

山楂种质资源果实颜色与花青苷含量的关系

李培嵩, 孙馨宇, 王健, 付东旭, 董文轩, 刘月学, 张泉

(沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866)

摘要: 本研究测定国家山楂种质资源圃(沈阳)中51份山楂地方品种(*Crataegus pinnatifida* var. *major*)的花青苷含量, 结合果实色差值, 以评价山楂果实颜色性状。利用色差仪测定山楂果皮、果肉的色差值(L^* , a^* , b^*)值并计算 h^* 、 C^* 、 $CIRG$ 值(红色葡萄果实颜色指数); 采用酶标仪测定山楂果皮、果肉的花青苷含量; 通过相关性分析、主成分分析、聚类分析, 明确山楂果实颜色与花青苷含量的关系。结果表明山楂果皮花青苷含量与果皮 $CIRG$ 、果肉花青苷含量呈极显著正相关; 果肉花青苷含量与果肉 a^* 、 C^* 、 $CIRG$ 值, 及果皮的 $CIRG$ 值呈极显著正相关。根据果实色差值及花青苷含量可将山楂资源聚为4类: 第1类果皮 a^* 值相对最低、花青苷含量相对最高, 果肉 a^* 值与花青苷含量相对最高; 第2类果皮 a^* 值相对最高、花青苷含量相对最低, 果肉 a^* 值与花青苷含量相对最低; 第3类果皮 a^* 值呈中等水平、果皮花青苷含量较高, 果肉 a^* 值与花青苷含量较高; 第4类果皮 a^* 值较高、花青苷含量呈中等水平, 果肉 a^* 值与花青苷含量呈中等水平。本文通过对山楂资源果实颜色性状进行数字化赋值, 并分析其与花青苷含量之间的关系, 为完善山楂种质资源评价提供参考依据。

关键词: 山楂; 种质资源; 果实颜色; 花青苷

中图分类号:

Relationship of Fruit Color and Anthocyanin Content of Hawthorn Germplasm Resources

LI Pei-hao, SUN Xin-yu, WANG Jian, FU Dong-xu, DONG Wen-xuan, LIU Yue-xue, ZHANG Xiao

(College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: The aim of this study was to evaluate the fruit color traits of hawthorn (*Crataegus pinnatifida* var. *major*) germplasm resources via measuring the chromatism index and anthocyanin content. Fifty-one hawthorn cultivars that preserved at the national hawthorn germplasm resource repository (Shenyang) were used. The peel and flesh of these hawthorn resources were initially determined using a colorimeter to identify their chromatism index (L^* , a^* , and b^*), followed by the calculation of the h^* , C^* , and $CIRG$ (color index of red grape) values. The anthocyanin content in the hawthorn peel and flesh was measured using a microplate reader. The relationship between fruit color traits and anthocyanin content was established using correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. The anthocyanin content of hawthorn peel was considerably correlated with the $CIRG$ value of the peel and the anthocyanin content of the flesh. The a^* , C^* , and $CIRG$ values of the flesh as well as the $CIRG$ value of the peel were largely influenced by the anthocyanin content of the hawthorn flesh. 51 hawthorn resources could be divided into four groups based on fruit chromatism index and anthocyanin content. The a^* value and anthocyanin content of the flesh were both highest in the first group, while the peel has the lowest a^* value and the highest anthocyanin content. The a^* value and anthocyanin content of the peel were highest and lowest in the second group, respectively, while both were lowest in the flesh. The peel of the third group's fruit has a medium a^* value and a high anthocyanin level, whereas the flesh has a higher a^* value and a higher anthocyanin content. The higher a^* value and medium anthocyanin content of the peel, and medium a^* value and anthocyanin content of the flesh were found in the fourth

收稿日期:

URL:

第一作者研究方向为果树种质资源评价与利用, E-mail: makeyuxiao@163.com

通信作者: 张泉, 研究方向为果树种质资源评价与利用研究, E-mail: zhangxiao8866@syau.edu.cn

基金项目: 沈阳农业大学博士启动项目(880418037); 山楂物种资源保护项目(19200357)

Foundation projects: Doctoral Initiating Project of Shenyang Agricultural University (880418037); Hawthorn Resource Conservation Project (19200357)

group. The fourth group contained both the peel's higher a^* value and medium anthocyanin levels as well as the flesh's medium a^* value and anthocyanin content. Collectively, this study assigned fruit color trait using digital scores and assessed the relationship between fruit color traits and its anthocyanin concentration, thus providing a reference basis for enhancing the evaluation of hawthorn germplasm resources,

Key words: hawthorn; germplasm resources; fruit color; anthocyanin

山楂属为蔷薇科 (Rosaceae) 梨亚科 (Pyreae) 中一个古老的植物属^[1]。中国作为山楂的原产地之一, 蕴含丰富的种质资源类型^[2]。山楂果实富含酚类、黄酮类、花青素等活性成分^[3-4], 具有良好的营养价值和保健功效, 常用于食品和医药行业^[5]。羽裂山楂大果变种 (*Crataegus pinnatifida* var. *major*) 为我国最主要的山楂栽培种, 分布于我国辽河流域、黄河流域等北方各个地区, 从中选育出的栽培品种近百余种^[6]。栽培山楂果皮颜色主要为橙红色 (‘大绵球’)、红色 (‘辽红’)、深红色 (‘西丰红’); 果肉颜色主要为白色 (‘蒙阴大金星’)、粉红色 (‘秋金星’)、深红色 (‘兴隆紫肉’) 等^[2], 这些山楂资源颜色的差异主要是由花青苷的含量差异所导致。

目前, 山楂资源果皮、果肉颜色通常基于《山楂种质资源描述规范》标准进行目测, 或利用比色卡比色^[7]。目测和比色卡测量方式极易受到环境因素、人为因素等主、客观影响, 特别是目测法, 需要丰富的实践经验才能进行较为准确的判断。色差仪是一种便捷的颜色偏差测试仪器, Bible等^[8]通过直接快速测量树上鲜果颜色, 输出 L^* 、 a^* 、 b^* 三组数据, 进而构建果实的色品坐标。色差仪已广泛应用于快速且较为准确的鉴定园艺植物的颜色、光泽度^[9-12]。基于 L^* 、 a^* 、 b^* 计算的红色葡萄果实颜色指数 (CIRG, color index of red grape) 已应用于葡萄、杨梅等果实外观色泽性状的评价^[13-14]。

本研究利用色差仪快速测定51份栽培山楂果实色差值及花青苷含量, 对结果进行相关性分析 (correlation analysis)、主成分分析 (PCA, principal component analysis)、聚类分析 (cluster analysis), 并进行CIRG评级, 为完善山楂资源的精准鉴定与评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2021年9月下旬, 在国家山楂种质资源圃 (沈阳) 内采集51份栽培山楂资源 (*Crataegus pinnatifida* var. *major*, 表1)。每份资源从3棵生长势基本一致的山楂树上采集成熟度一致的无病虫害的果实, 一部分用于果实色差值的测定, 另一部分用于花青苷含量的测定。

表1 供试山楂资源名称和原产地

Table 1 Name and origin of hawthorn germplasm resources

| 编号 | 名称 | 来源 | 编号 | 名称 | 来源 | 编号 | 名称 | 来源 |
|------|------|--------|------|----------|--------|------|-----------|--------|
| Code | Name | Origin | Code | Name | Origin | Code | Name | Origin |
| 1 | 北京山楂 | 北京 | 18 | 豫北红 | 河南 | 35 | 绛县 798201 | 山西 |
| 2 | 二乙子 | 北京 | 19 | 百花峪大金星 | 山东 | 36 | 绛县 798203 | 山西 |
| 3 | 海棠山楂 | 北京 | 20 | 百花峪山里红 | 山东 | 37 | 绛县山楂 | 山西 |
| 4 | 寒露红 | 北京 | 21 | 大货山楂 | 山东 | 38 | 田生山楂 | 山西 |
| 5 | 涧沟2号 | 北京 | 22 | 红瓢绵 | 山东 | 39 | 大旺山楂 | 吉林 |
| 6 | 京短1号 | 北京 | 23 | 蒙阴半野生小金星 | 山东 | 40 | 集安紫肉 | 吉林 |

| | | | | | | | | |
|----|--------|----|----|---------|----|----|------|----|
| 7 | 秋红 | 北京 | 24 | 蒙阴大金星 | 山东 | 41 | 鞍山紫肉 | 辽宁 |
| 8 | 银野岭9号 | 北京 | 25 | 平邑伏红子 | 山东 | 42 | 粉里山楂 | 辽宁 |
| 9 | 聂家峪2号 | 河北 | 26 | 歪把红 | 山东 | 43 | 粉色 | 辽宁 |
| 10 | 雾灵紫肉 | 河北 | 27 | 费县大绵球 | 山东 | 44 | 抚顺磨盘 | 辽宁 |
| 11 | 深红 | 河北 | 28 | 万宝地实生 | 山东 | 45 | 建昌山楂 | 辽宁 |
| 12 | 雾灵红 | 河北 | 29 | 万宝地实生-2 | 山东 | 46 | 辽红 | 辽宁 |
| 13 | 兴隆紫肉 | 河北 | 30 | 益都敞口 | 山东 | 47 | 辽阳紫肉 | 辽宁 |
| 14 | 紫珍珠 | 河北 | 31 | 益都红口 | 山东 | 48 | 秋金星 | 辽宁 |
| 15 | 百泉7801 | 河南 | 32 | 福山铁球 | 山东 | 49 | 甜水山楂 | 辽宁 |
| 16 | 百泉7903 | 河南 | 33 | 枣行小金星 | 山东 | 50 | 西丰红 | 辽宁 |
| 17 | 辉县大红孔杞 | 河南 | 34 | 81-2 | 山西 | 51 | 紫丰山楂 | 辽宁 |

