

基于 CIELab 颜色量化系统的红皮洋葱花青素含量预测模型构建

蒯佳琳¹, 张玉鑫¹, 马彦霞¹, 蔡子龙², 曹亚军³, 于庆文¹

(1. 甘肃省农业科学院蔬菜研究所 兰州 730070; 2. 甘肃德源农业科技发展有限公司 甘肃永昌 737200; 3. 甘肃省洋葱产业协会 兰州 730070)

摘要: 红皮洋葱鳞茎花青素的种类和积累水平不同, 所呈现的外观特征也不尽相同。为实现对红皮洋葱鳞茎颜色的数字化描述, 建立红皮洋葱花青素含量预测方法, 利于 CIELab 颜色量化系统, 通过对比分析 30 份长日照红皮洋葱鳞茎颜色量化指数与花青素含量之间的关系, 发现鳞茎花青素含量与鳞茎颜色量化指标 Chroma 和 CIRG 值间在 0.001 水平呈极显著正相关, 与鳞茎颜色量化指标 a 值间在 0.01 水平呈极显著正相关, 与鳞茎颜色量化指标 L 和 Hue 值间在 0.001 水平呈极显著负相关。并以此建立了可快速预测鳞茎花青素含量的最佳回归模型 $Y = 1.552^{el.231X}$ 。

关键词: 红皮洋葱; 颜色量化; 花青素; 预测模型

中图分类号: S633.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)11-127-06

Construction of a prediction model for anthocyanin content in red onion based on the CIELab color quantification system

KUAI Jialin¹, ZHANG Yuxin¹, MA Yanxia¹, CAI Zilong², CAO Yajun³, YU Qingwen¹

(1. Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Gansu Deyuan Agricultural Technology Development Co., Ltd., Yongchang 737200, Gansu, China; 3. Gansu Province Onion Industry Association, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The types and accumulation levels of anthocyanins in red onion bulbs are different, so the appearance characteristics are different. In order to achieve a digital description of the color of red onion bulbs and establish a method for predicting the anthocyanin content, this study utilized the CIELab color quantification system. By comparatively analyzing the relationship between color quantification indices and anthocyanin content in 30 long-day red onion bulbs, it was found that there was a highly significant positive correlation ($p \leq 0.001$) between the anthocyanin content of the bulbs and the color quantification indices Chroma and CIRG value. There was a highly positive correlation ($p \leq 0.01$) between the anthocyanin content and the color quantification index a of the bulbs. There was a highly significant negative correlation ($p \leq 0.001$) between the anthocyanin content and the color quantification indices L and Hue of the bulbs. Based on these findings, an optimal regression model $Y = 1.552^{el.231X}$ for rapidly predicting the anthocyanin content of onion bulbs was established.

Key words: Red onion; Color quantification; Anthocyanin; Prediction model

花青素是一种水溶性物质, 属于类黄酮次生代谢产物, 广泛存在于植物的花、果实、叶、茎等组织中, 是植物的主要着色物质^[1-3]。在农业生产中, 花青素含量是衡量果蔬品质、营养及市场价值的关键指标^[4-5]。红皮洋葱鳞茎积累了丰富的花青素, 因其

颜色鲜艳和具有抗氧化功能而深受广大消费者喜爱^[6], 但不同品种洋葱鳞茎间花青素的种类和积累水平不同^[7], 所呈现的外观特征也不尽相同。对于洋葱鳞茎外观颜色分级研究工作多参考《洋葱种质资源数据标准》进行感官评价, 而采用数字化精准

收稿日期: 2025-02-14; 修回日期: 2025-03-14

基金项目: 甘肃省农业科学院中青年基金项目(2023GAAS29); 甘肃省人才项目(2025QNGR58); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系(CARS-24-G-28); 农业农村部西北地区蔬菜科学观测试验站项目(2015-A2621-620321-G1203-066)

