

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2017.20283

蔡元保, 杨祥燕, 孙光明, 张治礼, 黄强, 刘业强, 唐莹莹, 王运儒, 李穆. 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

Cai YB, Yang XY, Sun GM, Zhang ZL, Huang Q, Liu YQ, Tang YY, Wang YR, Li M. Relationship among colors, pigments, and antioxidant activities of pineapple leaves[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(2): 283-290

## 菠萝叶片色泽、色素及抗氧化活性的关系

蔡元保<sup>1</sup>, 杨祥燕<sup>1\*</sup>, 孙光明<sup>2</sup>, 张治礼<sup>3</sup>, 黄强<sup>1</sup>, 刘业强<sup>4</sup>,  
唐莹莹<sup>1</sup>, 王运儒<sup>1</sup>, 李穆<sup>1</sup>(1. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 南宁 530001; 2. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江 524091;  
3. 海南省农业科学院, 海口 571100; 4. 广西壮族自治区农业科学院园艺研究所, 南宁 530007)

**摘要:**以菠萝22个栽培品种的叶片为实验材料,测定其5种色泽参数( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $c^*$ 和 $h^*$ 值)、5种色素(叶绿素、类胡萝卜素、花青苷、类黄酮和总酚)含量及3种抗氧化活性指标(ABTS、DPPH自由基和亚硝酸盐的清除能力),并进行相关性分析。研究结果显示,色泽参数 $a^*$ 和 $h^*$ 值可以作为菠萝叶片指示色泽、主要色素含量和抗氧化活性变化的重要指标;菠萝叶片主要色素组成是叶绿素、类黄酮和总酚,且含有少量的花青苷,几乎不含类胡萝卜素。相关性分析结果显示,菠萝叶片类黄酮和总酚含量均与3种抗氧化活性指标极显著正相关,而叶绿素含量与其它指标相关性未达到显著水平,类黄酮和总酚是菠萝叶片抗氧化活性的主要功效成分。

**关键词:**菠萝; 叶片; 色泽; 色素; 抗氧化活性

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)02-0283-08

## Relationship among colors, pigments, and antioxidant activities of pineapple leaves

Cai Yuan-Bao<sup>1</sup>, Yang Xiang-Yan<sup>1\*</sup>, Sun Guang-Ming<sup>2</sup>, Zhang Zhi-Li<sup>3</sup>, Huang Qiang<sup>1</sup>,  
Liu Ye-Qiang<sup>4</sup>, Tang Ying-Ying<sup>1</sup>, Wang Yun-Ru<sup>1</sup>, Li Mu<sup>1</sup>(1. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China; 2. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China;  
3. Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China; 4. Horticultural Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Twenty-two pineapple (*Ananas comosus*) cultivars were used to study the relationships among five color parameters ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$ , and  $h^*$  values), five pigment types (chlorophyll, carotenoids, anthocyanins, flavonoids, and total phenols), and three antioxidant activity indices (ABTS, DPPH, and nitrite assay) of leaves. The results indicated that color parameters  $a^*$  and  $h^*$  were important indicator indices for color, main pigment content, and antioxidant activity of pineapple leaves. The main pigment composition of the pineapple leaves was chlorophyll, flavonoids, and total phenols, with a small amount of anthocyanins and almost no carotenoids. Correlation analysis indicated that antioxidant activity

收稿日期: 2016-08-10, 退修日期: 2016-10-12。

基金项目: 广西自然科学基金项目(2014GXNSFBA118127, 2015GXNSFAA139069); 国家自然科学基金(31260460); 国家公益性行业(农业)科研专项(201203021); 广西直属公益性科研院所基本科研业务费专项(桂热研201703)。

This work was supported by grants from the Natural Science Foundation of Guangxi, China (2014GXNSFBA118127, 2015GXNSFAA139069), National Natural Science Foundation of China (31260460), Special Fund for Agro-Scientific Research in the Public Interest (201203021), and the Special Fund for Basic Scientific Research Business of Guangxi Public Research Institutes (Guireyan201703)。

作者简介: 蔡元保(1981-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为植物生理与分子生物学(E-mail: caiyuanbao205@163.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: yangxiangyan84412@126.com)。

was significantly positively correlated with flavonoid and total phenol content, but chlorophyll content was not significantly correlated with the other indicators. Flavonoids and total phenols were the main active compounds of antioxidant activity in pineapple leaves.

