—	—	49.70±0.36 ^b	80.60±0.93 ^a	—	—
	123-35-3	月桂烯	476.75±10.30 ^d	521.18±9.89 ^b	493.36±12.30 ^c	570.75±10.99 ^a	—	—
	13877-91-3	罗勒烯	94.17±0.46 ^c	264.15±6.44 ^c	214.21±4.81 ^d	277.84±3.77 ^b	279.19±2.35 ^b	558.63±6.70 ^a
	4316-65-8	3,5,5-三甲基-1-己烯	58.74±0.53	—	—	—	—	—
	7785-26-4	左旋-alpha-蒎烯	—	218.58±2.21 ^a	168.00±1.70 ^b	—	—	—
	586-62-9	蒎品油烯	—	61.54±0.22 ^b	61.26±0.19 ^b	55.37±0.09 ^c	61.63±0.16 ^b	144.04±1.33 ^a
	5392-40-5	柠檬醛	—	147.88±1.33	—	—	—	—
萜烯类	87-44-5	1-石竹烯	—	382.21±3.66 ^a	39.75±1.22 ^c	50.23±0.44 ^b	—	—
	6753-98-6	α-石竹烯	—	78.78±0.78	—	—	—	—
	3338-55-4	反-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	—	47.88±1.02	—	—	—	—
	1139-30-6	氧化石竹烯	—	27.75±0.50 ^a	—	—	—	13.41±0.06 ^b
	5989-54-8	(-)-柠檬烯	—	—	48.98±0.80 ^b	—	1005.06±17.99 ^a	—
	11028-42-5	雪松烯	—	—	77.59±1.55 ^b	—	—	160.00±2.52 ^a
	489-39-4	(+)-香橙烯	—	—	26.74±0.39 ^b	92.31±0.81 ^a	—	25.34±0.08 ^b
	5989-27-5	右旋蒎二烯	—	—	—	874.75±10.02	—	—

