

引用格式:

罗阳, 周涛, 卢蕊, 于博洋, 向佐湘, 胡龙兴, 徐倩. 不同颜色三色苋叶片的色素含量与抗氧化能力[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 61–69.

LUO Y, ZHOU T, LU R, YU B Y, XIANG Z X, HU L X, XU Q. Leaf pigment content and antioxidant capacity of different colored *Amaranthus tricolor*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(5): 61–69.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同颜色三色苋叶片的色素含量与抗氧化能力

罗阳¹, 周涛¹, 卢蕊¹, 于博洋¹, 向佐湘¹, 胡龙兴^{1,2}, 徐倩^{1*}

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.黄三角农高区院士工作站国家盐碱地综合利用技术创新中心, 山东 东营 257300)

摘 要: 为明确不同颜色三色苋(*Amaranthus tricolor*)叶片的叶色参数、色素含量与抗氧化能力之间的关系, 以 7 种彩叶三色苋为试验材料, 按照不同颜色分为 13 个叶色组织, 测定其叶色参数值、色素含量、生物活性物质含量及抗氧化能力指标值, 并进行相关性分析和隶属函数分析。结果表明: 13 个叶色组织的叶色参数、色素含量、生物活性物质含量和抗氧化能力存在明显差异; 不同叶色组织的 L^* 为 27.78 ~ 82.22, a^* 为 -21.93 ~ 53.14, b^* 为 1.00 ~ 60.33, c^* 为 3.10 ~ 69.06; 绿色和紫色叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量显著高于黄色、红色叶片的; 红色和紫色叶片中的甜菜色素、总黄酮和总多酚含量显著高于黄色和绿色叶片的; a^* 、甜菜色素、总黄酮和总多酚含量与抗氧化能力指标呈极显著正相关; 紫色、红色、绿色、黄色的三色苋叶片的抗氧化能力依次降低。

关 键 词: 三色苋; 叶色参数; 光合色素; 甜菜色素; 抗氧化能力

中图分类号: S636.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)05-0061-09

Leaf pigment content and antioxidant capacity of different colored *Amaranthus tricolor*

LUO Yang¹, ZHOU Tao¹, LU Rui¹, YU Boyang¹, XIANG Zuoxiang¹, HU Longxing^{1,2}, XU Qian^{1*}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Academician Workstation Agricultural High-Tech Industrial Area of the Yellow River Delta, National Center of Technology Innovation for Comprehensive Utilization of Saline-Alkali Land, Dongying, Shandong 257300, China)

Abstract: To understand the relationship between leaf color parameters, pigment content and antioxidant capacity of different colored *Amaranthus tricolor* L. leaves, seven colorful *A. tricolor* leaves were collected and analysed in this study. The leaves were divided into 13 types of leaf color tissues according to their colors, and leaf color parameters, pigment contents, biologically active substances contents, and indicators of antioxidant capacity were examined and the correlation and membership function of the above parameters were analyzed. The results showed that there were significant differences in leaf color parameters, pigmentation content, bioactive substance content and antioxidant capacity in the studied 13 leaf color tissues. The L^* of different leaf color tissues ranged from 27.78 to 82.22, the a^* from -21.93 to 53.14, the b^* from 1.00 to 60.33 and the c^* from 3.10 to 69.06. The contents of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoids were significantly higher in green and purple leaves than in yellow and red leaves. The contents of betalain, total flavonoids and total polyphenols were higher in red and purple leaves than in yellow and green

收稿日期: 2023-12-15

修回日期: 2024-05-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA26050201); 山东省重点研发计划项目(2022LZGC018); 黄三角国家农高区省级科技创新发展专项(2022SZX13)

作者简介: 罗阳(1997—), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事牧草种质资源评价研究, 2770855977@qq.com; *通信作者, 徐倩, 博士, 讲师, 主要从事牧草种质资源评价和利用研究, xq20052005@126.com

leaves. The a^* , the contents of betalain, total flavonoids and total polyphenols were positively correlated with both antioxidant activity indices. The antioxidant capacities of different colored *A. tricolor* leaves were ranked from high to low in the order of purple, red, green, and yellow *A. tricolor* leaves.

Keywords: *Amaranthus tricolor*; leaf color parameters; photosynthetic pigments; betalain; antioxidant capacity

三色苋(*Amaranthus tricolor* L.)又名雁来红、老来少,是苋科(Amaranthaceae)苋属(*Amaranthus*)一年生草本植物,常用作蔬菜、饲料、植物提取物原料等^[1]。三色苋原产于中美洲和东南亚的热带与亚热带地区,生长速度快,种类繁多,耐旱、耐盐碱和耐热能力强,对土壤要求不高,在中国大部分地区广泛种植^[2-3]。