**Key words:** Pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.); Leaf; Color; Pigments; Antioxidant activities

植物叶片颜色是各种色素综合作用所表现出的结果，不同色素种类及其含量的时空组合最终决定了叶片颜色。高等植物中，叶片所含色素主要为叶绿素、类胡萝卜素、类黄酮和花青素等<sup>[1]</sup>，类黄酮和花青素又属于多酚类物质。其中，类胡萝卜素在清除自由基、延缓衰老、防癌抗癌等方面起重要作用<sup>[2,3]</sup>；类黄酮具有抗氧化、抗炎症、抗病毒等多种重要生理功能<sup>[4,5]</sup>；花青素，又称花色素，属于类黄酮化合物，多以花青苷的形式存在，具有与类黄酮相似的生理功能<sup>[6]</sup>。

随着自由基和抗氧化理论的深入研究，尤其是一些人工合成抗氧化剂的副作用被发现后，天然抗氧化剂的开发与应用日渐受到重视。评价与筛选含有天然强抗氧化物质的植物资源，进而研发出安全、高效的天然抗氧化剂，对于预防和治疗由自由基引起的各种疾病具有重要意义。自然界中，植物叶片富含天然色素，其中类胡萝卜素、类黄酮和多酚等具有很强的抗氧化活性，能够对抗或减缓自由基对细胞造成的不良影响，可作为天然抗氧化剂进行开发与应用<sup>[4,7,8]</sup>。而且，这些色素抗氧化活性的主要功效组分也获得了进一步的分离与鉴定<sup>[9-11]</sup>。但是，不同色泽的植物叶片所具有的色素种类与含量以及抗氧化活性强度也不一

致<sup>[1,12,13]</sup>。因此，通过研究植物叶片的色泽、主要色素含量及其与抗氧化活性间的相互关系，可为抗氧化物质的筛选与利用提供理论依据。

菠萝(*Ananas comosus* (L.) Merr.)是世界四大热带水果之一，其风味独特，营养丰富，深受国内外消费者的青睐。我们前期的研究工作表明，菠萝果肉色泽主要是类胡萝卜素、类黄酮和花青素的综合表现，其果肉富含类胡萝卜素、类黄酮等色素<sup>[14,15]</sup>。而且，菠萝果肉具有较强的抗氧化活性，可为开发天然抗氧化剂提供植物来源<sup>[16]</sup>。目前，对菠萝资源的开发利用主要集中在菠萝果实贮藏保鲜及加工利用方面，有关菠萝叶片色泽、色素及其抗氧化活性等研究尚未见报道。因此，本研究通过测定 22 个菠萝栽培品种叶片的色泽、主要色素(叶绿素、类胡萝卜素、花青苷、类黄酮和多酚等)含量及其抗氧化活性，并探讨 3 者间的相互关系，以期为揭示菠萝叶片色泽形成的生理生化机制及其抗氧化功效的开发、利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

以国内外菠萝 22 个栽培品种为实验材料(表 1)，材料取自中国热带农业科学院亚热带作物研

表 1 菠萝 22 个栽培品种名称  
Table 1 Names of 22 *Ananas comosus* cultivars

编号 Number	栽培品种名称 Cultivar name	编号 Number	栽培品种名称 Cultivar name
1	‘台湾有刺’ ‘Taiwan Spine’	12	‘牛奶’ ‘Tai Nong 20’
2	‘金艳’ ‘Jin Yan’	13	‘粤脆’ ‘Yue Cui’
3	‘Sweet 16’	14	‘金菠萝’ ‘MD-2’
4	‘Pérola’	15	‘香水’ ‘Tai Nong 11’
5	‘蜜宝’ ‘Tai Nong 19’	16	‘珍珠’ ‘Pearl’
6	‘泰国卡因’ ‘Thailand Cayenne’	17	‘冬蜜’ ‘Tai Nong 13’
7	‘金桂花’ ‘Tai Nong 18’	18	‘苹果’ ‘Tai Nong 6’
8	‘神湾’ ‘Yellow Mauritius’	19	‘巴厘’ ‘Comte de Paris’
9	‘甜蜜蜜’ ‘Tai Nong 16’	20	‘卡因’ ‘Cayenne’
10	‘无眼’ ‘Wu Yan’	21	‘红菠萝’ ‘Hong Boluo’
11	‘黄金’ ‘Tai Nong 21’	22	‘金钻’ ‘Tai Nong 17’

