

欧李种质资源果实酚类物质分析及种质评价

邵郅胜, 张 薇, 孙 聪, 郭金丽*

(内蒙古农业大学 园艺与植物保护学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 以内蒙古地区 36 种欧李优系资源果实为试验材料, 分析欧李果实品质性状的 9 项指标含量差异及变异系数探究其多样性, 通过相关性、主成分、聚类分析对其品质性状进行综合评价, 筛选酚类品质优异的欧李优系资源, 为内蒙古欧李种质资源创新利用提供理论依据。结果表明, (1) 9 项品质性状指标变异系数为 5.91%~31.03%, 总黄酮最高, 可滴定酸最低。(2) 欧李果实 3 种酚类物质与总还原力、·OH 清除率、DPPH·清除率及果肉色泽多表现极显著正相关($P < 0.01$)。(3) 通过主成分分析提取的 3 个主成分累计贡献率为 73.54%, 分别为酚类因子、酸度因子和总抗氧化因子; 建立欧李种质综合评价数学模型: $F = [10 \times (46.213 \times F_1 + 15.132 \times F_2 + 12.197 \times F_3) / 73.542] + 60$, 综合得分最高为 MY37(84.53), 综合表现最差为 MY9(29.61)。(4) 系统聚类评价, 将 36 份优系资源聚为 4 大类, 其中第 I 类群综合表现最优, 分别为 MY5、MY36、MY37、MY38、MY41、MY47、MY50, 为酚类物质积累型, 多为红色果肉, 酸含量适中, 同时这 7 份优系资源综合得分均在前 10 位, 此类群可作为高酚类品质欧李种质资源。

关键词: 欧李; 果实; 酚类物质; 种质评价

中图分类号: S662.5 文献标志码: A

Fruit Phenolic Content Analysis and Germplasm Evaluation of *Cerasus humilis* Germplasm Resources

SHAO Zhisheng, ZHANG Wei, SUN Cong, GUO Jinli*

(College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In this study, 36 *Cerasus humilis* resources in Inner Mongolia were selected as experimental materials, and the content differences and coefficient of variation of 9 indexes of *C. humilis* fruit quality traits were analyzed for exploring their diversity. The quality traits were comprehensively evaluated through correlation, principal component and cluster analysis, and the *C. humilis* superior resources with excellent phenolic quality were screened. This study provided theoretical basis for the innovative utilization of germplasm resources of *C. humilis* in Inner Mongolia. The results show that: (1) The variation coefficients of 9 quality traits ranged from 5.91% to 31.03%, the highest was total flavone, and the lowest was titratable acid. (2) The three phenolic contents in *C. humilis* fruits were significantly positively correlated with total reducing power, ·OH clearance rate, DPPH· clearance rate and flesh color ($P < 0.01$). (3) The cumulative contribution rate of the three principal components extracted by principal component analysis was 73.54%, which were phenolic factors, acidity factors and total antioxidant factors. The mathematical

收稿日期: 2022-10-28; 修改稿收到日期: 2023-04-10

基金项目: 内蒙古科技成果转化专项(2019CG067); 内蒙古自治区直属高校科技领军人才和创新团队建设专项(BR22-11-11); 品种选育专项(YZGC2017019)

作者简介: 邵郅胜(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事果树生理生态研究。E-mail: 1309750685@qq.com

* 通信作者: 郭金丽, 教授, 博士生导师, 主要从事寒旱地区特色优质果树资源创新与开发应用研究。E-mail: guojinli1111@163.com

model for comprehensive evaluation of *C. humilis* germplasm was established as follows: $F = [10 \times (46.213 \times F_1 + 15.132 \times F_2 + 12.197 \times F_3) / 73.542] + 60$, the highest comprehensive score was MY37 (84.53), and the worst comprehensive performance was MY9 (29.61). (4) In the systematic cluster evaluation, the 36 *C. humilis* superior resources were grouped into four categories, among which group I had the best comprehensive performance, which were MY5, MY36, MY37, MY38, MY41, MY47 and MY50, which were the accumulation type of phenolic content, mostly red fruit meat and moderate acid content. Meanwhile, the comprehensive scores of these 7 superior resources were all among the top 10. This group can continue to breed new varieties of *C. humilis* with high phenolic quality.

Key words: *Cerasus humilis*; fruit; phenolic content; germplasm evaluation

欧李(*Cerasus humilis*)属蔷薇科樱桃属极矮生灌木,为我国特有野生果树资源^[1],主要分布于内蒙古、山西、辽宁、河北等北方地区。欧李果实香气浓郁、风味独特,同时富含酚类物质、氨基酸、维生素和Ca、Fe、Se等,备受人们关注^[2]。欧李资源丰富,具有抗旱、抗寒、耐瘠薄,综合适应性强的特点,适用于寒旱地区经济林建设及生态修复治理^[3-4]。欧李果实鲜食加工俱佳,可深加工成果酒、果汁、果酱、红色素等系列产品^[5]。此外,欧李仁可入药^[6],叶可制茶^[7]。欧李集果、种子、叶等综合开发利用于一身,具有极高的营养价值、药用价值和生态价值,开发前景广阔^[8]。酚类物质是一类重要的果蔬次生代谢物质,广泛存在于植物组织中,可有效抑制细菌、真菌等病原体的侵染,在抵抗病原菌方面发挥重要作用^[9-10]。酚类物质对果实色泽、口感风味、产品褐变等方面^[11-12]具有重要影响;在人类健康方面具有抗氧化、清除自由基、预防心血管疾病、延缓机体衰老等多种生理活性和功能^[13-18]。

