



紫色叶用莴苣色差参数及花青素含量的相关性分析

王文珠¹, 刘明霞¹, 侯 栋¹, 崔银花², 罗 涛³

(1. 甘肃省农业科学院 蔬菜研究所, 兰州 730070; 2. 榆中县农业技术推广中心, 兰州 730121;

3. 甘肃省合水县蔬菜开发办公室, 甘肃庆阳 745400)

摘 要 以紫色叶用莴苣为研究对象, 系统分析叶片色差参数(亮度 L^* 、红度 a^* 、黄度 b^* 、彩度 C^* 、饱和度 S^*)与花青素含量的相关性, 旨在建立基于色差分析的紫色叶用莴苣花青素含量快速检测方法。结果表明, 不同品种叶用莴苣的花青素含量差异显著($91.54 \sim 528.42 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 呈现丰富的紫色梯度变异; 随着叶色由浅紫向深紫转变, L^* 持续降低, b^* 呈先降后升的趋势, a^* 则表现为“上升—下降—再上升”的变化特征; 相关性分析表明, 花青素含量与 a^* 呈极显著正相关(相关系数为 0.866), 与 b^* 、 C^* 均呈显著正相关(相关系数为 0.800)。综合分析表明, a^* 可作为紫色叶用莴苣花青素含量预测的关键色差指标。

关键词 紫色叶用莴苣; 花青素; 色差参数; 相关性

叶用莴苣(*Lactuca sativa* L.)为菊科莴苣属一年或两年生蔬菜, 原产于地中海沿岸地区^[1], 其叶片鲜嫩爽脆, 营养丰富, 富含膳食纤维、蛋白质、碳水化合物、维生素 C 及铁、钙、磷等多种矿物质^[2-3], 是全球广泛栽培的重要叶用蔬菜。根据叶片呈色特征, 叶用莴苣可分为绿色、黄绿色、红色和紫色四大类, 其中紫色叶用莴苣依据不同程度紫色又可进一步划分为浅紫、中紫、深紫和特紫类。紫色叶用莴苣富含花青素等抗氧化活性成分, 在保健型蔬菜领域具有广阔的应用前景^[4-5]。

叶片颜色是叶菜类蔬菜的重要表型特征, 也是品种选育与评价的关键指标^[6]。目前叶片颜色判定主要采用肉眼观察法或色素含量测定法。肉眼观察法易受观察者主观判断, 结果不准确; 使用高效液相色谱法、分光光度计法等测定花青素含量, 操作成本高, 而且不宜于育种者对材料颜色的快速鉴定。色差仪因操作简便、测量精准且重复性好, 已被广泛应用于果蔬品质评价领域^[7]。刘冉等^[8]利用色差仪测定 8 种不同花色蔷薇属植物的花色表型, 发现花青素苷 Cy3Gal 含量与亮度 L^* 和黄度 b^* 呈正相关, 与红度 a^* 呈负相关; 王亚秀等^[9]分析了散叶大白菜叶脉颜色差参数与总

花青素含量的相关性, 确定了紫色叶脉的 L^* 判别阈值为 10.44; 郭咏梅等^[10]通过色差仪对不同品种观赏辣椒果实颜色的测定, 发现果实色差值 L^* 、 b^* 与花青素含量呈极显著负相关。此外, 路绪强等^[11]发现西瓜果肉色差参数 C^* 可用于估测番茄红素含量; 宿莹等^[12]研究表明, 龙胆色差参数 L^* 和 E^* 与其苦苷含量呈显著正相关。

尽管已有许多研究采用色差仪对园艺作物叶片颜色进行了量化分析^[13], 但关于紫色叶用莴苣叶片颜色与花青素含量方面的系统研究较为缺乏。本研究以 5 种不同紫色叶用莴苣品种为试验材料, 采用色差仪测定叶片 CIELAB 色度空间参数, 同时结合 pH 示差法测定其花青素含量, 初步探讨不同紫色程度叶用莴苣叶片的色差参数变化规律, 以及与花青素含量的相关性, 旨在为建立紫色叶用莴苣叶色数字化评价标准和选育高花青素含量的紫色叶用莴苣新品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 5 种紫色散叶叶用莴苣, 各品种形态特征见表 1。试验于 2024 年 3 月—6 月在甘