续表 7

类别	CAS号	化合物	品种					
			布里吉塔	莱格西	蓝雨	绿宝石	密斯梯	园蓝
酯类	138-86-3	双戊烯	—	—	—	413.40±5.11	—	—
	29548-02-5	黏蒿三烯	—	—	—	—	197.79±1.44	—
	1195-92-2	(R)-氧化柠檬烯	—	—	—	—	58.25±0.62	—
	6931-54-0	beta-环氧蒎烷	—	—	—	—	—	41.04±0.09
	77-53-2	柏木脑	—	—	—	—	—	33.44±0.07
	2437-56-1	1-十三烯	—	—	—	—	—	9.16±0.41
	13361-34-7	氰乙酸异辛酯	29.56±0.11 ^b	—	—	42.56±0.41 ^a	—	—
	103-11-7	丙烯酸2-乙基己酯	59.52±0.72 ^c	195.99±1.01 ^c	258.17±3.07 ^b	208.77±2.27 ^c	122.60±1.44 ^d	288.69±2.93 ^a
	6846-50-0	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	61.89±0.60 ^f	123.61±1.02 ^d	262.23±2.33 ^a	179.46±0.88 ^c	205.99±1.63 ^b	109.15±1.00 ^e
	84-69-5	邻苯二甲酸二异丁酯	67.91±0.17 ^a	—	—	—	11.73±0.03 ^b	—
	23853-33-0	硫代苯甲酸S-羟甲酯	—	25.91±0.28 ^b	57.79±0.51 ^a	—	—	—
	25415-84-3	2-乙基己酸乙酯	—	85.05±0.72 ^a	64.54±0.51 ^c	71.76±0.40 ^b	28.34±0.05 ^c	56.80±0.34 ^d
	141-12-8	乙酸橙花酯	—	21.13±0.02	—	—	—	—
	2566-89-4	花生四烯酸甲酯	—	46.21±0.15 ^a	—	24.76±0.04 ^b	—	30.73±0.21 ^c
	1731-88-0	十三碳脂肪酸	—	43.34±0.11 ^a	42.26±0.17 ^a	34.10±0.12 ^b	—	—
	111-82-0	月桂酸甲酯	—	90.66±1.03 ^b	—	—	43.71±0.18 ^c	113.50±0.77 ^a
	110-42-9	癸酸甲酯	—	—	—	33.28±0.24 ^b	16.57±0.04 ^c	83.95±0.60 ^a
	110-38-3	癸酸乙酯	—	—	—	—	—	76.25±0.35
	115-99-1	3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇甲酯	—	—	—	—	—	57.20±0.15
	112-12-9	甲基壬基甲酮	127.08±1.22 ^d	387.23±2.88 ^b	231.92±1.55 ^c	238.54±3.03 ^c	475.42±3.50 ^a	47.26±0.22 ^e
酮类	3796-70-1	香叶基丙酮	160.82±1.33 ^b	56.58±0.51 ^d	—	77.71±0.40 ^c	175.14±0.91 ^a	51.88±0.49 ^c
	821-55-6	2-壬酮	—	235.09±2.11 ^a	80.24±0.71 ^c	133.05±0.34 ^b	53.72±0.23 ^d	—
	464-48-2	左旋樟脑	—	—	123.43±2.03	—	—	—
	2345-27-9	2-十四酮	—	—	—	90.45±0.30	—	—
	6485-40-1	左旋香芹酮	—	—	—	—	145.00±1.39	—
	95-47-6	邻二甲苯	198.51±1.08	—	—	—	—	—
其他	629-20-9	环辛四烯	710.75±9.22 ^c	647.15±4.70 ^d	860.01±10.33 ^b	332.56±4.12 ^c	325.96±2.09 ^f	1024.07±15.23 ^a
	629-50-5	正十三烷	17.92±0.03 ^c	182.47±0.40 ^b	—	61.31±0.12 ^c	40.51±0.06 ^d	215.79±1.13 ^a
	544-76-3	十六烷	18.72±0.03 ^d	19.97±0.01 ^d	47.85±0.20 ^b	—	26.34±0.33 ^c	116.96±0.73 ^a
	112-40-3	十二烷	18.39±0.02 ^f	81.07±0.53 ^c	113.16±0.77 ^b	33.26±0.11 ^c	43.38±0.21 ^d	164.23±1.00 ^a
	1120-21-4	十一烷	—	39.11±0.06 ^b	34.58±0.03 ^b	74.61±0.12 ^a	37.30±0.01 ^b	—
	119-36-8	水杨酸甲酯	—	—	142.91±1.02 ^c	160.12±1.34 ^b	—	287.87±2.11 ^a
	15869-93-9	3,5-二甲基辛烷	—	—	44.19±0.40	—	—	—
	124-18-5	癸烷	—	—	—	71.63±0.40	—	—
	5333-84-6	3-甲基四氢苯酞	—	—	—	—	416.90±6.11 ^a	365.93±4.03 ^b
	1138-52-9	3,5-二叔丁基苯酚	—	—	—	—	—	28.89±0.02
	629-59-4	十四烷	—	—	—	—	—	40.07±0.05
		总量	4466.41±16.42 ^e	1618.06±12.02 ^f	4942.14±18.29 ^d	7052.68±23.01 ^b	5800.32±20.44 ^c	14604.72±17.96 ^a

结合表 7 和图 2 可见, 6 个品种蓝莓共检测出 12 种醇类物质, 园蓝中醇类物质最为丰富, 主要含有芳樟醇、2,6-壬二烯醇、alpha-松油醇等物质, 赋予蓝莓果香气味的同时表现出玫瑰木香气又似甜瓜香气。布里吉塔果实独有桉叶油醇, 具有清香的植物香气^[27]。在检测出的 10 种醛类物质里, 布里吉塔和绿宝石中醛类物质含量较高, 主要含有苯甲醛、反-2-辛烯醛、壬醛、反,顺-2,6-壬二烯醛和癸醛等化合物, 呈现苦杏仁气味及绿叶清香, 6 个品种蓝莓均含有癸醛, 表现出柑橘清样香气。绿宝石、密斯梯中萜烯类化合物较多, 主要含有罗勒烯、月桂烯、萜品油烯、1-石竹烯等。萜类化合物广泛存在于浆果果实中, 由于其具有较高的沸点而表现出较稳定的香气^[28]。莱格