植物叶片呈色是色素种类、含量及比例共同作用的结果,植物色素主要由叶绿素、类胡萝卜素、黄酮类色素和甜菜色素组成^[4-5]。黄酮类色素主要为花色苷,存在于大部分植物中,而甜菜色素只存在于石竹目的部分植物中,包括呈现紫红色的甜菜红素和呈现橙黄色的甜菜黄素^[6]。三色苋叶片颜色混杂,是具有观赏价值的观叶植物^[7-8]。胡建新^[9]对三色苋叶片色素分析后发现光合色素与花色素共同决定了叶片的颜色。三色苋在生长的不同阶段,其叶片颜色会持续发生变化。何奕昆等^[10]研究表明,三色苋叶色转变是细胞衰老、叶绿体结构解体、叶绿素消失、花色素显现的结果。类胡萝卜素、甜菜色素、黄酮类化合物等具有较强的抗氧化能力^[11],而三色苋叶片具有丰富的光合色素、甜菜色素以及各类抗氧化活性物质,推测三色苋具有较强的抗氧化能力。类胡萝卜素、甜菜红素可以通过提供电子来中和自由基以防止其对细胞的损害,具有抗氧化、预防肿瘤、降低血脂、减缓肌肉疲劳等作用^[12-13]。

KHANAM 等^[14]研究发现,叶片颜色鲜艳的三色苋中的甜菜红素、甜菜黄素含量高于千穗谷的,其抗氧化能力也较强。三色苋叶片内黄酮和多酚等活性物质也具有较好的抗氧化性,可作为天然抗氧化剂进行开发与应用^[15]。SARKER 等^[16]研究发现,从红色三色苋中得到的 4 种黄酮类化合物(槲皮素、儿茶素、杨梅素和芹菜素)均具有较强的抗氧化能力。

对三色苋的研究主要集中在种质资源分类、农艺性状调查、栽培繁殖、抗性研究^[17-18]以及三色苋营养品质、色素分离提取、抗氧化活性物质评价、基因遗传多样性^[19-20]等,对三色苋不同品种的颜色分类、色素组成及抗氧化活性关系的研究报道较少。本研究中,笔者以不同叶色的 7 种三色苋为材料,测定其叶色参数值和色素、总黄酮、总多酚含量及抗氧化指标值,并进行相关性分析,旨在揭示三色苋色素含量与抗氧化能力的关系,为深入研究三色苋叶色差异的分子机理及育种工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

7 种叶色的三色苋种质资源(图 1)基因型编号分别为 1107、1118、1177、1185、1186、1187、1210,其中 1177 来源于印度,其余 6 种均来源于美国。



图 1 7 种三色苋叶片表型

Fig.1 Phenotypes of 7 *Amaranthus tricolor* leaves

1.2 方法

于 2023 年 4 月至 5 月在湖南农业大学农学院草业科学系步入式人工气候室内进行试验。人工气候室条件如下:温度 25 °C/20 °C(昼/夜),相对湿度 70%~75%,光照时长 14 h,光照度 42 840 lx。采用

72 穴育苗盘(每穴口径 4 cm,底径 1.5 cm,径深 7 cm)播种,出苗后每个基因型选取长势基本一致的 5 株幼苗栽植于塑料花盆(上口径 10 cm,下口径 8 cm,高度 8 cm)中,装入细沙与营养土(体积比为 2:1)并混匀。在植株出苗后 45 d 左右(抽穗期,此时叶

片色彩最为鲜艳)取样。每个基因型选取 3 株 (每株作为 1 个重复), 每株植株取 5 片具代表性叶片进行相关指标的测定。

1.2.1 叶片颜色的测定

将叶片按照不同颜色切割, 分离叶片。每个基因型植株选取包含颜色最多的典型叶片, 并根据不同颜色将叶片分为不同部分, 颜色相近部分弃用。采用比色卡(RHSCC)描述叶片颜色, 选取重复次数较多的 1~2 种颜色, 将其定为该基因型植株的叶片颜色。

1.2.2 叶色参数值的测定

参照国际照明委员会推出的“CIELab”表色系统, 使用 Adobe Photoshop CC 2018, 在拾色器中采用 Lab 颜色模式, 测量叶片的明度值(L^*)、红度值(a^*)、黄度值(b^*)和彩度值(c^*)^[21]。

1.2.3 色素、总黄酮、总多酚含量与抗氧化指标的测定

参照 SARKER 等^[19]的方法测定样品中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量; 参照 SAKUTA^[22]、玛尔孜娅 阿不力米提等^[23]的方法测定样品中甜菜红素、甜菜黄素含量; 按照福林-肖卡法测定总多酚含量^[24]; 按照硝酸铝-亚硝酸钠比色法测定总黄酮含量^[25]; 参照李璐等^[26]的方法测定抗氧化活性指标 1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH)清除率和 2,2'-连氮-(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)二胺盐(ABTS)清除率。

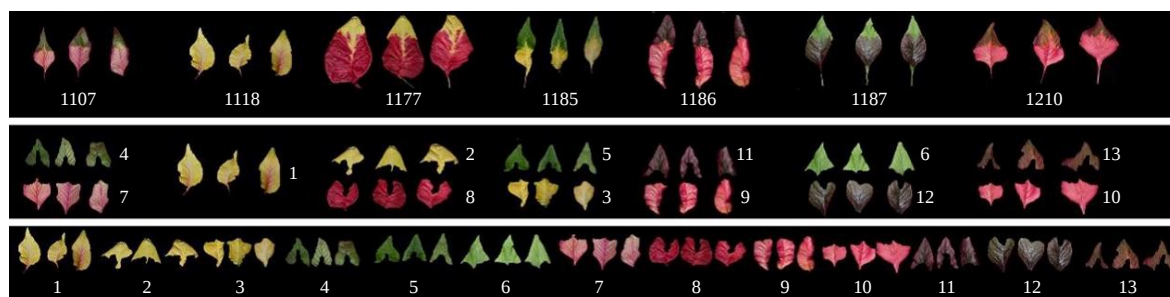
1.3 数据处理与统计分析

采用 Excel 2018 对原始数据进行处理并进行隶属函数分析; 采用 Adobe Photoshop CC 2018 进行叶色参数分析; 采用 Origin 2021 进行绘图和相关性分析; 采用 SPSS 17.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 7 种三色苋的叶色表型

