

文章编号:1000-8551(2019)05-0927-09

基于主成分分析的蓝莓果实质地品质评价

刘丙花^{1,2} 王开芳^{1,2} 王小芳^{1,2} 梁静^{1,2}白瑞亮³ 谢小锋³ 孙蕾^{1,2,*}¹山东省林业科学研究院,山东 济南 250014;²国家林业局经济林产品质量检验检测中心,山东 济南 250014;³山东省经济林管理站,山东 济南 250014)

摘要:为完善蓝莓果实质地品质评价体系,应用物性分析仪整果穿刺和质地多面分析法对22个蓝莓品种的果实质地品质进行测定,分析各质地参数间的相关性,并采用主成分分析法建立蓝莓果实质地品质优劣评价模型,对22个蓝莓品种的果实质地品质进行综合评价。结果表明,代表蓝莓果实质地品质的10个质地参数均存在品种间差异,其中品种间果皮破裂距离、果皮脆性、果皮韧性、果实硬度、粘附性、咀嚼性和回复性差异较大,果皮强度、弹性和内聚性差异较小。蓝莓果皮破裂距离与果皮强度、果皮韧性呈极显著正相关,果皮脆性与果皮韧性、果皮破裂距离呈极显著负相关,果实硬度与果实弹性呈显著负相关,咀嚼性与果实硬度、粘附性、弹性呈显著正相关,回复性与内聚性呈极显著正相关。采用主成分分析法建立了蓝莓果实质地品质综合评价指数模型,筛选出综合评价蓝莓果实质地品质的核心指标:果实硬度、果皮脆性和果实回复性。果实质地品质优良的参评蓝莓品种依次为大粒蓝金、克瑞顿、布莱登、陶柔、夏普蓝、莱格西、奥尼尔、泽西、米德、双迪。本研究结果为高品质蓝莓品种选育和良种采后储运、加工及销售提供了重要参考。

关键词:蓝莓;整果穿刺;质地多面分析;变异系数;主成分分析

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.05.0927

蓝莓(*Vaccinium* spp.)是一种经济价值较高的新兴果品,其色泽宜人、果肉细腻、酸甜适口、富含维生素、微量元素、花青素等营养成分和抗氧化物质,极具营养保健和经济价值,深受广大消费者喜爱,是联合国粮农组织录入的人类五大健康食品之一,被誉为“浆果之王”^[1-3]。但蓝莓果实较软,易受病原菌侵染,导致品质劣变,影响其贮藏、流通和销售。蓝莓果实在生长、发育、成熟、贮藏过程中,经历一系列复杂的生理生化变化,其中质地改变是果实成熟最显著的变化之一^[4-5]。果实的许多感官指标(如硬度、脆性、咀嚼性等)与质地密切相关,直接影响其贮运特性,已成为检测果实品质的重要指标,是评价果品可接受程度的首要因素^[6-8]。因此,研究不同蓝莓品种果实质地特征及各质地参数间的相关性,建立蓝莓果实质地品质优劣评价模型,对丰富蓝莓果实品质评价体系,选育高品

质蓝莓品种及其采后储运、加工和销售具有重要的指导意义。

近年来,物性分析仪被广泛应用于水果质地检测,该方法避免了人为因子干扰,评价结果更加客观、准确。本研究拟应用物性分析仪整果穿刺和质地多面分析(texture profile analysis, TPA)的方法对22个蓝莓品种果实的质地参数进行测定,分析各质地参数间的相关性,并采用主成分分析法建立蓝莓果实质地品质优劣评价模型,对22个蓝莓品种的果实质地品质进行综合评价,旨在为蓝莓果实质地品质评价提供科学准确、可行的技术,进一步完善蓝莓果实质地品质评价体系,为高品质蓝莓品种选育和良种采后储运、加工及销售提供参考。

收稿日期:2017-12-07 接受日期:2018-03-26

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201204402)

作者简介:刘丙花,女,主要从事果树学研究。E-mail: binghualiu@163.com

* 通讯作者:孙蕾,女,研究员,主要从事特色浆果良种选育及产业化技术开发研究。E-mail: sun7776@163.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为山东省引种的 22 个蓝莓品种(表 1),

各品种果实均于 2016 年 6 月采自沃林农业(青岛)有限公司日照市陈疃镇蓝莓生产基地。选择大小一致、果面完全着均匀蓝色,且无病、虫、伤害的果实,分别进行采收分装并置于 4℃ 聚乙烯保鲜盒中带回实验室用于质地品质指标测定。