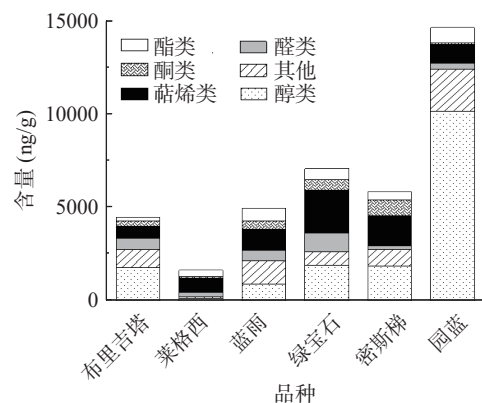


图 2 蓝莓香气成分比例

Fig.2 Proportion of aroma components in blueberry

西和园蓝酯类物质种类较多(8 种),园蓝、蓝雨和绿宝石的酯类含量较高,主要含有月桂酸甲酯、丙烯酸 2-乙基己酯、2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯和癸酸甲酯等香气成分,使得蓝莓具有典型的果香。除甲基壬基甲酮、香叶基丙酮外,莱格西、蓝雨、绿宝石和密斯梯还含有 2-壬酮,在蓝莓果香和植物香的基础上增添了甜香和青香。

2.5 不同品种蓝莓感官营养品质指标、游离氨基酸、挥发性风味化合物主成分及聚类分析

2.5.1 不同品种蓝莓主成分分析 对 6 个品种蓝莓感官品质、游离氨基酸及挥发性风味化合物含量等 20 个指标进行主成分分析,结果如表 8 所示。提取出 3 个主成分,累计贡献率达 89.223%,能解释绝大部分变量信息。主成分载荷矩阵可以表达出变量对相应主成分的影响程度^[29]。由表 9 可知,对第一主成分产生正向影响的为糖酸比、TSS、花青素、总酚、黄酮含量,具有较高的载荷权数,产生负向影响的为总酸。第二主成分主要代表果形指数、游离氨基酸含量、胶粘性和咀嚼性,为正相关。第三主成分

表 8 主成分特征值及累计贡献率

Table 8 Principal component characteristic values and cumulative contribution rate

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	8.834	44.169	44.169
2	5.606	28.029	72.198
3	3.405	17.025	89.223

表 9 主成分载荷表

Table 9 Principal component load table

指标	成分		
	1	2	3
单果重(X_1)	-0.443	-0.653	0.122
果形指数(X_2)	0.059	0.939	-0.292
L^* (X_3)	0.119	-0.277	0.910
a^* (X_4)	-0.634	-0.633	-0.019
b^* (X_5)	-0.209	-0.051	-0.887
硬度(X_6)	-0.348	0.692	0.620
弹性(X_7)	0.583	-0.405	0.119
胶粘性(X_8)	-0.09	0.734	0.65
咀嚼性(X_9)	-0.025	0.743	0.644
水分含量(X_{10})	-0.907	-0.35	-0.005
TSS(X_{11})	0.972	-0.072	-0.125
还原糖(X_{12})	0.361	-0.741	0.279
可溶性糖(X_{13})	0.781	-0.562	0.083
总酸(X_{14})	-0.983	0.069	0.059
糖酸比(X_{15})	0.986	-0.012	-0.064
花青素(X_{16})	0.873	0.445	-0.181
总酚(X_{17})	0.948	0.271	0.055
黄酮(X_{18})	0.897	-0.305	0.287
游离氨基酸总量(X_{19})	-0.167	0.833	-0.438
风味化合物总量(X_{20})	0.874	0.166	-0.190

反映蓝莓色泽,与 L^* 值呈正相关, b^* 值呈负相关。将三个主成分的得分记为 F_1 、 F_2 、 F_3 ,以 3 组主成分相应的特征值除以特征值总和作为权重数,建立主成分综合得分模型: $F_{\text{综}}=0.50\times F_1+0.31\times F_2+0.19\times F_3$,得分情况见表 10。6 种蓝莓的综合评分由高到低依次为:园蓝、蓝雨、莱格西、绿宝石、密斯梯、布里吉塔。

表 10 不同品种蓝莓主成分评分和综合评分

Table 10 Principal component score and comprehensive score of different blueberries

品种	F_1	F_2	F_3	$F_{\text{综}}$	排名
园蓝	5.846	0.755	-0.371	3.060	1
蓝雨	-1.752	4.215	-0.483	0.365	2
莱格西	-0.863	-0.872	2.499	-0.224	3
绿宝石	-1.585	-0.009	1.325	-0.535	4
密斯梯	0.252	-2.580	-0.029	-0.692	5
布里吉塔	-1.898	-1.508	-2.941	-1.974	6

