

# 基于主成分分析的重庆地区杨梅果实品质综合评价

李雪<sup>1</sup>, 杨丽<sup>1</sup>, 王进<sup>1</sup>, 陈元平<sup>1</sup>, 刘世明<sup>1</sup>, 樊清<sup>2</sup>, 方进强<sup>2</sup>, 武峥<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>重庆市农业科学院果树研究所, 重庆 401329; <sup>2</sup>重庆市南川区农村发展服务中心, 重庆 408400)

**摘要:**【目的】对重庆地区不同品种杨梅果实品质进行综合评价, 构建适宜本地区的杨梅果实品质综合评价体系, 以期筛选优异种质。【方法】以29份杨梅资源果实为材料, 对33个果实品质指标进行测定, 利用差异分析、相关性分析、聚类分析和主成分分析对杨梅果实品质进行综合评价并排名。【结果】不同杨梅资源间33个品质性状存在显著差异, 并表现出强弱不一的相关性; 通过主成分分析将15个品质指标归为5个主成分, 累计贡献率达84.034%, 分别反映了杨梅果实的功能性状(第1、第3、第4、第5主成分)和外观风味品质(第2主成分); 综合评价筛选出铁离子还原抗氧化能力(FRAP)、单果质量、蔗糖含量、槲皮素含量、Ca含量、维生素C含量作为评价杨梅果实品质的核心指标; 聚类分析将29份杨梅资源划分为2个类群, 综合排名为I > II。【结论】不同杨梅资源间果实品质指标差异较大, 经综合评价筛选出黑瑞林、HG-15、迟色、黑晶、早芥蜜梅等优异杨梅种质资源, 为重庆地区杨梅良种选育与推广提供了科学指导。

**关键词:** 杨梅; 果实品质; 相关性分析; 聚类分析; 主成分分析; 综合评价

中图分类号: S667.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2026)05-1186-14

## Comprehensive evaluation of the quality of different bayberry varieties in Chongqing based on principal component analysis

LI Xue<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, CHEN Yuanping<sup>1</sup>, LIU Shiming<sup>1</sup>, FAN Qing<sup>2</sup>, FANG Jinqiang<sup>2</sup>, WU Zheng<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>Fruit Research Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; <sup>2</sup>Chongqing Nanchuan District Rural Development Service Center, Chongqing 408400, China)

**Abstract:** 【Objective】 In recent years, bayberry, as a functional fruit, has been increasingly favored by consumers. Fruit quality is the primary factor determining the commodity value and economic benefits of fruits, and it is also the main basis for evaluating the quality of germplasm resources. It is usually evaluated by a combination of multiple trait indicators that affect internal and external quality. At present, many studies have comprehensively applied multiple analytical methods to fruit quality evaluation, such as pear, passion fruit, citrus, etc. However, reports on the comprehensive evaluation of the quality of bayberry fruits, especially those of wild varieties and introduced varieties in Chongqing, are almost nonexistent. Therefore, this study aimed to conduct a comprehensive evaluation of the fruit quality of different bayberry resources in Chongqing to screen out the core trait indicators suitable for evaluating the fruit quality in this area and to establish a comprehensive evaluation system for bayberry fruit quality suitable for this region. At the same time, excellent germplasm would be screened out to provide some reference for the efficient and scientific evaluation, selection and breeding of new variety, and promotion of the bayberry germplasm resources in Chongqing. 【Methods】 29 resources of bayberry fruits were collected from the germplasm repository of the Fruit Research Institute of the Chongqing Academy of Agricultural Sciences (including 21 cultivated varieties and 8 local wild resources) as materials in

收稿日期: 2025-10-10 接受日期: 2025-11-25

基金项目: 2024年重庆市级特色经济作物全域提质增效项目(FWLX20241200129); 2024年重庆市农业产业发展技术支撑项目(FWLX2024-1000068)

作者简介: 李雪, 女, 助理研究员, 研究方向为果树资源评价与栽培生理。E-mail: lixuexwz@163.com

\*通信作者 Author for correspondence. E-mail: wzheng0925@163.com

2024. A total of 33 fruit quality indicators were determined, including 8 appearance quality indicators, 10 sugar acid and nutrient indicators, 7 antioxidant capacity indicators, and 8 mineral elements. Multiple statistical analysis methods, such as difference analysis, correlation heatmap analysis, cluster analysis, and principal component analysis, were used to comprehensively evaluate and rank the quality of the bayberry fruits. **【Results】** The differential analysis showed that there were significant differences in the degree of variation of various quality traits of the 29 bayberry fruits. In terms of appearance quality, the coefficient of variation of the fruit shape index and edible rate was small (only 4.72% and 5.64%), and the coefficient of variation of the yellow-blue color difference  $b^*$  value was large (78.93%). The coefficient of variation of the soluble solids and total sugar content was small (only 9.54% and 8.97%), and the coefficient of the variation of other indicators was between 14.04% and 57.48%. The results showed that bayberry was sucrose accumulation fruit and citric acid dominant fruit. In terms of phenolic compounds and antioxidant capacity, the coefficient of the variation of quercetin and anthocyanins was relatively high, at 75.21% and 85.93%, respectively. Among the different resources, WM-17 and Heiruilin were the varieties with the highest total phenol and flavonoid content, respectively, Heiruilin was the variety with the strongest comprehensive antioxidant capacity, and Shuijingzhong was the variety with the lowest total phenol content. In terms of mineral nutritional quality, the coefficient of the variation of different mineral elements ranged from 15.64% to 94.39%. Among them, Fe, as the trace element with the highest content, had a relatively high coefficient of variation (76.11%), while the coefficient of the variation of Se content was as high as 94.39%, indicating extremely high variability. The correlation analysis showed that there was a significant or extremely significant correlation between the various quality indicators of different varieties of bayberry. For instance, all the color difference parameters were significantly negatively correlated with the antioxidant activity indicators, and the synthesis and function of polyphenolic substances were closely and positively correlated with the multiple elements such as Ca, Mg, Fe, etc. However, the six indicators of the soluble solids, malic acid, fructose, glucose, amino acids, and selenium content showed almost no significant correlation with other indicators, indicating that the correlation strength between the different indicators would vary. The purpose of simplifying the quality indicator evaluation system could be achieved by screening the indicators with extremely high or low correlation. Based on the correlation analysis results and coefficient of variation, 18 quality indicators with excessively high or low correlation and a small coefficient of variation were excluded, and only the remaining 15 indicators were subjected to the principal component analysis. The results classified 15 indicators into 5 principal components, with a cumulative contribution rate of 84.034% and principal component eigenvalues ranging from 1.848 to 4.183. The five principal components could be divided into two categories, reflecting the functional traits of the bayberry fruit (including the 1st, 3rd, 4th, and 5th principal components) and the appearance and flavor quality (including the 2nd principal component). At the same time, six quality indicators were selected as the core indicators for evaluating the quality of bayberry, including iron ion reduction antioxidant capacity (FRAP), average mass, sucrose content, quercetin content, Ca content, and vitamin C content. Based on the score coefficients of each principal component, 15 standardized fruit trait values were substituted into these 5 principal components to obtain the scores of each variety on the 5 principal components, namely  $F_1-F_5$ . Using the ratio of the variance contribution rate of each principal component to the cumulative variance contribution rate as the weight coefficient, a comprehensive score model for the bayberry fruit quality indicators was constructed as follows:  $F\text{-score}=0.332F_1 + 0.221F_2 + 0.152F_3 + 0.149F_4 + 0.147F_5$ . The comprehensive score of the fruit quality for the 29 bayberry resources was ultimately calculated to vary

between -0.954 and 0.897, with a higher  $F$ -score indicating better overall quality of bayberry. When the Euclidean distance was between 22 and 25, the cluster analysis grouped the 29 bayberry materials into two clusters, with the first cluster including 17 materials, which were cultivated superior varieties, and the second cluster including 12 materials, which were wild varieties. By combining the principal component comprehensive scores, it was found that the overall ranking of the two groups was  $I > II$ , which was consistent with reality. 【Conclusion】 There were significant differences in quality indicators among different resources of the bayberry fruits. A comprehensive screening identified superior bayberry germplasm resources such as Heiruilin, HG-15, Chise, Heijing, and Zaoqimimei. Among them, Heiruilin (0.897) had the highest comprehensive score, far exceeding the second-ranked HG-15 (0.699), and performed the best in the overall evaluation of the fruit quality of the 29 bayberry resources. The research results would provide guidance for the breeding and promotion of improved bayberry varieties in Chongqing.