表 1 试验所用蓝莓品种特性及其来源

Table 1 Characteristics and origins of the blueberry cultivars used in the study

编号 No.	品种 Cultivar	特性及来源 Characteristics and origins
1	奥尼尔 Oneal	1987 年美国北卡罗来纳州选育的早熟品种,由 Wolcott × FL64-15 杂交育成。
2	北陆 Northland	1968 年美国密执安大学农业试验站选育的中早熟品种,由 Berkeley × (Lowbush × Pioneer 实生苗)杂交育成。
3	伯克利 Berkeley	1949 年美国新泽西州杂交选育的中熟品种,由 Stanley × (Jersey × Pioneer)杂交育成。
4	布莱登 Bladen	1994 年美国北卡罗来纳大学选育的早熟品种,由 NC1711 × NCSF-12-L 杂交育成。
5	大粒蓝金 Biggold	1989 年美国新泽西州选育的中晚熟品种,由 Bluegold 自然杂交选育。
6	翰伯特 Herberd	1952 年美国杂交育成的中晚熟品种,由 Stanley × (Jersey × Pioneer)杂交育成。
7	克瑞顿 Croaton	1954 年美国北卡罗来纳州选育的早中熟品种,由 WeymouthF-6 × (Stanley × Crabbl4)杂交育成。
8	莱格西 Legacy	1993 年美国新泽西州发表的中晚熟品种。
9	蓝丰 Bluecrop	1952 年美国新泽西州杂交选育的中熟品种,由 (Jersey × Pioneer) × (Stanley × June)杂交育成。
10	蓝鸟 Bluejay	1978 年美国密歇根州立农业试验场推出的早熟品种,由 Berkeley × Michigan241 杂交育成。
11	蓝线 Bluera y	1955 年美国新泽西州选育的中熟品种,由 GM-37 × CU-5 杂交育成。
12	路宝 Rubel	起源于美国东北部,由野生高灌蓝莓选育而来。
13	米德 Meader	1971 年美国新海波塞尔农业试验站选育的早中熟品种,由 Earliblue × Bluecrop 杂交育成。
14	纳尔逊 Nelson	1988 年美国农业部发布的中晚熟品种。
15	努益 Nui	1985 年新西兰 Moanatuatua 研究农场培育的中熟品种,由 (Ashworth × Earliblue) × Bluecrop 杂交育成。
16	日出 Sunrise	1988 年美国新泽西州选育的早熟品种,由 G180 × ME-US6629 杂交育成。
17	瑞卡 Re ca	1976 年美国缅因州选育的早熟品种,由 Ashworth × Earliblue 杂交育成。
18	塞拉 Sierra	1988 年美国新泽西州农业试验场选育的中熟品种,由 US169 × G-156 杂交育成。
19	双迪 D-II	1990 年美国密歇根州立大学选育的中晚熟品种,由 Darrow × Duke 杂交育成。
20	陶柔 Toro	1987 年美国新泽西州立农业试验场选育的早熟品种,由 Earliblue × Ivanhoe 杂交育成。
21	夏普蓝 Sharpblue	1976 年美国佛罗里达大学选育的早中熟品种,由 Florida61-5 × Florida62-4 杂交育成。
22	泽西 Jersey	1928 年美国最早选育的中熟品种,由 Rube × Grover 杂交育成。

1.2 试验方法

1.2.1 整果穿刺试验 参考 Costa 等^[9]的方法。取完整的蓝莓果实采用 TA-XT Plus 物性分析仪(英国 Stable Micro Systems 公司)P/5 探头(直径 5 mm)在果实的赤道部位取点进行整果穿刺试验,得到果皮强度、果皮脆性、果皮韧性和果皮破裂距离等质地参数。测试参数:测前速度 5 mm·s⁻¹,下压速度 1 mm·s⁻¹、测后速度 5 mm·s⁻¹、穿刺深度 10 mm。

1.2.2 TPA 试验 参考 Hu 等^[10]的方法。取完整的蓝莓果实采用物性分析仪 P/75 探头(直径 75 mm)在果实的赤道部位进行 TPA 试验,由质地特征曲线得到蓝莓果实硬度、粘附性、弹性、内聚性、咀嚼性和回复性

等质地参数。测试参数:测前速度 5 mm·s⁻¹。测试速度 2 mm·s⁻¹。测后上行速度 2 mm·s⁻¹,果实受压变形为 25%,2 次压缩停顿时间为 5 s,触发力为 5.0 g。

1.3 数据处理

试验数据以平均值±标准方差表示。每个品种重复测定 30 个果实,取平均值。采用 IBM.SPSS Statistics 20.0 对主要质地品质指标进行相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同蓝莓品种整果穿刺试验质地参数及其相关性 由表 2 可知,蓝莓果皮强度为 131.31 ~ 225.96 g,

变异系数为 8.28%, 果皮强度最大和最小的品种分别为大粒蓝金(225.96 g)和路宝(131.31 g)。蓝莓果皮破裂距离为 2.34 ~ 4.39 mm, 变异系数为 11.97%, 果皮破裂距离超过 3.00 mm 的品种有 16 个, 其中蓝鸟和塞拉的果皮破裂距离较大, 分别为 4.39 和 4.36 mm; 奥尼尔的果皮破裂距离最小, 仅为 2.34 mm。蓝莓果皮脆性为 31.89 ~ 62.39 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$, 变异系数为 15.25%, 果皮脆性大于 50.00 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ 的品种有 11 个, 其中米德、克瑞顿和布莱登的果皮破裂距离较大分别为 62.39、61.54、61.39 和 60.92 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$; 蓝鸟和塞拉的果皮脆性较小, 分别为 31.89

和 32.65 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ 。蓝莓果皮韧性为 248.41 ~ 484.41 $\text{g}\cdot\text{s}$, 变异系数为 12.05%, 果皮韧性大于 300.00 $\text{g}\cdot\text{s}$ 的品种有 13 个, 其中大粒蓝金的果皮韧性最大(484.41 $\text{g}\cdot\text{s}$), 其次是陶柔(412.22 $\text{g}\cdot\text{s}$); 蓝线和克瑞顿的果皮韧性较小, 分别为 248.41 和 249.04 $\text{g}\cdot\text{s}$ 。

Pearson 相关系数分析结果表明, 果皮破裂距离与果皮强度、果皮韧性均呈极显著正相关($P < 0.01$), 与果皮脆性呈显著负相关($P < 0.05$); 果皮脆性与果皮韧性呈极显著负相关($P < 0.01$); 果皮强度与果皮脆性、果皮韧性均无显著相关性($P > 0.05$)(表 3)。