2.5.2 不同品种蓝莓聚类分析 采用聚类分析法对 20 个品质指标进行 R 型聚类,对蓝莓 6 个品种进行 Q 型聚类,结果见图 3 和图 4。由图 3 可知,当距离为 20 时,可将蓝莓的品质指标分为三大类:第 1 类为氨基酸含量、果形指数、硬度、咀嚼性、胶粘性等指标;第 2 类指标为糖酸比、黄酮、花青素、总酚、TSS、风味化合物含量、弹性、还原糖、总糖、 L^* 值;第 3 类指标为水分含量、总酸、 a^* 、 b^* 及单果重。结合主成分载荷表 9 可知,第 2 类指标对应第 1 主成分的正载荷量,即指标值与综合模型评分呈正相关。结合相关文献^[30-31],确定蓝莓品质的核心指标包括糖酸比、黄酮、花青素、硬度、咀嚼性、胶粘性等。

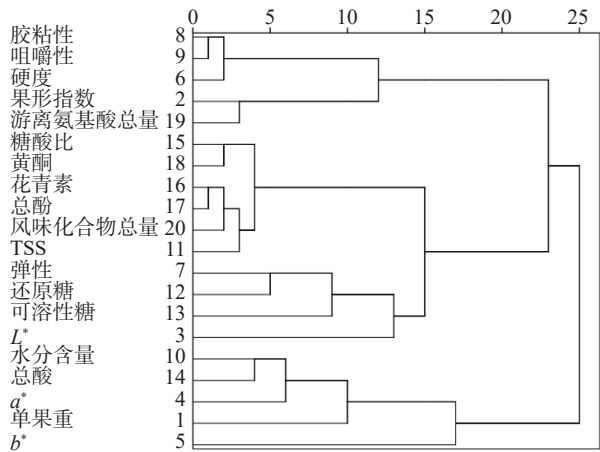


图 3 不同品种蓝莓 R 型聚类谱系图

Fig.3 R-type cluster pedigree diagram of different blueberry varieties

图 4 为不同品种蓝莓 Q 型聚类谱系图,可以将蓝莓分为三类。第一聚类包括蓝雨、布里吉塔、密斯梯、绿宝石,这四个品种水分含量丰富,可溶性固形物含量较高,总酸含量中等,同时花青素、总酚含量较高,属于鲜食加工皆可的品种。其中,蓝雨果实较小,商品性差,但高花青素含量使其更适宜被作为提

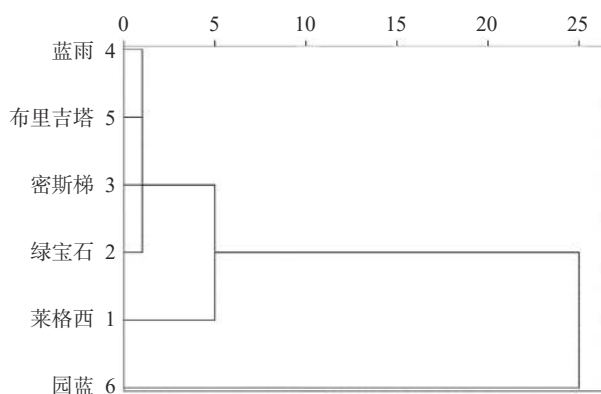


图4 不同品种蓝莓Q型聚类谱系图

Fig.4 Q-type cluster pedigree diagram of different blueberry varieties

取色素的原料利用。第二聚类为莱格西,其果实为扁圆形,属于中大型果实;高糖酸比、高硬度,是适宜鲜食和贮藏的蓝莓品种。第三聚类为园蓝,果实呈圆形,硬度适中,高糖酸比,抗氧化物质含量最高,鲜食的优势突出。

3 结论

科学的选择栽培品种对于果农来说至关重要,同时加工品种的选择影响产品深加工的品质;消费者也可以根据自身需求选择喜爱的蓝莓品种。6个品种蓝莓在单果重、糖酸比、花青素和总酚含量方面差异显著,布里吉塔果实较大,但糖酸比较低,园蓝和蓝雨花青素、总酚含量较高。主成分分析综合得分排名前三的品种依次为园蓝、蓝雨、莱格西,结合聚类分析筛选出蓝莓品质核心指标为:糖酸比、黄酮、花青素、硬度、咀嚼性、胶粘性。根据Q型聚类分析可以将品种归为三类,第一聚类包括蓝雨、布里吉塔、密斯梯、绿宝石,属于鲜食加工皆可的品种,但蓝雨果实小且果皮厚,商品性差,但花青素含量高,可以作为提取色素原料利用或加工高花青素产品,更适合加工利用。第二聚类为莱格西,适宜鲜食。第三聚类为园蓝,适宜鲜食;其高糖酸比,高营养功能物质含量,更受消费者喜爱,可以进一步扩大其种植面积。本研究筛选出适宜加工的蓝莓品种,后续可以对蓝莓深加工及其花青素提取利用深入研究。