1.2 方法

1.2.1 山楂果皮及果肉颜色的测定

使用 LS170 色差仪（深圳市林上科技有限公司）测定山楂果皮、果肉亮度 L^* 、 a^* 与色相 b^* 值。Wrolstad 等^[15]研究表明 L^* 值衡量的是果实的亮度，数值 0-100 代表果皮由暗到亮。 $+a^*$ 到 $-a^*$ 值的转变过程代表红色减退、绿色增强； $+b^*$ 到 $-b^*$ 值的转变过程代表黄色减退、蓝色增加，并根据数据计算色泽饱和度值 [$C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$]、色调角 [$h^\circ = \arctan(b^*/a^*)$]。

红色葡萄果实色泽指数（CIRG，color index of red grape）。计算公式为 [$CIRG = (180 - h^\circ) / (L^* + C^*)$]。果实色泽评价标准为： $CIRG < 2$ 为黄绿， $2 < CIRG < 4$ 为粉红， $4 < CIRG < 5$ 为红色， $5 < CIRG < 6$ 为深红， $CIRG > 6$ 为蓝黑^[16]。

每份山楂资源选择 16 个果实，测定果皮与果肉赤道位置正面、对面 2 个点，分别重复 8 次。

1.2.2 花青素含量测定

参照曹健康等^[17]的方法并稍作调整。分别称取各山楂资源果皮及果肉 1 g，采用冰研的方式提取花青苷。采用 TECAN Infinite 200 酶标仪测定待测样品的 OD_{530nm}、OD_{600nm} 吸光值，试验重复三次。根据标准曲线计算山楂果皮与果肉花青苷含量。

1.2.3 数据分析

试验结果使用 Excel 2016 进行数据处理。采用 Origin 2023 的 Correlation plot 插件进行相关性分析并作图。采用 MetaboAnalyst v5.0 线上分析软件 (<https://genap.metaboanalyst.ca/MetaboAnalyst/home.xhtml>) 进行主成分、聚类分析并作图。

2 结果与分析

2.1 山楂资源果皮及果肉颜色分析

用色差仪测定 51 份山楂果皮及果肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值，并计算 h° 、 C^* 、CIRG 均值及其变异系数。结果显示果皮中（表 2），‘百泉 7903’ L^* 值最高（46.4），‘雾灵紫肉’最低（31.39），果皮 L^* 值变异系数最低（10.2%）；‘益都红口’果皮 a^* 值最高（44.13），‘雾灵紫肉’最低（19.61），果皮 a^* 值变异系数为 19.49%；‘百泉

7903’果皮 b^* 值最高 (27.63), ‘雾灵紫肉’最低 (9.67), 果皮 b^* 值变异系数为 25.63%。‘百泉 7903’果皮 h^* 值最高 (0.72), ‘平邑伏红子’最低 (0.39), 果皮 h^* 值变异系数为 17.29%; ‘益都红口’果皮 C^* 值最高 (51.42), ‘雾灵紫肉’最低 (21.89), 果皮 C^* 值变异系数为 19.23%。果皮 $CIRG$ 的平均值为 2.49, 参照葡萄果色评级标准说明所选山楂资源果皮总体偏粉红色, 其中 ‘雾灵紫肉’果皮 $CIRG$ 最高 (3.38), ‘费县大绵球’与 ‘益都红口’最低 (1.95), 果皮 $CIRG$ 变异系数为 13.78%。51 份山楂资源果皮花青苷含量整体平均值为 918.57 $\mu\text{g/g}$, 分布在 51.38–2346.74 $\mu\text{g/g}$ 之间, 其中, ‘雾灵紫肉’果皮花青苷含量最高 (2346.41 $\mu\text{g/g}$), 果皮花青苷含量变异系数最高 (49.73%), 以上结果表明不同山楂资源间果皮色差值及果皮花青苷含量差异较大。

表 2 51 份山楂资源的果皮颜色指标和花青苷含量

Table 2 Peel chromatism indexes and anthocyanin contents of 51 hawthorn resources

| 编号 Code | 山楂果皮 Hawthorn peel | | | | | | |
|---------|--------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|---------------------------|
| | L^* | a^* | b^* | h^* | C^* | $CIRG$ | 花青苷含量 ($\mu\text{g/g}$) |
| 1 | 35.85 ± 2.27 | 35.64 ± 3.70 | 16.75 ± 2.04 | 0.44 ± 0.02 | 39.38 ± 4.13 | 2.40 ± 0.20 | 1138.91 ± 12.82 |
| 2 | 35.42 ± 1.85 | 36.50 ± 4.32 | 17.11 ± 2.84 | 0.44 ± 0.03 | 40.32 ± 5.05 | 2.39 ± 0.21 | 1452.99 ± 179.25 |
| 3 | 35.62 ± 2.47 | 27.52 ± 4.45 | 16.77 ± 3.31 | 0.55 ± 0.11 | 32.40 ± 4.37 | 2.66 ± 0.23 | 492.67 ± 239.56 |
| 4 | 34.59 ± 2.73 | 33.25 ± 4.79 | 17.79 ± 3.70 | 0.49 ± 0.05 | 37.76 ± 5.74 | 2.51 ± 0.30 | 700.57 ± 3.44 |
| 5 | 39.30 ± 1.93 | 41.60 ± 3.00 | 23.29 ± 1.92 | 0.51 ± 0.02 | 47.69 ± 3.40 | 2.07 ± 0.11 | 607.86 ± 6.50 |
| 6 | 33.83 ± 1.77 | 30.81 ± 4.21 | 16.54 ± 2.87 | 0.49 ± 0.05 | 35.01 ± 4.82 | 2.63 ± 0.26 | 1295.29 ± 31.22 |
| 7 | 34.52 ± 1.46 | 31.75 ± 3.43 | 15.71 ± 1.37 | 0.46 ± 0.04 | 35.45 ± 3.39 | 2.58 ± 0.16 | 1558.58 ± 6.78 |
| 8 | 36.34 ± 1.84 | 31.00 ± 2.99 | 19.21 ± 3.16 | 0.55 ± 0.06 | 36.54 ± 3.64 | 2.47 ± 0.17 | 581.18 ± 35.96 |
| 9 | 34.68 ± 1.44 | 26.91 ± 4.96 | 16.44 ± 3.21 | 0.55 ± 0.08 | 31.62 ± 5.38 | 2.73 ± 0.24 | 850.58 ± 28.06 |
| 10 | 31.39 ± 1.86 | 19.61 ± 3.03 | 9.67 ± 0.88 | 0.46 ± 0.06 | 21.89 ± 2.95 | 3.38 ± 0.22 | 2346.41 ± 0.46 |
| 11 | 35.38 ± 2.68 | 33.78 ± 4.21 | 18.23 ± 3.89 | 0.49 ± 0.04 | 38.42 ± 5.48 | 2.46 ± 0.27 | 895.07 ± 17.38 |
| 12 | 34.36 ± 1.69 | 32.02 ± 7.36 | 17.49 ± 5.06 | 0.51 ± 0.19 | 37.05 ± 6.00 | 2.54 ± 0.25 | 1094.09 ± 31.04 |
| 13 | 32.65 ± 1.76 | 24.79 ± 2.97 | 11.95 ± 1.48 | 0.45 ± 0.03 | 27.53 ± 3.24 | 2.99 ± 0.17 | 966.16 ± 15.15 |
| 14 | 39.16 ± 2.03 | 43.10 ± 2.57 | 23.57 ± 1.51 | 0.50 ± 0.03 | 49.15 ± 2.49 | 2.04 ± 0.08 | 480.19 ± 8.08 |
| 15 | 35.58 ± 1.41 | 32.24 ± 7.04 | 17.54 ± 2.40 | 0.52 ± 0.15 | 36.94 ± 6.04 | 2.03 ± 0.16 | 825.81 ± 45.16 |
| 16 | 46.40 ± 6.02 | 31.73 ± 6.57 | 27.63 ± 4.21 | 0.72 ± 0.16 | 42.55 ± 4.30 | 2.50 ± 0.25 | 211.84 ± 0.65 |
| 17 | 35.99 ± 2.97 | 33.84 ± 3.65 | 18.96 ± 3.55 | 0.51 ± 0.07 | 38.87 ± 4.38 | 2.41 ± 0.20 | 842.83 ± 12.64 |
| 18 | 33.79 ± 1.70 | 30.97 ± 3.10 | 15.87 ± 2.15 | 0.47 ± 0.04 | 34.83 ± 3.49 | 2.63 ± 0.19 | 1282.80 ± 120.06 |
| 19 | 34.56 ± 1.68 | 28.01 ± 4.16 | 16.55 ± 2.64 | 0.53 ± 0.06 | 32.58 ± 4.55 | 2.69 ± 0.22 | 839.35 ± 14.03 |
| 20 | 35.62 ± 2.23 | 27.58 ± 4.27 | 15.16 ± 3.33 | 0.50 ± 0.05 | 31.51 ± 5.20 | 2.70 ± 0.27 | 865.50 ± 8.64 |
| 21 | 36.29 ± 2.43 | 31.94 ± 3.83 | 17.93 ± 2.82 | 0.51 ± 0.07 | 36.72 ± 3.94 | 2.47 ± 0.18 | 785.73 ± 16.08 |
| 22 | 35.64 ± 1.97 | 31.00 ± 3.31 | 17.12 ± 2.55 | 0.50 ± 0.05 | 35.45 ± 3.75 | 2.54 ± 0.18 | 891.25 ± 100.36 |
| 23 | 36.51 ± 3.14 | 38.34 ± 4.95 | 20.42 ± 3.28 | 0.49 ± 0.03 | 43.46 ± 5.76 | 2.27 ± 0.26 | 739.47 ± 27.23 |
| 24 | 37.66 ± 2.49 | 31.03 ± 3.67 | 19.26 ± 3.13 | 0.55 ± 0.07 | 36.61 ± 4.04 | 2.43 ± 0.21 | 645.84 ± 29.74 |
| 25 | 31.43 ± 1.10 | 25.92 ± 2.90 | 10.76 ± 1.42 | 0.39 ± 0.02 | 28.07 ± 3.16 | 3.03 ± 0.22 | 2260.07 ± 15.89 |
| 26 | 37.32 ± 1.79 | 35.70 ± 4.38 | 20.35 ± 3.02 | 0.52 ± 0.04 | 41.13 ± 5.01 | 2.30 ± 0.20 | 663.45 ± 7.06 |
| 27 | 44.17 ± 3.62 | 41.51 ± 2.52 | 24.57 ± 1.92 | 0.53 ± 0.03 | 48.26 ± 2.80 | 1.95 ± 0.11 | 369.74 ± 7.99 |
| 28 | 33.91 ± 2.22 | 27.39 ± 4.42 | 14.49 ± 2.90 | 0.49 ± 0.04 | 31.02 ± 5.10 | 2.80 ± 0.30 | 969.71 ± 6.78 |
| 29 | 35.02 ± 2.45 | 34.05 ± 4.44 | 17.56 ± 3.17 | 0.47 ± 0.04 | 38.34 ± 5.18 | 2.47 ± 0.24 | 1015.31 ± 30.20 |
| 30 | 37.13 ± 2.43 | 30.77 ± 4.25 | 19.98 ± 3.23 | 0.58 ± 0.09 | 36.82 ± 4.26 | 2.44 ± 0.19 | 472.90 ± 15.61 |