究所农业部菠萝种质资源圃和广西亚热带作物研究所菠萝种质资源圃。于菠萝果实加工成熟期，每个品种随机选取5株，采集植株上、中、下部位叶片共3片，用于色泽、主要色素含量和抗氧化活性检测。

1.2 实验方法

1.2.1 叶片色差参数的测定

采用NR-110型色差仪进行色差参数的测定，采用“CIE Lab”表色系统测定叶片的L\*、a\*、b\*、c\*和h\*值等参数。每个品种测定叶片15片，每片检测3个不同位置，取平均值。

L\*值(亮度)越大表示所测叶片样品的表面越亮；a\*值(红绿色差)正值为红色，负值为绿色，绝对值越大表示叶片红色或绿色越深；b\*值(黄蓝色差)正值为黄色，负值为蓝色，绝对值越大表示叶片黄色或蓝色越深；c\*值表示颜色的彩度，值越大，颜色越纯；h\*值为色调角，从0°~180°依次为紫红色(0°)、红色、橙红色、橙黄色、黄色(90°)、黄绿色、绿色、蓝绿色(180°)。

1.2.2 叶片主要色素含量的测定

叶绿素和类胡萝卜素采用80%丙酮提取，参考杨祥燕等<sup>[14]</sup>的方法测定叶片叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素的含量。花青苷采用1%盐酸提取，采用pH示差法测定花青苷含量<sup>[17]</sup>；类黄酮采用80%乙醇提取，以芦丁(rutin)为标样建立标准曲线，采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法测定类黄酮含量<sup>[18]</sup>。总酚采用80%乙醇提取，以没食子酸(GA)为标样建立标准曲线，采用Folin-Ciocalteu法测定总酚含量<sup>[18]</sup>。每个叶片样品平行检测2次，实验重复3次。

1.2.3 叶片抗氧化活性的测定

菠萝叶片利用80%乙醇进行提取，并测定提取液的抗氧化活性。参考Re等<sup>[19]</sup>的方法，测定提取液的ABTS自由基清除率。参考Locatelli等<sup>[20]</sup>的方法，测定提取液DPPH自由基清除率。采用国家标准GB/T 5009.33-2003(食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定方法)测定叶片样品的亚硝酸盐含量，根据公式计算提取液的亚硝酸盐清除率，清除率=[1-(A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>)/A<sub>3</sub>]×100%。式中A<sub>1</sub>为提取液加入NaNO<sub>2</sub>溶液后的吸光度；A<sub>2</sub>为提取液的吸光度；A<sub>3</sub>为NaNO<sub>2</sub>溶液的吸光度。

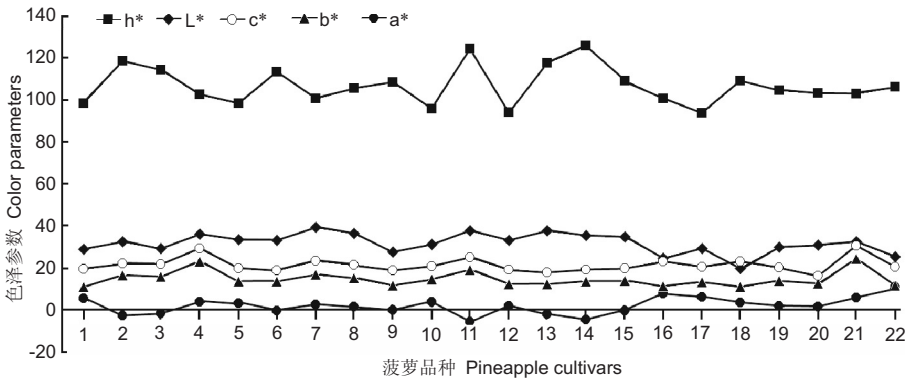
1.3 数据统计分析

实验结果以“平均值±标准差”表示。采用Excel 2007软件对数据进行整理与分析；利用SPSS 18.0软件进行方差分析(ANOVA)，多重比较采用S-N-K法进行差异显著性分析，并用该软件完成检测指标间的相关性分析和基于全部检测指标的聚类分析。差异显著性水平表示方法：显著(P<0.05)；极显著(P<0.01)。