参考文献

- [1] KALT W, CASSIDY A, HOWARD L R, et al. Recent research on the health benefits of blueberries and their anthocyanins[J]. *Advances in Nutrition*, 2020, 11(2): 224-236.
- [2] FALLAH A A, SARMAST E, JAFARI T. Effect of dietary anthocyanins on biomarkers of glycemic control and glucose metabolism: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109379.
- [3] SÓNIA N, SARA S, MANUELA M, et al. Blueberry anthocyanins in health promotion: A metabolic overview[J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(4): 1518-1528.
- [4] 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. [HAN Pengxiang,

ZHANG Pei, FENG Xuqiao, et al. Nutritional and health functions of blueberry and its development and utilization[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(6): 370-375.]

[5] 刘笑宏, 王建萍, 顾亮, 等. 不同品种蓝莓果实品质及芳香物质成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 234-240. [LIU Xiaohong, WANG Jianping, GU Liang, et al. Analysis of fruit quality and aromatic components of different blueberry varieties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(24): 234-240.]

[6] 温靖, 关小莺, 徐玉娟, 等. 不同蓝莓品种品质特性研究[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(9): 1846-1855. [WEN Jing, GUAN Xiaoying, XU Yujuan, et al. Quality evaluation of different blueberry cultivars[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(9): 1846-1855.]

[7] 周江伟, 孔悦, 孙锐, 等. 山东引种蓝莓品质指标综合评价[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 56-63. [ZHOU Jiangwei, SUN Yue, SUN Rui, et al. Comprehensive evaluation of quality index of introduced blueberry in Shandong Province[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 56-63.]

[8] SATER H, FERRÃO L F V, OLMSTEAD J, et al. Exploring environmental and storage factors affecting sensory, physical and chemical attributes of six southern highbush blueberry cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021: 289.

[9] 严鑫, 吴巨友, 贡鑫, 等. 不同产地圆黄梨果实品质差异分析[J]. *果树学报*, 2021, 38(12): 1-13. [YAN Xin, WU Juyou, GONG Xin, et al. Analysis on the difference of fruit quality of Wonhwang pear from different regions[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(12): 1-13.]

[10] 蔡晓洋, 张思荻, 曾俊, 等. 基于主成分分析和聚类分析的栀子种质资源评价[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2017, 23(14): 30-37. [CAI Xiaoyang, ZHANG Sidi, ZENG Jun, et al. Evaluation of germplasm resources of *Gardeniae fructus* based on principal component and hierarchical cluster analysis[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2017, 23(14): 30-37.]

[11] 刘萌, 张振富, 王美兰, 等. 不同包装方式对蓝莓物流及货架期质构品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(23): 323-327. [LIU Meng, ZHANG Zhenfu, WANG Meilan, et al. Influence of the different packing ways on texture quality of blueberry with logistics and shelf life[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(23): 323-327.]

[12] YUMI F, MIYA K, AIRI I, et al. Anthocyanins in perilla plants and dried leaves[J]. *Phytochemistry*, 2018, 147: 158-166.

[13] ZIA M P, ALIBAS I. Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and *in vitro* bioaccessibility of blueberry fruits[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101179.

[14] WU Y, XU L, LIU X, et al. Effect of thermosonication treatment on blueberry juice quality: Total phenolics, flavonoids, anthocyanin, and antioxidant activity[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 112021.

[15] 邵盈盈. 蓝莓总黄酮的提取纯化及紫心甘薯总黄酮的抗衰老作用评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. [SHAO Yingying. Extraction and purification of the flavonoids from blueberry and the anti-aging effects of the flavonoids from purple sweet potato[D].

Hangzhou: Zhejiang University, 2013.]

[16] JUNJUN L, AIPING Z, DONGMEI L, et al. Comparative study of the free amino acid compositions and contents in three different botanical origins of *Coptis herb*[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2019, 83: 117–120.

[17] KE C, BANGZHU P, FANG Y. Volatile composition of eight blueberry cultivars and their relationship with sensory attributes[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, 35(4): 443–453.

[18] 吴林, 张强, 臧慧明, 等. 气味活度值法评价蓝莓果皮、果肉、果汁挥发性香气成分[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(1): 195–200. [WU Lin, ZHANG Qiang, ZANG Huiming, et al. Evaluation of volatile aroma components in blueberry peel, pulp and juice by odor activity value[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(1): 195–200.]