本课题组^[19]初步研究表明,欧李果实中酚类物质含量丰富,酚类物质及其抗氧化特性是欧李果实品质的重要特征之一,研究了解欧李果实酚类物质及抗氧化的特性特征,可为欧李果实品质提升、品种选育等进一步研究应用打下基础。内蒙古高原作为中国欧李集中分布区域之一,具有丰富多样的欧李种质资源。本课题组多年来进行内蒙古地区欧李种质资源收集与研究,从丰富多样的内蒙古欧李种质资源中初步筛选出部分优系资源开展进一步深入研究。在前期工作的基础上,本试验以内蒙古36种欧李优系资源为材料,对果实酚类物质、抗氧化活性、酸度、果肉色4个品质性状的9个指标,利用主成分分析、相关性分析、综合聚类分析等相结合的方法,进行种质评价,探讨欧李果实品质性状之间的联系,同时为内蒙古欧李优异资源筛选及进一步研究和应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

36种欧李优系资源来源于内蒙古农业大学欧李科研基地(40°56′19.48″N, 111°57′34.95″E)资源圃,通过实生选种方式于2019年于资源圃内选出优良单株,之后通过绿枝扦插无性扩繁形成36份内蒙古欧李优系资源(以MY1-52表示)。每份资源各选取30株进行标记,10株为1次重复,重复3次。2021年7月下旬至9月下旬于36种欧李优系资源果实完熟期分别于结果枝的上、中、下部选择果个均匀一致、无病虫害、无机械伤的果实组成样本,洗净晾干后液氮速冻,于-80℃冰箱中保存待测。

1.2 提取液制备

取适量欧李果实去核后切碎,称取3.0g放入研钵,以0.1%盐酸的40%乙醇水溶液做提取液,加50mL提取液磨碎,超声波清洗仪25℃提取1h,反复提取3次,过滤定容至50mL量瓶,提取液5000r/min离心10min,上清液即为果实提取液,-20℃储存待测。3次重复。

1.3 测定方法

1.3.1 果肉色

取欧李果实纵切,目测将果肉颜色归为三大类,浅红、桔黄、红,并赋值(浅红=1,桔黄=2,红=3)。

1.3.2 酚类物质

总酚、总黄酮、原花青素含量参照邵郅胜^[20]试验方法进行测定。

1.3.3 抗氧化活性

抗氧化活性4个指标均参照邵郅胜^[20]的试验方法,略有改动。

总抗氧化:取1mL提取液、6mL铁离子还原能力(FRAP)工作液、0.6mL蒸馏水,混合摇匀后于37℃水浴20min。在593nm处,用无水乙醇调零,测吸光度。标准曲线以FeSO₄溶液制作,用无水乙醇配制FeSO₄溶液(浓度梯度200~6000μg/

mL),测定标准系列溶液的吸光值,做标准曲线,以无水乙醇代替样品做空白,根据吸光值,求得相应 Fe^{2+} 当量定义FRAP值 $[\text{CVN}/1000M, C$ 为样品减去空白吸光度代入 Fe^{2+} 当量($\mu\text{mol/L}$), V 为待测液总体积(L), N 为样品稀释倍数, M 为样品质量(g)]。

总还原力:依次加入 2.5 ml pH 7.0 磷酸盐缓冲液、100 μL 果实提取液、2.5 mL 30.37 mmol/L 铁氰化钾,混匀,50 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴 20 min,加入 2.5 mL 0.6 mol/L 三氯醋酸溶液终止反应。反应体系中取 2.5 mL 上清液,加 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 3.70 mmol/L FeCl_3 溶液,反应 10 min 后于 700 nm 处测定吸光值;以蒸馏水代替提取液作空白。

$\cdot\text{OH}$ 清除率:依次加入 1 mL 9 mmol/L FeSO_4 、1 mL 9 mmol/L 水杨酸乙醇溶液、400 μL 果实提取液,混匀,加入 2 mL 8 mmol/L H_2O_2 、4.6 mL 蒸馏水,混匀,37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 60 min 后取出冷却,于 510 nm 处测定吸光值;以蒸馏水代替提取液做空白,蒸馏水代替 H_2O_2 作为对照。按 $\cdot\text{OH}$ 清除率 = $[A_{\text{空白}} - (A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}})]/A_{\text{空白}} \times 100\%$ 计算。

DPPH \cdot 清除率:依次加入 2 mL 果实提取液、2 mL 0.1 mg/mL DPPH 甲醇溶液,混匀,避光反应 60 min,于 517 nm 处测吸光值;以甲醇代替提取液作对照。按 DPPH \cdot 清除率 = $(A_{\text{对照}} - A_{\text{样品}})/A_{\text{对照}} \times 100\%$ 计算。

1.3.4 可滴定酸

可滴定酸含量采用滴定法测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 统计软件进行数据分析处理,利用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析、主成分分析及系统聚类。

2 结果与分析

2.1 欧李优系资源果实品质性状的变异分析

欧李果实酚类物质、抗氧化活性、酸度及果肉色的差异和多样性分析见表 1。果实总酚含量变幅为 555.33~1 090.89 mg/(100 g),最大值为最小值的 1.96 倍,均值为 774.35 mg/(100 g),变异系数为 16.80%;总黄酮含量变幅为 191.56~679.33 mg/(100 g),最大值为最小值的 3.55 倍,变异系数为 31.03%;原花青素含量变幅为 222.73~483.94 mg/(100 g),最大值为最小值的 2.17 倍,变异系数为 19.25%。果实总抗氧化活性变幅为 9.96~22.09 $\mu\text{mol/g}$,最大值为最小值的 2.22 倍,均值为 14.70 $\mu\text{mol/g}$,变异系数为 22.12%;总还原力在 18.27%~37.70% 范围内变化,最大值为最小值的