| | | | | | | | |
|------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------------|
| 31 | 40.98 ± 3.54 | 44.13 ± 3.38 | 26.27 ± 3.50 | 0.54 ± 0.05 | 51.42 ± 3.99 | 1.95 ± 0.14 | 417.37 ± 12.27 |
| 32 | 35.27 ± 1.70 | 37.56 ± 3.71 | 17.93 ± 2.71 | 0.44 ± 0.03 | 41.63 ± 4.45 | 2.35 ± 0.18 | 586.04 ± 10.59 |
| 33 | 34.47 ± 2.15 | 25.07 ± 5.30 | 13.73 ± 2.55 | 0.51 ± 0.09 | 28.69 ± 5.29 | 2.87 ± 0.27 | 1087.65 ± 5.76 |
| 34 | 42.54 ± 5.23 | 38.15 ± 6.12 | 25.63 ± 4.85 | 0.60 ± 0.15 | 46.44 ± 3.80 | 2.03 ± 0.14 | 421.71 ± 11.52 |
| 35 | 33.36 ± 1.23 | 29.55 ± 3.50 | 14.92 ± 2.13 | 0.47 ± 0.04 | 33.12 ± 3.91 | 2.72 ± 0.21 | 1418.03 ± 59.29 |
| 36 | 34.29 ± 2.78 | 31.21 ± 4.93 | 16.79 ± 4.99 | 0.48 ± 0.06 | 35.51 ± 6.67 | 2.61 ± 0.32 | 856.30 ± 4.93 |
| 37 | 34.66 ± 2.87 | 31.82 ± 4.33 | 17.75 ± 3.89 | 0.50 ± 0.06 | 36.50 ± 5.40 | 2.55 ± 0.29 | 978.97 ± 1.49 |
| 38 | 36.75 ± 1.66 | 36.38 ± 4.36 | 18.82 ± 2.45 | 0.48 ± 0.04 | 40.98 ± 4.77 | 2.32 ± 0.19 | 727.38 ± 19.42 |
| 39 | 34.37 ± 2.43 | 35.39 ± 4.36 | 17.77 ± 3.48 | 0.46 ± 0.05 | 39.65 ± 5.21 | 2.45 ± 0.25 | 1088.90 ± 247.55 |
| 40 | 36.35 ± 2.60 | 35.19 ± 2.68 | 20.72 ± 3.31 | 0.53 ± 0.06 | 40.90 ± 3.53 | 2.34 ± 0.17 | 54.27 ± 4.09 |
| 41 | 36.13 ± 2.62 | 26.22 ± 4.48 | 16.86 ± 4.54 | 0.57 ± 0.09 | 31.31 ± 5.64 | 2.69 ± 0.29 | 875.02 ± 12.64 |
| 42 | 34.87 ± 1.63 | 34.72 ± 3.45 | 15.84 ± 2.70 | 0.43 ± 0.03 | 38.18 ± 4.25 | 2.47 ± 0.18 | 1452.66 ± 14.96 |
| 43 | 35.64 ± 1.48 | 39.45 ± 4.59 | 18.94 ± 2.89 | 0.45 ± 0.03 | 43.77 ± 5.29 | 2.28 ± 0.19 | 1572.57 ± 132.60 |
| 44 | 36.64 ± 2.98 | 32.78 ± 4.13 | 20.18 ± 4.06 | 0.55 ± 0.07 | 38.58 ± 5.11 | 2.41 ± 0.24 | 334.52 ± 6.97 |
| 45 | 36.08 ± 1.63 | 32.57 ± 3.75 | 18.09 ± 2.43 | 0.51 ± 0.05 | 37.29 ± 4.14 | 2.46 ± 0.17 | 796.24 ± 4.92 |
| 46 | 35.70 ± 2.23 | 33.15 ± 4.65 | 18.46 ± 3.42 | 0.51 ± 0.04 | 37.97 ± 5.56 | 2.46 ± 0.25 | 568.37 ± 0.65 |
| 47 | 34.82 ± 1.56 | 28.59 ± 3.33 | 16.27 ± 2.80 | 0.52 ± 0.05 | 32.94 ± 4.02 | 2.66 ± 0.21 | 1063.93 ± 73.41 |
| 48 | 36.40 ± 1.57 | 38.59 ± 2.91 | 19.76 ± 3.70 | 0.47 ± 0.09 | 43.51 ± 2.82 | 2.25 ± 0.11 | 1358.24 ± 13.75 |
| 49 | 37.27 ± 2.90 | 33.08 ± 3.67 | 20.03 ± 3.15 | 0.54 ± 0.07 | 38.75 ± 4.12 | 2.38 ± 0.20 | 641.76 ± 5.20 |
| 50 | 36.84 ± 3.81 | 33.72 ± 3.26 | 19.08 ± 3.87 | 0.51 ± 0.06 | 38.81 ± 4.44 | 2.40 ± 0.24 | 804.78 ± 35.40 |
| 51 | 34.83 ± 2.57 | 30.50 ± 3.69 | 16.20 ± 3.69 | 0.48 ± 0.07 | 34.62 ± 4.55 | 2.61 ± 0.25 | 1600.11 ± 151.28 |
| 平均值 | 36.05 | 32.63 | 18.06 | 0.50 | 37.43 | 2.49 | 918.57 |
| 标准偏差 | 3.68 | 6.36 | 4.63 | 0.09 | 7.20 | 0.34 | 456.83 |
| 最大值 | 62.52 | 49.77 | 36.14 | 1.18 | 56.94 | 3.95 | 2346.74 |
| 最小值 | 27.17 | 12.28 | 8.39 | 0.30 | 14.96 | 1.77 | 51.38 |
| 极差 | 35.35 | 37.49 | 27.75 | 0.88 | 41.98 | 2.18 | 2295.35 |
| 变异系数 | 10.20% | 19.49% | 25.63% | 17.29% | 19.23% | 13.78% | 49.73% |

表中数据由“平均数±标准差”表示；编号同表1；下同

The data in the table are expressed as 'mean ± standard deviation; The No. 1-51 is the same as in table 1; The same as below

对 51 份山楂果肉色差值和花青苷含量的测定结果显示（表 3），‘秋红’果肉 L^* 值最高（72.55），‘雾灵紫肉’最低（35.93），果肉 L^* 值变异系数为 13.64%；‘雾灵紫肉’ a^* 值最高（40.2），‘抚顺磨盘’最低（5.84），果肉 a^* 值变异系数为 54.96%；‘81-2’果肉 b^* 值最高（41.17），‘秋红’最低（18.75），果肉 b^* 值变异系数为 21.28%；‘抚顺磨盘’ h^* 值最高（1.39），‘雾灵紫肉’最低（0.51），果肉 h^* 值变异系数为 25.4%；‘雾灵红’果肉 C^* 值最高（49.33），‘粉色’果肉最低（23.18），果肉 C^* 值变异系数为 19.08%；‘雾灵紫肉’果肉 $CIRG$ 最高（2.21），‘81-2’最低（1.66）， $CIRG$ 变异系数最小（8.27%），平均值为 1.82，分布在 1.24-3.69 之间，表明所选山楂资源果肉总体偏黄绿色，个别品种偏粉红色。‘雾灵紫肉’果肉花青苷含量最高（341.71 $\mu\text{g/g}$ ），‘兴隆紫肉’次之（156.22 $\mu\text{g/g}$ ），‘紫珍珠’最低（12.45 $\mu\text{g/g}$ ），果肉花青苷含量变异系数最大（114.64%），所测含量整体平均值为 46.97 $\mu\text{g/g}$ ，分布在 12.42-343.06 $\mu\text{g/g}$ 之间。以上结果显示，51 份山楂资源间果肉色差值与花青苷含量差异较大。