**Key words:** Bayberry; Fruit quality; Correlation analysis; Cluster analysis; Principal component analysis; Comprehensive evaluation

杨梅(*Myrica rubra* Sieb.et Zucc.)是杨梅科杨梅属的亚热带常绿乔木,原产中国,已经有2000多年的栽培历史<sup>[1]</sup>,种质资源丰富。我国杨梅栽培面积与产量占全世界的90%以上<sup>[2]</sup>,是我国南方特色经济水果之一<sup>[3]</sup>。杨梅果实初夏成熟,外观鲜艳诱人,酸甜多汁。研究发现,杨梅果实中富含多种糖类、维生素、酚酸、花青素、槲皮苷等营养物质,这些功能成分在抗氧化、抗炎、抗菌等方面发挥重要作用,能够有效预防癌症、心血管疾病、糖尿病等慢性疾病的发生<sup>[4-6]</sup>。

果实品质是决定果实商品价值与经济效益的首要因素,也是评价种质资源优劣的主要依据,通常由内在和外在品质的多种性状指标综合评价而成。因此,明确不同品质指标对果实品质的影响程度差异,并结合多种分析方法进行全面评价,在筛选优异种质及品种选育等方面具有重要意义。目前,已有研究将多种分析方法综合应用于果实品质评价,如猕猴桃<sup>[7]</sup>、葡萄<sup>[8]</sup>、梨<sup>[9]</sup>、百香果<sup>[10]</sup>、果桑<sup>[11]</sup>和柑橘<sup>[12]</sup>等,但关于杨梅,特别是重庆地区杨梅野生资源和引进品种果实品质综合评价方面的研究却未见报道。因此,笔者选取重庆地区栽培条件下的21个杨梅品种和8份野生资源为材料,结合差异分析、相关性分析、聚类分析与主成分分析,筛选适宜本地区杨梅果实品质评价的核心性状指标,并对果实品质进行综合评价,以期为重地区杨梅种质资源的高效科学评价、品种选育与推广提供一定参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

29份杨梅资源(21个栽培品种和8份野生资源)均来自于重庆市农业科学院果树研究所杨梅种质资源圃(表1)。2024年采集果实,每份资源随机选择3株健康、无病虫害的杨梅植株,于不同方位(上、下、左、右)采集大小均匀的健康、成熟果实,带回实验室进行果实品质指标的测定。同时,使用解剖刀切取各资源杨梅果肉,并分为3份作为重复,标记后快速放入液氮中预处理,于-80℃超低温冰箱中保存备用。

### 1.2 测定指标与方法

**外观品质指标测定:**使用电子天平精确称量单果质量及果核质量,通过计算果肉质量与果实质量的百分比确定可食率;使用数显游标卡尺测定果实纵径和横径,并以纵径与横径之比作为果形指数,每个指标重复测定20次,取平均值。色差参数使用便携式色差仪CR-400测定,记录明度值( $L^*$ )、红绿色差值( $a^*$ )、黄蓝色差值( $b^*$ ),再使用GY-4型数显硬度计测定果实多点硬度值,每个指标重复测定9次,取平均值。

**内在品质指标测定:**使用PAL-1型测糖仪测定果汁可溶性固形物含量。可滴定酸含量采用NaOH标准溶液滴定法<sup>[13]</sup>测定。维生素C含量采用2,6-二氯酚氧化还原滴定法<sup>[14]</sup>测定。总糖含量通过硫酸-苯酚显色法<sup>[15]</sup>测定。杨梅糖类组分含量采用蒽酮-硫酸比色法定量分析<sup>[16]</sup>。柠檬酸、苹果酸含量测定参考万嘉欣等<sup>[17]</sup>的方法。游离氨基酸总量使用茚

三酮显色法定量检测<sup>[18]</sup>。总酚含量采用福林酚比色法测定<sup>[19]</sup>。黄酮含量采用硝酸铝盐比色法测定<sup>[20]</sup>。植物花色苷含量采用示差法测定<sup>[21]</sup>。槲皮素含量使用高效液相色谱仪(Vanquish UHPLC, ThermoFisher, USA)检测。使用商品化试剂盒(南京陌凡生物科技有限公司)分别测定FRAP铁离子还原能力、ABTS及DPPH自由基清除率。各矿质元素含量参照马玉娥等<sup>[22]</sup>的方法测定。每个指标重复测定3次,取平均值。

### 1.3 数据分析

使用Excel 2019软件进行数据统计、整理、标准化,使用SPSSAU在线软件进行差异分析,使用Origin 2024软件进行相关性分析,使用SPSS 26.0软件进行聚类分析和主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同杨梅资源果实外观品质分析

如表1所示,东魁单果质量最大,平均单果质

表1 不同杨梅资源外观品质比较

Table 1 Comparison of appearance quality of different bayberry resources

资源名称 Resource name	平均单果质量 Average single fruit mass/g	果形指数 Fruit shape index	果实硬度 Fruit hardness/ (kg·cm <sup>-2</sup> )	可食率 Edible rate/%	明度值L* Light value L*	红绿色差值a* Red-green color difference value a*	黄蓝色差值b* Yellow-blue color difference value b*	果实颜色 Fruit color
TZ-1	14.07	0.95	0.72	92.32	20.13	6.21	2.29	紫黑色 Purple black
早佳 Zaojia	13.39	0.96	0.88	91.04	19.42	8.38	3.75	紫黑色 Purple black
早茛蜜梅 Zaoqimimei	9.36	0.95	0.93	90.81	20.02	10.80	4.31	紫黑色 Purple black
水晶种 Shuijingzhong	10.24	0.94	0.69	91.02	42.85	16.57	19.38	粉白色 Pink white
迟色 Chise	12.13	1.00	1.02	91.18	20.35	9.57	3.84	红色 Red
荸荠种 Biqizhong	9.08	0.93	0.83	87.11	19.85	8.58	3.51	紫黑色 Purple black
晚茛蜜梅 Wanqimimei	7.70	0.97	0.96	89.74	19.69	7.55	3.48	紫黑色 Purple black
HK-10	13.72	0.96	1.08	90.82	22.31	15.09	6.85	紫黑色 Purple black
大叶细蒂 Dayexidi	5.76	0.97	1.01	74.65	21.38	12.59	5.37	紫黑色 Purple black
硬丝安海变 Yingsianhaibian	8.47	0.99	0.99	82.29	20.47	7.00	2.63	深红色 Dark red
黑晶 Heijing	13.12	1.01	1.03	85.14	19.08	10.84	5.35	深红色 Dark red
东魁 Dongkui	21.11	1.00	0.83	92.52	19.84	12.07	6.10	深红色 Dark red
HG-15	12.31	0.92	0.84	93.50	18.45	4.51	1.42	紫黑色 Purple black
WM-17	8.09	1.03	0.90	89.74	20.10	7.25	3.28	紫黑色 Purple black
黑瑞林 Heiruilin	16.29	0.96	1.07	94.66	18.52	3.80	1.73	紫黑色 Purple black
XH-19	8.05	0.96	0.87	90.43	21.46	12.00	5.50	深红色 Dark red
大叶杨梅 Dayeyangmei	8.38	1.01	0.95	82.34	24.34	14.08	11.11	红色 Red
夏至红 Xiazhihong	11.65	0.94	0.92	91.67	25.42	19.67	8.98	粉红色 Pink
SH-23	10.15	0.95	0.99	90.44	28.04	19.58	11.56	红色 Red
DC-26	9.87	0.95	0.89	86.73	24.76	19.61	10.10	红色 Red
晚稻杨梅 Wandaoyangmei	9.26	0.96	0.88	92.76	18.90	4.32	1.45	紫黑色 Purple black
YW1	11.82	0.95	0.86	91.03	38.49	12.71	16.52	粉白色 Pink white
YW2	8.94	1.03	0.75	75.62	20.04	14.96	7.27	深红色 Dark red
YW3	7.80	1.06	1.08	85.26	18.99	26.14	21.11	红色 Red
YW4	6.51	1.08	1.37	84.64	20.54	25.27	21.89	深红色 Dark red
YW5	6.68	1.05	1.26	90.04	29.50	20.04	22.66	红色 Red
YW6	8.21	1.06	1.08	91.17	24.41	24.08	19.32	深红色 Dark red
YW7	6.08	1.08	0.99	82.81	21.56	24.44	22.87	深红色 Dark red
YW8	8.77	1.01	1.06	91.62	21.13	21.04	18.23	红色 Red
平均值 Average value	10.24	0.99	0.96	88.38	22.76	13.75	9.37	
标准差 Standard deviation	3.36	0.05	0.15	4.99	5.70	6.73	7.40	
极差 Extreme deviation	15.35	0.16	0.68	20.01	24.40	22.34	21.45	
变异系数 Coefficient of variation/%	32.78	4.72	15.33	5.64	25.05	48.97	78.93	

量为21.11 g;大叶细蒂单果质量最小,平均单果质量为5.76 g。杨梅果实的果形指数范围为0.92~1.08,均为近球形;可食率范围为74.65%~94.66%,相对较高;但两者的变异系数较小,分别为4.72%和5.64%。果实硬度是衡量杨梅新鲜度、成熟度和耐贮性的重要指标之一。YW4果实硬度最大,为1.37 kg·cm<sup>-2</sup>,而水晶种果实硬度最小,只有0.69 kg·cm<sup>-2</sup>。明度值(*L\**)、红绿色差值(*a\**)和黄蓝色差值(*b\**)是

果实颜色最直观的表现形式。其中水晶种、YW1为白梅类,*L\**较大,果肉呈现粉白色。

## 2.2 不同杨梅资源果实糖酸等营养物质分析

由表2可知,29份杨梅资源的可溶性固形物含量(*w*,后同)范围为8.37%~13.80%,其中大叶细蒂最高,大叶杨梅和DC-26较低,均低于10%。杨梅果实总糖含量范围为75.29~109.83 mg·g<sup>-1</sup>,变异系数(8.97%)较小,早佳总糖含量最高。杨梅果实蔗糖