比色卡(RHSCC)比色结果表明, 7 种基因型三色苋的叶色共分成 13 类叶色组织(图 2), 其中, 1~3 号组织整体呈黄色; 4~6 号组织整体呈绿色; 7~10 号组织整体呈红色; 11~13 号组织整体呈紫色。1107 基因型取样叶片为粉绿相间, 下半部分为粉色, 上半部分为绿色, 取样时分割为 4 号和 7 号 2 份叶色组织。1118 基因型取样叶片整体呈浅黄色, 叶脉呈现粉紫色, 由于叶脉细小, 不好分割, 对完整叶片进行指标测定。1177 基因型叶片为黄红相间, 上半部分为黄色, 下半部分为红色, 取样时分割为 2 号和 8 号 2 份叶色组织。1185 基因型取样叶片为绿黄相间, 上半部分为绿色, 下半部分为黄色, 取样时分割为 5 号和 3 号 2 份叶色组织。1186、1201 基因型叶片均为紫红相间, 上半部分为紫色, 下半部分为红色, 取样时分割为 9 号、10 号 2 份红色组织和 13 号、11 号 2 份紫色组织。1187 基因型叶片为绿紫相间, 上半部分为绿色, 下半部分为紫色, 取样时分割为 6 号和 12 号 2 份叶片组织。



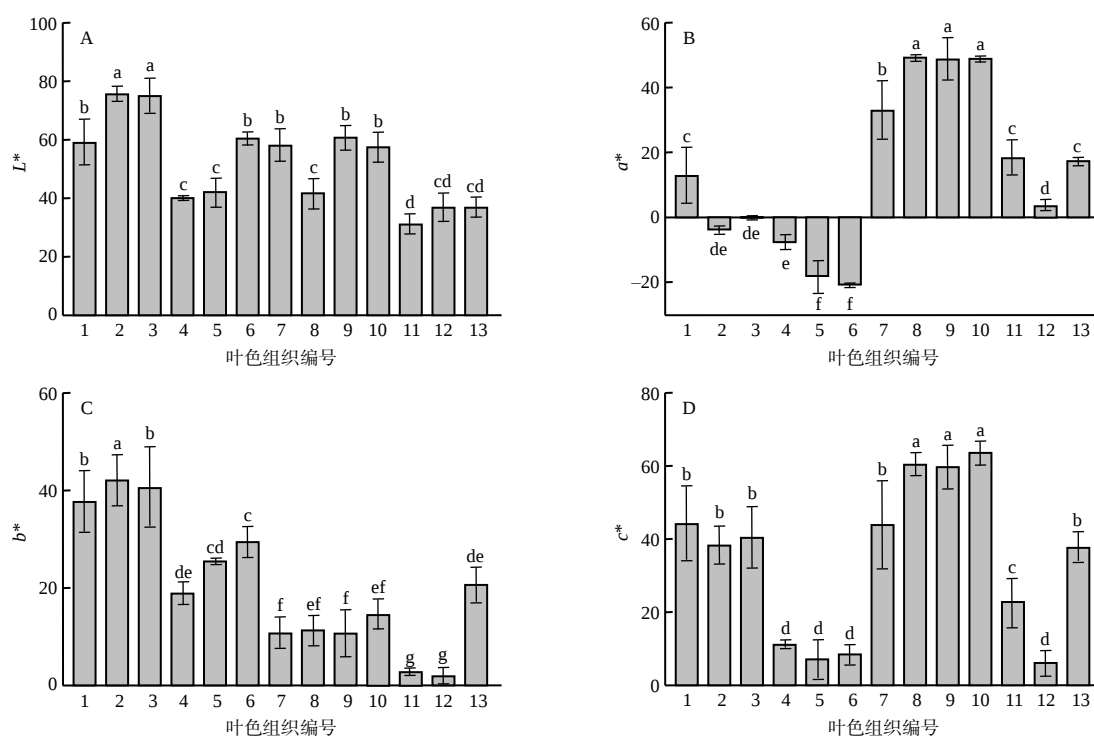
序号 1~13 代表三色苋叶片的叶色组织编号。

图 2 7 种三色苋叶片叶色组织情况

Fig.2 Leaf color tissues of 7 *Amaranthus tricolor* leaves

2.2 不同叶色组织的叶色参数分析

L^* 代表明亮度, L^* 越小, 颜色越暗, L^* 越大, 颜色越亮; a^* 代表红/绿色相, a^* 越小, 颜色越绿, a^* 越大, 颜色越红; b^* 代表黄/蓝色相, b^* 越小, 颜色越蓝, b^* 越大, 颜色越黄。由图 3 可知, 三色苋不同颜色组织的 4 种颜色参数具有一定的差异。由图 3-A 可知, 黄色(1、2、3 号)叶色组织的 L^* 高于其他类型叶色组织的; 2 号叶色组织的 L^* 最高, 11 号叶色组织 L^* 最低。由图 3-B 可知, 红色(8、9、10 号)叶色组织的 a^* 显著高于其他叶色组织的; 红色、紫色叶色组织 a^* 为正值; 黄色、绿色叶色组织 a^* 多数为负值; 1 号叶色组织整体呈浅黄色, 叶脉为红紫色, 未进行叶片组织分割, a^* 表现为正值。