表 3 51 份山楂资源果肉色差值和花青苷含量

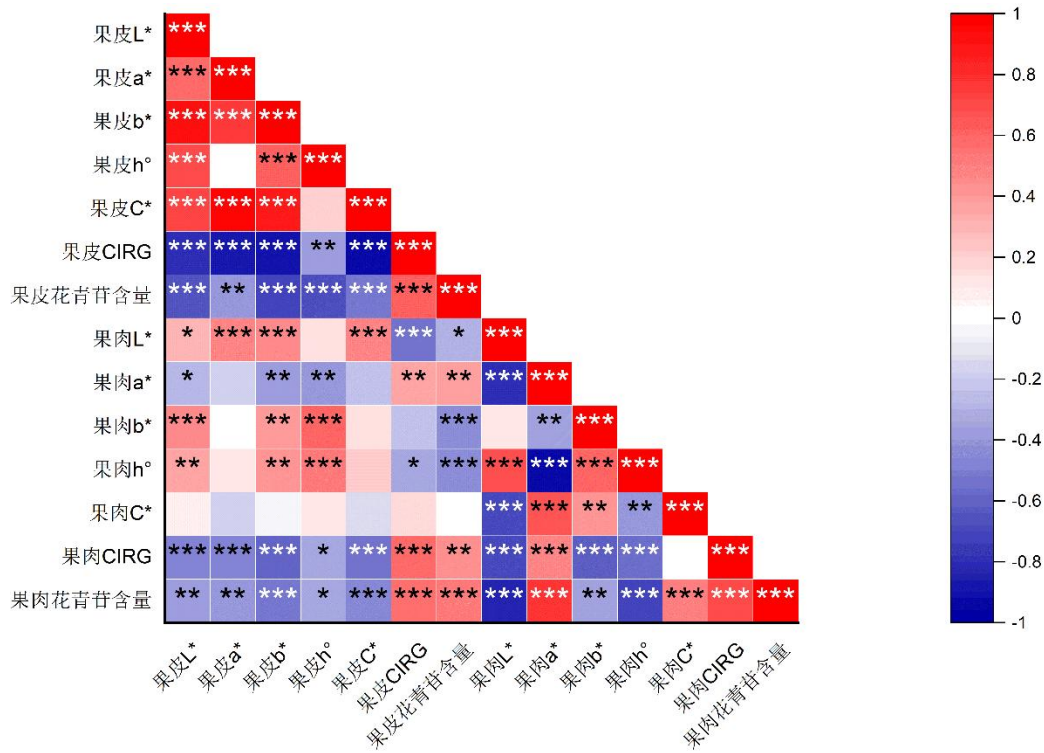
Table 3 The flesh chromatism indexes and anthocyanin contents of 51 hawthorn resources

| 编号 | 山楂果肉 Hawthorn flesh | | | | | | |
|------|---------------------|---------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| Code | L^* | a^* | b^* | h^* | C^* | CIRG | 花青苷含量 (ug/g) |
| 1 | 62.97 ± 14.06 | 21.50 ± 3.35 | 25.14 ± 2.87 | 0.86 ± 0.11 | 33.29 ± 2.26 | 1.93 ± 0.47 | 60.35 ± 0.23 |
| 2 | 60.37 ± 3.63 | 28.74 ± 4.46 | 27.38 ± 3.09 | 0.76 ± 0.12 | 39.96 ± 2.61 | 1.79 ± 0.05 | 112.39 ± 0.70 |
| 3 | 63.69 ± 5.22 | 11.84 ± 4.60 | 33.73 ± 3.02 | 1.24 ± 0.11 | 35.95 ± 3.80 | 1.79 ± 0.04 | 15.61 ± 0.33 |
| 4 | 71.89 ± 4.84 | 8.66 ± 6.15 | 29.37 ± 2.48 | 1.29 ± 0.16 | 31.06 ± 3.87 | 1.74 ± 0.04 | 20.60 ± 0.70 |
| 5 | 70.46 ± 4.44 | 6.89 ± 1.82 | 33.21 ± 3.58 | 1.37 ± 0.04 | 33.94 ± 3.75 | 1.71 ± 0.07 | 13.11 ± 0.14 |
| 6 | 69.95 ± 4.93 | 12.01 ± 5.90 | 22.21 ± 2.50 | 1.09 ± 0.19 | 25.73 ± 3.82 | 1.87 ± 0.04 | 41.20 ± 0.46 |
| 7 | 72.55 ± 3.53 | 15.85 ± 4.35 | 18.75 ± 2.26 | 0.88 ± 0.17 | 24.88 ± 2.61 | 1.84 ± 0.04 | 47.70 ± 2.32 |
| 8 | 63.10 ± 7.45 | 15.18 ± 4.38 | 30.66 ± 2.70 | 1.11 ± 0.13 | 34.48 ± 2.49 | 1.84 ± 0.15 | 22.04 ± 0.51 |
| 9 | 58.91 ± 3.81 | 17.28 ± 3.76 | 34.89 ± 1.56 | 1.11 ± 0.09 | 39.07 ± 2.32 | 1.83 ± 0.07 | 28.71 ± 0.56 |
| 10 | 35.93 ± 3.03 | 40.20 ± 4.92 | 22.43 ± 3.45 | 0.51 ± 0.04 | 46.07 ± 5.69 | 2.21 ± 0.24 | 341.71 ± 1.90 |
| 11 | 64.79 ± 5.60 | 16.19 ± 3.55 | 32.20 ± 3.04 | 1.11 ± 0.09 | 36.18 ± 3.41 | 1.77 ± 0.07 | 27.96 ± 0.23 |
| 12 | 50.94 ± 4.44 | 37.79 ± 6.33 | 31.41 ± 2.28 | 0.70 ± 0.10 | 49.33 ± 5.01 | 1.79 ± 0.08 | 104.51 ± 0.42 |
| 13 | 43.51 ± 2.02 | 34.28 ± 4.21 | 23.50 ± 1.68 | 0.61 ± 0.08 | 41.69 ± 2.98 | 2.11 ± 0.06 | 156.22 ± 1.90 |
| 14 | 66.31 ± 4.70 | 7.03 ± 1.74 | 31.87 ± 2.15 | 1.35 ± 0.05 | 32.68 ± 2.19 | 1.81 ± 0.09 | 12.45 ± 0.05 |
| 15 | 61.14 ± 4.81 | 18.86 ± 6.37 | 33.40 ± 10.09 | 1.05 ± 0.18 | 39.03 ± 9.36 | 1.72 ± 0.09 | 46.78 ± 0.38 |
| 16 | 64.28 ± 6.89 | 13.66 ± 3.07 | 37.62 ± 4.35 | 1.22 ± 0.06 | 40.08 ± 4.83 | 1.80 ± 0.15 | 18.14 ± 1.30 |
| 17 | 66.82 ± 3.52 | 16.64 ± 13.26 | 34.90 ± 4.89 | 1.15 ± 0.20 | 39.80 ± 10.21 | 1.69 ± 0.13 | 26.38 ± 0.70 |
| 18 | 66.46 ± 4.32 | 12.81 ± 5.80 | 29.03 ± 2.21 | 1.16 ± 0.18 | 32.21 ± 2.44 | 1.81 ± 0.06 | 38.24 ± 0.65 |
| 19 | 67.38 ± 2.10 | 10.71 ± 5.03 | 25.77 ± 1.93 | 1.18 ± 0.18 | 28.33 ± 1.77 | 1.87 ± 0.04 | 21.78 ± 0.60 |
| 20 | 47.99 ± 3.80 | 26.67 ± 5.96 | 27.15 ± 2.05 | 0.80 ± 0.13 | 38.39 ± 3.57 | 2.08 ± 0.09 | 144.85 ± 0.33 |
| 21 | 67.41 ± 6.01 | 15.48 ± 5.93 | 27.21 ± 1.81 | 1.07 ± 0.17 | 31.73 ± 3.19 | 1.81 ± 0.08 | 24.05 ± 0.09 |
| 22 | 66.80 ± 5.53 | 14.60 ± 4.10 | 26.31 ± 6.72 | 1.04 ± 0.25 | 30.71 ± 4.71 | 1.84 ± 0.14 | 28.65 ± 1.30 |
| 23 | 58.71 ± 6.04 | 29.70 ± 6.01 | 20.44 ± 2.69 | 0.61 ± 0.13 | 36.33 ± 4.67 | 1.89 ± 0.07 | 89.72 ± 2.18 |
| 24 | 66.53 ± 5.02 | 8.01 ± 3.72 | 32.31 ± 3.15 | 1.33 ± 0.09 | 33.43 ± 3.71 | 1.79 ± 0.06 | 12.65 ± 0.14 |
| 25 | 61.85 ± 6.61 | 18.71 ± 6.24 | 32.19 ± 4.52 | 1.05 ± 0.18 | 37.81 ± 3.76 | 1.80 ± 0.12 | 48.72 ± 0.88 |
| 26 | 61.02 ± 4.85 | 19.78 ± 7.46 | 29.65 ± 3.54 | 0.99 ± 0.19 | 36.30 ± 4.16 | 1.84 ± 0.06 | 34.50 ± 1.02 |
| 27 | 69.25 ± 3.59 | 16.06 ± 3.80 | 31.94 ± 4.25 | 1.11 ± 0.08 | 35.86 ± 4.93 | 1.70 ± 0.06 | 27.07 ± 0.46 |
| 28 | 66.59 ± 3.25 | 16.22 ± 4.09 | 34.56 ± 3.93 | 1.13 ± 0.10 | 38.36 ± 4.11 | 1.71 ± 0.07 | 29.57 ± 1.86 |
| 29 | 61.82 ± 5.14 | 27.75 ± 7.22 | 31.93 ± 3.99 | 0.86 ± 0.14 | 42.68 ± 5.81 | 1.72 ± 0.09 | 80.29 ± 1.49 |
| 30 | 66.06 ± 3.84 | 6.68 ± 5.45 | 30.76 ± 3.22 | 1.36 ± 0.19 | 31.98 ± 2.40 | 1.82 ± 0.05 | 14.98 ± 0.09 |
| 31 | 67.47 ± 4.14 | 22.21 ± 4.97 | 32.81 ± 2.95 | 0.98 ± 0.12 | 39.88 ± 3.35 | 1.67 ± 0.04 | 25.69 ± 0.37 |
| 32 | 61.82 ± 5.72 | 25.10 ± 7.01 | 20.47 ± 4.26 | 0.70 ± 0.17 | 32.87 ± 5.80 | 1.90 ± 0.15 | 17.84 ± 0.33 |
| 33 | 57.46 ± 4.71 | 26.24 ± 7.29 | 25.76 ± 2.95 | 0.79 ± 0.19 | 37.34 ± 4.14 | 1.89 ± 0.09 | 74.15 ± 0.79 |
| 34 | 64.45 ± 2.70 | 13.02 ± 2.47 | 41.17 ± 4.19 | 1.27 ± 0.03 | 43.20 ± 4.62 | 1.66 ± 0.08 | 13.50 ± 0.05 |
| 35 | 69.09 ± 4.05 | 12.25 ± 4.37 | 29.16 ± 2.10 | 1.18 ± 0.14 | 31.91 ± 2.03 | 1.77 ± 0.06 | 26.78 ± 0.14 |
| 36 | 67.77 ± 4.63 | 16.76 ± 6.48 | 27.53 ± 2.45 | 1.03 ± 0.19 | 32.78 ± 3.18 | 1.78 ± 0.06 | 29.44 ± 0.19 |
| 37 | 66.11 ± 6.67 | 11.20 ± 8.02 | 27.35 ± 2.77 | 1.20 ± 0.25 | 30.46 ± 3.71 | 1.86 ± 0.10 | 25.49 ± 0.19 |
| 38 | 57.70 ± 2.40 | 31.43 ± 6.53 | 22.28 ± 4.24 | 0.63 ± 0.17 | 39.03 ± 4.37 | 1.86 ± 0.06 | 69.62 ± 0.05 |
| 39 | 66.12 ± 5.96 | 20.71 ± 8.46 | 22.62 ± 2.20 | 0.86 ± 0.21 | 31.28 ± 6.00 | 1.84 ± 0.06 | 39.42 ± 0.28 |
| 40 | 64.69 ± 5.77 | 13.11 ± 4.70 | 33.62 ± 3.44 | 1.20 ± 0.13 | 36.36 ± 3.61 | 1.77 ± 0.08 | 44.91 ± 1.72 |
| 41 | 62.65 ± 6.16 | 9.87 ± 2.75 | 33.95 ± 1.94 | 1.29 ± 0.08 | 35.45 ± 2.01 | 1.83 ± 0.13 | 16.10 ± 0.28 |
| 42 | 59.05 ± 6.45 | 30.68 ± 7.68 | 26.24 ± 2.03 | 0.72 ± 0.15 | 40.80 ± 5.07 | 1.80 ± 0.06 | 114.89 ± 4.23 |