表2 不同杨梅资源糖酸等营养物质比较

Table 2 Comparison of sugars, acids and other nutrients of different bayberry resources

资源名称 Resource name	w(可溶性 固形物) Soluble solids content/ content/%	w(总糖) Total sugar content/ content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(蔗糖) Sucrose content/ content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(果糖) Fructose content/ content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(葡萄糖) Glucose content/ content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(可滴 定酸) Titratable acid content/ content/%	w(苹果酸) Malic acid content/ content/ (μg·g <sup>-1</sup> )	w(柠檬酸) Citric acid content/ content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(维生素C) Vitamin C content/ content/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	w(氨基酸) Aminoc acid content/ content/ (μg·g <sup>-1</sup> )
TZ-1	12.20	100.81	57.33	23.62	13.49	0.78	173.10	7.24	40.96	319.53
早佳 Zaojia	10.00	109.83	49.52	32.99	10.66	0.71	97.20	5.79	45.30	241.40
早茛蜜梅 Zaoqimimei	12.60	102.69	42.00	28.15	19.36	0.84	113.94	6.87	61.19	392.46
水晶种 Shuijingzhong	12.80	95.67	53.69	28.37	11.76	1.03	322.14	11.39	56.59	275.21
迟色 Chise	11.97	86.26	44.00	19.85	18.27	0.79	462.74	6.04	57.30	322.23
荸荠种 Biqizhong	11.93	87.75	46.08	25.43	14.05	0.85	356.77	4.61	52.06	232.49
晚茛蜜梅 Wanqimimei	11.57	99.37	48.03	28.31	22.06	0.80	360.11	5.66	60.65	148.06
HK-10	11.10	85.29	42.76	24.19	14.62	1.15	519.68	8.49	59.44	195.81
大叶细蒂 Dayexidi	13.80	92.45	38.97	36.32	16.52	1.58	495.22	10.09	59.01	219.39
硬丝安海变 Yingsianhaibian	12.43	83.04	36.43	26.02	13.03	1.05	1 077.34	8.08	60.07	550.40
黑晶 Heijing	11.60	87.10	44.82	22.13	15.88	1.26	473.56	10.11	57.02	364.63
东魁 Dongkui	11.17	98.14	45.95	27.00	19.70	0.87	553.40	6.61	58.08	413.33
HG-15	11.00	83.47	34.56	25.58	15.02	0.76	677.78	5.09	56.67	159.61
WM-17	10.37	98.56	44.00	27.47	19.59	0.77	640.02	4.97	54.07	174.84
黑瑞林 Heiruilin	11.30	105.57	38.73	24.12	24.17	0.81	761.49	5.50	54.72	153.59
XH-19	11.33	98.19	41.06	26.49	15.30	0.88	205.88	6.66	53.93	397.66
大叶杨梅 Dayeyangmei	8.37	91.79	39.21	25.09	13.67	1.57	195.45	11.43	55.30	381.64
夏至红 Xiazhihong	11.07	94.29	42.21	24.74	12.70	1.02	243.42	6.56	58.33	513.79
SH-23	10.40	90.61	46.31	22.60	15.28	1.17	284.35	7.68	57.47	200.53
DC-26	9.17	81.96	37.29	22.02	14.62	1.21	113.25	8.30	54.10	196.89
晚稻杨梅 Wandaoyangmei	10.60	94.00	37.09	28.27	12.22	0.87	640.34	5.17	57.62	223.48
YW1	11.47	90.64	17.99	18.69	24.98	1.01	378.50	9.13	46.35	150.39
YW2	11.20	80.81	14.64	25.18	19.22	1.22	250.04	11.11	39.13	106.30
YW3	10.83	75.29	12.76	21.39	19.80	1.52	227.62	9.91	48.97	93.91
YW4	10.73	87.46	23.11	25.33	13.02	1.48	235.61	11.31	70.49	464.24
YW5	10.60	84.55	25.29	30.38	16.00	1.15	890.30	9.79	63.21	456.40
YW6	11.53	82.70	24.92	25.14	11.37	1.03	475.57	7.38	69.13	487.76
YW7	10.80	84.54	20.67	30.89	16.59	1.70	341.79	12.02	37.05	359.54
YW8	10.67	92.83	26.08	25.98	22.12	1.10	561.87	8.95	55.78	476.68
平均值 Average value	11.19	91.23	37.09	25.92	16.38	1.07	418.22	8.00	55.17	299.04
标准差 Standard deviation	1.07	8.18	11.66	3.75	3.86	0.28	240.40	2.27	7.73	134.58
极差 Extreme deviation	5.43	34.54	44.57	17.63	14.32	0.99	980.14	7.41	33.44	456.49
变异系数 Coefficient of variation/%	9.54	8.97	31.45	14.48	23.58	26.39	57.48	28.35	14.02	45.00

含量范围为 12.76~57.33 mg·g<sup>-1</sup>,变异系数(31.45%)较大。栽培杨梅品种中蔗糖含量>果糖含量>葡萄糖含量。杨梅果实可滴定酸含量范围为 0.71%~1.70%,其中早佳最低。因此,早佳糖酸比最高,果实甜酸风味最好。在可滴定酸中,苹果酸含量范围为 97.20~1 077.34 μg·g<sup>-1</sup>,柠檬酸含量范围为 4.61~12.02 mg·g<sup>-1</sup>,占总酸含量的 74.77%。杨梅不同资源间苹果酸含量的变异程度较高,变异系数达 57.48%;而可滴定酸和柠檬酸含量的变异系数较小,分别为 26.39%和 28.35%。维生素 C 是人体必需的营养元素且只能从果蔬中摄取,杨梅果实维生素 C 含量范围为 37.05~70.49 mg·100 g<sup>-1</sup>,平均含量为 55.17 mg·100 g<sup>-1</sup>,变异系数(14.02%)相对较小。氨基酸作为影响食品营养的关键因子,29 份杨梅资源果实氨基酸含量差异较大,变异系数为 45.00%,其中硬丝安海变含量最高,为 550.40 μg·g<sup>-1</sup>,YW3 最低,为 93.91 μg·g<sup>-1</sup>。

### 2.3 不同杨梅资源果实酚类物质及抗氧化能力分析

如表 3 所示,29 份杨梅资源果实总酚含量范围为 1.00~3.35 mg·g<sup>-1</sup>,其中 WM-17 最高,水晶种最低;黄酮含量范围为 0.90~3.47 mg·g<sup>-1</sup>,其中黑瑞林

最高,YW5 最低;槲皮素含量的变异系数(75.21%)较大,其中 HG-15 含量最高,为 97.49 μg·g<sup>-1</sup>。花色苷与果实颜色密切相关,不同杨梅资源中花色苷含量差异极大,变异系数达 85.93%,其中 DC-26 含量最高,为 196.41 mg·100 g<sup>-1</sup>,而白梅类的水晶种最低,只有 6.41 mg·100 g<sup>-1</sup>。FRAP、ABTS 自由基清除率和 DPPH 自由基清除率常作为评价植物抗氧化能力的三大指标。杨梅果实 FRAP 总抗氧化能力范围为 0.97~4.98 μmol·g<sup>-1</sup>,ABTS、DPPH 自由基清除率范围分别为 20.14%~80.33%、45.09%~76.61%,其中 FRAP 总抗氧化能力的变异程度最大。黑瑞林的 FRAP 总抗氧化能力和 ABTS 自由基清除率均最高,而 SH-23 的 3 种抗氧化能力均最低,即其综合抗氧化能力最弱。

### 2.4 不同杨梅资源果实矿质营养品质分析

由表 4 可知,人体所需的矿质元素含量在不同杨梅资源间存在较大差异,变异系数范围为 15.64%~94.39%,其中 Fe 和 Se 的变异程度较大。在微量元素中,Fe 含量较高,范围为 5.02~90.15 mg·kg<sup>-1</sup>,其中黑瑞林最高,早佳最低。Se 含量变异系数高达 94.39%,变异程度最高,含量最高为荸荠种(44.91 μg·kg<sup>-1</sup>),含量最低为水晶种(2.51 μg·kg<sup>-1</sup>)。

表 3 不同杨梅资源酚类物质及抗氧化能力比较

Table 3 Comparison of phenolic compounds and antioxidant capacity of different bayberry resources