2.06 倍,变异系数为 17.33%; $\cdot\text{OH}$ 清除率变幅为 38.52%~50.43%,均值为 45.31%,变异系数为 6.66%;DPPH \cdot 清除率在 28.49%~63.53% 范围内变化,最大值为最小值的 2.23 倍,变异系数为 18.96%。果实可滴定酸含量变幅为 1.31%~1.79%,变异系数小,仅为 5.91%;而果肉色变异系数则高达 30.29%。不同欧李资源类型之间果实的酚类物质含量、抗氧化活性、酸度及果肉色均有不同程度的差异。3 种酚类物质中,总黄酮含量的变异程度最高,原花青素含量次之,总酚含量最低;4 种抗氧化活性中,变异程度由高到低的顺序依次为总抗氧化活性、DPPH \cdot 清除率、总还原力及 $\cdot\text{OH}$ 清除率。可滴定酸含量变异系数最小(5.91%)。果肉色划分为红、桔黄、浅红三大类,变异系数高达 30.29%。由上可见,36 份欧李优系资源多个品质性状指标均具有丰富的遗传多样性,不同优系资源间性状差异较大,适合进行优异种质分析与评价。

2.2 欧李优系资源品质性状间的相关性分析

36 份欧李优系资源果实酚类物质含量、抗氧化活性、酸度及果肉色 4 个品质性状的 9 项指标相关性分析表明:果实总酚、总黄酮、原花青素三者间均表现为极显著正相关,其中总酚与总黄酮相关程度(0.865)最高。果实 4 项抗氧化指标中,总还原力、 $\cdot\text{OH}$ 清除率和 DPPH \cdot 清除率三者间均表现为极显著正相关,其中还原力与 $\cdot\text{OH}$ 清除率相关程度(0.539)最高;而总抗氧化活性与其他三项抗氧化指标的相关性均不显著。果实总酚和总黄酮含量均与总还原力、 $\cdot\text{OH}$ 清除率和 DPPH \cdot 清除率存在显著正相关,相关程度表现为 DPPH \cdot 清除率 > 总还原力 > $\cdot\text{OH}$ 清除率;原花青素含量与总还原力、 $\cdot\text{OH}$ 清除率和 DPPH \cdot 清除率均表现为极显著正相关,与总抗氧化表现显著正相关,相关程度表现为总还原力 > $\cdot\text{OH}$ 清除率 > DPPH \cdot 清除率 > 总抗氧化。果实可滴定酸含量仅与总黄酮含量呈显著负相关,与其他指标相关性不显著。果肉颜色与总酚含量表现极显著正相关,与总黄酮、原花青素及 DPPH \cdot 清除率均呈显著正相关。从酚类物质与抗氧化活性的相关程度来看,3 种酚类物质与总抗氧化活性、总还原力、 $\cdot\text{OH}$ 清除率三者的相关系数均表现为原花青素 > 总酚 > 总黄酮;与 DPPH \cdot 清除率的相关系数表现为总酚 > 总黄酮 > 原花青素。综上所述,欧李果实各酚类物质含量之间关联紧密,同时抗氧化活性指标、可滴定酸含量及果肉色三者基本均与欧李果实各酚类物质含量存在不同程度的相关性(表 2)。

表 1 欧李优系资源果实品质性状分析
Table 1 Analysis on fruit quality characters of *Cerasus humilis* superior lines

优系编号 Superior line ID	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
MY1	920.89±15.24	411.56±8.83	340.55±10.28	18.96±0.56	23.60±0.38	44.68±4.07	53.02±0.49	1.70±0.04	3
MY2	736.44±15.75	417.11±23.65	311.40±4.46	16.02±0.66	21.87±1.67	41.96±1.62	41.54±0.34	1.60±0.08	3
MY3	813.11±85.14	501.56±42.36	318.74±34.94	19.20±2.23	24.47±1.10	48.11±1.33	50.56±1.40	1.55±0.10	3
MY4	853.11±60.77	550.44±12.62	368.43±29.92	21.85±0.21	23.83±2.97	42.81±0.36	51.60±0.47	1.67±0.13	2
MY5	929.78±29.12	608.22±26.54	397.78±4.55	19.35±1.58	37.70±3.70	45.43±2.78	52.27±0.37	1.59±0.05	2
MY6	655.33±52.39	339.33±20.12	305.32±37.16	17.52±0.33	23.30±0.25	40.57±1.46	46.09±1.36	1.65±0.01	1
MY7	726.44±39.77	332.67±19.65	332.79±42.96	16.11±0.99	24.17±2.30	43.60±2.31	35.27±0.34	1.70±0.07	3
MY8	608.67±23.33	269.33±15.78	295.05±6.45	13.06±2.43	32.50±0.79	47.63±1.68	38.40±7.78	1.75±0.01	2
MY9	558.67±35.12	191.56±12.36	230.06±7.65	13.42±0.16	18.27±1.29	38.52±2.86	31.99±1.91	1.62±0.08	1
MY10	555.33±36.06	231.56±14.56	222.73±44.98	13.43±0.25	18.53±0.55	40.91±1.96	28.49±0.40	1.63±0.04	2
MY11	740.89±85.53	398.22±10.26	362.98±6.96	17.16±3.39	26.63±2.30	47.03±2.97	43.77±4.08	1.72±0.06	3
MY12	655.33±56.86	353.78±19.85	342.01±9.52	15.03±0.71	25.10±3.05	40.91±2.48	39.08±2.29	1.63±0.03	3
MY13	846.44±50.15	577.11±18.46	341.38±46.30	13.50±0.04	25.43±1.03	48.38±0.87	43.62±3.08	1.67±0.05	2
MY14	712.00±51.75	350.44±19.98	352.29±26.86	13.12±0.04	30.93±0.61	46.81±1.91	41.46±2.25	1.70±0.06	2
MY15	613.11±56.40	263.78±15.34	300.50±11.34	18.19±0.31	23.47±0.35	48.11±0.79	40.57±0.85	1.66±0.09	2
MY16	664.22±36.72	297.11±20.65	370.94±13.62	19.58±0.34	28.67±0.50	45.58±1.38	53.32±1.71	1.65±0.02	3
MY17	790.89±44.76	520.44±22.36	381.64±18.78	22.09±0.02	32.17±1.08	47.89±1.42	38.40±1.81	1.75±0.07	3
MY18	752.00±16.67	430.44±24.89	243.69±11.08	12.48±0.59	23.53±0.35	44.87±0.64	44.52±0.67	1.69±0.10	3
MY19	715.33±33.83	370.44±21.50	279.54±2.54	10.35±0.13	22.57±0.81	45.02±0.68	32.44±1.91	1.69±0.03	1
MY20	650.89±21.69	264.89±20.01	255.22±10.47	10.41±0.24	21.33±0.40	44.42±2.95	34.97±1.44	1.72±0.07	3
MY21	758.67±69.84	457.11±23.41	346.21±32.62	12.60±1.18	22.93±0.76	48.45±1.15	45.26±1.68	1.74±0.03	1
MY22	932.00±32.15	551.56±13.25	244.74±6.90	12.50±0.53	27.07±0.38	43.97±0.75	52.72±1.57	1.64±0.02	2
MY25	944.22±58.34	626.00±39.65	256.90±39.46	11.68±0.24	24.40±0.40	44.90±2.02	60.40±2.93	1.69±0.04	3
MY29	762.00±10.00	533.78±44.52	298.20±9.67	12.49±0.28	23.90±2.55	45.99±1.23	48.62±0.85	1.70±0.05	2