| | | | | | | | |
|------|--------------|--------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|
| 43 | 71.72 ± 5.11 | 11.19 ± 4.02 | 19.86 ± 3.77 | 1.06 ± 0.19 | 23.18 ± 3.39 | 1.89 ± 0.11 | 30.39 ± 3.58 |
| 44 | 69.12 ± 4.76 | 5.84 ± 1.84 | 30.76 ± 2.78 | 1.39 ± 0.05 | 31.34 ± 3.01 | 1.78 ± 0.05 | 13.47 ± 0.74 |
| 45 | 60.05 ± 4.39 | 13.08 ± 3.50 | 33.98 ± 2.90 | 1.20 ± 0.09 | 36.55 ± 3.15 | 1.86 ± 0.10 | 18.92 ± 0.74 |
| 46 | 69.96 ± 3.89 | 10.41 ± 4.45 | 29.66 ± 2.18 | 1.24 ± 0.13 | 31.66 ± 3.01 | 1.76 ± 0.05 | 23.33 ± 0.46 |
| 47 | 62.95 ± 5.38 | 17.36 ± 5.79 | 30.07 ± 5.56 | 1.05 ± 0.20 | 35.31 ± 4.52 | 1.82 ± 0.08 | 24.44 ± 1.67 |
| 48 | 70.16 ± 4.51 | 12.46 ± 3.91 | 23.02 ± 3.13 | 1.08 ± 0.15 | 26.47 ± 2.85 | 1.86 ± 0.09 | 20.11 ± 0.84 |
| 49 | 67.44 ± 7.43 | 13.57 ± 6.87 | 31.25 ± 11.92 | 1.16 ± 0.20 | 34.74 ± 11.86 | 1.77 ± 0.17 | 17.94 ± 0.46 |
| 50 | 67.08 ± 3.60 | 10.26 ± 3.95 | 31.80 ± 2.96 | 1.26 ± 0.11 | 33.60 ± 3.32 | 1.78 ± 0.03 | 22.57 ± 0.70 |
| 51 | 61.00 ± 7.88 | 19.67 ± 9.26 | 30.36 ± 3.14 | 1.02 ± 0.24 | 37.16 ± 4.46 | 1.83 ± 0.08 | 35.42 ± 2.32 |
| 平均值 | 63.28 | 17.87 | 29.18 | 1.04 | 35.49 | 1.82 | 46.97 |
| 标准偏差 | 8.63 | 9.82 | 6.21 | 0.26 | 6.77 | 0.15 | 53.84 |
| 最大值 | 79.99 | 65.14 | 77.82 | 1.56 | 80.97 | 3.69 | 343.06 |
| 最小值 | 16.56 | 0.16 | 3.49 | 0.20 | 17.24 | 1.24 | 12.42 |
| 极差 | 63.43 | 64.98 | 74.33 | 1.36 | 63.73 | 2.44 | 330.64 |
| 变异系数 | 13.64% | 54.96% | 21.28% | 25.40% | 19.08% | 8.27% | 114.64% |

2.2 山楂资源果实色差值和花青苷含量相关性分析

基于 51 份山楂资源色差值与花青苷含量的相关性分析，结果表明山楂果实花青苷含量与色差值间存在相关性（图 1）。果皮花青苷含量与果皮 L^* 、 b^* 、 h° 、 C^* 值、果肉 b^* 、 h° 之间呈极显著负相关 ($p \leq 0.001$)，与果皮 $CIRG$ 、果肉花青苷含量呈极显著正相关 ($p \leq 0.001$)；果肉花青苷含量与果皮 b^* 、 C^* 、果肉 L^* 、 h° 之间存在极显著负相关 ($p \leq 0.001$)，与果皮 $CIRG$ 、果皮花青苷含量、果肉 a^* 、果肉 C^* 值、果肉 $CIRG$ 之间呈极显著正相关 ($p \leq 0.001$)。



* $p \leq 0.05$ ** $p \leq 0.01$ *** $p \leq 0.001$

* indicates a significant correlation at the $p \leq 0.05$ level; ** indicates a significant correlation at the $p \leq 0.01$ level; *** indicates a significant correlation at the $p \leq 0.001$ level

图 1 51 份山楂资源果实色差值和花青苷含量相关性热图

Fig. 1 Correlation heatmap of fruit chromatism index and anthocyanin content of 51 hawthorn resources

2.3 山楂资源果实色差值和花青苷含量主成分分析

基于51份山楂资源果皮色差值与花青苷含量进行主成分分析，绘制PCA散点图（图2A），数据经降维处理后，获得PC1=85.1%，PC2=12.5%，累计达97.6%。图2B为山楂果皮PCA结果载荷图，结果显示，‘福山铁球’、‘田生山楂’、‘歪把红’、‘蒙阴半野生小金星’、‘蒙阴大金星’、‘费县大绵球’、‘紫珍珠’、‘涧沟2号’、‘益都红口’、‘甜水山楂’的果皮花青苷含量与果皮 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 值呈正相关关系；且根据图2B可以筛选出分类贡献较大的变量，果皮花青苷含量与果皮CIRG对两组样本的区分贡献更大。