作者简介: 蒯佳琳, 男, 副研究员, 主要从事洋葱遗传育种与栽培研究。E-mail: kuaijialin_1222@126.com

通信作者: 张玉鑫, 男, 副研究员, 主要从事蔬菜栽培及营养研究。E-mail: zhangyuxin@gsagr.ac.cn

描述洋葱鳞茎颜色的研究鲜见报道。

目前,运用 CIELab 颜色系统,依托 L 、 a 、 b 值来进行颜色量化分析已广泛应用于园艺产品品质预测与评价,如番茄^[8]、西瓜^[9]的番茄红素含量预测,蓝靛果忍冬^[10]、紫叶茼蒿^[11]、茶叶^[12]和紫苏叶片^[13]的花青素含量评价等等。本研究以长期保存的丰富的长日照红皮洋葱种质资源为材料,基于 Lab 颜色量化系统对洋葱鳞茎颜色进行赋值量化测定,以期克服鳞茎颜色描述模糊不精准的弊端,实现鳞茎颜色

的定量分析,明确鳞茎颜色 L 、 a 、 b 值与花青素含量之间的关系,建立基于 Lab 颜色量化系统的红皮洋葱花青素含量预测分析模型。

1 材料与方法

1.1 材料

供试 30 份红皮洋葱材料均由国家特色蔬菜产业体系兰州试验站提供,其中国外材料 18 份,国内材料 12 份(表 1)。

表 1 参试材料编号及来源
Table 1 Number and source of test materials

编号 Number	名称 Name	来源 Source	编号 Number	名称 Name	来源 Source	编号 Number	名称 Name	来源 Source
1	红天 Hongtian	荷兰 Netherlands	11	JQ-04	中国甘肃 Gansu, China	21	红利 Hongli	美国 USA
2	紫金 Zijin	中国陕西 Shaanxi, China	12	红鹰 Hongying	荷兰 Netherlands	22	NNM02	美国 USA
3	LA2	中国山东 Shandong, China	13	红星 Hongxing	荷兰 Netherlands	23	SV4643NT	美国 USA
4	宝红 1 号 Baohong No. 1	中国陕西 Shaanxi, China	14	LA1	中国山东 Shandong, China	24	红锦 Hongjin	荷兰 Netherlands
5	N01	美国 USA	15	NNM03	美国 USA	25	JC-004	美国 USA
6	JQ-05	中国甘肃 Gansu, China	16	红玉 2 号 Hongyu No. 2	中国北京 Beijing, China	26	红元帅 Hongyuanshuai	荷兰 Netherlands
7	FH-08	美国 USA	17	紫宝石 Purple Gem	中国陕西 Shaanxi, China	27	新红奇 Xinhongqi	美国 USA
8	NNM01	美国 USA	18	红吉 Hongji	荷兰 Netherlands	28	JC-001	美国 USA
9	JQ-09	中国甘肃 Gansu, China	19	JQ-10	中国甘肃 Gansu, China	29	紫罗兰 Ziluolan	荷兰 Netherlands
10	JQ-03	中国甘肃 Gansu, China	20	超级紫红 Super Zihong	中国陕西 Shaanxi, China	30	红泰 Hongtai	荷兰 Netherlands

1.2 方法

试验于 2023 年 5—9 月在农业农村部西北地区蔬菜科学观测试验站示范基地内进行(甘肃省金昌市永昌县水源镇)。采用随机区组设计,以每份材料为 1 个处理,每个处理 3 次重复,共计 90 个小区,小区面积 9 m²。于 2 月 23 日在日光温室育苗,5 月 10 日定植,株行距 15 cm×15 cm。采用膜下滴灌方式,地膜净宽为 120 cm,一膜定植 8 行洋葱,定植密度 22 000 株·667 m²。洋葱总施肥量的 20%作基肥施入,剩余 80%随滴灌追施。待成熟时每个品种随机从试验小区选取 30 个大小一致、外形良好、无病虫害的洋葱作为样品,用于测定颜色量化指标及花青素含量。

1.3 测定指标和方法

洋葱鳞茎颜色使用 CR-9 分光测色仪(深圳市

三恩时科技有限公司)测定。考虑不同材料所呈现的外观特征,随机选择充分成熟的洋葱,去除外层干皮后沿鳞茎中部横径一周均匀取 3 个点,得出 L 、 a 、 b 的数值后取平均值。每份材料测定 10 个鳞茎,每个鳞茎重复测定 3 次。色差仪 L 值反映颜色亮度从黑色到白色(0~100)的变化; a 值反映从绿色到红色的变化($-a \sim +a$); b 值反映从蓝色到黄色($-b \sim +b$)的变化;色度值 $\text{Chroma} = (a^2 + b^2)^{1/2}$ 反映色素的浓度大小;色调值 $\text{Hue} = \tan^{-1}(b/a)$ 反映红、橙、绿、蓝、紫等颜色类型以及这些基本色之间的过渡颜色;色泽指数 $\text{CIRG} = (180 - \text{Hue}) / (L + \text{Chroma})$ 反映物质的表面颜色。花青素含量采用 pH 示差法测定^[14],在波长 530 和 750 nm 处检测吸光值;最后根据花青素含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)= $[\Delta A \times V \div (\varepsilon \times d) \times M \times F \times 10^6] \div W$ 公式计算出总花青素含量。式中:花青素吸光值