表 2 不同蓝莓品种果实整果穿刺试验质地参数

Table 2 Textural parameters of different blueberry cultivars in puncture test

编号 No.	品种 Cultivars	果皮强度 Peel strength/g	果皮破裂距离 Peel rupture distance/mm	果皮脆性 Peel brittleness/($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	果皮韧性 Peel toughness/($\text{g}\cdot\text{s}$)
1	奥尼尔 Oneal	151.70 ± 8.01	2.34 ± 0.31	55.79 ± 4.08	270.51 ± 14.74
2	北陆 Northland	153.57 ± 8.80	3.74 ± 0.52	39.82 ± 5.37	327.38 ± 19.70
3	伯克利 Berkeley	156.65 ± 10.57	3.37 ± 0.31	45.46 ± 4.18	321.31 ± 25.40
4	布莱登 Bladen	177.10 ± 11.86	2.94 ± 0.36	60.92 ± 7.58	300.48 ± 18.57
5	大粒蓝金 Biggold	225.96 ± 12.59	3.61 ± 0.85	61.54 ± 12.68	484.41 ± 26.06
6	翰伯特 Herberd	151.80 ± 13.37	3.95 ± 0.59	37.34 ± 5.94	330.23 ± 17.15
7	克瑞顿 Croaton	160.23 ± 6.97	2.53 ± 0.49	61.39 ± 8.34	249.04 ± 15.98
8	莱格西 Legacy	175.51 ± 13.93	3.01 ± 0.69	58.05 ± 9.86	329.12 ± 16.04
9	蓝丰 Bluecrop	157.16 ± 15.45	3.39 ± 0.47	45.16 ± 5.23	313.88 ± 14.37
10	蓝鸟 Bluejay	144.99 ± 14.06	4.39 ± 0.34	31.89 ± 4.01	327.20 ± 19.22
11	蓝线 Blueray	140.84 ± 13.66	2.90 ± 0.79	47.22 ± 5.68	248.41 ± 10.99
12	路宝 Rubel	131.31 ± 5.07	3.23 ± 0.28	39.07 ± 8.44	257.58 ± 18.36
13	米德 Meader	172.50 ± 8.27	2.69 ± 0.31	62.39 ± 7.48	289.02 ± 17.33
14	纳尔逊 Nelson	152.50 ± 6.32	2.84 ± 0.46	51.96 ± 7.68	258.24 ± 15.87
15	努益 Nui	157.13 ± 8.93	3.33 ± 0.15	45.70 ± 11.35	317.82 ± 16.69
16	日出 Sunrise	154.22 ± 13.93	3.13 ± 0.44	47.59 ± 6.38	290.85 ± 12.38
17	瑞卡 Recca	178.18 ± 12.58	3.39 ± 0.41	51.46 ± 8.29	341.60 ± 16.27
18	塞拉 Sierra	147.33 ± 13.06	4.36 ± 0.35	32.65 ± 3.75	368.79 ± 14.59
19	双迪 D-II	164.86 ± 8.57	3.51 ± 0.55	45.76 ± 5.10	334.76 ± 14.66
20	陶柔 Toro	182.20 ± 13.48	3.42 ± 0.91	53.90 ± 3.34	412.22 ± 18.09
21	夏普蓝 Sharpblue	164.89 ± 14.62	3.12 ± 0.25	51.20 ± 5.71	282.64 ± 13.25
22	泽西 Jersey	165.15 ± 11.07	3.08 ± 0.59	53.77 ± 12.82	296.73 ± 12.01
变异系数 Variation coefficients/%		8.28	11.97	15.25	12.05

表 3 不同蓝莓品种果实整果穿刺试验质地参数相关性

Table 3 Correlation among textural parameters of the puncture test on different blueberry cultivars

质地参数 Textural parameters	果皮强度 Peel strength	果皮破裂距离 Peel rupture distance	果皮脆性 Peel brittleness	果皮韧性 Peel toughness
果皮强度 Peel strength	1			
果皮破裂距离 Peel rupture distance	0.866 2**	1		
果皮脆性 Peel brittleness	0.335 7	-0.746 6*	1	
果皮韧性 Peel toughness	0.274 0	0.942 8**	-0.897 0**	1

注: * 表示差异显著($P < 0.05$); ** 表示差异极显著($P < 0.01$)。下同。

Note: * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as following.

2.2 不同蓝莓品种 TPA 试验质地参数及其相关性

硬度反映蓝莓果实在外力作用下发生形变所需要的屈服力大小。由表 4 可知,蓝莓果实硬度范围为 265.50 ~ 576.87 N,变异系数为 19.23%,其中克瑞顿、大粒蓝金和布莱登蓝莓的果实硬度大于 500.00 N,分别为 576.87、526.49、513.74 N;蓝鸟、路宝、塞拉和北陆蓝莓的果实硬度小于 300.00 N,分别为 265.50、267.98、283.55、296.40 N。粘附性是评价咀嚼果肉时口腔克服果肉表面吸引力所需的能量。蓝莓果实的粘附性为 0.10 ~ 0.61 N·s,变异系数为

32.68%,粘附性大于 0.50 N·s 的品种有 6 个,其中布莱登和克瑞顿蓝莓的最高,均为 0.61 N·s;粘附性小于 0.20 N·s 的品种有 3 个,分别为北陆(0.10 N·s)、瑞卡(0.14 N·s)和纳尔逊(0.18 N·s)。弹性反映蓝莓果实经第 1 次压缩变形后,去除变形力后所能恢复的程度。本研究中蓝莓果实弹性为 0.62 ~ 0.77,变异系数为 5.45%,果实弹性大于 0.70 的品种有 6 个,分别为夏普蓝(0.77)、北陆(0.74)、奥尼尔(0.73)、翰伯特(0.73)、蓝鸟(0.73)和泽西(0.71);布莱登、米德和努益蓝莓的果实弹性最小,均为 0.62。