续表 1 Continued table 1

优系编号 Superior line No	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
MY30	718.67±84.13	362.67±21.71	299.66±21.11	11.35±0.71	25.90±0.42	41.06±1.31	46.16±1.90	1.71±0.03	3
MY32	769.78±52.10	532.67±33.26	324.82±9.87	11.68±0.72	24.83±1.50	43.26±0.97	40.64±1.15	1.70±0.05	3
MY36	1 090.89±45.38	679.33±23.42	454.59±46.12	11.46±0.42	31.83±0.25	50.43±0.52	55.56±0.68	1.69±0.07	3
MY37	855.33±25.17	569.33±22.21	483.94±25.29	15.05±0.64	31.60±2.48	50.17±0.81	61.30±1.40	1.79±0.07	3
MY38	786.44±20.09	549.33±13.65	425.87±7.23	12.94±1.14	25.90±0.40	50.43±0.53	63.53±2.42	1.72±0.03	3
MY40	826.44±8.39	642.60±55.08	351.03±10.98	14.15±0.53	25.10±1.47	40.80±1.35	46.83±5.08	1.31±0.03	3
MY41	938.67±17.32	640.40±55.01	413.08±27.79	14.69±0.11	33.10±1.51	47.11±1.24	43.55±7.50	1.37±0.06	3
MY46	714.22±6.94	554.89±22.39	314.34±16.27	12.03±0.70	25.63±1.01	44.83±0.62	41.31±0.93	1.52±0.04	2
MY47	973.11±43.99	604.89±48.57	417.27±52.02	15.47±0.01	33.03±0.80	48.60±2.75	57.79±1.06	1.59±0.02	3
MY50	976.44±49.01	559.33±13.93	458.36±47.66	17.37±2.51	36.17±2.63	46.55±1.34	55.48±1.18	1.55±0.01	3
MY51	577.56±24.57	200.44±19.14	327.34±31.18	12.93±0.33	25.40±0.52	45.80±0.73	45.64±1.78	1.72±0.11	1
MY52	753.11±50.48	572.67±58.97	322.52±24.07	9.96±0.68	27.00±1.10	45.73±1.09	36.99±0.56	1.64±0.03	2
平均值 Mean	774.35	453.25	335.89	14.70	26.44	45.31	45.64	1.65	2.42
最大值 Max	1 090.89	679.33	483.94	22.09	37.70	50.43	63.53	1.79	3.00
最小值 Min	555.33	191.56	222.73	9.96	18.27	38.52	28.49	1.31	1.00
标准差 SD	130.07	140.64	64.67	3.25	4.58	3.02	8.65	0.10	0.73
变异系数 CV/%	16.80	31.03	19.25	22.12	17.33	6.66	18.96	5.91	30.29

注: $X_1 \sim X_9$ 分别表示总酚(mg/100 g)、总黄酮(mg/100 g)、原花青素(mg/100 g)、总抗氧化($\mu\text{mol/g}$)、总还原力(%)、OH 清除率(%)、DPPH·清除率(%)、可滴定酸(%)、果肉色。下同。

Notes: $X_1 \sim X_9$ represent total phenolic (mg/100 g), total flavonoids (mg/100 g), proanthocyanidins (mg/100 g), total antioxidants ($\mu\text{mol/g}$), total reducing power (%), OH clearance (%), DPPH· clearance (%), titratable acid content (%), flesh color. The same as below.