资源名称 Resource name	w(总酚) Total phenols content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(黄酮) Flavone content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(槲皮素) Quercetin content/ (μg·g <sup>-1</sup> )	w(花色苷) Proanthocyanidin content/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	b(FRAP)/ (μmol·g <sup>-1</sup> )	ABTS自由 基清除率 ABTS free radical clearance rate/%	DPPH自由 基清除率 DPPH free radical clearance rate/%
TZ-1	2.26	1.98	21.51	39.51	2.45	39.80	59.71
早佳 Zaojia	1.31	2.08	11.66	26.81	3.53	56.71	72.80
早荠蜜梅 Zaoqimimei	2.34	2.81	44.03	56.36	4.09	65.69	74.32
水晶种 Shuijingzhong	1.00	1.39	8.30	6.41	1.38	33.21	54.11
迟色 Chise	2.14	2.29	64.34	58.71	3.67	69.69	74.68
荸荠种 Biqizhong	2.26	2.15	86.18	43.23	2.99	44.05	66.97
晚荠蜜梅 Wanqimimei	2.89	2.92	52.50	55.93	3.81	58.33	72.64
HK-10	2.34	1.83	21.43	38.68	3.51	53.11	71.27
大叶细蒂 Dayexidi	2.68	2.12	36.95	59.36	3.94	56.99	71.93
硬丝安海变 Yingsianhaibian	1.78	2.15	32.98	47.98	4.42	67.83	75.27
黑晶 Heijing	3.32	2.61	12.26	38.18	4.00	68.60	76.61
东魁 Dongkui	2.47	2.20	19.09	34.30	1.96	42.91	63.22
HG-15	3.16	2.81	97.49	83.51	4.64	67.02	73.36
WM-17	3.35	2.74	28.83	25.59	2.89	52.46	67.36
黑瑞林 Heiruilin	3.00	3.47	17.09	114.86	4.98	80.33	75.75
XH-19	3.06	2.19	58.97	23.92	3.43	66.05	73.31
大叶杨梅 Dayeyangmei	2.37	1.46	10.90	24.50	2.16	39.23	60.68
夏至红 Xiazhihong	1.69	2.00	16.26	18.95	2.14	38.02	60.68

表 3 (续) Table 3 (Continued)

资源名称 Resource name	w(总酚) Total phenols content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(黄酮) Flavone content/ (mg·g <sup>-1</sup> )	w(槲皮素) Quercetin content/ (μg·g <sup>-1</sup> )	w(花色苷) Proanthocyanidin content/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	b(FRAP)/ (μmol·g <sup>-1</sup> )	ABTS自由 基清除率 ABTS free radical clearance rate/%	DPPH自由基 清除率 DPPH free radical clearance rate/%
SH-23	1.07	1.09	15.50	6.86	0.97	20.14	45.09
DC-26	1.81	2.12	10.75	196.41	2.54	42.35	66.31
晚稻杨梅 Wandaoyangmei	3.12	3.44	38.25	11.54	3.47	51.37	64.33
YW1	1.58	1.38	19.00	19.79	1.08	26.98	51.59
YW2	1.84	1.64	5.88	23.89	1.02	21.84	51.77
YW3	2.18	1.76	9.36	46.79	1.67	34.02	58.53
YW4	3.03	1.87	46.77	49.77	2.77	47.32	69.35
YW5	1.28	0.90	46.80	28.41	1.81	36.08	60.68
YW6	1.80	1.04	31.81	27.65	1.80	38.95	61.27
YW7	1.21	1.17	29.49	26.23	2.14	41.05	64.67
YW8	1.31	1.01	8.69	23.78	1.56	32.60	56.15
平均值 Average value	2.20	2.02	31.14	43.38	2.79	48.03	65.32
标准差 Standard deviation	0.72	0.69	23.42	37.27	1.16	15.58	8.45
极差 Extreme deviation	2.35	2.57	91.61	190.00	4.01	60.19	31.52
变异系数 Coefficient of variation/%	32.97	34.29	75.21	85.93	41.43	32.45	12.94

表 4 不同杨梅资源矿质营养品质比较

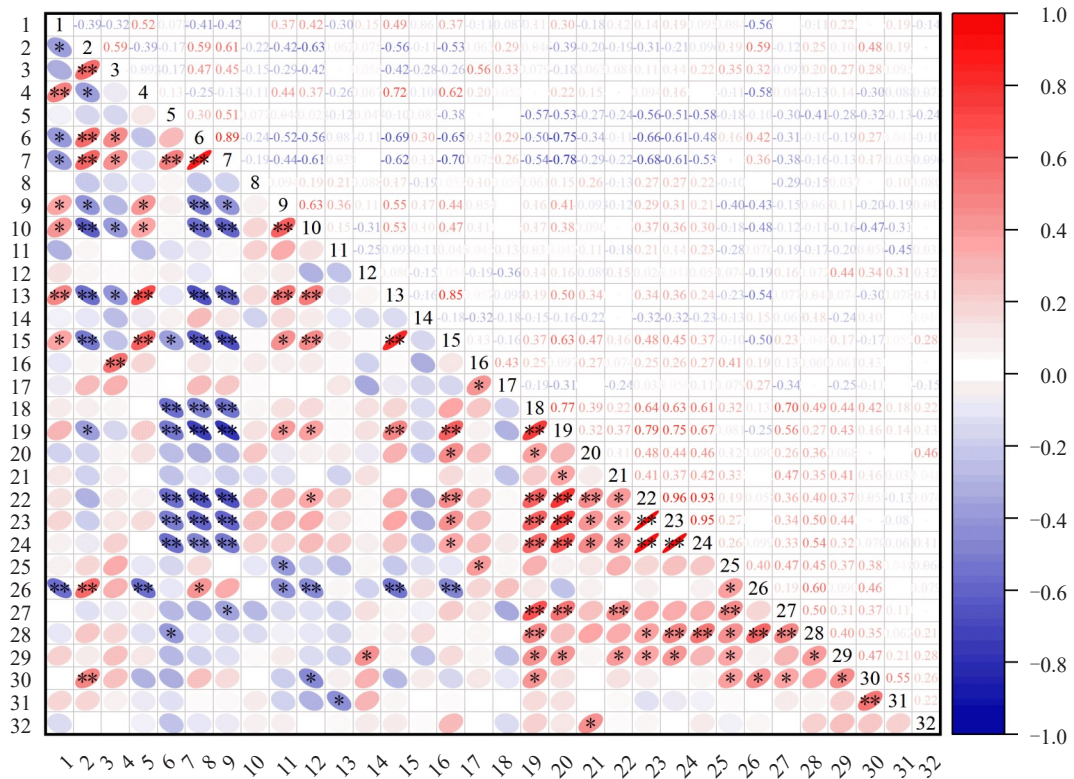
Table 4 Comparison of mineral nutritional quality of different bayberry resources

资源名称 Resource name	w(P)/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(K)/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(Ca)/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(Mg)/ (g·kg <sup>-1</sup> )	w(Fe)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(Zn)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(Cu)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(Se)/ (μg·kg <sup>-1</sup> )
TZ-1	0.06	1.36	0.05	0.07	10.64	1.07	0.25	5.19
早佳 Zaojia	0.06	1.32	0.05	0.07	5.02	1.08	0.16	2.90
早茛蜜梅 Zaoqimimei	0.11	1.69	0.12	0.09	12.87	1.70	0.28	5.81
水晶种 Shuijingzhong	0.08	1.53	0.05	0.05	9.16	1.13	0.13	2.51
迟色 Chise	0.13	1.64	0.10	0.11	27.15	1.59	0.47	5.08
荸荠种 Biqizhong	0.09	1.51	0.09	0.08	19.81	1.59	0.36	44.91
晚茛蜜梅 Wanqimimei	0.08	1.50	0.12	0.08	18.59	1.65	0.26	18.08
HK-10	0.12	1.43	0.12	0.08	15.45	1.25	0.21	4.15
大叶细蒂 Dayexidi	0.11	1.86	0.11	0.07	16.34	2.09	0.16	5.26
硬丝安海变 Yingsianhaibian	0.08	1.72	0.09	0.07	9.37	1.07	0.36	4.55
黑晶 Heijing	0.14	1.68	0.13	0.08	18.45	1.75	0.28	4.48
东魁 Dongkui	0.11	1.38	0.13	0.07	19.06	2.67	0.47	8.33
HG-15	0.12	1.46	0.20	0.08	24.13	1.44	0.20	4.89
WM-17	0.09	1.43	0.16	0.08	23.21	1.65	0.33	10.01
黑瑞林 Heiruilin	0.12	1.42	0.13	0.09	90.15	2.09	0.31	14.19
XH-19	0.11	2.03	0.17	0.11	26.80	1.86	0.22	10.25
大叶杨梅 Dayeyangmei	0.12	1.95	0.15	0.10	21.34	1.49	0.15	8.70
夏至红 Xiazhihong	0.10	1.28	0.07	0.05	10.56	1.45	0.52	4.89
SH-23	0.10	1.37	0.06	0.05	5.72	1.11	0.17	3.14
DC-26	0.12	1.64	0.20	0.09	16.70	1.62	0.20	3.68
晚稻杨梅 Wandaoyangmei	0.09	1.48	0.18	0.07	14.90	1.61	0.25	3.89
YW1	0.08	1.43	0.12	0.07	13.61	1.55	0.47	5.21
YW2	0.11	1.95	0.14	0.08	21.29	2.35	0.54	9.10
YW3	0.10	1.74	0.11	0.07	33.56	2.65	0.47	12.66
YW4	0.10	2.10	0.12	0.10	28.67	2.66	0.54	12.59
YW5	0.11	1.54	0.07	0.06	18.35	1.39	0.24	6.45
YW6	0.13	2.23	0.09	0.09	19.98	1.95	0.18	9.84
YW7	0.09	1.87	0.06	0.09	14.24	1.56	0.11	7.17
YW8	0.09	1.45	0.06	0.06	11.68	1.33	0.19	6.37
平均值 Average value	0.10	1.62	0.11	0.08	19.89	1.67	0.29	8.42
标准差 Standard deviation	0.02	0.25	0.04	0.02	15.14	0.47	0.13	7.95
极差 Extreme deviation	0.08	0.95	0.15	0.06	85.13	1.60	0.43	42.40
变异系数 Coefficient of variation/%	19.67	15.64	39.21	20.69	76.11	27.97	45.76	94.39