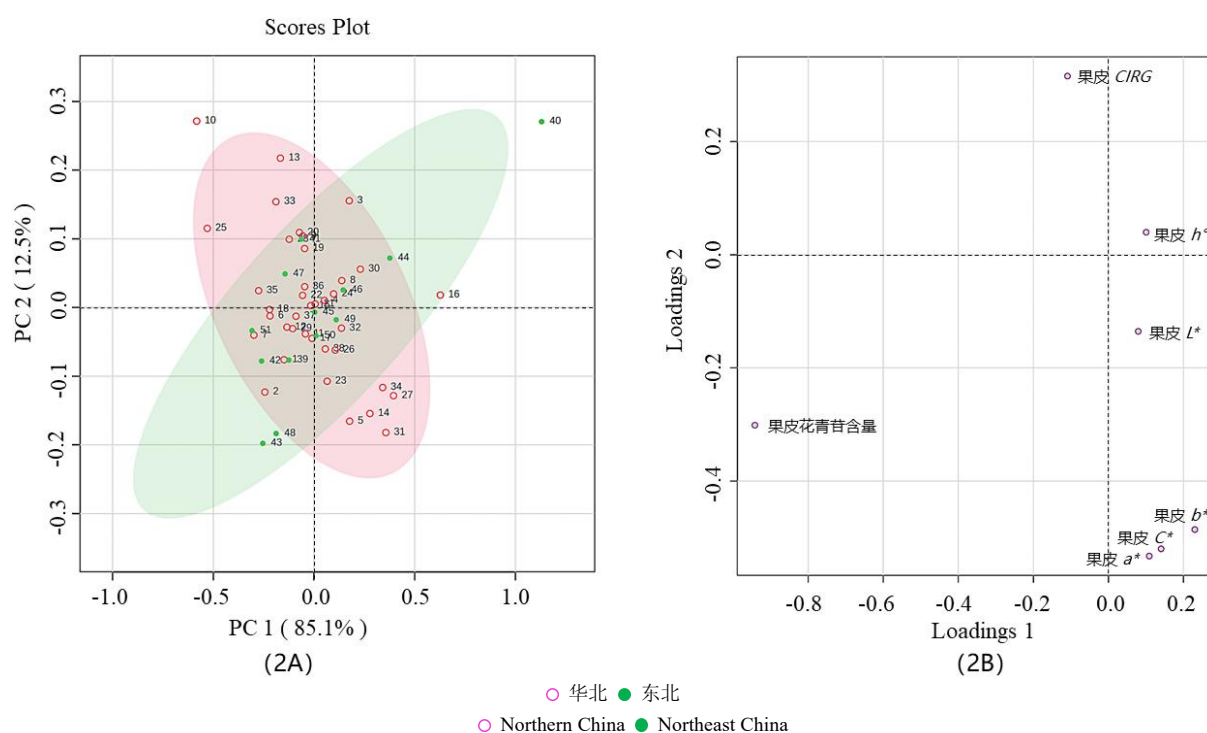


图 2 51 份山楂资源果皮色差值和花青苷含量 PCA 散点图 (A) 和载荷图 (B)

Fig. 2 PCA scatter plot (A) and loading plot (B) of peel chromatism index and anthocyanin content of 51 hawthorn germplasm resources

基于51份山楂资源果肉色差值与花青苷含量进行主成分分析，绘制PCA散点图（图3A），数据经降维处理后，获得PC1=87.8%，PC2=6.4%，累计达94.2%。图3B为山楂果肉PCA结果载荷图，结果显示，‘益都敞口’、‘寒露红’、‘百花峪大金星’、‘绛县山楂’、‘绛县798201’、‘红瓢绵’、‘涧沟2号’、‘紫珍珠’、‘蒙阴大金星’、‘粉色’、‘抚顺磨盘’、‘辽红’、‘秋金星’、‘西丰红’的果肉花青苷含量与果肉 L^* 和 h^* 值呈正相关关系。且根据图3B可以筛选出分类贡献较大的变量，果肉花青苷含量和果肉 a^* 值对两组样本的区分贡献更大。

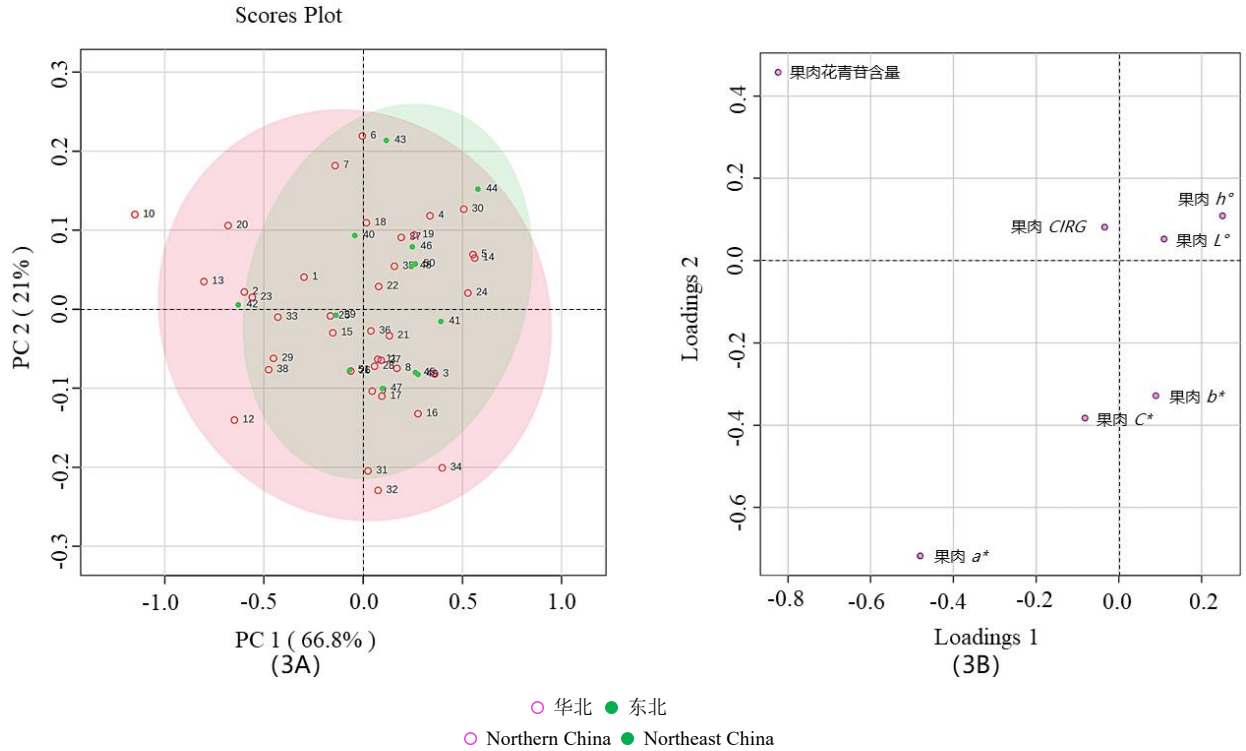


图 3 51 份山楂资源果肉色差值和花青苷含量 PCA 散点图 (A) 和载荷图 (B)

Fig.3 PCA scatter plot (A) and load plot (B) of flesh chromatism index and anthocyanin content of 51 hawthorn germplasm resources

2.4 山楂资源果实色差值和花青苷含量聚类分析

根据果实色差值及花青苷含量对 51 份山楂资源进行聚类分析（欧氏距离，最长距离法）。结果显示（图 4），对所有指标进行水平聚类可分为两大类，第 1 类包含果皮 h^* 、 L^* 、 b^* 、 a^* 、 C^* 、果肉 L^* 、 h^* 值；第 2 类包含果肉 b^* 、 a^* 、 C^* 值、果肉与果皮 $CIRG$ 以及花青苷含量。

对 51 份山楂资源进行垂直聚类可以将其分为 4 大类。第 1 类包含‘雾灵紫肉’和‘兴隆紫肉’，其果皮 a^* 值相对最低 (19.61–24.79)、花青苷含量相对最高 (966.16–2346.41 $\mu\text{g/g}$)；果肉 a^* 值相对最高 (34.28–40.2)、花青苷含量相对最高 (156.22–341.71 $\mu\text{g/g}$)。第 2 类包含‘百泉 7903’、‘81-2’、‘费县大绵球’、‘益都红口’、‘集安紫肉’、‘涧沟 2 号’、‘紫珍珠’、‘抚顺磨盘’、‘蒙阴大金星’和‘益都敞口’，其果皮 a^* 值相对最高 (30.77–44.13)、花青苷含量相对最低 (54.27–645.84 $\mu\text{g/g}$)；果肉 a^* 值相对最低 (5.84–22.21)、花青苷含量相对最低 (12.45–44.91 $\mu\text{g/g}$)。第 3 类包含‘平邑伏红子’、‘百花峪山里红’、‘枣行小金星’、‘雾灵红’、‘万宝地实生-2’、‘二乙子’和‘粉里山楂’，其果皮 a^* 值呈中等水平 (25.07–36.5)、果皮花青苷含量较高 (865.5–2260.07 $\mu\text{g/g}$)，果肉 a^* 值较高 (18.71–37.79)、花青苷含量较高 (48.72–144.85 $\mu\text{g/g}$)。剩余品种聚为第 4 类，其果皮 a^* 值较高 (26.22–39.45)、花青苷含量呈中等水平 (492.67–1600.11 $\mu\text{g/g}$)，果肉 a^* 值呈中等水平 (8.66–31.43)、花青苷含量呈中等水平 (15.61–89.72 $\mu\text{g/g}$)。

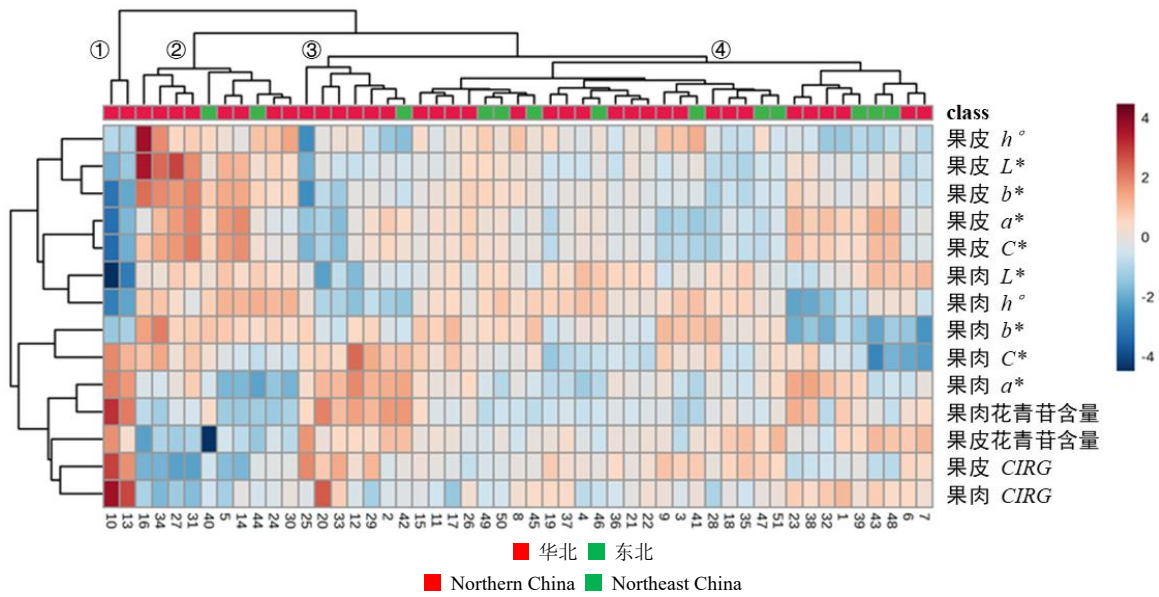


图 4 51 份山楂资源果实色差值和花青苷含量聚类分析图

Fig.4 Cluster analysis of fruit chromatism index and anthocyanin content of 51 hawthorn germplasm resources