表 2 欧李果实不同品质性状相关性分析

Table 2 Correlation analysis of different quality characters of *Cerasus humilis* fruits

指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_1	1								
X_2	0.865**	1							
X_3	0.577**	0.535**	1						
X_4	0.126	0.010	0.351 [°]	1					
X_5	0.565**	0.489**	0.729**	0.250	1				
X_6	0.424*	0.390*	0.595**	0.044	0.539**	1			
X_7	0.685**	0.587**	0.586**	0.214	0.449**	0.465**	1		
X_8	-0.230	-0.355*	-0.091	-0.085	-0.116	0.264	0.006	1	
X_9	0.435**	0.371*	0.373 [°]	0.187	0.292	0.185	0.359*	-0.151	1

注：“*”表示相关性显著($P < 0.05$)；“**”表示相关性极显著($P < 0.01$)。

Note: “*” means the correlation is significant ($P < 0.05$); “**” means the correlation is extremely significant ($P < 0.01$).

2.3 欧李优系资源品质性状间的主成分分析

基于 36 份欧李优系资源 9 项指标的主成分分析(表 3),由表 3 可知,共划分 3 个主成分($F_1 \sim F_3$),贡献率分别为 46.21%、15.13%和 12.20%,累计贡献率达 73.54%;同时 3 个主成分的特征值均大于 1,其中 F_1 的提取特征值为 4.159。提取的 3 个主成分可反映优系材料品质性状 73.54%的信息,可作为评价欧李优系资源品质性状的重要指标。由表 4 可知, F_1 主要由载荷因子分别为 0.870、0.811、0.843、0.776、0.643、0.781 和 0.539 的总酚、总黄酮、原花青素、总还原力、 $\cdot\text{OH}$ 清除率、DPPH \cdot 清除率和果肉色决定,称为酚类因子; F_2 主要由载荷因子为 0.873 的可滴定酸含量决定,称为酸度因子; F_3 主要由载荷因子为 0.898 的总抗氧化活性决定,称为总抗氧化因子。综上所述,总酚、总黄酮、原花青素、总抗氧化、总还原力、 $\cdot\text{OH}$ 清除率、DPPH \cdot 清除率、酸度和果肉色可作为评价欧李优系资源品质性状的重要指标。

表 3 主成分特征值、贡献率及累计贡献率

Table 3 Principal component eigenvalue, contribution rate and cumulative contribution rate

主因子 Principal factor	提取载荷平方和 Extract the sum of loads squared		
	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
F_1	4.159	46.213	46.213
F_2	1.362	15.132	61.345
F_3	1.098	12.197	73.542

表 4 因子载荷矩阵

Table 4 Factor load matrix

指标 Index	主成分 Principal component		
	F_1	F_2	F_3
X_1	0.870	-0.202	-0.226
X_2	0.811	-0.318	-0.340
X_3	0.843	0.176	0.209
X_4	0.291	0.001	0.898
X_5	0.776	0.145	0.131
X_6	0.643	0.584	-0.173
X_7	0.781	0.106	-0.068
X_8	-0.186	0.873	-0.077
X_9	0.539	-0.230	0.154

2.4 品质性状的主成分得分和综合评价

根据主成分分析中提取的 3 个主成分进行得分综合评价,先建立欧李种质综合评价数学模型: $F = [10 \times (46.213 \times F_1 + 15.132 \times F_2 + 12.197 \times F_3) / 73.542] + 60$,通过公式计算欧李种质品质性状的综合得分,由高到低进行优良排序,综合得分越高,欧李优系种质综合性状越好,结果见表 5。排名在前 10 的欧李优系由高到底分别为 MY37、MY36、MY50、MY47、MY5、MY38、MY17、MY41、MY16 和 MY1,综合得分范围是 66.45~84.53。上述 10 个优系中有 6 个总酚含量均在 900 mg/(100 g)以上;8 个优系总黄酮含量在 500 mg/(100 g)以上;6 个优系原花青素含量在 400 mg/(100 g)以上;抗氧化力突出,同时果肉色基本均为红色。排名前 10 的欧李优系综合表现优异(表 6)。排名在后 10 的优

系资源综合得分范围是 29.61~52.46,由低到高分别为 MY9、MY10、MY19、MY20、MY6、MY51、MY30、MY12、MY18、MY2。此部分资源酚类物质含量较低,抗氧化能力较差,果肉色大多为浅红和桔黄,综合表现差。

表 5 欧李优系资源的主成分得分、综合得分及排序

Table 5 Principal component score, comprehensive score and superior ranking of *Cerasus humilis* superior resources

优系排序 Superior order	优系编号 Superior line ID	得分 Score		综合得分 Composite score	
		F ₁	F ₂	F ₃	F
1	MY37	3.27	2.01	-0.08	84.53
2	MY36	3.89	0.64	-1.65	83.03
3	MY50	3.53	-0.52	0.82	82.50
4	MY47	3.33	-0.14	-0.15	80.38
5	MY5	2.69	-0.29	1.01	77.98
6	MY38	2.24	1.37	-0.79	75.59
7	MY17	1.40	1.10	2.02	74.40
8	MY41	2.68	-2.26	-0.04	72.13
9	MY16	0.40	0.58	2.04	67.08
10	MY1	0.77	-0.01	0.98	66.45
11	MY3	1.00	-0.67	0.91	66.44
12	MY4	0.67	-0.35	1.55	66.05
13	MY11	0.28	0.84	0.91	64.97
14	MY13	0.55	0.41	-0.99	62.64
15	MY25	1.02	-0.56	-1.77	62.32
16	MY14	-0.31	1.15	-0.08	60.27
17	MY22	0.20	-0.70	-1.39	57.51
18	MY21	-0.64	1.50	-1.12	57.22
19	MY40	0.78	-3.98	-0.04	56.65
20	MY29	-0.36	0.36	-1.12	56.64
21	MY8	-1.21	1.82	0.08	56.25
22	MY32	-0.40	-0.39	-0.82	55.34
23	MY15	-1.48	1.02	1.23	54.86
24	MY7	-1.11	0.02	0.91	54.56
25	MY52	-0.46	-0.22	-1.55	54.09
26	MY46	-0.51	-1.18	-0.86	52.97
27	MY2	-0.98	-1.21	0.67	52.46
28	MY18	-0.98	-0.20	-0.73	52.19
29	MY12	-1.25	-0.79	0.92	52.05
30	MY30	-1.13	-0.25	-0.41	51.73
31	MY51	-2.10	1.70	0.02	50.31
32	MY6	-2.03	-0.18	1.00	48.52
33	MY20	-2.48	0.30	-0.68	43.89
34	MY19	-2.47	0.52	-1.34	43.35
35	MY10	-4.13	-0.69	0.27	33.06
36	MY9	-4.66	-0.77	0.28	29.61