$\Delta A=(A_{530}-A_{700})_{pH1.0}-(A_{530}-A_{700})_{pH4.5}$; V 为提
取液体积(1 mL); ε 为花青素的摩尔消光系数; d 为
96 孔板光径(0.5 cm); M 为花青素的相对分子质
量; F 为稀释倍数; W 为样本鲜质量(g)。

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS Statis-
tics 22 进行数据整理和分析;采用 Origin Pro 2021
进行相关性分析、主成分分析并作图。

2 结果与分析

2.1 红皮洋葱鳞茎颜色量化指标和花青素含量
分析

从 30 份供试红皮洋葱材料颜色量化指标和花
青素含量测定结果来看(表 2), L 值分布在 25.73~
63.26,平均值为 36.46,变异系数为 26.95%; a 值分
布在 4.78~21.41,平均值为 16.09,变异系数为

表 2 30 份供试红皮洋葱材料颜色量化指标和花青素含量测定结果
Table 2 Determination results of color quantification indexes and anthocyanin contents of 30 tested red onion materials

材料编号 Material number	颜色量化指标 Color quantification index						w (花青素) Anthocyanin content ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
	色差仪 L 值 L	色差仪 a 值 a	色差仪 b 值 b	色度值 Chroma	色调值 Hue	色泽指数 CIRG	
1	31.75	18.18	-4.29	18.84	0.23	3.58	54.87
2	49.20	12.88	-4.02	13.51	0.30	2.87	12.45
3	35.71	19.77	-5.61	16.56	0.28	3.21	27.94
4	63.26	4.78	1.10	5.38	0.38	2.62	6.27
5	31.03	18.11	-2.57	18.33	0.13	3.68	92.67
6	27.44	11.23	0.64	17.26	0.08	4.68	79.49
7	55.36	8.45	-1.40	8.69	0.21	2.81	6.49
8	27.52	13.87	1.48	18.95	0.11	4.34	119.52
9	37.58	18.28	-5.10	13.01	0.27	3.20	25.63
10	38.63	19.96	-5.76	20.78	0.28	3.03	94.78
11	31.11	17.11	-2.43	17.33	0.13	3.81	79.49
12	35.91	20.15	-6.13	21.11	0.30	3.16	96.11
13	30.47	17.86	-1.81	17.98	0.10	3.72	44.08
14	30.98	18.05	-4.18	18.54	0.23	3.63	56.95
15	29.39	16.51	-0.43	16.54	0.05	3.93	101.93
16	52.12	7.05	1.78	8.30	0.45	2.83	10.04
17	46.85	12.71	-4.90	10.90	0.36	2.83	7.91
18	30.51	19.05	-2.94	16.36	0.15	3.62	41.75
19	30.16	18.63	-1.79	17.89	0.11	3.75	44.04
20	52.27	10.30	-2.27	10.64	0.19	2.86	10.62
21	28.35	14.73	-0.82	14.82	0.10	4.22	66.71
22	33.49	16.72	-2.09	16.90	0.12	3.85	66.44
23	35.31	18.90	-4.66	15.52	0.24	3.35	43.04
24	36.17	18.94	-4.22	15.57	0.21	3.51	88.35
25	32.03	21.41	-3.46	21.70	0.15	3.36	104.66
26	31.52	18.36	-1.95	18.53	0.10	3.64	50.81
27	26.33	17.58	-0.42	20.61	0.06	4.11	122.93
28	29.66	18.57	-1.05	18.91	0.14	3.81	102.91
29	25.73	15.86	1.15	15.95	0.09	4.36	63.25
30	48.10	18.58	-6.83	14.85	0.35	2.87	32.20
平均值 Average value	36.46	16.09	-2.50	16.01	0.20	3.51	58.48
标准差 SD	9.83	4.15	2.41	3.97	0.11	0.54	36.27
变异系数 $CV/\%$	26.95	25.81	96.41	24.80	53.92	15.28	62.03