3 讨论

目前，已有诸多学者利用色差仪对园艺植物的果实颜色进行评价。任凯丽等^[18]使用色差仪以 466 份甜瓜种质资源为试材，进行果皮与果肉 L^* 、 a^* 、 b^* 值的测定，克服对甜瓜果实颜色描述不清的现状，实现了对甜瓜果实颜色的定量分析与数字化描述。蔡锦玲等^[19]研究发现利用果皮 C^* 、 h° 值可以更加快速、准确地评价番茄果皮颜色。赵瑞^[20]对 42 份山楂资源进行了果皮色差值的测定，结果表明使用分光光度仪可以精准测定山楂果皮颜色。本研究选用了 51 份山楂资源进行果实色差值的测定，其中‘紫珍珠’、‘秋金星’的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 值与赵瑞^[20]所测山楂果皮色差结果总体趋近，表明本试验重复性良好，可以作为一种快速且准确评价山楂果实颜色的评价方式。多数园艺作物果实颜色的评价主要集中于果皮^[12, 19-21]。本试验使用色差仪测定了 51 份山楂资源果肉的色差值，结果表明，‘雾灵紫肉’ a^* 值最高，果肉颜色最红，‘81-2’ 果肉 b^* 值最高，颜色最黄，这一结果较《山楂种质资源描述规范》中的目测法评价更为精准，为丰富山楂资源果肉颜色的评价提供了数字化参考。

山楂资源果实颜色评价时研究者大多通过目测法进行，结果显示山楂果皮整体以红色为主，少数呈橙红色、黄色，果肉颜色以绿白为主，另有黄绿色、粉红色、粉白、橙黄等^[2, 22-24]，其中董文轩^[2]研究表明‘辽红’果皮呈红色、‘西丰红’果皮呈深红色，‘蒙阴大金星’果肉呈白色、‘秋金星’果肉呈粉红色，‘兴隆紫肉’果肉呈深红色。 $CIRG$ 可用于桃、草莓等果实的外观色泽评价^[25-26]。本研究引用了 $CIRG$ 对山楂资源果实颜色进行评级。通过测定 51 份山楂资源的 $CIRG$ 值，结果显示果皮 $CIRG$ 的平均值为 2.49，分布在 1.77-3.95 之间，山楂资源果皮总体偏粉红色，个别品种为黄绿色，其中‘辽红’与‘西丰红’果皮 $CIRG$ 平均值分别为 2.46、2.4，果皮均偏粉红色，此结果与董文轩^[2]研究结论有一致性，但更数字化。果肉 $CIRG$ 平均值为 1.82，分布在 1.24-3.69 之间，总体偏黄绿色，个别品种偏粉红色，其中‘兴隆紫肉’的 $CIRG$ 平均值为 2.11，果肉颜色偏粉红；‘秋金星’与‘蒙阴大金星’的果肉 $CIRG$ 平均值分别为 1.86、1.79，果肉均偏黄绿色，此评级结果与董文轩^[2]评价结果有所不同，推测利用 $CIRG$ 评价山楂果肉颜色数据更加量化、

准确。

部分园艺植物果实色差值与花青苷含量具有相关性。林莎莎等^[21]以9份不同桃品种为试材,研究不同桃品种果皮色差值与花青苷含量的关系,结果表明果皮 b^* 值与 C^* 值之间存在显著正相关。果皮 L^* 值与 h^* 值之间存在极显著正相关,与果皮花青苷含量存在极显著负相关。蒋蕊等^[27]以95份杨梅种质资源为试材进行了色差值与单果核质量等24个数量性状之间的相关性分析,结果表明果实 b^* 值与果实CIRG间存在极显著负相关,而果实 a^* 值、 b^* 值与果实CIRG之间存在极显著负相关, L^* 值与 b^* 值之间存在极显著正相关,但与果实的CIRG值存在极显著负相关,果实CIRG值与固酸比之间存在显著正相关。张望舒等^[28]通过对杨梅果实外观色泽变化进行CIRG评级,发现杨梅果实CIRG值与矢车菊-3-葡萄糖苷呈极显著正相关。王霄霄^[29]对7个品种的杨梅果实花青苷含量与果实成熟度进行研究,结果同样表明果实CIRG值与杨梅果实的矢车菊-3-葡萄糖苷呈显著正相关。本研究中,山楂果皮花青苷含量分别与果皮CIRG、果肉花青苷含量呈极显著正相关($p \leq 0.001$),果肉花青苷含量分别与 a^* 、 C^* 、CIRG值,及果皮的CIRG值呈极显著正相关($p \leq 0.001$),此结果与上述两人对于色差指标与花青苷含量间的关系分析相类似。

色差值及花青苷含量可以用作植物的聚类分析。朱培琦等^[30]以50种针叶材的色差均值进行聚类,将50种针叶材主要分为4类,第1类 b^* 和 C^* 值相对较高,第2类 L^* 和 h^* 值相对较高,第3类 a^* 和 C^* 值相对较高,第4类 a^* 相对较高, b^* 、 L^* 和 h^* 值相对较低。林莎莎^[21]等以 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 、 h^* 值、叶绿素、花青苷含量7个指标将9个桃品种聚为3类,其中1类受 b^* 和 h^* 值影响较大,1类果皮 L^* 值与叶绿素含量较突出,1类受果皮花青苷含量、果皮 a^* 与 C^* 值影响较大。尹蓉等^[31]根据色差仪测定的果实颜色数值将10个红枣品种聚为“低亮度—红色品种”和“高亮度—橙红色品种”两类。白婧^[26]以山楂果实颜色、糖酸比等品质特性与山楂花色苷、黄酮含量等功能性成分进行聚类分析,将10个山楂品种分为4类,其中第1类含较高黄酮、多酚含量的‘磨盘山楂’等品种与较低黄酮含量的‘蒙阴大金星’两个亚类;第2类‘费县大绵球’、‘秋金星’糖酸比较高且‘费县大绵球’花色苷含量最低;第3类为花色苷含量很高的‘兴隆紫肉’;第4类为大黄山楂,具有花色苷含量较低、硬度适中、糖酸比较高等特性。本试验将51份山楂资源以12个色差值指标及果实花青苷含量进行垂直聚类分为4类,第1类中‘兴隆紫肉’的果皮花青苷含量相对最高;第2类中的‘费县大绵球’果皮花青苷含量相对最低,这与白婧^[26]聚类结果中涉及功能性成分花色苷含量的分类相类似,证明此聚类方法具有可行性。

4 结论

本研究通过测定分析51份山楂资源果实色差值与花青苷含量,系统地分析了不同山楂资源间果皮、果肉颜色、花青苷含量的关系,结果显示果皮花青苷含量与果皮CIRG、果肉花青苷含量呈极显著正相关;果肉花青苷含量与果皮CIRG、果皮花青苷含量、果肉 a^* 、果肉 C^* 值、果肉CIRG之间呈极显著正相关。51份山楂资源可聚为4类,第1类果皮 a^* 值相对最低、花青苷含量相对最高,果肉 a^* 值与花青苷含量相对最高;第2类果皮 a^* 值相对最高、花青苷含量相对最低,果肉 a^* 值与花青苷含量相对最低;第3类果皮 a^* 值呈中等水平、果皮花青苷含量较高,果肉 a^* 值与花青苷含量较高;第4类果皮 a^* 值较高、花青苷含量呈中等水平,果肉 a^* 值与花青苷含量呈中等水平。本研究对山楂资源果实颜色进行数字化赋值,为完善山楂种