不同小写字母表示不同叶色组织的色彩参数值间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图 3 三色苋不同叶色组织的色彩参数

Fig.3 Color parameters for different types of leaf color tissues of *Amaranthus tricolor*

2.3 不同叶色组织的色素含量

由图 4 可知, 6 种色素的含量在三色苋不同颜色的叶色组织之间差异较大。其中, 4 种光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素)的含量在不同类型的叶色组织之间具有相似的规律。黄色(1~3 号)和红色(7~10 号)叶色组织光合色素含量较低, 绿色(4~6 号)和紫色(11~13 号)叶色组织光合色素含量较高。由图 4-E 和图 4-F 可知, 甜菜

由图 3-C 可知, 黄色(1、2、3 号)叶色组织的 b^* 显著高于其他叶色组织的; 紫色(11、12、13 号)叶色组织中, 13 号叶色组织的叶片呈现出带有微黄的紫色, b^* 显著高于其他 2 组叶片的。由图 3-D 可知, c^* 在不同颜色组织之间存在显著差异, 黄色和红色叶色组织 c^* 高于绿色和紫色叶色组织的, 其中, 红色叶色组织(8、9、10 号)的 c^* 显著高于其他类型叶色组织的, 10 号红色叶色组织的色彩饱和度最高, 12 号紫色叶色组织的色彩饱和度最低。同时, 在同种颜色的叶片之间 c^* 也存在显著差异, 如紫色叶色组织(11、12、13 号)中, 13 号叶色组织的 c^* 显著高于 11 号和 12 号的。

红素和甜菜黄素含量在不同叶色组织间也具有显著差异, 黄色、绿色叶色组织中含量低, 红色、紫色叶色组织中含量高。而且, 同类颜色的叶片中甜菜色素含量之间亦存在显著差异, 如红色(7~10 号)叶色组织中, 8 号叶色组织甜菜色素含量显著高于 7、9、10 号的, 表明光合色素、甜菜色素在三色苋不同颜色组织中的含量分布极不平衡。