表 4 不同蓝莓品种果实 TPA 试验质地参数

Table 4 Textural parameters of different blueberry cultivars in TPA test

编号 No.	品种 Cultivars	硬度 Hardness/N	粘附性 Adhesiveness/(N·s)	弹性 Springiness	内聚性 Cohesiveness	咀嚼性 Chewiness/N	回复性 Resilience
1	奥尼尔 Oneal	313.53 ± 12.96	0.29 ± 0.06	0.73 ± 0.11	0.51 ± 0.08	116.76 ± 9.25	0.22 ± 0.05
2	北陆 Northland	296.40 ± 16.41	0.10 ± 0.04	0.74 ± 0.04	0.47 ± 0.03	103.63 ± 11.78	0.20 ± 0.01
3	伯克利 Berkeley	385.03 ± 19.64	0.28 ± 0.07	0.64 ± 0.02	0.41 ± 0.02	101.00 ± 13.46	0.18 ± 0.01
4	布莱登 Bladen	513.74 ± 16.90	0.61 ± 0.02	0.62 ± 0.04	0.40 ± 0.06	127.40 ± 7.05	0.22 ± 0.04
5	大粒蓝金 Biggold	526.49 ± 30.04	0.39 ± 0.02	0.65 ± 0.08	0.41 ± 0.07	140.30 ± 7.41	0.26 ± 0.03
6	翰伯特 Herberd	305.28 ± 17.16	0.52 ± 0.02	0.73 ± 0.02	0.50 ± 0.03	111.40 ± 7.94	0.08 ± 0.01
7	克瑞顿 Croaton	576.87 ± 35.07	0.61 ± 0.03	0.65 ± 0.04	0.35 ± 0.02	131.20 ± 13.45	0.25 ± 0.01
8	莱格西 Legacy	463.92 ± 28.01	0.51 ± 0.02	0.69 ± 0.03	0.43 ± 0.02	137.60 ± 9.79	0.18 ± 0.01
9	蓝丰 Bluecrop	335.53 ± 10.53	0.24 ± 0.02	0.65 ± 0.05	0.42 ± 0.05	91.60 ± 16.01	0.18 ± 0.02
10	蓝鸟 Bluejay	265.50 ± 15.45	0.30 ± 0.01	0.73 ± 0.03	0.53 ± 0.03	102.70 ± 14.76	0.24 ± 0.02
11	蓝线 Blueray	399.94 ± 30.99	0.34 ± 0.03	0.64 ± 0.04	0.40 ± 0.04	102.40 ± 14.54	0.18 ± 0.01
12	路宝 Rubel	267.98 ± 15.19	0.21 ± 0.02	0.68 ± 0.05	0.43 ± 0.05	78.36 ± 5.86	0.21 ± 0.02
13	米德 Meader	491.10 ± 38.28	0.30 ± 0.01	0.62 ± 0.04	0.35 ± 0.03	106.60 ± 7.98	0.17 ± 0.02
14	纳尔逊 Nelson	472.61 ± 33.99	0.18 ± 0.05	0.65 ± 0.06	0.39 ± 0.04	119.80 ± 10.66	0.18 ± 0.01
15	努益 Nui	468.15 ± 23.19	0.36 ± 0.01	0.62 ± 0.05	0.38 ± 0.06	110.30 ± 13.12	0.17 ± 0.02
16	日出 Sunrise	388.74 ± 12.63	0.37 ± 0.02	0.65 ± 0.03	0.38 ± 0.03	96.02 ± 10.71	0.16 ± 0.01
17	瑞卡 Reca	410.96 ± 23.62	0.14 ± 0.01	0.66 ± 0.04	0.39 ± 0.03	105.80 ± 7.86	0.17 ± 0.01
18	塞拉 Sierra	283.55 ± 10.13	0.44 ± 0.03	0.68 ± 0.05	0.48 ± 0.03	92.55 ± 11.96	0.22 ± 0.01
19	双迪 D-II	389.71 ± 38.75	0.47 ± 0.02	0.69 ± 0.03	0.42 ± 0.03	112.90 ± 12.54	0.18 ± 0.01
20	陶柔 Toro	484.75 ± 24.56	0.52 ± 0.01	0.64 ± 0.14	0.47 ± 0.01	145.80 ± 11.04	0.17 ± 0.03
21	夏普蓝 Sharpblue	421.66 ± 25.00	0.43 ± 0.02	0.77 ± 0.05	0.46 ± 0.04	149.40 ± 13.23	0.21 ± 0.02
22	泽西 Jersey	311.94 ± 11.21	0.53 ± 0.02	0.71 ± 0.04	0.47 ± 0.06	104.10 ± 8.10	0.21 ± 0.03
变异系数 Variation coefficients/%		19.23	32.68	5.45	9.62	13.16	14.75

内聚性指咀嚼蓝莓果肉时,果肉抵抗牙齿咀嚼破坏而表现出的内部结合力,反映了细胞间结合力的大小和果实保持完整性的能力。本研究中蓝莓果实内聚力为 0.35 ~ 0.53,变异系数为 9.62%,内聚力超过 0.40 的品种有 16 个,其中大于 0.50 的品种有蓝鸟(0.53)和奥尼尔(0.51);克瑞顿和米德的内聚性最