收稿日期: 2025-05-30 修回日期: 2025-08-07

基金项目: 甘肃省科技计划重大专项(24ZDNA005); 甘肃省技术创新引导计划(25CXNA0270); 金昌市重点科技计划(2024NY016z)。

第一作者: 王文珠, 女, 研究实习员, 研究方向为蔬菜遗传育种。E-mail: 1244715561@qq.com

通信作者: 刘明霞, 女, 副研究员, 研究方向为蔬菜遗传育种。Email: maggie@gsagr.cn

肃省农业科学院蔬菜研究所兰州试验基地进行,该基地海拔 1 500 m。采用穴盘育苗移栽方式,3 月 6 日温室内育苗,4 月 10 日移栽至露地,双行定植,垄宽 50 cm,垄高 10 cm,垄面覆黑色地膜,

植株行距为 25 cm×30 cm,每份材料种 20 株,3 次重复。灌溉采用膜下滴灌系统,每垄铺设 2 根滴灌带(滴头间距 30 cm,灌水量维持田间持水量的 70%~80%),水肥按常规处理。

表 1 供试紫色叶用莴苣形态特征

Table 1 Morphological characteristics of tested purple loose-leaf Lettuce cultivars

品种编号 Variety code	叶色 Leaf color	叶面褶皱 Leaf wrinkling	叶面光泽 Leaf glossiness	叶裂刻 Leaf lobation	叶缘 Leaf margin	叶尖 Leaf apex	叶形 Leaf shape
SC1	紫红色 Purple red	微皱 Micro-wrinkle	有光泽 Shiny	无裂刻 Non-cracked	钝齿状 Obtuse	圆形 Round	长椭圆 Long ellipse
SC2	紫红色 Purple red	微皱 Micro-wrinkle	有光泽 Shiny	无裂刻 Non-cracked	重锯齿 Heavy-sawtooth	圆形 Round	倒卵形 Inverted oval
SC3	深紫色 Deep purple	微皱 Micro-wrinkle	有光泽 Shiny	无裂刻 Non-cracked	钝齿状 Obtuse	圆形 Round	匙形 Spoon-shaped
SC4	紫带绿色 Purple-green	微皱 Micro-wrinkle	有光泽 Shiny	浅裂 Shallow-crack	全缘 Entire-margin	尖形 Sharp shape	披针形 Lanceolate
SC5	紫红色 Purple red	平滑 Smoothing	有光泽 Shiny	深裂 Drastic cracking	重锯齿 Heavy-sawtooth	圆形 Round	提琴形 Viola shape

1.2 叶片颜色表型观测

定植 35 d 后采用目测评估法观察各品种叶色,每个品种随机选取 9 株,采集完全展开的第 3~4 片功能叶,置于黑纸观测板,由 5 人观察,按多数人描述叶色信息进行记录整理。

1.3 叶片色差参数测定

定植 35 d 后,于晴天 9:00—11:00,采用色差仪(CR-400, Konica Minolta, 日本)测定叶用莴苣叶片色差参数。各品种随机选择 3 株生长良好的叶用莴苣,取基部向上第 3~4 片功能叶,避开主叶脉区域测定叶片 L* (亮度)、a* (红绿值)、b* (黄蓝值)和 C* (彩度),重复 3 次,取平均值。计算饱和度 S*^[14]。计算公式:S* = C* / L*。

1.4 花青素含量测定

定植 35 d 后,采用 pH 示差法^[15]测定叶用莴苣叶片花青素含量。每个品种随机选择 3 株生长良好的叶用莴苣,取基部向上第 3~4 片功能叶,避开主叶脉区域取样混合。取 1.0 g 混合样,用液氮研磨,加入 10 mL 预冷的 1% 盐酸-甲醇溶液,4 ℃ 避光提取 12 h,离心后取 1 mL 上清液,用 0.2 μm 滤膜过滤后,加入 4 mL pH 4.5 的 0.2 mol·L⁻¹ 醋酸钠缓冲液,再取上清液 1 mL 加入 pH 1.0 mol·L⁻¹ 的 0.2 mol·L⁻¹ 氯化钾缓冲液 4 mL,摇匀,室温平衡 30 min 后,测定 520 nm 和 700 nm 处的吸光值。每处理重复 3 次。计算公式如下:

$$A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 1.0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH } 4.5}$$

$$\text{提取液花青素质量浓度} = (A \times V \times n \times$$

$$M) / (\epsilon \times m)$$

上述公式中,A 指 pH 1.0 和 pH 4.5 处吸光度的差值;V 指提取液总体积(mL);n 为稀释倍数;M 为花青苷相对分子质量 449.2;ε 为花青苷的摩尔消光系数,26 900;m 为样品质量(g)。

1.5 数据分析

采用 SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析,并通过 Duncan's 多重比较检验差异显著性(P < 0.05)。变量间的相关性分析采用 Pearson 相关系数法。采用 Microsoft Excel 2023 进行数据整理分析,数据以“平均值±标准差”的形式表示。

2 结果与分析

2.1 不同紫色叶用莴苣品种叶色表现比较

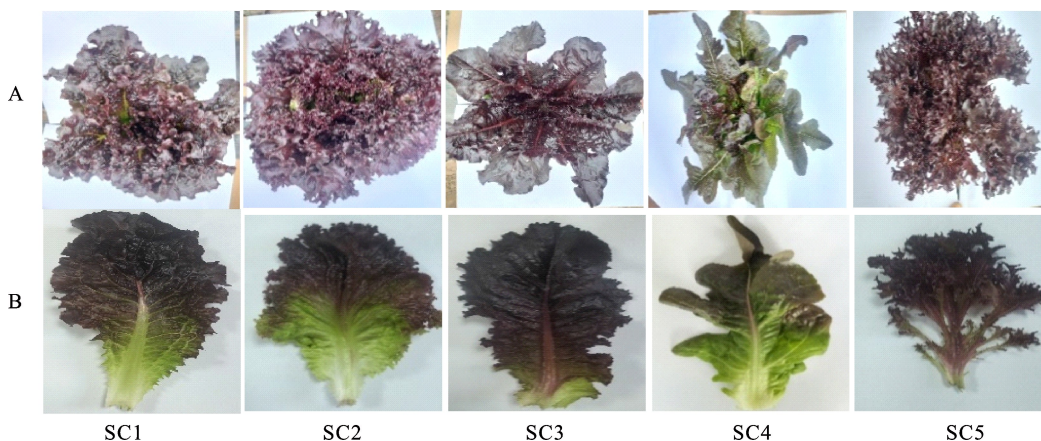
由图 1 可知,5 个紫色叶用莴苣品种在叶片颜色上表现出明显差异。目测法结果表明,叶色深浅为 SC3 > SC1 > SC5 > SC2 > SC4。其中 SC3 叶片呈深紫红色;SC1 和 SC5 呈中等紫色,但叶缘着色较深;SC2 表现为标准紫红色;SC4 为紫色较浅,叶片中上部位处呈现轻微紫晕,其余部分接近浅绿色。

2.2 不同紫色叶用莴苣品种色差指标的差异

由表 2 可知,各紫色叶用莴苣品种的叶片色差参数值存在显著差异。色差参数 L* 表示明亮度,变幅为 0~100,数值越小,黑色越深;数值越大,颜色偏白色。SC3 的 L* 亮度值最低,表明颜色最深;而 SC4 中 L* 显著高于其他品种,说明其叶片反光率较强,故颜色最浅。a* 表示红色与绿

色间的色彩变化,数值为正时则为红色,负值为绿色;数值越大表示红色越深,数值越小表示颜色偏绿。SC4 的 a^* 最小,且为负值(-1.47),说明该品种显示绿色特征;而 SC3 的 a^* 为最高值,且显著高于其他品种,表明 SC3 的红色成分最明显。 b^* 表示黄色与蓝色间的变化,正值是黄色,负值是蓝色。所有品种的 b^* 均为正值,其中 SC4 品种 b^* 为最大值,表明 SC4 品种有黄色成分特征,