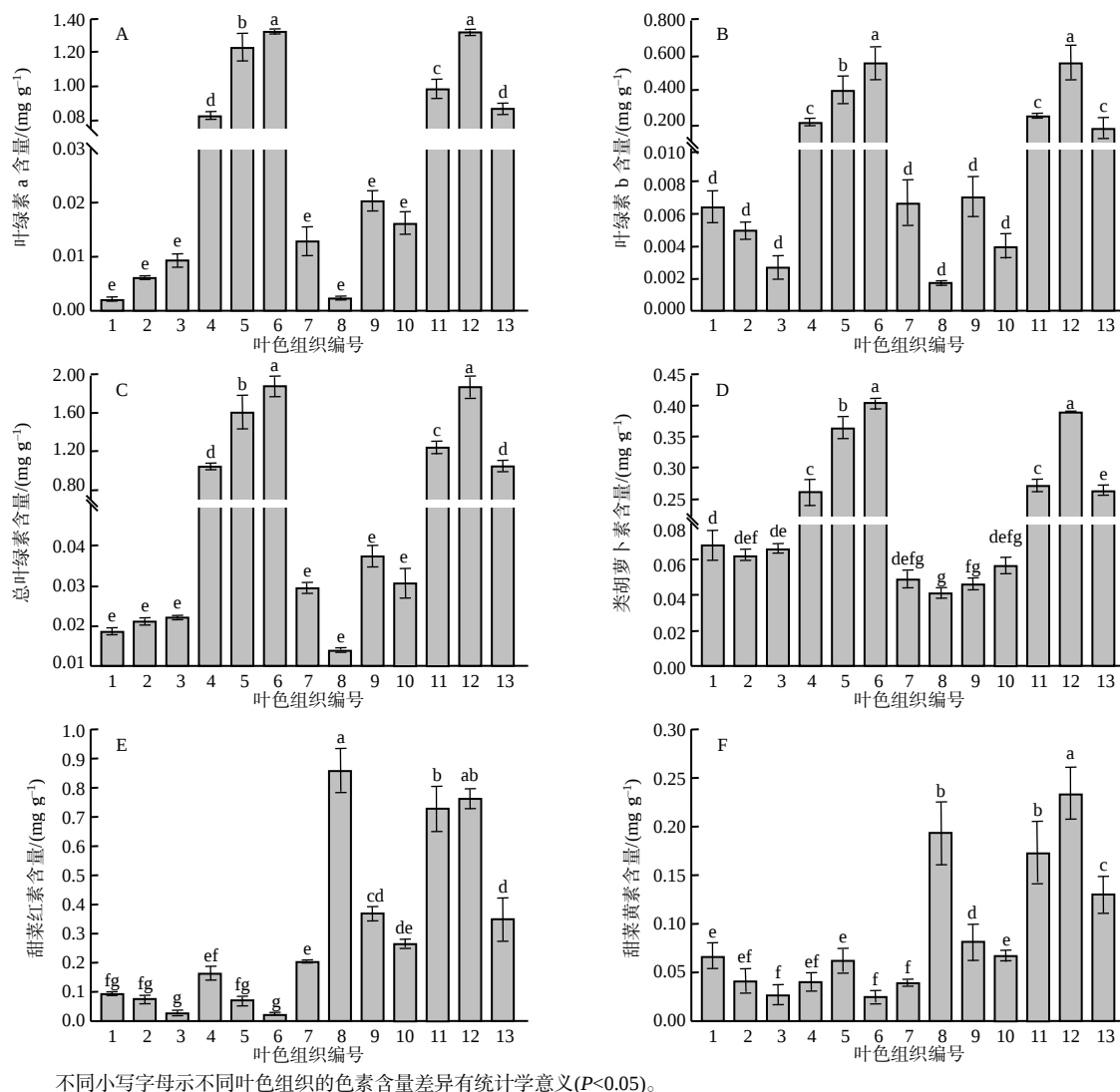


图 4 三色苋不同叶色组织的色素含量

Fig.4 Pigment content in different types of leaf color tissues of *Amaranthus tricolor*

2.4 不同叶片组织的总黄酮、总多酚含量

由图 5 可知,总多酚、总黄酮的含量在不同类型叶片之间具有相似的规律,整体上黄色(1~3 号)叶片含量最低,绿色(4~6 号)叶片含量稍高,红色(7~10 号)叶片和紫色(11~13 号)叶片的含量均较

高。部分同类颜色组织间总黄酮的含量也存在显著性差异,如紫色(11~13 号)叶色组织中,12 号叶色组织的总黄酮含量显著高于 11 号和 13 号的。总多酚含量在同类颜色组织间的差异小于总黄酮的。

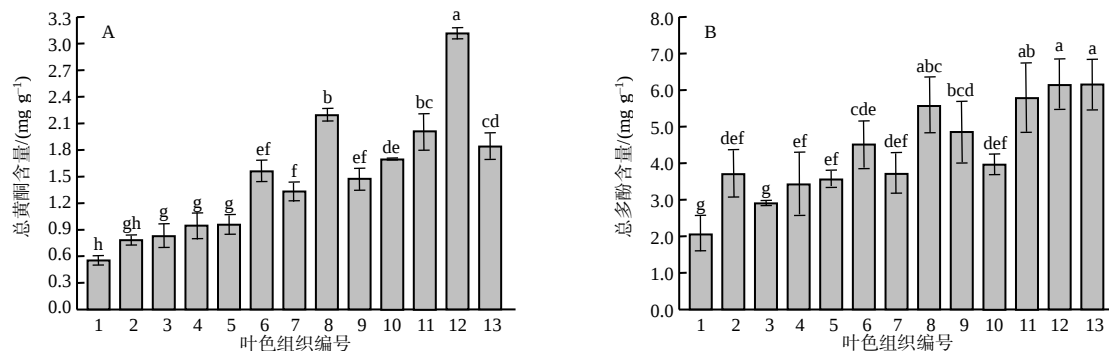


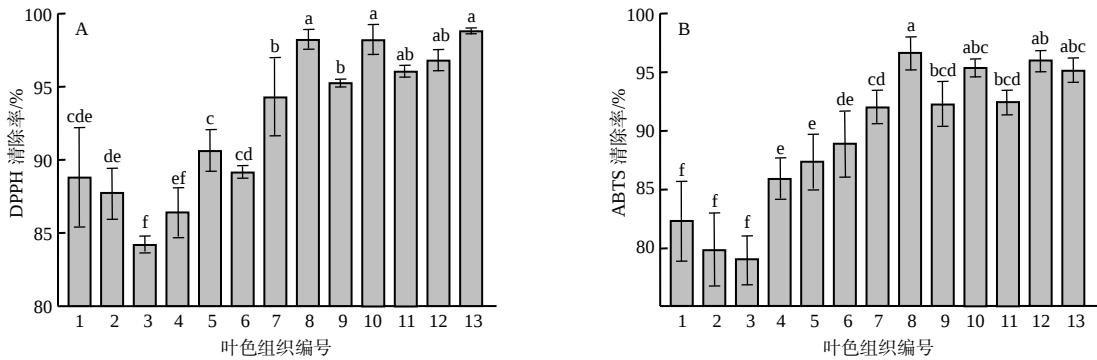
图 5 三色苋不同叶色组织的总黄酮和总多酚含量

Fig.5 Total flavonoids and total polyphenols contents in different types of leaf color tissues of *Amaranthus tricolor*

2.5 不同叶色组织的抗氧化能力

由图 6 可知, ABTS、DPPH 自由基清除率在不同颜色叶色组织之间存在差异。黄色(1~3 号)和绿色(4~6 号)叶色组织的较低, 红色(7~10 号)、紫色

(10~13 号)叶色组织的较高。比较 ABTS 和 DPPH 自由基清除率在不同类型叶色组织之间的差异, 发现二者具有相似的规律, 其中, 8 号红色叶片的自由基清除率最高, 3 号黄色叶片的自由基清除率最低。