小,均为 0.35。咀嚼性反映牙齿将蓝莓果实咀嚼成吞咽状态时所需要的能量,是硬度、凝聚性和弹性三者的乘积,综合反映了果实对咀嚼的持续抵抗性。蓝莓果实咀嚼性为 78.36 ~ 149.40 N,变异系数为 13.16%,咀嚼性大于 140.00 N 的品种有 3 个,分别为夏普蓝(149.40 N)、陶柔(145.80 N)和大粒蓝金(140.30

N);咀嚼性小于 100.00 N 的品种有 4 个,分别为路宝(78.36 N)、蓝丰(91.60 N)、塞拉(92.55 N)和日出(96.02 N)。回复性反映了果实受压同时迅速恢复变形的能力。蓝莓果实回复性为 0.08 ~ 0.26,变异系数为 14.75%,其中回复性大于 0.20 的品种有 10 个,大粒蓝金的回复性最大(0.26),其次是克瑞顿(0.25),

翰伯特蓝莓的回复性最小(0.08)(表 4)。

Pearson 相关系数分析表明(表 5),蓝莓果实硬度与果实弹性呈显著负相关($P < 0.05$),与咀嚼性呈极显著正相关($P < 0.01$);咀嚼性与粘附性、弹性均呈显著正相关($P < 0.05$);回复性与内聚性呈极显著正相关($P < 0.01$)。

表 5 不同蓝莓品种果实 TPA 质地参数相关性

Table 5 Correlation among textural parameters of the TPA test on different blueberry cultivars

质地参数 Textural parameters	硬度 Hardness	粘附性 Adhesiveness	弹性 Springiness	内聚性 Cohesiveness	咀嚼性 Chewiness	回复性 Resilience
硬度 Hardness	1					
粘附性 Adhesiveness	0.695 6	1				
弹性 Springiness	-0.726 8*	0.244 5	1			
内聚性 Cohesiveness	0.547 0	0.488 0	0.315 9	1		
咀嚼性 Chewiness	0.945 6**	0.749 2*	0.877 6*	0.627 5	1	
回复性 Resilience	0.253 6	0.310 2	0.544 5	0.985 6**	0.568 7	1

2.3 主成分分析

由表 6 可知,将 22 个蓝莓品种的 10 个质地参数转化为 10 个主成分,根据各主成分的特征值和贡献率进行主成分提取,前 4 个主成分的累计方差贡献率达 87.638%,能够代表所有指标的绝大部分信息,综合反映蓝莓的果实质地品质特性,可以作为蓝莓选优、评价

的综合指标。第 1 主成分的特征值为 4.114,方差贡献率为 41.142%,代表了全部信息的 41.142%,是最主要的主成分;第 2 主成分的特征值为 2.269,方差贡献率为 22.629%,是仅次于第 1 主成分的主成分;第 3 主成分的特征值为 1.394,方差贡献率为 13.943%;第 4 主成分的特征值是 0.986,方差贡献率为 9.861%。

表 6 主成分的特征值、方差贡献率和累计方差贡献率

Table 6 Eigenvalue, variance contribution rate and cumulative variance contribution rate of principal components

主成分 Principal components	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%
1	4.114	41.142	41.142
2	2.269	22.692	63.834
3	1.394	13.943	77.777
4	0.986	9.861	87.638
5	0.694	6.941	94.580
6	0.315	3.151	97.731
7	0.178	1.779	99.510
8	0.036	0.362	99.872
9	0.009	0.090	99.962
10	0.004	0.038	100.000

为了更好地解释各质地参数与成分因子之间的关系,将所提取的主成分因子进行旋转处理,使一个变量在较少的几个因子上有较高的载荷,其载荷值的大小反映各变量在主成分中的重要程度(表 7)。第 1 主成分主要综合了果实硬度和果皮脆性的信息,作为第 1 主成分的代表指标。第 2 主成分中,果皮韧性的正系

数最大,作为第 2 主成分的代表指标。第 3 主成分中,果实弹性的正系数最大,作为第 3 主成分的代表指标。第 4 主成分中,回复性的正系数最大,作为第 4 主成分的代表指标。

综合分析 4 个主成分主要代表指标的相关性及其变异系数:果皮脆性与果皮韧性成极显著的负相关(P

< 0.01), 果实硬度与果实弹性呈显著负相关 ($P < 0.05$); 果皮脆性的变异系数大于果皮韧性, 果实硬度的变异系数大于果实弹性(表 2~表 5)。因此, 将果实

硬度、果皮脆性和果实回复性作为不同蓝莓品种果实质地品质评价的核心指标。

表 7 主要质地参数相关矩阵的规格化特征向量

Table 7 Eigenvectors of correlation matrix of main textural parameters in blueberry

性状 Characters	主成分 Principal components			
	1	2	3	4
硬度 Hardness	0.956	-0.042	-0.075	-0.072
果皮脆性 Peel brittleness	0.927	-0.082	0.209	0.082
果皮强度 Peel strength	0.721	0.573	-0.228	0.108
咀嚼性 Chewiness	0.683	0.493	0.378	-0.149
内聚性 Cohesiveness	-0.654	0.576	0.379	-0.035
果皮破裂距离 Peel rupture distance	-0.599	0.596	-0.434	-0.059
粘附性 Adhesiveness	0.424	0.324	0.341	-0.494
果皮韧性 Peel toughness	0.160	0.836	-0.493	0.045
弹性 Springiness	-0.563	0.389	0.624	0.029
回复性 Resilience	0.214	0.219	0.264	0.830