2.5 不同杨梅资源果实品质指标的相关性分析

对29份杨梅资源的32个果实品质指标进行相关性分析,结果(图1)表明,不同杨梅资源果实的各项品质指标间呈现出的相关性强弱不一。各外观指标间相关性较强,且各外观指标与糖酸组分(可滴定酸、柠檬酸、总糖、蔗糖)含量和矿质元素(K、Ca、Zn)含量存在显著或极显著相关性。但除色差指标( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ )与抗氧化活性指标呈极显著负相关外,其他外观指标均与抗氧化特性无相关性。在糖酸品质方面,各糖酸指标间均存在较强的相关关系,且蔗糖、柠檬酸含量均与K含量呈极显著负相关;可滴定酸、柠檬酸、黄酮含量三者之间呈极显著正相关。在

抗氧化方面,多酚类物质(多酚、黄酮、槲皮素、花色苷)能显著或极显著提升自由基清除能力(FRAP、ABTS、DPPH),且其合成与功能发挥与Ca、Mg、Fe、Zn等多种元素呈显著或极显著正相关。在矿质元素方面,各种元素之间存在很强的协同效应,其中P含量与Ca含量、K/Ca含量与Mg含量、Zn含量与Cu含量呈极显著正相关,Mg含量与Fe含量、Fe含量与Zn含量呈显著正相关,共同构成元素互作网络。但并非所有指标均与其他指标存在较强相关性,可溶性固形物、苹果酸、果糖、葡萄糖、氨基酸、Se含量6种指标与其他指标仅存在1对显著相关性或不存在任何显著相关性。因此,可对相关性极强或极弱的



1. 单果质量;2. 果形指数;3. 果实硬度;4. 可食率;5. 明度值  $L^*$ ;6. 红绿色差值  $a^*$ ;7. 黄蓝色差值  $b^*$ ;8. 可溶性固形物含量;9. 总糖含量;10. 蔗糖含量;11. 果糖含量;12. 葡萄糖含量;13. 可滴定酸含量;14. 苹果酸含量;15. 柠檬酸含量;16. 维生素 C 含量;17. 氨基酸含量;18. 总酚含量;19. 黄酮含量;20. 槲皮素含量;21. 花色苷含量;22. FRAP;23. ABTS 自由基清除率;24. DPPH 自由基清除率;25. P 含量;26. K 含量;27. Ca 含量;28. Mg 含量;29. Fe 含量;30. Zn 含量;31. Cu 含量;32. Se 含量。 \*\*代表在 0.01 级别(双尾)相关性极显著,\*代表在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

1. Average single fruit mass; 2. Fruit shape index; 3. Fruit hardness; 4. Edible rate; 5. Light  $L^*$  value; 6. Red-green color difference  $a^*$  value; 7. Yellow-blue color difference  $b^*$  value; 8. Soluble solids content; 9. Total sugar content; 10. Sucrose content; 11. Fructose content; 12. Glucose content; 13. Titratable acid content; 14. Malic acid content; 15. Citric acid content; 16. Vitamin C content; 17. Aminoc acid content; 18. Total phenols content; 19. Flavone content; 20. Quercetin content; 21. Proanthocyanidin content; 22. FRAP; 23. ABTS free radical clearance rate; 24. DPPH free radical clearance rate; 25. P content; 26. K content; 27. Ca content; 28. Mg content; 29. Fe content; 30. Zn content; 31. Cu content; 32. Se content. \*\* indicates extremely significant correlation at 0.01 level (two tails), and \* indicates significant correlation at 0.05 level (two tails).

图1 杨梅不同品质指标间的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between different quality indexes of bayberry

指标进行筛选,以达到简化品质指标评价体系的目的。

## 2.6 不同杨梅资源果实品质指标的主成分分析

基于相关性分析结果以及变异系数,剔除相关性过强、相关性过弱及变异系数过小的品质指标,然后利用 SPSS 26.0 软件降维板块中的因子分析法,对 15 个品质指标进行主成分分析。以主成分特征值大于 1 作为标准,最终提取到 5 个主成分,累计贡献率 84.034%,主成分特征值为 1.848~4.183 (表 5)。第 1 主成分的方差贡献率为 27.884%,主要由总酚含量、黄酮含量、FRAP、ABTS 自由基清除

率、DPPH 自由基清除率等指标决定,即抗氧化物质及其清除能力;其中 FRAP 的载荷值最高,且其与其他 4 个指标均呈极显著正相关,因此 FRAP 为核心指标。第 2 主成分的方差贡献率为 18.581%,主要由平均单果质量、总糖含量、蔗糖含量、柠檬酸含量和可滴定酸含量决定,即单果质量及糖酸品质;其中平均单果质量的载荷值最大,蔗糖含量次之,且蔗糖含量与可滴定酸、总糖、柠檬酸含量均呈极显著正相关,因此单果质量和蔗糖含量为核心指标。第 3 主成分的方差贡献率为 12.734%,主要由槲皮素含量决定。第 4 主成分的方差贡献率为

表 5 杨梅果实品质指标的主成分旋转后的载荷矩阵、特征值与方差贡献率

Table 5 The principal component rotation load matrix, eigenvalue and contribution rate of bayberry fruit quality indexes

性状 Trait	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
平均单果质量 Average single fruit mass	0.006	0.848	-0.126	0.230	-0.050
果实硬度 Fruit hardness	0.154	-0.406	-0.187	-0.073	0.769
总糖含量 Total sugar content	0.328	0.663	0.037	-0.397	-0.192
蔗糖含量 Sucrose content	0.288	0.713	0.164	-0.265	-0.034
柠檬酸含量 Citric acid content	0.282	0.522	0.714	0.066	-0.047
维生素 C 含量 Vitamin C content	0.125	0.051	0.216	0.087	0.870
可滴定酸含量 Titratable acid content	0.143	0.667	0.643	-0.048	-0.124
总酚含量 Total phenols content	0.684	0.062	0.176	0.517	0.016
黄酮含量 Flavone content	0.757	0.335	0.255	0.307	-0.176
槲皮素含量 Quercetin content	0.346	-0.232	0.798	0.079	0.151
FRAP	0.932	0.136	0.195	0.060	0.115
ABTS 自由基清除率 ABTS free radical clearance rate	0.917	0.188	0.143	0.084	0.173
DPPH 自由基清除率 DPPH free radical clearance rate	0.924	0.057	0.118	0.051	0.201
P 含量 P content	0.107	-0.055	-0.167	0.702	0.538
Ca 含量 Ca content	0.344	-0.077	0.170	0.839	-0.122
特征值 Eigenvalues	4.183	2.787	1.910	1.878	1.848
方差贡献率 Variance contribution rate/%	27.884	18.581	12.734	12.518	12.318
累计方差贡献率 Cumulative contribution rate/%	27.884	46.465	59.199	71.717	84.034

12.518%,主要由 P 含量、Ca 含量决定,即矿质元素;其中 Ca 含量的载荷值更大,且与 P 含量呈极显著正相关,因此 Ca 含量为核心指标。第 5 主成分的方差贡献率为 12.318%,主要由果实硬度和维生素 C 含量决定;其中维生素 C 含量的载荷值更高,且与果实硬度呈极显著正相关,因此维生素 C 含量为核心指标。5 个主成分可进一步分为 2 类,即功能性状(第 1、第 3、第 4、第 5 主成分)和外观风味品质(第 2 主成分)。

## 2.7 不同杨梅资源果实品质的综合评价

果实品质是由多个品质指标综合共同决定的。

基于主成分得分系数矩阵(表 6),将标准化后的 15 项果实性状指标代入 5 个主成分计算公式中,分别计算各资源在 5 个主成分上的得分,即  $F_1 \sim F_5$ 。随后,以各主成分的方差贡献率与累计方差贡献率的比值作为权重系数,构建杨梅果实品质综合得分模型:  $F=0.332F_1+0.221F_2+0.152F_3+0.149F_4+0.147F_5$ ,最终计算出 29 份杨梅资源果实品质的综合得分。由表 7 可知,综合得分变化范围为 -0.954~0.897,  $F$  越大即杨梅果实综合品质越好。晚稻杨梅和东魁是公认的“四大良种”之二,表现良好;黑瑞林的综合得分最高,且远高于排名第二的 HG-15,在 29 份杨梅资