不同小写字母表示不同叶片组织的自由基清除率差异有统计学意义($P<0.05$)。

图 6 三色苋不同叶色组织的自由基清除率

Fig.6 Free radical clearance rate of different types of leaf color tissues of *Amaranthus tricolor*

2.6 三色苋叶色参数、色素、总多酚、总黄酮含量及抗氧化能力的相关性分析

表 1 结果显示, 三色苋叶色参数 L^* 与 b^* 之间呈正相关, a^* 与 c^* 呈正相关。叶绿素 a、叶绿素 b、

总叶绿素含量与类胡萝卜素含量呈显著正相关, 相关系数为 0.88 以上。甜菜色素含量与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量的相关性不显著, 与总黄酮和总多酚含量呈显著正相关。三色苋

表 1 不同叶色组织类型的叶色、色素含量、总黄酮、总多酚及抗氧化能力的相关性分析结果

Table 1 Correlation analysis result of leaf color, pigment content, total flavonoids, total polyphenols, and antioxidant capacity among different types of leaf color tissue

指标	L^*	a^*	b^*	c^*	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	总叶绿素含量	类胡萝卜素含量	甜菜红素含量	甜菜黄素含量	叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值	类胡萝卜素含量与总叶绿素含量的比值	总黄酮含量	总多酚含量	ABTS 清除率
a^*	-0.19														
b^*	0.75***	-0.50***													
c^*	0.31*	0.79***	0.14												
叶绿素 a 含量	-0.51***	-0.57***	-0.31*	-0.88***											
叶绿素 b 含量	-0.40**	-0.56***	0.25	-0.82***	0.93***										
总叶绿素含量	-0.48***	-0.58***	-0.30*	-0.88***	0.98***	0.96***									
类胡萝卜素含量	-0.42**	-0.55***	-0.17	-0.75***	0.88***	0.90***	0.89***								
甜菜红素含量	-0.67***	0.38*	-0.65***	0.03	0.29	0.30	0.28	0.29							
甜菜黄素含量	-0.64***	0.59***	-0.71***	0.17	0.11	0.08	0.09	0.10	0.90***						
叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值	-0.49***	-0.33*	-0.23	-0.53***	0.68***	0.47**	0.64***	0.58***	0.18	0.12					
类胡萝卜素含量与总叶绿素含量的比值	0.56***	0.09	0.60***	0.54***	-0.65***	-0.57***	-0.64***	-0.50***	-0.30*	-0.31*	-0.57***				
总黄酮含量	-0.56***	0.37*	-0.62***	0.01	0.33*	0.38*	0.34*	0.37*	0.80***	0.85***	0.16	-0.39**			
总多酚含量	-0.52***	0.31*	-0.62***	0.09	0.37*	0.36*	0.37*	0.34*	0.78***	0.79***	0.31*	-0.48***	0.84***		
ABTS 清除率	-0.55***	0.74***	-0.67***	0.37*	-0.13	-0.15	-0.16	-0.11	0.64***	0.76***	0.07	-0.21	0.67***	0.51***	
DPPH 清除率	-0.59***	0.73***	-0.68***	0.35*	-0.13	-0.18	-0.15	-0.12	0.63***	0.72***	0.03	-0.23	0.57***	0.50***	0.93***

“*”、“**”、“***” 分别表示 0.05、0.01、0.001 水平显著相关。

L^* 与叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、甜菜黄素和甜菜红素含量呈极显著负相关,表明随着叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、甜菜黄素和甜菜红素含量的升高, L^* 降低,叶片颜色变暗。甜菜色素、总黄酮、总多酚含量和 2 种抗氧化能力指标与叶色参数 a^* 呈显著或极显著正相关,表明三色苋叶色 a^* 越大,其甜菜素、总黄酮、总多酚含量越高,抗氧化能力越强。三色苋的 L^* 、 b^* 与类胡萝卜素含量与总叶绿素含量的比值呈极显著正相关,表明类胡萝卜素的相对含量高可以提高叶片的 L^* 和 b^* 。

2.7 三色苋叶片抗氧化能力比较

为了对三色苋叶片的抗氧化能力进行综合评

价,对三色苋不同叶色组织中具有抗氧化作用的色素、总黄酮、总多酚和抗氧化活性指标进行隶属值求和并排序。结果(表 2)表明,13 号叶色组织的综合隶属函数值为 0.608~9.506;3 号叶色组织的隶属函数值最低,为 0.608;12 号叶色组织的隶属函数值最高,为 9.506,是 3 号的 15.63 倍。不同叶色组织的隶属函数值差异较大,说明其抗氧化能力存在显著差异。从隶属函数值排序来看,黄色(1~3 号)叶片排名靠后,绿色(4~6 号)和红色(7~10 号)叶片排名居中,紫色(11~13 号)叶片排名靠前。三色苋不同颜色组织类型的抗氧化能力从高到低排序依次为紫色、红色、绿色、黄色叶片。