这可能是叶片的绿色和紫色叠加,故呈现出黄色调。彩度 C^* 表示测试颜色到亮度轴的垂直距离,距离越大,彩度越大。各品种间 C^* 差异显著,其中 SC3 的 C^* 较 SC4 品种显著降低 68.30%。 S^* 表示颜色饱和度,其数值为彩度与亮度之比,表示相对于自身亮度的彩色性。相较于其他品种,SC2 和 SC4 的 S^* 均为最高,且差异显著,说明 SC2 和 SC4 叶片颜色鲜艳。



A. 植株整体形态; B. 叶片局部特征。从左至右依次为 SC1(紫红)、SC2(紫红)、SC3(深紫)、SC4(紫带绿)、SC5(紫红)

A. Whole plant morphology; B. Leaf morphological details. From left to right are SC1 (purple-red), SC2 (purple-red), SC3 (dark purple), SC4 (purple-green), and SC5 (purple-red) respectively

图 1 不同紫色叶用莴苣品种叶色特征

Fig. 1 Leaf color characteristics of different purple lettuce varieties

表 2 不同紫色叶用莴苣品种色差参数

Table 2 Chromatic parameters of different varieties of purple lettuce

品种编号 Variety code	L^*	a^*	b^*	C^*	S^*
SC1	16.86±0.19 b	4.71±0.73 b	2.07±1.60 bc	5.15±0.69 c	0.31±0.04 b
SC2	16.82±3.86 b	4.49±1.18 b	3.65±0.58 b	8.86±1.11 b	0.55±0.11 a
SC3	16.28±2.20 b	8.08±0.96 a	0.57±0.40b d	4.53±1.22 c	0.27±0.03 b
SC4	21.92±2.38 a	-1.47±1.52 c	12.54±1.10 a	14.29±0.14 a	0.63±0.06 a
SC5	13.94±0.31 b	7.52±1.56 a	0.94±0.37 d	7.58±1.58 b	0.32±0.07 b

2.3 不同紫色叶用莴苣品种花青素含量差异分析

由表 3 可知,不同紫色叶用莴苣品种的花青素含量为 91.54~341.36 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其中以 SC3 花青素含量最高,为 341.36 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于其他品种;其次是 SC4,花青素含量达到 248.59 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,SC1、SC2 和 SC5 品种差异显著;而 SC1、SC2 和 SC5 品种间花青素含量差异不显著,分别是 113.38 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、91.54 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 114.72 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.4 紫色叶用莴苣色差指标与花青素含量的相关性分析

由表 4 可知,除 L^* 和 S^* 外, a^* 、 b^* 和 C^* 与花青素含量具有一定相关性。其中 a^* 与花青素

表 3 不同紫色叶用莴苣品种花青素含量

Table 3 Anthocyanin content of different purple lettuce varieties

品种编号 Variety code	花青素含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$ Anthocyanin content
SC1	113.38±4.47 c
SC2	91.54±9.92 c
SC3	341.36±6.36 a
SC4	248.59±4.67 b
SC5	114.72±9.08 c

含量呈极显著正相关,相关性系数为 0.866; b^* 与花青素含量呈极显著正相关,相关性系数分别为 0.715; C^* 与花青素含量呈显著正相关,相关性系数为 0.552;其相关性系数大小(绝对值)为 $a^* >$

$b^* > C^*$ 。此外, b^* 、 C^* 分别与 S^* 呈极显著正相关,其中 b^* 、 C^* 与 S^* 相关性极强,相关系数在 0.800 以上,说明不同紫色叶用莴苣品种的叶片颜色中黄蓝度、饱和度与彩度均具有强相关性。

表 4 不同紫色叶用莴苣品种花青素含量与色泽参数的相关性

Table 4 Correlation between anthocyanin content and color parameters of different varieties of purple lettuce

参数 Parameters	L*	a*	b*	C*	S*	花青素 Anthocyanidin
L*	1.000					
a*	-0.195	1.000				
b*	0.301	-0.788**	1.000			
C*	0.463	-0.518*	0.916**	1.000		
S*	0.043	-0.327	0.807**	0.881**	1.000	
花青素 Anthocyanidin	0.167	0.866**	0.715**	0.552*	0.390	1.000

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。 ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: * Significantly correlated at the 0.05 level (bilateral). ** Significantly correlated at the 0.01 level (bilateral).