2.5 欧李优系资源的聚类分析及评价

采用欧氏距离法对标准化后的 9 个指标进行系统聚类分析,最终将 36 份欧李优系资源划分为 4 大类(图 1)。

由表 7 和表 8 可知,第 I 类群中的优系共 7 个,分别为 MY5、MY36、MY37、MY38、MY41、MY47、MY 50,占比 19.44%,均在综合得分排名的前 10 位之列;第 II 类群中的优系最少,仅 1 个,为 MY40。

第 I、II 类群均具有各酚类物质含量高及综合抗氧化能力强的特点,果肉色多为红色,主要区别在于第 II 类群的 MY40,可滴定酸含量更低,为 1.31%。第 III 类群中的优系资源共 25 个,占比最高,为 69.44%,此类群具有各酚类物质含量及综合抗氧化能力适中,可滴定酸含量偏高的特点。第 IV 类群中的优系资源共 3 个,分别为 MY6、MY9、MY10,占比 8.33%,此类群具有各酚类物质含量偏低、综合抗氧化能力较弱及可滴定酸含量高的特点,果肉色为浅红和桔黄。

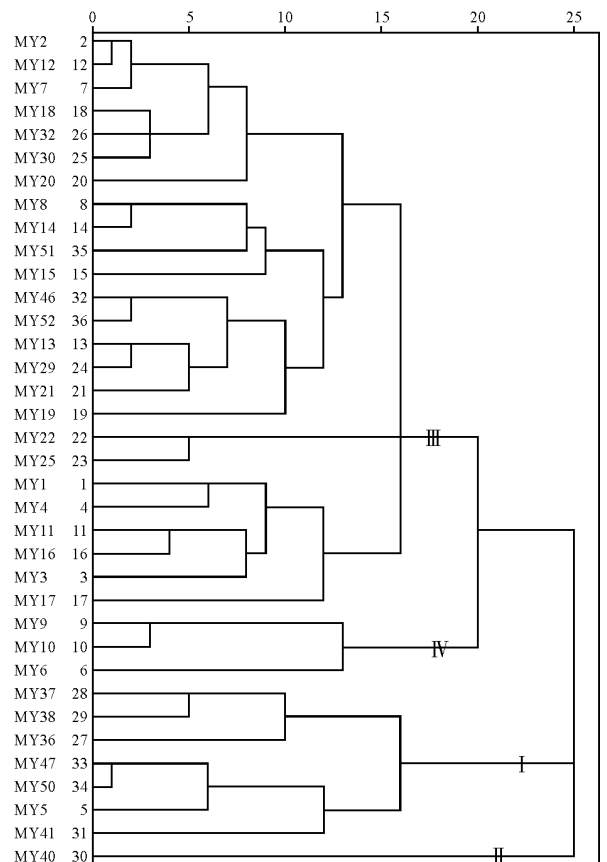


图 1 36 种欧李优系资源系统聚类谱系图

Fig. 1 Cluster pedigree of 36 *Cerasus humilis* superior resources

表 6 排名前 10 的欧李优系资源各指标信息

Table 6 The index information of the top 10 *Cerasus humilis* superior resources

优系编号 Superior line ID	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
MY37	855.33	569.33	483.94	15.05	31.60	50.17	61.30	1.79	3.00
MY36	1 090.89	679.33	454.59	11.46	31.83	50.43	55.56	1.69	3.00
MY50	976.44	559.33	458.36	17.37	36.17	46.55	55.48	1.55	3.00
MY47	973.11	604.89	417.27	15.47	33.03	48.60	57.79	1.59	3.00
MY5	929.78	608.22	397.78	19.35	37.70	45.43	52.27	1.59	2.00
MY38	786.44	549.33	425.87	12.94	25.90	50.43	63.53	1.72	3.00
MY17	790.89	520.44	381.64	22.09	32.17	47.89	38.40	1.75	3.00
MY41	938.67	640.44	413.08	14.69	33.10	47.11	43.55	1.37	3.00
MY16	664.22	297.11	370.94	19.58	28.67	45.58	53.32	1.65	3.00
MY1	920.89	411.56	340.55	18.96	23.60	44.68	53.02	1.70	3.00

表 7 3 类欧李优系资源各指标均值差异性分析

Table 7 Analysis of mean difference of three kinds of *Cerasus humilis* superior resources

分类 Classification	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
I	935.81	601.56	435.84	15.19	32.76	48.39	55.64	1.61	2.86
II	826.44	642.67	351.03	14.15	25.10	40.80	46.83	1.31	3.00
III	749.20	428.04	317.27	14.57	25.49	45.27	44.01	1.68	2.40
IV	589.78	254.15	252.70	14.79	20.03	40.00	35.52	1.64	1.33