表 2 三色苋不同叶色组织类型各指标的隶属函数值及排序

编号	隶属函数值										综合	
	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素	类胡萝卜素	甜菜红素	甜菜黄素	总黄酮	总多酚	DPPH 清除率	ABTS 清除率	隶属函数值	排序
1	0.005	0.012	0.004	0.100	0.196	0.091	0.000	0.000	0.463	0.369	1.239	11
2	0.005	0.000	0.004	0.055	0.123	0.040	0.073	0.401	0.128	0.100	0.927	12
3	0.015	0.000	0.011	0.136	0.000	0.011	0.079	0.205	0.147	0.003	0.608	13
4	0.582	0.355	0.514	0.582	0.137	0.174	0.198	0.333	0.558	0.541	3.975	7
5	0.748	0.657	0.722	0.609	0.038	0.042	0.101	0.367	0.374	0.265	3.924	8
6	1.000	1.000	1.000	0.918	0.049	0.004	0.394	0.598	0.000	0.000	4.963	5
7	0.020	0.006	0.016	0.264	0.427	0.696	0.737	0.570	0.843	1.000	4.578	6
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.766	1.000	0.611	0.862	0.938	0.986	5.163	4
9	0.018	0.012	0.014	0.055	0.444	0.553	0.430	0.685	0.618	0.510	3.339	9
10	0.015	0.018	0.014	0.091	0.254	0.300	0.338	0.467	0.936	0.848	3.281	10
11	0.683	0.404	0.600	0.600	0.693	0.846	0.542	0.910	0.703	0.528	6.506	2
12	0.987	0.988	0.954	1.000	1.000	0.885	1.000	1.000	0.781	0.910	9.506	1
13	0.605	0.295	0.445	0.536	0.474	0.395	0.389	0.724	1.000	0.824	5.687	3

3 结论与讨论

叶片的色彩表型是影响彩叶植物观赏价值的重要因素^[27]。在实际景观应用中,色彩参数可以反映叶色的变化和植物的观赏性。本研究,三色苋叶片出现颜色混杂相间的情况,表现出丰富的色彩表型。同时,三色苋叶片色彩参数 L^* 和 b^* 呈正相关, a^* 与 c^* 呈正相关。研究发现,不同植物的色彩参数之间的相关性不同。孙旺旺^[28]对金叶金钟花的研究表明, L^* 、 a^* 与 b^* 的相关性不显著;孟力等^[29]对彩叶草的研究结果表明叶片 a^* 与 c^* 呈正相关。

植物叶片呈色十分复杂,与叶片细胞内色素的

种类、含量以及叶片中的分布比例有关^[30]。本研究中,三色苋的叶绿素含量在绿色和紫色叶片中差异不大,紫色叶片中甜菜色素含量显著高于绿色叶片的,推测紫色叶片主要是由于甜菜色素含量高而呈现红紫色。决定不同物种叶片颜色的关键色素差异较大。邵雯雯等^[31]研究认为,紫薇叶片呈色受叶绿素、类胡萝卜素和花色素苷的影响,花色素苷含量的差异造成了叶片颜色表型的差异,对叶片呈色起主导作用。陈海霞等^[32]发现,非洲菊花瓣细胞中的色素是花瓣颜色的决定性物质,黄色花瓣由花色素和类胡萝卜含量的比值决定。植物叶色除了受色素

种类、含量和生物活性物质等影响外,液泡、pH、金属离子和植物外界环境也会影响其叶色的形成^[33]。张冰等^[34]在威氏绿绒蒿花色变化的研究中发现,Fe、Ca、K 离子元素与花色显色呈正相关。三色苋生长过程中色彩表现丰富,其色素、生物活性物质的合成调控更为复杂,有待进一步研究。

本研究结果表明三色苋叶片的色彩参数和甜菜色素、总黄酮和总多酚含量与抗氧化能力呈显著相关性。其中, a^* 越大,甜菜色素含量、总黄酮含量和总多酚含量越高,抗氧化能力越强; L^* 越小,叶绿素含量、类胡萝卜素含量、甜菜色素含量越高。 L^* 、 a^* 可以作为三色苋叶片色素含量变化、生物活性物质含量以及抗氧化能力变化的重要指标。朱婷等^[35]发现色彩参数能够作为色素含量变化、生物活性物质含量变化的重要指标。彭新等^[36]在野火球的研究中发现, a^* 与叶绿素含量呈显著正相关, b^* 、 c^* 与花色素苷含量呈显著正相关;康宇乾等^[37]在三角梅中发现甜菜红素含量与 a^* 、 c^* 呈正相关。本研究中,对三色苋不同叶色组织中具有抗氧化作用的色素、总黄酮、总多酚和抗氧化活性指标进行隶属值求和并排序,结果发现紫色、红色、绿色、黄色的三色苋叶片的抗氧化能力依次降低。

参考文献:

- [1] ANGEL HUERTA-OCAMPO J, PAULINA BARBA DE LA ROSA A. Amaranth: a pseudo-cereal with nutraceutical properties[J]. Current Nutrition & Food Science, 2011, 7(1): 1-9.
- [2] SARKER U, OBA S. Response of nutrients, minerals, antioxidant leaf pigments, vitamins, polyphenol, flavonoid and antioxidant activity in selected vegetable amaranth under four soil water content[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 72-83.
- [3] ADHIKARY D, FORSYTH J A, MURCH S J, et al. Impact of betacyanins on responses to ultraviolet radiation in *Amaranthus tricolor* L.[J]. Journal of Plant Interactions, 2020, 15(1): 117-126.
- [4] 苏金, 黄婧, 周鹏, 等. 黄金枸骨变色期的叶色与叶片光合色素含量关系研究[J]. 江苏林业科技, 2019, 46(4): 33-36.
- [5] 蔡元保, 杨祥燕, 孙光明, 等. 菠萝叶片色泽、色素及抗氧化活性的关系[J]. 植物科学学报, 2017, 35(2): 283-290.
- [6] 张玉霜, 许庆轩, 李红侠, 等. 甜菜色素种类分布和应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(24): 149-156.
- [7] 柏玉萍. 苋科花卉与园林绿化[J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 1999, 1(3): 105-108.
- [8] 王樟华, 严靖. 苋属植物在园林中的应用与潜在危害[J]. 园林, 2016(6): 59-63.
- [9] 胡建新. 三色苋叶片色素分析[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(22): 85-87.
- [10] 何奕昆, 代庆阳, 苏学辉. 雁来红叶色转变与超微结构及色素含量的关系[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 1995, 16(3): 195-198.
- [11] AGATI G, AZZARELLO E, POLLASTRI S, et al. Flavonoids as antioxidants in plants: location and functional significance[J]. Plant Science, 2012, 196: 67-76.
- [12] SKIBSTED L H. Carotenoids in antioxidant networks. Colorants or radical scavengers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(10): 2409-2417.
- [13] AZEREDO H M C. Betalains: properties, sources, applications, and stability: a review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(12): 2365-2376.
- [14] KHANAM U K S, OBA S. Bioactive substances in leaves of two amaranth species, *Amaranthus tricolor* and *A. hypochondriacus*[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2013, 93(1): 47-58.
- [15] JIMÉNEZ-AGUILAR D M, GRUSAK M A. Minerals, vitamin C, phenolics, flavonoids and antioxidant activity of *Amaranthus* leafy vegetables[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 58: 33-39.
- [16] SARKER U, OBA S. Antioxidant constituents of three selected red and green color *Amaranthus* leafy vegetable[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 18233.
- [17] 肖深根, 刘志敏, 宋勇, 等. 苋菜品种资源的分类研究[J]. 湖南农业大学学报, 2000, 26(4): 274-277.
- [18] 杜雷, 孙雄军, 陈丽萍, 等. 不同化肥减施技术对设施苋菜产量和品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(23): 74-77.
- [19] SARKER U, HOSSAIN M M, OBA S. Nutritional and antioxidant components and antioxidant capacity in green morph *Amaranthus* leafy vegetable[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1336.
- [20] KHAING A A, MOE K T, CHUNG J W, et al. Genetic diversity and population structure of the selected core set in *Amaranthus* using SSR markers[J]. Plant Breeding,

- 2013, 132(2): 165–173.
- [21] 王涛, 贺帆, 詹军, 等. 烘烤过程中不同部位烟叶颜色值和主要化学成分的变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(2): 125–130.
- [22] SAKUTA M. Diversity in plant red pigments: anthocyanins and betacyanins[J]. Plant Biotechnology Reports, 2014, 8(1): 37–48.
- [23] 玛尔孜娅 阿不力米提, 买买提明 苏来曼, 尤努斯江 吐拉洪, 等. 苋菜红色素的提取及其生物活性研究[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(4): 39–43.
- [24] 徐帆. 三叶青质量差异及生物活性物质基础研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [25] 李红, 李波, 李晨阳, 等. 大孔树脂纯化苜蓿总黄酮及纯化前后抗氧化能力比较[J]. 草地学报, 2022, 30(3): 750–757.
- [26] 李璐, 姚美, 张华峰, 等. 3 种葱属蔬菜水提物、醇提物与多糖的抗氧化活性研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 98–103.
- [27] 吴再兴, 陈玉和, 马灵飞, 等. 紫外辐照下染色竹材的色彩稳定性[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(2): 127–132.
- [28] 孙旺旺. 金叶金钟花叶片色素含量年变化及解剖结构特征[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2018.
- [29] 孟力力, 张俊, 闻婧. 不同品种彩叶草叶片色素含量与叶色参数的关系[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 296–298.
- [30] 齐睿. 彩叶植物叶片转色期叶色表达与色素含量关系研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
- [31] 邵雯雯, 何钢, 乔中全, 等. 6 个紫薇品种叶片色彩变化及其与色素含量的相关性[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 104–110.
- [32] 陈海霞, 刘明月, 吕长平. 非洲菊花瓣色素分布对花色的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(2): 165–168.
- [33] GROTEWOLD E. The genetics and biochemistry of floral pigments[J]. Annual Review of Plant Biology, 2006, 57: 761–780.
- [34] 张冰, 郭小雪, 罗军, 等. 威氏绿绒蒿不同时期类黄酮与金属离子含量的变化分析[J]. 分子植物育种, 2024, 22(9): 3103–3110.
- [35] 朱婷, 章陆杨, 郝亮, 等. 基于 Lab 模型的三种观赏草叶色研究[J]. 草地学报, 2018, 26(5): 1267–1272.
- [36] 彭新, 石凤翎, 付娜娜. 野火球叶片色素和多酚类物质含量与叶色参数的关系[J]. 草地学报, 2023, 31(7): 2005–2011.
- [37] 康宇乾, 杨挺, 李雪青, 等. 不同三角梅品种苞片色彩表型及色素组成分析[J]. 植物科学学报, 2022, 40(5): 714–723.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正