表 8 不同蓝莓品种的主成分值与综合评价指数值

Table 8 Values of principal components and synthetic analysis indexes in different blueberry cultivars

编号 No.	品种 Cultivars	主成分值 Y Value of principal components				综合评价指数 S Synthetic analysis indexes
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	
1	奥尼尔 Oneal	-0.326	-0.271	2.165	0.969	0.202
2	北陆 Northland	-1.278	0.358	-0.028	1.080	-0.342
3	伯克利 Berkeley	-0.210	-0.470	-0.938	0.053	-0.319
4	布莱登 Bladen	1.400	-0.043	0.332	-0.214	0.591
5	大粒蓝金 Biggold	1.727	2.376	-1.288	1.686	1.236
6	翰伯特 Herberd	-1.255	0.771	0.068	-3.174	-0.645
7	克瑞顿 Croaton	1.633	-0.847	1.267	0.340	0.690
8	莱格西 Legacy	0.841	0.529	0.760	-0.780	0.495
9	蓝丰 Bluecrop	-0.524	-0.551	-0.928	0.296	-0.441
10	蓝鸟 Bluejay	-1.783	1.157	0.286	1.075	-0.325
11	蓝线 Blueray	-0.110	-1.391	0.036	-0.248	-0.380
12	路宝 Rubel	-1.299	-1.251	-0.040	1.008	-0.724
13	米德 Meader	1.087	-1.231	-0.706	-0.042	0.065
14	纳尔逊 Nelson	0.363	-1.199	-0.022	0.237	-0.102
15	努益 Nui	0.300	-0.594	-1.089	-0.569	-0.219
16	日出 Sunrise	-0.072	-0.971	-0.626	-0.625	-0.399
17	瑞卡 Reca	0.137	-0.197	-1.297	0.469	-0.123
18	塞拉 Sierra	-1.365	0.965	-0.777	0.280	-0.423
19	双迪 D-II	-0.097	0.366	-0.122	-0.223	0.004
20	陶柔 Toro	0.894	1.480	-0.370	-1.178	0.536
21	夏普蓝 Sharpblue	0.151	0.768	2.165	-0.063	0.532
22	泽西 Jersey	-0.215	0.244	1.151	0.043	0.132

上述 4 个主成分能综合反映 22 个蓝莓品种果实的质地品质。将主要品质指标原始数据标准化后, 计算 4 个主成分的得分, 以所选主成分对应的特征值占 4 个特征值总和的比例为权重, 计算出不同蓝莓品种

的综合评价得分值 (Y), 各得分值与相应特征值的方差贡献百分率的乘积累加得出不同蓝莓品种的综合评价指数 ($S = Y_1 \times 0.41142 + Y_2 \times 0.22629 + Y_3 \times 0.13943 + Y_4 \times 0.09861$), 以此来评价不同蓝莓品种的果实

质地性状优劣。由表 8 可知,22 个蓝莓品种质地综合品质排名前 10 位的依次为大粒蓝金、克瑞顿、布莱登、陶柔、夏普蓝、莱格西、奥尼尔、泽西、米德、双迪。

3 讨论

整果穿刺法能够根据果实自身特点选取测试探头和编辑运行程序,反映整个果实的流变学特征,该法能同时准确获得果皮强度、韧性、脆性等多项指标,避免了人为干扰,克服了传统检测方法的缺点,更能客观准确的反映果实的质地品质特征^[11-13]。本研究中整果穿刺试验结果表明,不同蓝莓品种间果皮质地差异较大,其中果皮破裂距离、果皮脆性和果皮韧性的变异系数均大于 10.00%,品种间差异较大;果皮强度变异系数为 8.28%,品种间差异较小。

物性分析仪 TPA 法是通过模拟人的口腔咀嚼运动,利用力学方法判断样品质地状况和组织结构,能够全面反映样品硬度、弹性、咀嚼性等质地特性,是评价样品贮藏和运输品质的有效方法^[5,14-15]。TPA 测试已在国外食品领域得到广泛应用^[14,16-17],但在我国起步较晚。近年来,TPA 法在水果^[11,18-22]、蔬菜^[23]上的应用不断增多,但在蓝莓上的研究报道较少。本研究采用 TPA 法测定不同蓝莓品种果实质地品质,发现不同蓝莓品种 TPA 质地参数差别较大,其中硬度、粘附性、咀嚼性和回复性的变异系数均大于 10.00%,品种间差异较大;弹性和内聚性的变异系数均小于 10.00%,品种间差异较小。

研究表明,果实质地参数间具有较高的相关性^[14-16,22,24]。本研究中,蓝莓果实硬度与果实弹性呈显著负相关,与咀嚼性呈极显著正相关性,这与在克瑞森无核葡萄^[18]、京白梨^[24]和苹果^[21,25-26]上的研究结果一致,说明硬度、弹性和咀嚼性与果肉的适口感关系极为密切,可以作为评价蓝莓质地的重要参数。蓝莓果实回复性与内聚性呈极显著的正相关性,咀嚼性与粘附性、弹性均呈显著的正相关性,与苹果^[9,21,27]、杨梅^[22]和冬枣^[11]上的研究结果一致,说明粘附性、内聚性、弹性、回复性、咀嚼性可以反映不同蓝莓品种的质地品质差异。

主成分分析是将多个评价指标简化为少量综合评价指标的一种统计分析方法,剔除不重要部分,保留重要信息,用少数变量尽可能多地反映原来变量的信息,保证原信息损失小且变量数目尽可能少^[28-29]。目前,主成分分析已成为果蔬、食品品质综合评价的主要方法之一^[30-34],是选育专用型果蔬品种及合理加工利用