[19] 刘丙花, 孙锐, 王开芳, 等. 不同蓝莓品种果实品质比较与综合评价[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 70–76. [LIU Binghua, SUN Rui, WANG Kaifang, et al. Comparison and comprehensive evaluation of fruit quality of different blueberry (*Vaccinium* spp.) varieties[J]. *Food Science*, 2019, 40(1): 70–76.]

[20] 纪滨, 许正华, 胡学钢, 等. 基于颜色的食品品质检测技术现状及展望[J]. *食品与机械*, 2013, 29(4): 229–232. [JI Bin, XU Zhenghua, HU Xuegang, et al. Reviewing food quality detection technology based on color[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(4): 229–232.]

[21] VANDITA S, NEJIB G, AHMED A, et al. Instrumental texture profile analysis (TPA) of date fruits as a function of its physico-chemical properties[J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 50: 866–873.

[22] 葛翠莲, 黄春辉, 夏思进, 等. 10 个蓝莓品种主要营养成分与色素含量分析[J]. *中国南方果树*, 2012, 41(4): 33–35. [GE Cuilian, HUANG Chunhui, XIA Sijin, et al. Analysis of main nutritional components and pigments of ten blueberry cultivars[J]. *South China Fruits*, 2012, 41(4): 33–35.]

[23] 严红光, 杨卫, 鲜殊, 等. 中国南方适栽蓝莓品种果实氨基酸组成分析[J]. *食品科技*, 2015, 40(2): 352–356. [YAN Hongguang, YANG Wei, XIAN Shu, et al. Amino acid composition analysis of blueberry cultivars from south China[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(2): 352–356.]

[24] 段静怡, 李自燕, 李建, 等. 基于游离氨基酸的组分及特征比较四种食用菌与四种果蔬的营养与风味特征[J]. *菌物学报*, 2020, 39(6): 1077–1089. [DUAN Jingyi, LI Ziyang, LI Jian, et al. Comparison of nutritional and flavor characteristics between four

edible fungi and four fruits and vegetables based on components and characteristics of free amino acids[J]. *Mycosystema*, 2020, 39(6): 1077–1089.]

[25] 侯娜, 赵莉莉, 魏安智, 等. 不同种质花椒氨基酸组成及营养价值评价[J]. *食品科学*, 2017, 38(18): 113–118. [HOU Na, ZHAO Lili, WEI Anzhi, et al. Amino acid composition and nutritional quality evaluation of different germplasms of Chinese prickly ash (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim)[J]. *Food Science*, 2017, 38(18): 113–118.]

[26] 刘伟, 张群, 李志坚, 等. 不同品种黄花菜游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 243–250. [LIU Wei, ZHANG Qun, LI Zhijian, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating free amino acids of different cultivars of daylily buds[J]. *Food Science*, 2019, 40(10): 243–250.]

[27] 周立华, 牟德华, 李艳. 7 种小浆果香气物质的 GC-MS 检测与主成分分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 184–190. [ZHOU Lihua, MOU Dehua, LI Yan, et al. GC-MS detection combined with principal component analysis to study the aroma compounds of seven small berries[J]. *Food Science*, 2017, 38(2): 184–190.]

[28] 曹雪丹, 李二虎, 方修贵, 等. 蓝莓酒主发酵前后挥发性成分变化的 GC-MS 分析[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(3): 179–184. [CAO Xuedan, LI Erhu, FANG Xiugui, et al. GC-MS analysis of volatiles variation in blueberry wine before and after primary fermentation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(3): 179–184.]

[29] 韩斯, 孟宪军, 汪艳群, 等. 不同品种蓝莓品质特性及聚类分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(6): 140–144. [HAN Si, MENG Xianjun, WANG Yanqun, et al. Quality properties and cluster analysis of different blueberry cultivars[J]. *Food Science*, 2015, 36(6): 140–144.]

[30] 张佳. 北高丛蓝莓内在品质评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [ZHANG Jia. Research on inner quality evaluation of northern highbush blueberry[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020]

[31] 刘丙花, 王开芳, 王小芳, 等. 基于主成分分析的蓝莓果实质地品质评价[J]. *核农学报*, 2019, 33(5): 927–935. [LIU Binghua, WANG Kaifang, WANG Xiaofang et al. Evaluation of fruit texture quality of blueberry based on principal component analysis[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(5): 927–935.]