表6 杨梅果实品质指标的因子得分系数矩阵

Table 6 Component score coefficient matrix of bayberry fruit quality indexes

性状 Trait	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
平均单果质量 Average single fruit mass	-0.120	0.465	-0.223	0.236	0.112
果实硬度 Fruit hardness	0.069	-0.065	-0.092	-0.148	0.402
总糖含量 Total sugar content	0.124	0.212	-0.140	-0.231	-0.024
蔗糖含量 Sucrose content	0.031	0.267	-0.041	-0.144	0.090
柠檬酸含量 Citric acid content	-0.114	0.121	0.396	0.044	0.047
维生素C含量 Vitamin C content	-0.131	0.150	0.150	-0.002	0.562
可滴定酸含量 Titratable acid content	-0.147	0.199	0.350	0.014	0.046
总酚含量 Total phenols content	0.141	-0.032	-0.027	0.220	-0.087
黄酮含量 Flavone content	0.177	0.028	-0.026	0.110	-0.158
槲皮素含量 Quercetin content	-0.031	-0.247	0.562	-0.046	0.027
FRAP	0.290	-0.060	-0.069	-0.110	-0.019
ABTS 自由基清除率 ABTS free radical clearance rate	0.276	-0.010	-0.111	-0.089	0.028
DPPH 自由基清除率 DPPH free radical clearance rate	0.304	-0.073	-0.111	-0.125	0.021
P含量 P content	-0.100	0.154	-0.132	0.401	0.289
Ca含量 Ca content	-0.010	-0.049	0.054	0.474	-0.173

表7 不同杨梅资源果实品质综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of the quality of different bayberry resources

资源名称 Resource name	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F$	排名 Ranking
黑瑞林 Heiruilin	1.753	1.567	-0.993	0.461	0.343	0.897	1
HG-15	0.697	-0.366	2.161	1.784	-0.306	0.699	2
迟色 Chise	0.444	0.359	0.882	0.226	1.034	0.545	3
黑晶 Heijing	1.339	0.496	-1.880	1.132	0.666	0.536	4
早芥蜜梅 Zaoqimimei	1.061	0.422	0.367	-0.352	0.339	0.498	5
东魁 Dongkui	-0.847	2.443	-0.473	1.257	0.296	0.418	6
晚芥蜜梅 Wanqimimei	1.041	0.007	1.214	-0.793	-0.112	0.396	7
XH-19	0.898	-0.255	0.885	0.466	-0.508	0.371	8
晚稻杨梅 Wandaoyangmei	0.525	0.052	1.046	0.915	-0.853	0.355	9
HK-10	0.239	0.530	-0.830	0.502	1.063	0.301	10
WM-17	0.528	0.257	0.854	0.373	-0.815	0.297	11
硬丝安海变 Yingsianhaibian	1.048	-0.707	0.146	-1.120	0.240	0.082	12
荸荠种 Biqizhong	-0.202	-0.380	2.345	-0.451	-0.488	0.066	13
YW4	0.596	-1.552	-0.365	-0.293	1.797	0.019	14
大叶细蒂 Dayexidi	1.273	-1.105	-0.849	-0.457	0.230	0.015	15
早佳 Zaojia	0.736	1.301	-0.326	-2.276	-0.941	0.005	16
DC-26	-0.313	-0.107	-0.475	1.582	-0.359	-0.016	17
YW6	-1.337	-0.199	0.704	0.390	1.992	-0.031	18
夏至红 Xiazhihong	-0.732	0.872	0.024	-0.414	0.415	-0.047	19
TZ-1	-0.192	1.231	-0.008	-1.291	-1.752	-0.242	20
大叶杨梅 Dayeyangmei	-0.153	-0.366	-1.495	0.700	-0.026	-0.258	21
YW5	-1.006	-1.027	0.494	-0.809	1.829	-0.338	22
SH-23	-2.062	0.668	0.157	-0.560	0.758	-0.485	23
YW8	-1.091	-0.164	-0.301	-0.980	0.481	-0.520	24
水晶种 Shuijingzhong	-1.148	0.836	-0.563	-1.266	-0.416	-0.531	25
YW3	-0.529	-1.567	-0.821	0.624	-0.451	-0.619	26
YW1	-1.442	-0.206	0.076	0.315	-1.196	-0.641	27
YW2	-1.338	-0.930	-0.702	1.491	-1.950	-0.819	28
YW7	0.212	-2.111	-1.274	-1.156	-1.312	-0.954	29

源中综合品质表现最优。

### 2.8 不同杨梅资源聚类分析

基于33个果实表型性状指标,利用SPSS 26的系统聚类分析功能对29份杨梅进行Q型聚类分析。当欧氏距离为22~25时,将29份供试材料聚为2个群体:第I群体(17份)分别是晚茅蜜梅、

WM-17、晚稻杨梅、HG-15、HK-10、黑晶、早茅蜜梅、XH-19、迟色、荸荠种、硬丝安海变、大叶细蒂、TZ-1、早佳、东魁、夏至红、黑瑞林,为栽培优势品种类群;第II群体(12份)分别是水晶种、SH-23、大叶杨梅、DC-26、YW1、YW2、YW3、YW4、YW5、YW6、YW7、YW8,为野生品种类群(图2)。

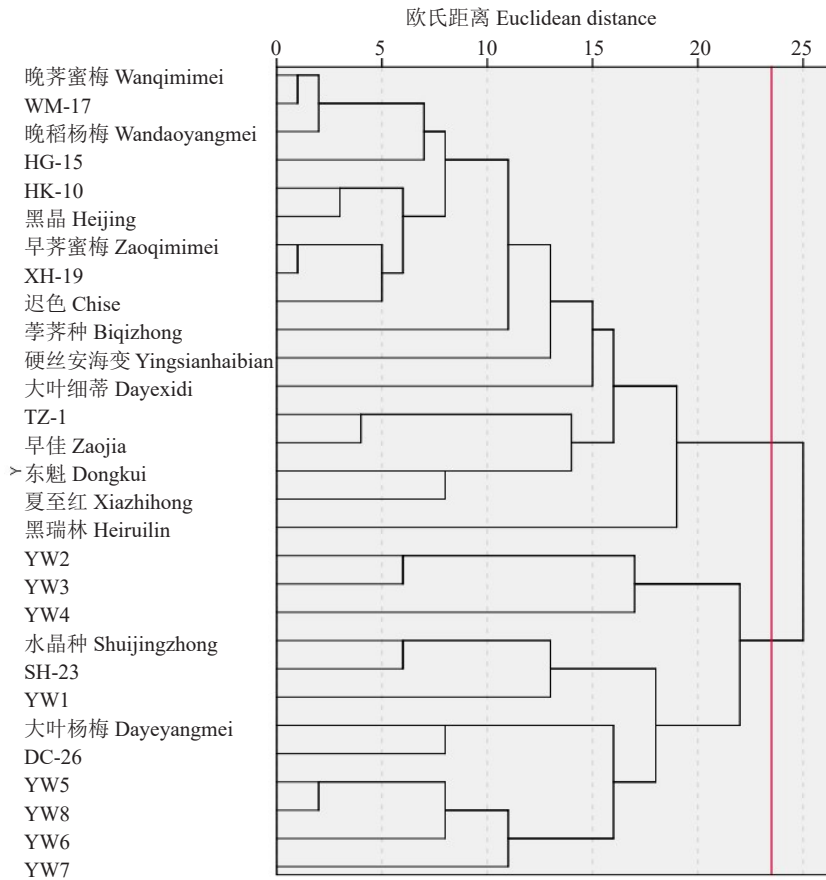


图2 不同杨梅资源的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of different bayberry resources

## 3 讨 论

果实大小、颜色等外观品质指标和糖酸、抗氧化物质等多种内在品质指标是进行果实品质评价和优异种质筛选的重要依据。本研究结果表明,在杨梅果实外观品质中,果实颜色差异较大,而其他外观品质差异相对较小,果形指数、可食率的变异系数均小于10%,与蒋芯等<sup>[23]</sup>、张淑文等<sup>[24]</sup>的研究结果一致;同时东魁单果质量最大,与实际情况相符。果实的糖酸种类和含量是影响果实品质及口感的关键因素<sup>[25]</sup>。前人对21份杨梅材料的糖酸物质组成的研究表明,杨梅果实以甜酸风味为主,糖类物质中蔗糖

含量最高,为蔗糖积累型果实;酸类物质中柠檬酸含量最高,为柠檬酸优势型果实<sup>[26]</sup>。本研究结果与其基本一致,但发现野生杨梅资源在糖酸组成上存在差异。在本研究中大多数野生杨梅资源的糖类物质以果糖含量最高,这可能与品种特性相关。酚类物质作为杨梅果实抗氧化能力的主要贡献者,其含量和种类因品种不同而表现出较大差异。水晶种等浅色品种的总酚含量最低,花色苷积累较少;而WM-17和黑瑞林等深色品种的总酚和黄酮含量较高,抗氧化能力较强,这与张夏南<sup>[27]</sup>和郑小飞等<sup>[28]</sup>的研究结果一致,表明果实颜色可作为判断抗氧化能力强弱的指标之一。矿质元素是维持人体正常生理功能

的营养物质,也是决定杨梅果实品质的重要指标。赵双等<sup>[29]</sup>的研究表明,在30份杨梅种质资源中,矿物质元素含量差异较大,其中Se含量变异系数最大,而Ca、Fe、Zn含量变异系数较小。本研究结果与其基本一致,但Fe含量的变异系数较大,这可能与不同栽培地区土壤的理化性质及供试资源的差异相关。