的重要理论支持。本研究利用主成分分析法从 22 个蓝莓品种的 10 个果实质地品质指标中提取了 4 个主成分,可反映所有质地品质指标的 87.638% 信息,综合分析 4 个主成分的主要特征指标的相关性及其变异系数,最终将果实硬度、果皮脆性和果实回复性作为不同蓝莓品种果实质地品质评价的核心指标。将主要质地指标数据标准化后,计算 4 个主成分的得分,以所选主成分对应的特征值占 4 个特征值总和的比例为权重,计算出不同蓝莓品种的综合评价得分值,各得分值与相应特征值的方差贡献百分率的乘积累加得出不同蓝莓品种的综合评价指数,以此来评价不同蓝莓品种果实质地品质的优劣。依据综合评价指数明确了果实质地品质优良的蓝莓品种依次为大粒蓝金、克瑞顿、布莱登、陶柔、夏普蓝、莱格西、奥尼尔、泽西、米德、双迪。

4 结论

不同蓝莓品种的果实质地品质参数存在品种间差异,整果穿刺和 TPA 法能够很好的反映不同蓝莓品种的果实质地差异,客观评价蓝莓果实品质。本研究创新性采用主成分分析和相关性分析相结合的方法对 22 个蓝莓品种的 10 个质地参数进行了综合评价,筛选出综合评价蓝莓质地品质的 3 个核心参数(果实硬度、果皮脆性和果实回复性),提高了蓝莓质地品质评价的准确性和方便性,进一步丰富了蓝莓果实质地品质评价体系。本研究仅对蓝莓果实质地品质进行了评价,但蓝莓果实质地参数与感官评价还存在一定的差异,因此,研究果实质地指标与感官分析之间的相关性,建立科学的蓝莓果实质量等级分类标准是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] Figueira M E, Oliveira M, Direito R, Rocha J, Alves P, Serra A T, Duarte C, Bronze R, Fernandes A, Brites D, Freitas M, Fernandes E, Sepodes B. Protective effects of a blueberry extract in acute inflammation and collagen-induced arthritis in the rat [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2016, 83: 1191-1202
- [2] Song F Y, Su H Y, Yang N, Zhu L Y, Cheng J S, Wang L, Cheng X H. Myo-Inositol content determined by myo-inositol biosynthesis and oxidation in blueberry fruit [J]. *Food Chemistry*, 2016, 210: 381-387
- [3] Wang H L, Guo X B, Hu X D, Li T, Fu X, Liu R H. Comparison of phytochemical profiles, antioxidant and cellular antioxidant activities in different varieties of blueberry (*Vaccinium* Spp.) [J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 773-781
- [4] Chen H J, Cao S F, Fang X J, Mu H L, Yang H L, Wang X, Xu