质资源评价方式提供参考依据。

参考文献

- [1] 赵焕璋, 丰宝田. 中国果树志-山楂卷. 北京: 中国林业出版社, 1996
Zhao H Z, Feng B T. China fruit-plant monograph of hawthorn (*Crataegus*) Flora. Beijing: China Forest Press. 1996
- [2] 董文轩. 中国果树科学与实践-山楂. 西安: 陕西科学技术出版社, 2015
Dong W X. Science and practice of Chinese fruit trees-hawthorn. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press. 2015
- [3] Özcan M, Haciseferoğulları H, Marakoğlu T, Arslan D. Hawthorn (*Crataegus* spp.) fruit: some physical and chemical properties. *Journal of Food Engineering*, 2005, 69(4): 409-413
- [4] Li T P, Fu S Y, Huang X, Zhang X S, Cui Y M, Zhang Z Y, Ma Y, Zhang X, Yu Q H, Yang S N, Li S H. Biological properties and potential application of hawthorn and its major functional components: a review. *Journal of Functional Foods*. 2022, 90: 104988
- [5] Wu M, Liu L T, Xing Y W, Yang S J, Li H, Cao Y. Roles and mechanisms of hawthorn and its extracts on atherosclerosis: a review. *Frontiers in Pharmacology* 2020, 11: 118
- [6] 张育明, 辛孝贵. 中国山楂种质资源研究进展. 北方果树, 1998, (3): 4-9
Zhang Y M, Xin X G. Research progress of Chinese hawthorn germplasm resources. *Northern Fruits*, 1998, (3): 4-9
- [7] 农作物种质资源鉴定评价技术规范 山楂. NY/T 2325-2013
Technical specification for the identification and evaluation of crop germplasm resources hawthorn. NY/T 2325-2013
- [8] Bible B B, Singha S. Canopy position influences CIELAB coordinates of peach color. *HortScience*, 1993, 28(10): 992-993
- [9] 沈镛, 方智远, 李锡香, 李全辉, 程嘉琪, 宋江萍, 王海平, 邱杨. 黄瓜果肉色的遗传分析. 植物遗传资源学报, 2011, 12(2): 216-222.
Shen D, Fang Z Y, Li X X, Li Q H, Cheng J Q, Song J P, Wang H P, Q Y. Inheritance of fruit flesh color in *Cucumis sativus* L.. *Journal of Plant Genetic Resources*. 2011, 12(2): 216-222
- [10] 牡丹妮, 张超, 高树林, 董丽. 低温对牡丹切花花色和花青素苷合成的影响. 植物遗传资源学报 2016, 17(2): 295-302
Du D N, Zhang C, Gao S L, Dong L. Effect of low temperature on flower color and anthocyanin biosynthesis in tree peony (*Paeonia suffruticosa*) 'Luoyang Hong' cut flower. *Journal of Plant Genetic Resources*. 2016, 17(2): 295-302
- [11] 胡梦蝶, 李佳伟, 崔顺立, 侯名语, 杨鑫雷, 刘立峰, 蒋晓霞, 穆国俊. 花生花斑种皮花青素合成的转录组-代谢组联合分析. 植物遗传资源学报 2021, 22(6): 1732-1745
Hu M D, Li J W, Cui S L, Hou M Y, Yang X L, Liu L F, Jiang X X, Mu G J. Transcriptomic-Metabolomics joint analysis of anthocyanin synthesis for variegated testa in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Plant Genetic Resources*. 2021, 22(6): 1732-1745
- [12] 李平平, 张祥, 刘雨婷, 谢志和, 张芮豪, 赵凯, 吕俊恒, 王梓然, 文锦芬, 邹学校, 邓明华. 辣椒63份种质果皮颜色与呈色物质的关系. 园艺学报, 2022, 49(7): 1589-1601
Li P P, Zhang X, Liu Y T, Xie Z H, Zhang R H, Zhao K, Lyu J H, Wang Z R, Wen J F, Zou X X, Deng M H. Studies on the relationship between pigment composition and fruit coloration of 63 peppers. *Acta Horticulture Sinica*, 2022, 49(7): 1589-1601
- [13] Wu L N, Wang F X, Sha R Y, Li X J, Yu K, Feng J R. The effect of N and KH₂PO₄ on skin color, sugars, and organic acids of 'Flame Seedless' grape. *Agronomy*, 2023, 13(3): 902
- [14] 颜丽菊, 蒋芯, 陈安南, 朱安娜, 王军. '东魁'杨梅果实色泽指标及果实内在品质相关性. 中国农学通报, 2023, 39(10): 136-143
Yan L J, Jiang X, Chen A N, Zhu A N, Wang J. The correlation between fruit color indexes and fruit internal quality of *Mollera rubra* 'Dong kui'. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(10): 136-143
- [15] Wrolstad R E, Durst R W, Lee J. Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends in Food Science & Technology*, 2005, 16(9): 423-428
- [16] 孙晓文, 高登涛, 魏志峰, 郭景南, 曹钰. 茉莉酸酯类对'圣诞玫瑰'葡萄果实着色及品质的影响. 果树学报, 2016, 33(1): 43-51
Sun X W, Gao D T, Wei Z F, Guo J N, Cao M. Effect of jasmonates on coloration and quality of the 'Christmas Rose' grape berry. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(1): 43-51
- [17] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导. 北京: 中国轻工业出版社, 2017: 50-51
Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. Beijing: China Light

t Industry Press. 2017: 50-51

- [18] 任凯丽, 孔维萍, 唐桃霞, 程鸿. 基于 Lab 表色系统的甜瓜果实颜色多样性分析. 园艺学报, 2022, 49(9): 2017-2022
Ren K L, Kong W P, Tang T X, Cheng H. Diversity analysis of melon fruit color based on the Lab system. Acta Horticulture Sinica, 2022, 49(9): 2017-2022
- [19] 蔡锦玲, 姚文, 陈品品, 蓝波妙, 林涛. 番茄果皮颜色的基因功能标记开发及色差仪参数相关分析. 热带农业科学, 2022, 42(11): 37-43
Cai J L, Yao W, Chen P P, Lan B M, Lin T. The development of molecular functional marker and colorimeter analysis of tomato pericarp color. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2022, 42(11): 37-43
- [20] 赵瑞. 山楂种质资源性状调查与分析. 河北科技师范学院, 2015
Zhao R. Traits investigation and analysis of hawthorn germplasm resources. Hebei Normal University of Science & Technology, 2015
- [21] 林莎莎, 张琦, 于巨, 段黄金. 不同桃品种果皮色差值与色素含量的关系分析. 江西农业学报, 2018, 30(9): 35-38
Lin S S, Zhang Q, Yu J, Duan H J. Analysis of relationship between chromatic aberration value and pigment content of peel in different peach varieties. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(9): 35-38
- [22] 劳永春. 山楂属种质资源形态学评价及疑似资源鉴定. 沈阳农业大学, 2019
Lao Y C. Morphological evaluation of hawthorn germplasm resources and identification of suspected resources. Shenyang Agricultural University, 2019
- [23] 秦宇, 郝瑞鑫, 李若晴, 王燕, 董宁光. 山楂种质资源表型性状多样性分析及评价. 果树学报, 2022, 39(10): 1759-1773
Qin Y, Hao R X, Li R Q, Wang Y, Dong N G. Diversity analysis of phenotypic characters in germplasm resources of hawthorn. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1759-1773
- [24] 白婧. 辽宁主栽山楂品种特征差异与主要功能性成分研究. 沈阳农业大学, 2020
Bai J. Study on the variety characteristics and functional components of cultivated hawthorn. Shenyang Agricultural University, 2020
- [25] 王莉, 庞钰洁, 贾惠娟, 陆鸿英, 陆萍, 殷益明. 庚村阳桃关键栽培技术研究. 浙江农业科学, 2023, 64(3): 646-648
Wang L, Pang Y J, Jia H J, Lu H Y, Lu P, Yin Y M. Study on key cultivation techniques of Gengcunyangtao. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(3): 646-648
- [26] 杨肖芳, 张祖瑛, 苗立祥, 张豫超, 沈岚, 秦巧平, 蒋桂华. ‘越心’草莓组培突变体着色差异的分子机理初探. 园艺学报, 2020, 47(10): 1999-2008
Yang X F, Zhang Z Y, Miao L X, Zhang Y C, Shen L, Qin Q P, Jiang G H. Preliminary analysis on the molecular differences of fruit colouring between ‘Yuexin’ strawberry and its somaclonal mutation. Acta Horticulture Sinica, 2020, 47(10): 1999-2008
- [27] 蒋蕊, 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. 果树学报, 2023: 1-17. DOI:[10.13925/j.cnki.gsxb.20220704](https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20220704).
Jiang X, Y L J, You J L, Xu C Y, Zhang S W, Liang S M. Phenotypic traits diversity analysis of some Chinese bayberry germplasm resources. Journal of Fruit Science. 2023, 1-17. DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20220704.
- [28] 张望舒, 郑金土, 汪国云, 何桂娥, 孙崇德, 许文平, 杨绍兰, 蔡冲, 李鲜, 陈昆松. 不同成熟度杨梅果实采后呼吸速率、乙烯释放速率和品质的变化. 植物生理与分子生物学报, 2005, (4): 417-424
Zhang W S, Zheng J T, Wang G Y, He G E, Sun C D, Xu W P, Yang S L, Cai C, Li X, Chen K S. Changes in respiratory rate, ethylene production rate and quality of postharvest Chinese bayberry fruits with different maturities. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2005 (4): 417-424
- [29] 王霄霄. 不同品种杨梅果实品质和抗氧化活性的比较. 浙江大学, 2007
Wang X X. Comparison of quality and antioxidant capacity of different varieties of Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. & Zucc.) fruit. Zhejiang University, 2007
- [30] 朱培琦, 何鑫, 陈松阳, 曹秀龙, 邱坚. 云南 50 种针叶材表面视觉特性和细胞结构对总色差的影响. 森林工程, 2023, 39(3): 91-99
Zhu P Q, He X, Chen S Y, Cao X L, Qiu J. Surface visual characteristics and the effect of cell structure on the total color difference of 50 species of softwood in Yunnan Province. Forest Engineering, 2023, 39(3): 91-99
- [31] 尹蓉, 张倩茹, 孟庆玲, 王贤萍, 李登科, 薛晓芳. 不同红枣品种果实表面色差的研究. 林业科技通讯, 2017, (7): 66-70
Yin R, Zhang Q R, Meng Q L, Wang X P, Lee D k, Xue X F. Study on chromatic aberration of fruit surface for different jujube varieties. Forest Science and Technology, 2017, (7): 66-70