表 8 36 种欧李优系资源聚类结果

Table 8 Clustering results of 36 *Cerasus humilis* superior resources

分类 Classification	优系编号 Superior line ID
I	MY5、36、37、38、41、47、50
II	MY40
III	MY1、2、3、4、7、8、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、25、29、30、32、46、51、52
IV	MY6、9、10

3 讨论

实生选种是对种子实生繁殖后产生的变异进行选择,从而筛选出性状优异的优良种质资源,是植物优良种质资源筛选及新品种培育的主要方式^[21]。欧李具有早果特性,实生选种亦作为欧李优良种质资源筛选及进一步新品种选育的常用途径^[22]。遗传多样性是欧李新品种选育的基础,本研究对实生选种选出的 36 份欧李优系资源果实酚类物质、抗氧化性、酸度及果肉色 4 类品质性状的 9 个指标变异系数及相关性进行分析,结果表明,9 个指标变异系

数范围为 5.91%~31.03%,36 份优系资源品质性状间存在丰富的遗传多样性,其中总黄酮和总抗氧化的变异系数较高。3 种酚类物质均与总还原力、DPPH·清除率、·OH 清除率和果肉色存在正相关关系,与酸度的相关系数均为负值,三类品质性状与酚类物质均存在着紧密的联系。牛帅科等^[23]在葡萄上,严娟等^[24]在桃果肉上也发现果肉色与酚类物质有类似的关系。综上,研究的 9 项指标可以作为欧李优良种质筛选及品种选育的重要参考指标。

通过主成分分析法将 9 项品质性状指标转化为彼此独立的 3 个指标,分别为酚类因子、酸度因子和总抗氧化因子。结合相关性分析结果,总抗氧化活性与酚类物质相关性较其他 3 个抗氧化指标较差,同时又被划分为独自的主成分,可知总抗氧化受果实中其他物质影响较大,如维生素 C 等。基于提取的 3 个主成分及建立的欧李种质综合评价数学模型: $F = [10 \times (46.213 \times F_1 + 15.132 \times F_2 + 12.197 \times F_3) / 73.542] + 60$,对 36 份欧李优系进行综合得分评价。排名前 10 的优系资源酚类物质含量高,抗氧化能力强,果肉多为红色;后 10 位的优系资源酚类物质含量低,抗氧化能力较弱,果肉多为桔黄和浅

红色,不宜作为高酚类欧李种质资源。

本试验以 9 项品质指标为参数通过系统聚类将 36 份优系资源聚为 4 大类:第 I 类群包括 MY5、MY36、MY37、MY38、MY41、MY47、MY50,为酚类物质积累型,多为红果肉,此类群可作为高酚类欧李种质资源及进行后续研究及应用;第 II 类群为 MY40,与前一类群主要区别在于酸度,MY40 可滴定酸含量更低,为 1.31%,可作为特异的低酸高酚种质资源进行后续研究;第 III 类群中的优系资源共 25 个,此类群具有各酚类物质含量及综合抗氧化能力适中,可滴定酸含量偏高的特点;第 IV 类群包括 MY6、MY9、MY10,此类群酚类物质含量低,抗氧化能力弱,可滴定酸含量高,果肉色多为浅红和桔黄,此类群不宜作为高酚类欧李种质资源,但可作为高酸低酚种质资源用于其他研究。

4 结 论

本研究差异性及相关性分析表明,36 份欧李优系资源的 4 类品质性状联系紧密,遗传多样性丰富。主成分分析将 9 个品质性状指标归为累计贡献率达 73.54% 的 3 个主成分,分别为酚类因子、酸度因子和总抗氧化因子。通过建立的种质综合评价数学模型,筛选出酚类品质优异的优系资源 10 份,分别为 MY37、MY36、MY50、MY47、MY5、MY38、MY17、MY41、MY16 和 MY1。通过系统聚类分析,最终聚为 4 大类,第 I 类群包括 7 份优系资源,分别为 MY5、MY36、MY37、MY38、MY41、MY47、MY50,为酚类物质积累型,多为红果肉,同时这 7 份优系资源综合得分均在前 10 位,此类群可作为高酚类品质欧李种质资源。

参考文献:

- [1] 王鹏飞,曹琴,何永波,等. 欧李果实发育期糖和酸组分及其含量的动态变化特性[J]. 西北植物学报, 2011, **31**(7): 1 411-1 416.
WANG P F, CAO Q, HE Y B, *et al.* Composition and dynamic changes of sugars and acids in Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis* Bunge) during fruit development[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31**(7): 1 411-1 416.
- [2] 李卫东,李欧,和银霞,等. 基于 TXRF 法的欧李果肉中营养元素特征分析[J]. 食品科学, 2015, **36**(4): 164-167.
LI W D, LI O, HE Y X, *et al.* Analysis of nutrient element characteristics of flesh of Chinese dwarf cherry based on total reflection X-ray fluorescence method[J]. *Food Science*, 2015, **36**(4): 164-167.
- [3] 李学强,李秀珍. 盐碱胁迫对欧李叶片部分生理生化指标的影响[J]. 西北植物学报, 2009, **29**(11): 2 288-2 293.
LI X Q, LI X Z. Some physiological-biochemical characteristics of *Cerasus humilis* (Bge.) sok under salt-alkali stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, **29**(11): 2 288-2 293.
- [4] 吴亚芳,李晓艳,郭金丽,等. 欧李适应非生物胁迫的研究进展及应用前景[J]. 特产研究, 2022, **44**(1): 104-110.
WU Y F, LI X Y, GUO J L, *et al.* Research progress and application prospect of *Cerasus humilis* adaptation to abiotic stress[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2022, **44**(1): 104-110.
- [5] 温华婷,高娉娉,史肖,等. 欧李果露酒加工工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2021, **47**(16): 196-202.
WEN H T, GAO P P, SHI X, *et al.* Optimization of processing technology of *Cerasus humilis* liqueur[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, **47**(16): 196-202.
- [6] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2015 年版(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [7] 江冠宇,田晓菊,张惠玲. 不同干燥方法对欧李叶袋泡茶的影响[J]. 食品工业, 2022, **43**(6): 116-121.
JIANG G Y, TIAN X J, ZHANG H L. Effects of different drying methods on bag tea made from *Cerasus humilis* leaves[J]. *The Food Industry*, 2022, **43**(6): 116-121.
- [8] 田金强. 欧李果实加工利用及其标准体系构建[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [9] LIMA M C, PAIVA DE SOUSA C, FERNANDEZ-PRADA C, *et al.* A review of the current evidence of fruit phenolic compounds as potential antimicrobials against pathogenic bacteria[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2019, **130**: 259-270.
- [10] 陈新,王敏,傅茂润,等. 核桃炭疽病发生相关的酚类物质代谢分析[J]. 林业科学, 2021, **57**(10): 71-80.
CHEN X, WANG M, FU M R, *et al.* Metabolic analysis of phenolic compounds associated with walnut anthracnose[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(10): 71-80.
- [11] 乜兰春,孙建设,李明. 酚类物质与果蔬品质研究进展[J]. 中国食品学报, 2003, **3**(4): 93-98.
NIE L C, SUN J S, LI M. Research progress on the relationship of phenolic compounds and quality of fruits and vegetables[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2003, **3**(4): 93-98.

- [12] 李晓丽, 陈计峦, 范盈盈, 等. 无核白葡萄干制过程中酚类物质的变化及其与褐变的关系[J]. 食品科学, 2019, **40**(7): 27-32.
LI X L, CHEN J L, FAN Y Y, *et al.* Relationship between changes of phenolic substances and browning during drying of Thompson seedless grapes[J]. *Food Science*, 2019, **40**(7): 27-32.
- [13] BOEING H, BECHTHOLD A, BUB A, *et al.* Critical review: Vegetables and fruit in the prevention of chronic diseases[J]. *European Journal of Nutrition*, 2012, **51**(6): 637-663.
- [14] 欧雅文, 周倩, 刘琪, 等. 酚类物质与肠道微生物对高血脂症的作用机制[J]. 中国食品学报, 2018, **18**(10): 269-275.
OU Y W, ZHOU Q, LIU Q, *et al.* The mechanisms of action of phenols and gut microbes for hyperlipidemia[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, **18**(10): 269-275.
- [15] RIENKS J, BARBARESCO J, NÖTHLINGS U. Association of polyphenol biomarkers with cardiovascular disease and mortality risk: A systematic review and meta-analysis of observational studies[J]. *Nutrients*, 2017, **9**(4): 415.
- [16] WOJCIK M, KRAWCZYK M, WOJCIK P, *et al.* Molecular mechanisms underlying curcumin-mediated therapeutic effects in type 2 diabetes and cancer[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018, **2018**: 9 698 258.
- [17] ZULKAWI N, NG K H, ZAMBERI R, *et al.* The *in vivo* hepato-recovery effects of the polyphenol-rich fermented food XenijiTM on ethanol-induced liver damage[J]. *RSC Advances*, 2017, **7**(61): 38 287-38 299.
- [18] PICCOLELLA S, CRESCENTE G, CANDELA L, *et al.* Nutraceutical polyphenols: New analytical challenges and opportunities[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2019, **175**: 112 774.
- [19] 李树青. 不同欧李资源果实和叶片酚类物质含量及抗氧化活性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [20] 邵邳胜, 杨波, 朱成, 等. 不同生长阶段欧李叶片酚类物质含量及其抗氧化性[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(10): 1 720-1 727.
SHAO Z S, YANG B, ZHU C, *et al.* Phenolic content and antioxidant activity in leaves of *Cerasus humilis* at different growth stages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(10): 1 720-1 727.
- [21] 刘硕, 徐铭, 张玉萍, 等. 我国李育种研究进展、存在问题和展望[J]. 果树学报, 2018, **35**(2): 231-245.
LIU S, XU M, ZHANG Y P, *et al.* Retrospect, problematic issues and the prospect of plum breeding in China[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, **35**(2): 231-245.
- [22] 樊丽, 李连国, 李小燕, 等. 欧李早熟新品种蒙原早丰和蒙原早红的选育[J]. 中国果树, 2015(5): 5-6.
FAN L, LI L G, LI X Y, *et al.* Breeding of new early-maturing *Prunus humilis* varieties Mengyuan Zaofeng and Mengyuan Zaohong[J]. *China Fruits*, 2015(5): 5-6.
- [23] 牛帅科, 赵艳卓, 牛早柱, 等. 葡萄果实中酚类物质研究进展[J]. 保鲜与加工, 2022, **22**(2): 107-112.
NIU S K, ZHAO Y Z, NIU Z Z, *et al.* Research progress of phenolic compounds in grape fruits[J]. *Storage and Process*, 2022, **22**(2): 107-112.
- [24] 严娟, 蔡志翔, 张斌斌, 等. 桃果肉总酚提取和测定方法的研究[J]. 江苏农业学报, 2013, **29**(3): 642-647.
YAN J, CAI Z X, ZHANG B B, *et al.* Extraction and determination of total phenol in peach mesocarp[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, **29**(3): 642-647.

(编辑:潘新社)