- Q Q, Gao H Y. Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 188(4): 44-48
- [5] Giongo L, Poncetta P, Loretto P, Fabrizio C. Texture profiling of blueberries (*Vaccinium* spp.) during fruit development, ripening and storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 76(1): 34-39
- [6] Szczesniak A S. Texture is a sensory property [J]. *Food Quality and Preference*, 2002, 13(4): 215-225
- [7] Chaib J, Devaux M F, Grotte M G, Robini K, Causse M, Lahaye M, Marty I. Physiological relationships among physical, sensory, and morphological attributes of texture in tomato fruit [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(8): 1915-1925
- [8] Infante R, Meneses C, Crisosto C H. Preconditioning treatment maintains taste characteristic perception of ripe 'September Sun' peach following cold storage [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2009, 44(5): 1011-1016
- [9] Costa F, Cappellin L, Longhi S, Guerra W, Magnago P, Porro D, Soukoulis C, Salvi S, Velasco R, Biasioli F, Gasperi F. Assessment of apple (*Malus domestica* Borkh.) fruit texture by a combined acoustic-mechanical profiling strategy [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 61(1): 21-28
- [10] Hu M H, Dong Q L, Liu B Li, Opara U L. Prediction of mechanical properties of blueberry using hyperspectral interactance imaging [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 115: 122-131
- [11] 马庆华, 王贵禧, 梁丽松. 质构仪穿刺试验检测冬枣质地品质方法的建立[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(6): 1210-1217
- [12] 冯慧敏, 郭玉明, 武新慧. 基于穿刺试验苹果力学性质的研究[J]. *农机化研究*, 2016(1): 188-191
- [13] Camps C, Guilermin P, Mauget J C, Bertrand D. Data analysis of penetrometric force/displacement curves for the characterization of whole apple fruits [J]. *Journal of Texture Studies*, 2005, 36(4): 387-401
- [14] Singh V, Guizani N, Al-Alawi A, Claereboudt M, Rahman M S. Instrumental texture profile analysis (TPA) of date fruits as a function of its physico-chemical properties [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 50(10): 866-873
- [15] Li C Y, Luo J W, MacLean D. A novel instrument to delineate varietal and harvest effects on blueberry fruit texture during storage [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 1653-1658
- [16] Bianchi T, Guerrero L, Gratacós-Cubarsí M, Claret A, Argvris J, Garcia-Mas I, Hortós M. Textural properties of different melon (*Cucumis melo* L.) fruit types: sensory and physical-chemical evaluation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 201(30): 46-56
- [17] Chen L, Opara U L. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods-A review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(3): 497-507
- [18] 高丕生, 张平, 朱志强. TPA 测试法分析不同保鲜剂对 '克瑞森' 无核葡萄质地的影响 [J]. *果树学报*, 2013, 30(1): 153-158
- [19] 贾艳茹, 魏建梅, 高海生. 质构仪在果实品质测定方面的研究与应用 [J]. *食品科学*, 2011(S1): 184-186
- [20] 宋肖琴, 张波, 徐昌杰, 张九凯, 李鲜, 陈昆松. 采后枇杷果实的质构变化研究 [J]. *果树学报*, 2010, 27(3): 379-384
- [21] 杨玲, 肖龙, 王强, 张彩霞, 丛佩华, 田义. 质地多面分析 (TPA) 法测定苹果果肉质地特性 [J]. *果树学报*, 2014, 31(5): 977-985
- [22] 徐志斌, 励建荣, 陈青. 杨梅果实采摘后品质变化规律的 TPA 表征 [J]. *食品研究与开发*, 2009, 30(2): 114-117
- [23] 郭雨萱, 郝利平, 卢银洁, 李志刚. 不同贮藏温度对茄子冷害发生及质构特性的影响 [J]. *核农学报*, 2016, 30(9): 1763-1769
- [24] 高海生, 贾艳茹, 魏建梅, 冉辛拓, 乐文全. 用物性分析仪检测鸭梨和京白梨果实采后质地的变化 [J]. *园艺学报*, 2012, 39(7): 1359-1364
- [25] Costa F, Cappellin L, Fontanari M, Longhi S, Guerra W, Magnago P, Gasperi F, Biasioli F. Texture dynamics during postharvest cold storage ripening in apple (*Malus domestica* Borkh.) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 69: 54-63
- [26] 邵兴锋, 屠康. 采后热空气处理对嘎拉苹果质地的影响及其作用机理 [J]. *果树学报*, 2009, 26(1): 13-18
- [27] 潘秀娟, 屠康. 质构仪质地多面分析 (TPA) 方法对苹果采后质地变化的检测 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(3): 166-170
- [28] Keenan D F, Valverde J, Gormley R, Butler F, Brunton N P. Selecting apple cultivars for use in ready-to-eat desserts based on multivariate analyses of physico-chemical properties [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 48(2): 308-315
- [29] 公丽艳, 孟宪军, 刘乃侨, 毕金峰. 基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 276-285
- [30] 聂继云, 李志霞, 李海飞, 李静, 王昆, 毋永龙, 徐国锋, 闫震, 吴锡, 覃兴. 苹果理化品质评价指标研究 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(14): 2895-2903
- [31] 褚能明, 柯剑鸿, 袁亮. 不同鲜食甜糯玉米挥发性风味物质主成分分析 [J]. *核农学报*, 2017, 31(11): 2175-2185
- [32] Hossain M B, Patras A, Barry-Ryana C, Martin-Diana A B, Brunton N P. Application of principal component and hierarchical cluster analysis to classify different spices based on *in vitro* antioxidant activity and individual polyphenolic antioxidant compounds [J]. *Journal of Functional Foods*, 2011, 3(3): 179-189
- [33] 田茂成, 邓小华, 陆中山, 田峰, 陈治锋, 张明发, 张黎明. 基于灰色效果测度和主成分分析的湘西州烟叶物理特性综合评价 [J]. *核农学报*, 2017, 31(1): 187-193
- [34] Patras A, Brunton N P, Downey G, Rawson A, Warriner K, Gernigon G. Application of principal component and hierarchical cluster analysis to classify fruits and vegetables commonly consumed in Ireland based on *in vitro* antioxidant activity [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(2): 250-256

Evaluation of Fruit Texture Quality of Blueberry Based on Principal Component Analysis

LIU Binghua^{1,2} WANG Kaifang^{1,2} WANG Xiaofang^{1,2} LIANG Jing^{1,2}

BAI Ruiliang³ XIE Xiaofeng³ SUN Lei^{1,2,*}

(¹Shandong Academy of Forestry, Jinan, Shandong 250014;

²Economic Forest Products Quality Inspection Test Center of State Forestry Administration, Jinan, Shandong 250014;

³Shandong Economic Forest Management Station, Jinan, Shandong 250014)

Abstract: To improve fruit texture quality evaluation system of blueberry, fruit texture quality of 22 blueberry varieties were analyzed with whole fruit puncture test and texture profile analysis using texture analyzer. Correlations between the texture parameters were analyzed, and comprehensive evaluation of 22 blueberry cultivars was carried out using principal component analysis (PCA). The results showed that the 10 quality indicators were greatly different among different blueberry varieties. Peel rupture distance, peel brittleness, peel toughness, hardness, adhesiveness, chewiness, and resilience had high difference between varieties. Meanwhile, peel strength, springiness, and cohesiveness had little difference between varieties. Correlation analysis showed that peel rupture distance was significantly positively correlated with peel strength and peel toughness. Peel brittleness had significant negative correlation with peel toughness and peel rupture distance. Hardness had significant negative correlation with springiness. Chewiness was significantly positively correlated with hardness, adhesiveness, and springiness. Resilience had significant positive correlation with cohesiveness. Fruit hardness, peel brittleness and resilience were screened out using PCA as the core indicators for comprehensive fruit texture quality evaluation of different blueberry varieties. According to the comprehensive evaluation index, comprehensive texture quality of Biggold, Croaton, Bladen, Toro, Sharpblue, Legacy, Oneal, Jersey, Meader, and D-II were much better than other varieties. These results would provide an important reference for the selection and breeding of high quality blueberry varieties and their storage, processing and sales.

Keywords: blueberry, whole fruit puncture, texture profile analysis, variation coefficient, principal component analysis