杨梅果实品质评价涵盖多维度指标体系,尽管各指标的测量量程、计量单位存在差异,且未形成明确的主次层级划分,但不同指标之间存在显著的关联性与重叠性,难以开展标准化评价<sup>[30]</sup>。传统的感官评价法与方差分析法,常受主观性与多因素性影响,导致评价结果存在片面性<sup>[31]</sup>。主成分分析作为一种综合评价方法,通过线性变换将多个原始指标简化为少数几个综合因子,并保留原始变量的主要信息<sup>[30]</sup>,具有系统、全面、高效的优点,已广泛应用于树莓<sup>[32]</sup>、草莓<sup>[33]</sup>、龙眼<sup>[34]</sup>、苹果<sup>[35]</sup>、甜樱桃<sup>[36]</sup>等多种果树的综合品质评价。

笔者测定了29份杨梅资源的33个果实品质指标,并开展了不同品质指标间的相关性分析。结果表明,各性状间存在显著相关性,且单果质量、果形指数、色泽参数等与其他多种内在品质指标均存在极强的相关性,即外观品质是内在品质的表现形式。综合相关性分析及差异分析结果,剔除18个不适宜进行主成分分析的指标,对剩余的15个指标进行PCA降维处理,共提取出5个主成分,累计贡献率为84.034%。综合评价得分排名前列的黑瑞林、HG-15、迟色、黑晶、早茅蜜梅、东魁、晚茅蜜梅等资源,若具有高度生态适应性,可在未来产业发展中直接推广应用;而综合得分低于0的13份资源,也可能具有优异特性,值得进行深入挖掘。例如,水晶种在此次综合评价中排名靠后,但其果肉细腻且外观晶莹剔透,深受消费者喜爱。此外,除YW4外,其他7份野生资源的综合排名靠后,但其具有明显的药香味,可围绕药用价值和果酒加工方面开展进一步研究。此次综合评价仅涉及部分理化指标,且样本数量较小,结果具有一定局限性。未来在进行杨梅果实品质综合评价时,可依据白梅类、红梅类、乌梅类、粉红梅类等不同类型杨梅的品种特性,设置相应指标开展差异评价;或根据评价目的(营养品质、口感等)个性化选择品质指标,结合具体目的进行结果解读,以确保分析结果的可靠性与有效性,使评价工作更加完整,满足消费者多样化的需求,为种质创新和产业链延

长提供更多参考。在本研究中,笔者通过聚类分析将29份杨梅资源聚为2个类群,基于主成分综合得分发现,2个类群的果实品质综合排名为I>II,即聚类分析结果与综合评价结果具有高度一致性,评价结果较为合理。

## 4 结 论

不同杨梅资源的果实品质指标差异较大,变异程度较高;FRAP、单果质量、蔗糖含量、槲皮素含量、Ca含量、维生素C含量是杨梅果实品质评价的核心指标;黑瑞林、HG-15、迟色、黑晶、早茅蜜梅为排名前5的优异资源,本研究结果为杨梅种质资源的评价和选育鉴定工作提供了参考依据。

## 参考文献 References:

- [1] JIANG Q J, JIN W W, ZHANG W Y, ZHANG Z C, YOU L F, BI Y Q, YUAN L M. Analysis of vibration acceleration levels and quality deterioration of Chinese bayberry fruit in semi-vacuum package by express delivery[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(12): e13899.
  - [2] LI J K, CHEN J, LIU L X, CHEN N, LI X, CAMERON K M, FU C X, LI P. Domestication history reveals multiple genetic improvements of Chinese bayberry cultivars[J]. Horticulture Research, 2022, 9: uhac126.
  - [3] ZHANG S W, YU Z P, SUN L, REN H Y, ZHENG X L, LIANG S M, QI X J. An overview of the nutritional value, health properties, and future challenges of Chinese bayberry[J]. PeerJ, 2022, 10: e13070.
  - [4] HE K, LI X G, XIAO Y B, YONG Y, ZHANG Z Q, LI S P, ZHOU T M, YANG D Q, GAO P C, XIN X L. Hypolipidemic effects of *Myrica rubra* extracts and main compounds in C57BL/6j mice[J]. Food & Function, 2016, 7(8): 3505-3515.
  - [5] SAINI R, GARG V, DANGWAL K. Effect of extraction solvents on polyphenolic composition and antioxidant, antiproliferative activities of Himalyan bayberry (*Myrica esculenta*) [J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(4): 887-894.
  - [6] SUN C D, HUANG H Z, XU C J, LI X, CHEN K S. Biological activities of extracts from Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.): A review[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2013, 68(2): 97-106.
  - [7] 陶双勇, 逢宏扬, 王澎, 李红莉, 李雪, 谭放, 孙玉娟, 夏善智. 黑龙江不同区域软枣猕猴桃种质资源的果实品质多样性评价[J]. 中国果树, 2024(10): 69-76.
- TAO Shuangyong, PANG Hongyang, WANG Peng, LI Hongli, LI Xue, TAN Fang, SUN Yujuan, XIA Shan zhi. Evaluation on fruit quality diversity of *Actinidia arguta* germplasm resources in different regions of Heilongjiang Province[J]. China Fruits, 2024(10): 69-76.

- [8] 陈焯铨, 庞柳, 陈小央, 郑婷, 向江, 魏灵珠, 吴江, 徐凯, 程建徽. 基于不同方法综合评价浙北平原地区 101 份鲜食葡萄果实品质[J]. 果树学报, 2024, 41(12): 2377-2388.  
CHEN Yeqi, PANG Liu, CHEN Xiaoyang, ZHENG Ting, XIANG Jiang, WEI Lingzhu, WU Jiang, XU Kai, CHENG Jianhui. Comprehensive evaluation of berry qualities of 101 table grape cultivars cultivated in northern Zhejiang plain based on different methods[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(12): 2377-2388.
- [9] 叶彦辉, 王秀, 柳羽, 韩艳英, 张西哲, 陶江, 周玉柳. 林芝市引进梨品种果实品质的综合分析与评价模型构建[J]. 果树学报, 2024, 41(10): 2117-2129.  
YE Yanhui, WANG Xiu, LIU Yu, HAN Yanying, ZHANG Xizhe, TAO Jiang, ZHOU Yuliu. Comprehensive analysis and construction of evaluation model of fruit quality of introduced pear varieties in Nyingchi city[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(10): 2117-2129.
- [10] 袁启凤, 王立娟, 龙世方, 颜培玲, 陈楠, 杨普秋, 粟睿, 史斌斌. 贵州从江黄金百香果果实品质评价[J]. 中国果树, 2024(7): 89-94.  
YUAN Qifeng, WANG Lijuan, LONG Shifang, YAN Peiling, CHEN Nan, YANG Puqiu, SU Rui, SHI Binbin. Fruit quality evaluation of golden passion fruit in Congjiang county, Guizhou province[J]. China Fruits, 2024(7): 89-94.
- [11] 史星雲, 徐珊珊, 柳丽萍, 陶新中, 钱文春. 基于主成分分析果桑品质评价模型的建立[J]. 中国果树, 2024(3): 54-59.  
SHI Xingyun, XU Shanshan, LIU Liping, TAO Xinzhong, QIAN Wenchun. Establishment of quality evaluation model of fruit mulberry based on principal component analysis[J]. China Fruits, 2024(3): 54-59.
- [12] 李群贞, 黄福琼, 朱礼乾, 袁梦, 龙勇, 王男麒, 凌丽俐, 淳长品. 四川省眉山市爱媛 28 和春见果实品质分析与评价[J]. 果树学报, 2024, 41(4): 651-664.  
LI Qunzhen, HUANG Fuqiong, ZHU Liqian, YUAN Meng, LONG Yong, WANG Nanqi, LING Lili, CHUN Changpin. Analysis and evaluation of fruit quality of Ehime 28 and Harumi in Meishan city, Sichuan province[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(4): 651-664.
- [13] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.  
WANG Xuekui, HUANG Jianliang. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [14] 段开行, 王晓玲, 毛永民, 王瑶, 任勇响, 任柳柳, 申连英. 酸枣种质资源果实数量性状遗传多样性分析[J]. 园艺学报, 2023, 50(12): 2568-2576.  
DUAN Kaihang, WANG Xiaoling, MAO Yongmin, WANG Yao, REN Yongxiang, REN Liuliu, SHEN Lianying. Analysis of genetic diversity of wild jujube germplasm resources based on quantitative characters[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(12): 2568-2576.
- [15] 郭晓蕾, 朱思潮, 翟旭峰, 王怀豫, 宝丽. 硫酸蒽酮法与硫酸苯酚法测定灵芝多糖含量比较[J]. 中华中医药学刊, 2010, 28(9): 2000-2002.  
GUO Xiaolei, ZHU Sichao, ZHAI Xufeng, WANG Huaiyu, BAO Li. Comparison of methods in determination of polysaccharide in *Ganoderma lucidum*[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2010, 28(9): 2000-2002.
- [16] 伦麒景, 罗珮妍. 苯酚硫酸法与硫酸蒽酮法测定灵芝孢子粉中灵芝多糖含量的比较[J]. 食品安全导刊, 2024(14): 89-91.  
LUN Qijing, LUO Peiyan. Comparison of phenol-sulfuric acid method and anthrone sulfate method for determining the content of *Ganoderma lucidum* polysaccharides in *Ganoderma lucidum* spore[J]. China Food Safety Magazine, 2024(14): 89-91.
- [17] 万嘉欣, 代涛, 骆国亮, 李丽, 武红霞, 许文天, 郑斌, 王松标, 罗聪, 梁清志. 杧果杂交群体糖酸品质性状的遗传分析[J]. 园艺学报, 2023, 50(6): 1203-1214.  
WAN Jiaxin, DAI Tao, LUO Guoliang, LI Li, WU Hongxia, XU Wentian, ZHENG Bin, WANG Songbiao, LUO Cong, LIANG Qingzhi. Genetic analysis of sugar and acid quality traits in mango hybrid population[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(6): 1203-1214.
- [18] 王文平. 植物样品中游离氨基酸总量测定方法的改进[J]. 北京农学院学报, 1998, 13(3): 9-13.  
WANG Wenping. Improvement of the method for determining the total amount of free amino acids in plant samples[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 1998, 13(3): 9-13.
- [19] 李静, 聂继云, 李海飞, 徐国峰, 王孝娣, 毋永龙, 王贞旭. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件[J]. 果树学报, 2008, 25(1): 126-131.  
LI Jing, NIE Jiyun, LI Haifei, XU Guofeng, WANG Xiaodi, WU Yonglong, WANG Zhenxu. On determination conditions for total polyphenols in fruits and its derived products by Folin-phenol methods[J]. Journal of Fruit Science, 2008, 25(1): 126-131.
- [20] 宋元清, 王艳平, 毛远菁. 分光光度法测定芦笋中总黄酮的含量[J]. 化学分析计量, 2005, 14(4): 52-53.  
SONG Yuanqing, WANG Yanping, MAO Yuanjing. Determination of total flavonoid in *Asparagus officinalis* Linn by spectrophotometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2005, 14(4): 52-53.
- [21] 赵慧芳, 王小敏, 阎连飞, 吴文龙, 李维林. 黑莓果实中花色苷的提取和测定方法研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(5): 176-179.  
ZHAO Huifang, WANG Xiaomin, LÜ Lianfei, WU Wenlong, LI Weilin. Study on the extraction and assay method of anthocyanin in blackberry fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(5): 176-179.
- [22] 马玉娥, 李静, 朱宁, 朱靖蓉, 刘河疆. 基于灰色关联度及因子分析法的新疆葡萄矿质营养评价[J]. 陕西林业科技, 2023, 51(2): 1-5.  
MA Yu'e, LI Jing, ZHU Ning, ZHU Jingrong, LIU Hejiang.