25.81%;*b* 值分布在 -6.83~1.78, 平均值为 -2.50, 变异系数为 96.41%;Chroma 值分布在 5.38~21.70, 平均值为 16.01, 变异系数为 24.80%;Hue 值分布在 0.05~0.45, 平均值为 0.20, 变异系数为 53.92%;CIRG 值分布在 2.62~4.68, 平均值为 3.51, 变异系数为 15.28%;花青素含量分布在 6.27~122.93 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,

平均值为 58.48 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数为 62.03%。

2.2 红皮洋葱鳞茎颜色多样性分析

通过 30 份红皮洋葱材料鳞茎 *L*、*a*、*b* 颜色三维分布图直观地展示了 3 个变量(*L*、*a*、*b*)之间的关系(图 1)。根据 PANTONE 国际色卡 Lab-RGB 对照表, 红皮洋葱鳞茎颜色总体可分为深紫色和浅紫

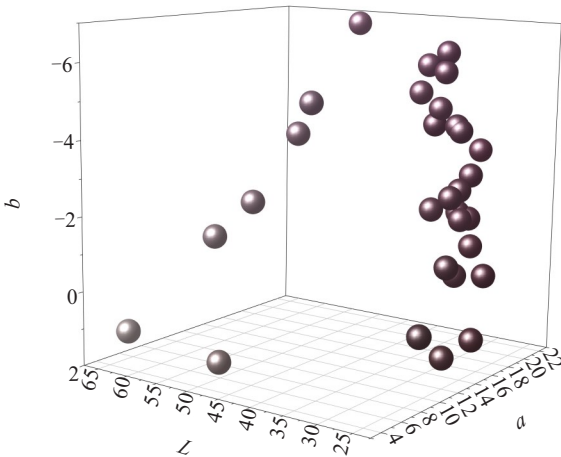


图 1 30 份供试红皮洋葱材料颜色量化指标分布
Fig. 1 Distribution map of color quantification indicators for 30 tested red onion materials

色, 大部分深紫色散点集中在 *L* 轴数值相对较高(亮度较高)、*a* 轴正值(偏向红色)且 *b* 轴负值(偏向蓝色)的区域, 这可能表示这些数据点所代表的对象在颜色特征上具有较高亮度且偏向紫红色调。浅紫色散点相对较少, 分布在深紫色散点之中, 可能代表了一些特殊的数据点或者不同的类别, 与深紫色散点在颜色特征上有一定的差异, 但又存在于相似的亮度和色度范围内。

2.3 红皮洋葱鳞茎颜色量化指标与花青素含量相关性分析

如图 2 所示, 30 份红皮洋葱材料鳞茎花青素含量与颜色量化指标间存在相关性。鳞茎花青素含量与鳞茎颜色量化指标 Chroma、CIRG 值间在 0.001 水平呈极显著正相关; 与鳞茎颜色量化指标 *a* 值间在 0.01 水平呈极显著正相关; 与鳞茎颜色量化指标 *L* 和 Hue 值间在 0.001 水平呈极显著负相关。

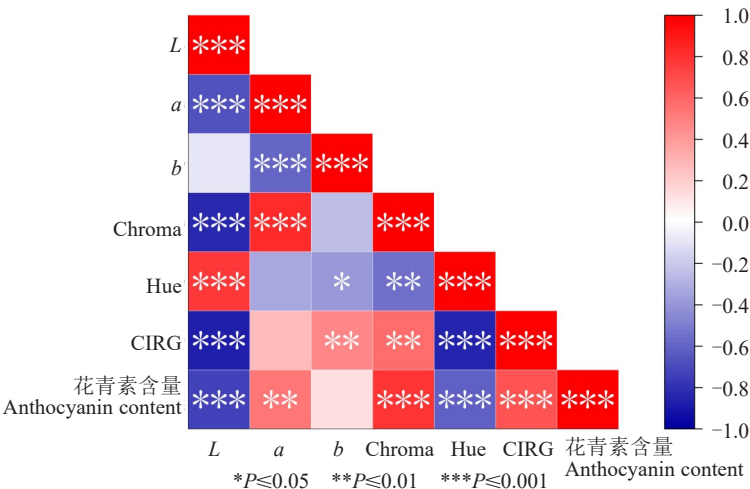


图 2 30 份红皮洋葱材料鳞茎颜色量化指标与花青素含量相关性热图
Fig. 2 Correlation heatmap of color quantification index and anthocyanin content of 30 tested red onion materials