3 结论与讨论

花青素是一种天然色素,具有较强的抗氧化性,可预防心血管疾病,对身体有一定保护作用^[15-16]。目前,已培育出富含花青素的紫色大白菜和紫甘蓝等品种,选育富含花青素成分是叶用莴苣品质育种的方向^[17],本研究为建立紫色叶用莴苣花青素含量快速预测的方法提供依据。高琦等^[18]研究表明,当叶用莴苣叶色由浅紫向紫色变化时,L 逐渐变小、a 逐渐增大、b 逐渐减小。本试验中不同紫色叶用莴苣品种的叶色由浅紫到深紫时,色泽参数具有一定变化趋势,呈现 L* 递减、b* 先减后增、a* 呈现先增再减后增的规律,这与高琦等^[18]研究结果相似。本试验中深紫色 SC3 品种 L* 显著低于 SC4 品种,但其 b* 最小,表明深色品种的 L* 较低,故判定 SC3 品种为深紫色;紫带绿 SC4 品种的 a* 最小,但其 b* 最高,这表明 SC4 品种与其余各品种相比,颜色为最浅,且偏黄绿色。代祥等^[19]研究发现白光处理的‘黄金芽’茶叶的叶片颜色较红蓝光处理,叶片偏白色,其 L* 和 b* 数值显著大于红蓝光处理的 L*、b*,而 a* 显著小于红蓝光处理的 a*。这与本试验色差指标结果基本一致。

林文超等^[20]研究发现,紫色大白菜中花青素含量随叶片由内向外层是逐步升高的变化,外部叶片(绿—紫叶)的花青素含量最高,为 82.83 mg·kg⁻¹。本试验中紫带绿 SC4 品种叶片的花青素含量达 248.59 μg·g⁻¹,显著高于 SC1、SC2 和 SC5 品种,这与林文超等^[20]研究结果基本相似。本试验相关性分析结果中,a* 与花青素含量呈极显著正相关,相关系数为 0.866。表明 a* 越大,花青素含量越高^[21]。

综上,除 SC4 品种外,SC3 品种花青素含量显著高于 SC1、SC2 和 SC5 品种,该品种 a* 与花青素含量呈极显著正相关性。表明色差参数与花青素含量具有一定相关性,该结果为快速预测蔬菜花青素含量提供理论依据。此外,叶色深浅的变化受到花青素合成的条件以及外在环境因素的影响^[22-23]。本试验环境为露地栽培,其花青素含量和色差参数的测定可能受到外在条件的影响。因此,建立基于色差参数估测紫色叶用莴苣花青素含量的模型,需结合多地点试验进一步验证。

参考文献 Reference:

- [1] 曾诗丝,刘厚诚.植物工厂叶用莴苣的光环境调控研究进展[J].农业工程技术,2023,43(15):15-23.
- [2] 田雪珂,钟启文,孙雪梅,等.叶用莴苣种质资源表型性状及营养品质综合评价[J].江苏农业学报,2022,38(5):1330-1339.
- [3] 杨攀,杨诗雯,李磊,等.生菜研究进展综述[J].现代园艺,2020,43(15):34-36.
- [4] 徐文栋,刘晓英,焦学磊,等.蓝光对莴苣生长和品质的影响[J].南京农业大学学报,2015,38(6):890-895.
- [5] LIU Y,ZHANG J,YANG X,et al. Diversity in flower colorations of *Ranunculus asiaticus* L. revealed by anthocyanin biosynthesis pathway in view of gene composition, gene expression patterns, and color phenotype[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(14):13785-13794.
- [6] 杨开,李精精,董旭军,等.莴苣功能成分及生理活性研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(8):329-335.
- [7] 胡可,韩科厅,戴思兰.环境因子调控植物花青素苷合成及呈色的机理[J].植物学报,2010,45(3):307-317.
- [8] 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.
- [9] 王亚秀,张妮南,张学芬,等.大白菜叶脉紫色程度快速及准确划分方法[J].西北农业学报,2023,32(3):386-392.
- [10] 郭咏梅,段旭东,白健君,等.观赏辣椒果实花青素提取及果色相关性分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(1):48-58.
- [11] 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.
- [12] 宿莹,李翟,侯晓琳,等.基于色差原理分析龙胆有效成分含量与颜色的相关性[J].中国实验方剂学杂志,