- Grey correlation degree and factor analysis of grape mineral nutrient elements in Xinjiang[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2023, 51(2): 1-5.
- [23] 蒋芯, 颜丽菊, 尤建林, 徐春燕, 张淑文, 梁森苗. 部分杨梅种质资源表型性状多样性分析[J]. 果树学报, 2023, 40(7): 1281-1293. JIANG Xin, YAN Liju, YOU Jianlin, XU Chunyan, ZHANG Shuwen, LIANG Senmiao. Phenotypic traits diversity analysis of some Chinese bayberry germplasm resources[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(7): 1281-1293.
- [24] 张淑文, 俞浙萍, 孙鹏, 武祥琪, 梁森苗, 郑锡良, 戚行江. 基于重测序的杨梅 InDel 标记开发与果实性状关联分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(6): 1890-1900. ZHANG Shuwen, YU Zheping, SUN Li, WU Xiangqi, LIANG Senmiao, ZHENG Xiliang, QI Xingjiang. Development of In-Del markers and association analysis of fruit traits in Chinese bayberry based on re-sequencing[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(6): 1890-1900.
- [25] 吴斌, 苏金生, 邢文婷, 宋顺, 马伏宁, 黄东梅. 不同品种百香果果实转色期糖酸品质性状评价[J]. 果树学报, 2024, 41(12): 2532-2542. WU Bin, SU Jinsheng, XING Wenting, SONG Shun, MA Funing, HUANG Dongmei. Evaluation of sugar and acid quality traits of different passion fruit varieties during coloration period[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(12): 2532-2542.
- [26] 张淑文, 梁森苗, 郑锡良, 任海英, 朱婷婷, 戚行江. 杨梅优株果实品质的主成分分析及综合评价[J]. 果树学报, 2018, 35(8): 977-986. ZHANG Shuwen, LIANG Senmiao, ZHENG Xiliang, REN Haiying, ZHU Tingting, QI Xingjiang. Principal component analysis and comprehensive evaluation of fruit quality in some advanced selections of Chinese bayberry[J]. Journal of Fruit Science, 2018, 35(8): 977-986.
- [27] 张夏南. 杨梅果实酚类物质提取物降糖活性及其相关机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. ZHANG Xianan. Anti-diabetic activity of phenolic-rich Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) fruits extracts and its mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [28] 郑小飞, 许鹏, 寿惠霞. 整合转录组与代谢组解析杨梅果色形成及其调控基因[J]. 植物生理学报, 2025, 61(10): 1378-1390. ZHENG Xiaofei, XU Peng, SHOU Huixia. Integrated transcriptome and metabolome analysis reveals the formation of fruit coloration and its regulatory genes in Chinese bayberry (*Myrica rubra*) [J]. Plant Physiology Journal, 2025, 61(10): 1378-1390.
- [29] 赵双, 黄颖宏, 郗红丽. 30 个杨梅品种果实品质分析与综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(3): 392-402. ZHAO Shuang, HUANG Yinghong, QI Hongli. Fruit quality analysis and comprehensive evaluation of 30 bayberry varieties[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(3): 392-402.
- [30] 游双红, 史文景, 陈元平, 魏召新, 周广文, 刘家红, 晏重西, 韩国辉. 不同类型果袋对紫金红 2 号桃果皮色泽和果实品质的影响[J]. 果树学报, 2025, 42(7): 1502-1517. YOU Shuanghong, SHI Wenjing, CHEN Yuanping, WEI Zhaoxin, ZHOU Guangwen, LIU Jiahong, YAN Chongxi, HAN Guohui. Effects of different types of fruit bags on peel color and fruit quality in Zijinhong No. 2 peach[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(7): 1502-1517.
- [31] 盛玮, 刘巧玲, 刘丽燕. 基于因子分析的 6 个大果沙枣新品种果实性状综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(9): 1800-1810. SHENG Wei, LIU Qiaoling, LIU Liyan. Comprehensive evaluation of fruit quality traits of six new *Elaeagnus moorcroftii* varieties based on factor analysis[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(9): 1800-1810.
- [32] 李俞昕, 曹贵寿, 黄军保, 张拥兵, 李卓, 王林, 吕英忠, 曹希娟. 树莓不同品种在山西的引种适应性及果实品质研究[J]. 果树学报, 2024, 41(12): 2518-2531. LI Yuxin, CAO Guishou, HUANG Junbao, ZHANG Yongbing, LI Zhuo, WANG Lin, LÜ Yingzhong, CAO Xijuan. A study on the introduction and growth characteristics and fruit quality of different varieties of raspberry in Shanxi[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(12): 2518-2531.
- [33] 慈志娟, 贾明, 隋秀奇, 刘聪, 于文英, 张今泽, 刘少青, 牟红梅, 段小娜. 20 个草莓品种在山东烟台的果实品质差异分析与综合评价[J]. 中国果树, 2024(8): 44-50. CI Zhijuan, JIA Ming, SUI Xiuqi, LIU Cong, YU Wenying, ZHANG Jinze, LIU Shaoqing, MU Hongmei, DUAN Xiaona. Analysis and comprehensive evaluation of fruit quality differences among 20 strawberry varieties in Yantai of Shandong[J]. China Fruits, 2024(8): 44-50.
- [34] 邱宏业, 徐宁, 侯延杰, 秦献泉, 刘冰浩, 房晨, 李冬波, 李鸿莉, 尤婧祎, 周泽秀. 广西 391 份实生龙眼种质资源果实品质性状分析[J]. 果树学报, 2025, 42(9): 1977-1990. QIU Hongye, XU Ning, HOU Yanjie, QIN Xianquan, LIU Binghao, FANG Chen, LI Dongbo, LI Hongli, YOU Jingyi, ZHOU Zexiu. Analysis of fruit characters of 391 seedling Longan germplasm resources in Guangxi[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(9): 1977-1990.
- [35] 魏江彤, 马志航, 田旭东, 李雪雯, 张志军, 李超, 马锋旺. 8 份苹果种质资源的果实品质评价[J]. 果树学报, 2025, 42(10): 2225-2239. WEI Jiangtong, MA Zhihang, TIAN Xudong, LI Xuewen, ZHANG Zhijun, LI Chao, MA Fengwang. Fruit quality evaluation on eight apple germplasm accessions[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(10): 2225-2239.
- [36] 候璇, 尹凯花, 聂国伟, 李凯, 张亚楠, 张晓萍, 田永强. 山西地区 39 份甜樱桃种质果实品质分析与综合评价[J]. 果树学报, 2025, 42(4): 752-764. HOU Xuan, YIN Kaihua, NIE Guowei, LI Kai, ZHANG Yanan, ZHANG Xiaoping, TIAN Yongqiang. Analysis and comprehensive evaluation of fruit quality of 39 sweet cherry accessions in Shanxi region[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(4): 752-764.