2.4 红皮洋葱鳞茎颜色量化指标与花青素含量主成分分析

通过主成分分析(表 3)绘制 30 份红皮洋葱材料颜色量化指标与花青素含量的 PCA 散点图(图 3),可以直观地观察到样本之间的相似性和差异性,以及不同变量对样本分布的影响。数据经降维处理后,PC1(第一主成分)解释了数据变异的 61.7%,PC2(第二主成分)解释了数据变异的 27.0%,累计达 88.7%。从图中还可以看到,不同的变量用蓝色箭头表示,箭头的方向和长度反映了变量与主成分之间的关系。例如“a”“Chroma”“花青

表 3 红皮洋葱各个颜色性状的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of red onions

指标 Index	PC1	PC2
<i>L</i>	-0.463	0.009
<i>a</i>	0.331	0.501
<i>b</i>	0.041	-0.702
Chroma	0.428	0.267
Hue	-0.393	0.282
CIRG	0.409	-0.325
花青素含量 Anthocyanin content	0.411	-0.008
特征值 Eigenvalue	4.321	1.889
贡献率 Contribution rate/%	61.70	27.00
累计方差贡献率 Cumulative contribution rate/%	61.70	88.70

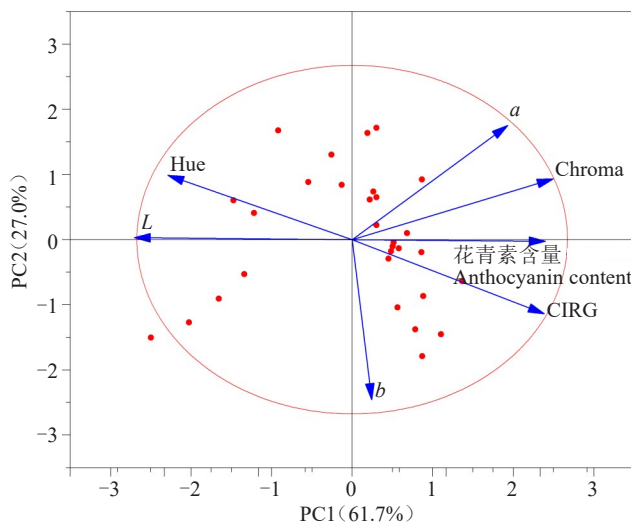


图 3 30 份红皮洋葱材料鳞茎颜色量化指标与花青素含量 PCA 散点图

Fig. 3 PCA scatter plot of color quantification index and anthocyanin content of 30 tested red onion materials

素含量”和“CIRG”等变量的箭头指向 PC1 的正方向,表明它们与 PC1 呈正相关;而“Hue”变量的箭头指向 PC1 的负方向,表明它与 PC1 呈负相关。

2.5 红皮洋葱花青素含量预测模型建立

运用多元线性回归分析颜色参数与花青素含量的关系,建立回归方程预测洋葱花青素含量。选择与花青素含量呈极显著且相关系数最高的 Chroma 指标进行线性回归分析及曲线估计,并建立回归方程(图 4)。通过拟合的线性、二次曲线、指数和复合模型对比,得到与花青素含量拟合度最高的方程为 $Y=1.552e^{1.231X}$, $R^2=0.803$, $F=114.206$ 。

3 讨论与结论

园艺作物的颜色与其营养价值和口感密切相关^[15-16]。颜色量化技术的最大优势在于其与人类视觉感知的高度相关性,能够准确量化颜色差异,将复杂的颜色信息转化为具体的数值,有助于营养品质和颜色遗传分析评价^[17-18]。在本研究之前,已有