- 2019,25(13):151-156.
- [13] 邱正明,严承欢,黄燕,等. 莴苣花青素研究进展[J]. 中国蔬菜,2019(12):25-30.
- [14] ZOU Y, MA W, TANG Q, *et al.* A high - precision method evaluating color quality of Sichuan Dark Tea based on colorimeter combined with multi - layer perceptron [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43 (8): e13444.
- [15] 杨兆艳. pH 示差法测定桑椹红色素中花青素含量的研究[J]. 食品科技,2007(4):201-203.
- [16] JAMEI R, BABALOO F. Stability of Blueberry (Cornus mas-Yulush)anthocyanin pigment under pH and co-pigment treatments [J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20: 2128-2133.
- [17] 孙日飞,张淑江,章时蕃,等. 紫红色大白菜种质的创新研究[J]. 园艺学报,2006(5):1032.
- [18] 高琦,韩莹琰,谢蒙胶,等. 紫色叶用莴苣色泽参数及花色苷含量的相关研究[J]. 中国农学通报,2016,32(34):42-48.
- [19] 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.
- [20] 林文超,王德森,王海龙,等. 大白菜花青素含量及色差指标相关性研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版),2011,28(3):201-204.
- [21] 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.
- [22] 于芮芦,魏泽楼,郭媛,等. 甘蓝型油菜 BnWRKY41 的理化性质分析及 BnWRKY41-2 在花青素合成中的功能解析[J]. 西北农业学报,2022,31(10):1316-1328.
- [23] 金笑雨,王艺光,赵宏波,等. 彩叶桂叶色变化及生理特征分析[J]. 浙江农林大学学报,2024,41(5):1056-1065.

Correlation between Color Parameters and Anthocyanin Content in Purple Lettuce

WANG Wenzhu¹, LIU Mingxia¹, HOU Dong¹, CUI Yinhua² and LUO Tao³

(1. Vegetable Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

2. Yuzhong County Agricultural Technology Extension Center, Lanzhou 730121, China;

3. Vegetable Development Office of Heshui County, Qingyang Gansu 745400, China)

Abstract Leaf color is a crucial phenotypic trait for breeding and quality evaluation of lettuce varieties. In this study, purple lettuce was used as the study object, and the correlation between leaf color parameters (lightness L^* , redness a^* , yellowness b^* , chroma C^* , saturation S^*) and anthocyanin content was systematically analyzed, aiming to establish a rapid detection method for detecting anthocyanin content in purple lettuce based on color analysis. The results showed that the anthocyanin content among different lettuce varieties varied significantly (ranging from 91.54 to 528.42 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), exhibiting abundant purple gradient variation. As the leaf color changed from light purple to dark purple, the L^* value continuously decreased, the b^* value first decreased and then increased, and the a^* value showed a fluctuating trend of increase-decrease-increase. Correlation analysis demonstrated that anthocyanin content was significantly positively correlated with the a^* value ($r=0.866$) and with the b^* and C^* values ($r=0.800$). Comprehensive analysis showed that the a^* value could serve as a key color indicator for predicting anthocyanin content in purple lettuce.

Key words Purple lettuce; Anthocyanin; Color difference parameters; Correlation

Received 2025-05-30

Returned 2025-08-07

Foundation item Major Scientific and Technological Plan of Gansu Province (No. 24ZDNA005); Technological Innovative Guidance Plan of Gansu Province (No. 25CXNA0270); Key Scientific and Technological Plan of Jinchang City (No. 2024NY016z).

First author WANG Wenzhu, female, research intern. Research area: vegetable genetic breeding. E-mail: 1244715561 @ qq.com

Corresponding author LIU Mingxia, female, associate research fellow. Research area: vegetable genetic breeding. E-mail: maggie @ gsagr.cn

(责任编辑:顾玉兰 Responsible editor: GU Yulan)