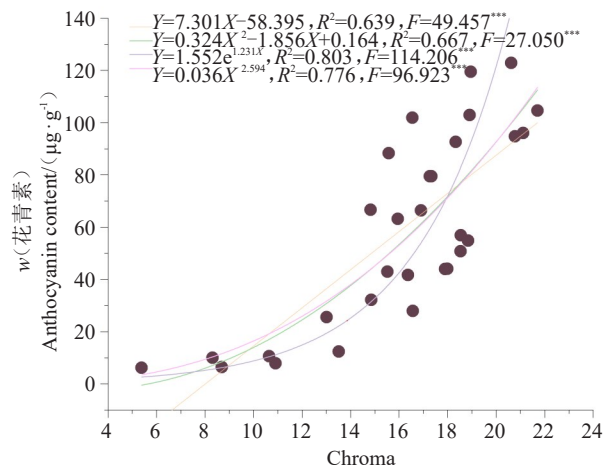


图 4 红皮洋葱花青素含量预测模型建立

Fig. 4 Establishment of prediction model for anthocyanin content in red onion

诸多相关探索,如李龙杰等^[19]采用分光测色技术发现叶绿素含量和叶片含水率与 CIELab 颜色指标存在一定的线性相关;黄娟等^[20]利用 Lab 颜色量化技

术建立了库尔勒香梨果实颜色评价模型和分级标准;任凯丽等^[21]通过颜色数字化进行甜瓜分类,克服了肉眼识别的颜色描述不精准的弊端;路绪强等^[9]利用色差仪可快速检测西瓜番茄红素含量。在本研究中,通过对比分析30份长日照红皮洋葱材料鳞茎颜色量化指数与花青素含量之间的关系,发现鳞茎花青素含量与鳞茎颜色量化指标 Chroma 和 CIRG 值间在 0.001 水平呈极显著正相关;与鳞茎颜色量化指标 a 值间在 0.01 水平呈极显著正相关;与鳞茎颜色量化指标 L 和 Hue 值间在 0.001 水平呈极显著负相关。像李培曷等^[22]通过山楂种质资源果实颜色与花青素含量的关系研究也证明山楂果肉花青素含量分别与 a^* 、 c^* 、CIRG 值呈极显著正相关;代祥等^[23]用色差仪测定 120 个茶树品种叶片的明度(L^*)、红度(a^*)、黄度(b^*)、彩度(c^*)、总色值(e^*)、色调角(h)和饱和度(s^*),证明 7 个参数皆与花色苷含量显著相关。通过拟合方程对比,本研究确定 Chroma 值在一定程度上能够反映洋葱鳞茎花青素含量的高低,并成功建立了鳞茎花青素含量与 Chroma 的最佳回归模型 $Y = 1.552e^{1.231X}$ 。Gazula 等^[24]关于在莴苣中花青素含量、刘徐冬雨等^[25]关于紫苏叶片花青素含量的研究也都借助 Lab 颜色量化技术实现了预测。本研究的 Lab 颜色量化技术为洋葱皮色育种实践中表型选择提供了新的方法和借鉴,可以通过检测 Chroma 等颜色量化值,快速筛选出花青素含量高的洋葱植株,加速高营养价值洋葱品种的选育进程。同时考虑到洋葱花青素合成易受光照、温度、水分等环境因素的干扰^[26-27],后续研究需建立环境因素与颜色量化指标、花青素含量的多元关系模型,为洋葱种植提供更科学的环境调控依据。此外,加强颜色量化技术与基因技术的结合,从分子层面解析颜色与花青素合成的调控网络,为洋葱皮色育种提供更坚实的理论基础。

本研究利用 Lab 颜色量化系统对红皮洋葱颜色进行定量化、数字化特征数值分析,明确了鳞茎颜色量化指标与花青素含量之间的关系,成功建立基于 Lab 颜色量化系统的红皮洋葱花青素含量预测分析模型,为完善洋葱种质资源外观及品质评价奠定了基础。同时,本研究成果也为洋葱皮色育种提供了新的思路与方法,有望推动洋葱育种工作取得新进展。

参考文献

- [1] 谷如祥,冯淑贞,刘聪慧,等.8种彩色马铃薯中花青素含量测定及其在贮藏过程中的含量变化研究[J].食品安全质量检测学报,2024,15(24):239-247.
- [2] LI L,ZHANG H,LIU J N,et al. Grain color formation and analysis of correlated genes by metabolome and transcriptome in different wheat lines at maturity[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10:1112497.
- [3] 周弘峰,朱思颖,贺丹,等.紫叶甘蓝型油菜花青素合成的转录组-代谢组联合分析[J].华北农学报,2024,39(3):25-34.
- [4] 杨琴,邓洁,张婷婷,等.花粉直感效应对蓝莓果实花青素合成及其关键酶活性的影响[J].北方园艺,2024(16):15-21.
- [5] 刘冉,寇亚平,陈庆阳,等.蔷薇属植物花青素苷的测定及其对花瓣呈色的影响[J].植物遗传资源学报,2024,25(5):800-812.
- [6] 蒯佳琳,张玉鑫,陶兴林,等.甘肃河西地区红皮洋葱种质资源农艺性状相关性及其聚类分析[J].种子,2023,42(5):68-72.
- [7] 徐宏志,刘冰江,任秀梅,等.洋葱鳞茎颜色遗传与分子调控机制研究进展[J].山东农业科学,2021,53(11):130-135.
- [8] 周蓉,蒋芳玲,梁梅,等.用色差仪法定量分析番茄果实番茄红素的含量[J].江西农业学报,2012,24(9):45-48.
- [9] 路绪强,袁明,何楠,等.利用色差仪快速检测西瓜番茄红素含量[J].中国瓜菜,2021,34(4):41-45.
- [10] 郑先哲,赵兴隆,刘成海,等.基于果实颜色特征的蓝靛果忍冬花青素含量预测[J].农业工程学报,2023,39(2):242-251.
- [11] 王璐,刘超杰,齐正阳,等.紫色叶用莴苣中花青素含量与色差指标的相关性[J].北京农学院学报,2018,33(3):44-48.
- [12] DAI F S,SHI J,YANG C S,et al. Detection of anthocyanin content in fresh Zijuan tea leaves based on hyperspectral imaging[J]. Food Control, 2023, 152:109839.
- [13] 聂黎行,王馨平,康帅,等.紫苏叶和白苏叶叶色数字化表征及与花青素含量相关性研究[J].中国医院药学杂志,2024,44(21):2477-2483.
- [14] 李楠,毛培春,郑明利,等.代谢组和转录组联合解析马蔺花瓣花青素积累机制[J].中国草地学报,2025,47(2):56-69.
- [15] 胡紫蔚,张蕾琛,陈英子,等.西瓜果实类胡萝卜素组分含量与瓤色相关性分析[J].中国瓜菜,2025,38(1):31-38.
- [16] 徐丽丽,申晓青,单素兰,等.园艺作物果实皮色遗传研究进展[J].分子植物育种,2015,13(11):2655-2662.
- [17] 章毅颖,张余,褚云霞,等.利用色差仪参数分析青花菜和花椰菜叶片颜色特征[J].园艺学报,2025,52(4):872-882.
- [18] 林涛,李锦泉,黄青峰,等.樱桃番茄果色的遗传分析[J].福建农业学报,2013,28(10):987-992.
- [19] 李龙杰,史勇,郭俊先.基于分光测色反演哈密瓜叶片叶绿素与含水率研究[J].光谱学与光谱分析,2024,44(8):2296-2302.
- [20] 黄娟,李新建.基于色差仪法的库尔勒香梨果实颜色分级标准[J].北方园艺,2018(17):38-44.
- [21] 任凯丽,孔维萍,唐桃霞,等.基于 Lab 表色系统的甜瓜果实颜色多样性分析[J].园艺学报,2022,49(9):2017-2022.
- [22] 李培曷,孙馨宇,王键,等.山楂种质资源果实颜色与花青素含量的关系[J].植物遗传资源学报,2024,25(1):72-83.
- [23] 代祥,梅菊芬,杨亦扬,等.基于色差仪的茶树叶色量化研究[J].南京农业大学学报,2024,47(2):232-241.
- [24] GAZULA A,KLEINHENZ M D,SCHEERENS J C,et al. Anthocyanin levels in nine lettuce (*Lactuca sativa*) cultivars: Influence of planting date and relations among analytic, instrumented, and visual assessments of color[J]. HortScience, 2007, 42(2):232-238.
- [25] 刘徐冬雨,郭潇潇,付晨青,等.基于 RGB 和 CIELab 预测紫苏叶片花青素含量[J].中国农业科技导报,2024,26(7):103-110.
- [26] 王振宝,徐宏志,刘冰江,等.不同皮色洋葱花青素合成酶基因片段的克隆及苗期表达分析[J].山东农业科学,2022,54(11):19-24.
- [27] 宋建辉,郭长奎,石敏.植物花青素生物合成及调控[J].分子植物育种,2021,19(11):3612-3620.