2 结果与分析

2.1 不同品种菠萝叶片的色泽参数分析

在菠萝果实加工成熟期，对菠萝22个品种叶片的亮度(L\*)、红绿色差(a\*)、黄蓝色差(b\*)、颜色彩度(c\*)和色调角(h\*)进行测定(图1)。“CIE Lab”表色系统分析和方差分析结果显示，5种叶片色泽参数在菠萝不同品种间的差异达到显著水平(P<0.05)。L\*值在19.37~39.06之间，平均值为31.48±4.81，以‘金桂花’叶片表面亮



图中数字对应的品种名称参照表1。下同。  
Numbers corresponding to species names refer to Table 1. Same below.

图1 菠萝不同品种叶片的色泽参数  
Fig. 1 Color parameters of pineapple variety leaves

度最高, ‘苹果’ 最低。a\* 值在 -5.94 ~ 10.67 之间, 平均值为  $1.60 \pm 0.91$ , 大部分 a\* 值为正值 (红色)。这可能是由于大部分品种的叶片随着果实的成熟而退绿, 且叶缘呈微红色。b\* 值在 10.63 ~ 24.14 之间, 平均值为  $14.30 \pm 3.62$ , 以 ‘红菠萝’ 最高, 所有品种叶片都呈现出不同程度的微黄色。c\* 值在 15.88 ~ 30.17 之间, 平均值为  $21.11 \pm 3.37$ , 以 ‘红菠萝’ 的色彩饱和度最高。h\* 值在 105.64 ~ 135.56 之间, 平均值为  $118.53 \pm 9.17$ , 以 ‘金菠萝’ 叶片的绿色程度最高; 而且绝大多数品种的 h\* 值大于 110, 呈黄绿色或绿色。a\* 和 h\* 值所显示的颜色与肉眼观察结果基本一致。因此, a\* 和 h\* 值可以作为菠萝叶片指示色泽的重要指标。

2.2 菠萝不同品种叶片的主要色素含量分析

在菠萝果实加工成熟期, 对 22 个品种叶片的主要色素含量进行了测定, 包括叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素、花青苷、类黄酮和总酚 (图 2)。方差分析结果显示, 除类胡萝卜素外 (未检测出), 其它 6 种指标在菠萝不同品种间的差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。叶绿素 a 含量的变化范围和平均值分别为 1.09 ~ 5.81 和  $2.50 \pm 1.17$  mg/100 g (鲜重, FW), 以 ‘泰国卡因’ 最高, ‘金菠萝’ 最低。叶绿素 b 含量的变化范围和平均值分别为 0.91 ~ 3.60 和  $1.74 \pm 0.77$  mg/100 g (FW), 以 ‘黄金’ 最高, ‘金菠萝’ 最低。总

叶绿素含量的变化范围和平均值分别为 2.00 ~ 8.21 和  $4.24 \pm 1.83$  mg/100 g (FW), 以 ‘泰国卡因’ 最高, ‘金菠萝’ 最低。有 7 个品种未检测到花青苷, 其余品种花青苷含量的变化范围和平均值分别为 0.14 ~ 3.06 和  $1.48 \pm 0.79$  mg Cy-3-gla/100 g (FW), 以 ‘pérola’ 最高。类黄酮含量的变化范围和平均值分别为 108.42 ~ 275.86 和  $206.50 \pm 49.17$  mg rutin/100 g (FW), 以 ‘牛奶’ 和 ‘金钻’ 最高, ‘金艳’ 最低。总酚含量的变化范围和平均值分别为 64.65 ~ 85.89 和  $73.18 \pm 5.56$  mg GA/100 g (FW), 以 ‘珍珠’ 最高, ‘黄金’ 最低。因此, 菠萝叶片主要含有叶绿素、类黄酮和总酚及少量花青苷, 几乎不含类胡萝卜素。

2.3 菠萝不同品种叶片的抗氧化活性分析

在菠萝果实加工成熟期, 对 22 个品种叶片的抗氧化活性进行测定, 包括 ABTS 自由基清除率、DPPH 自由基清除率和亚硝酸盐清除率。方差分析结果显示, 3 种清除率以及累积清除率在菠萝不同品种间的差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) (图 3)。ABTS 自由基清除率在 10.60% ~ 24.29% 之间, 平均值为  $18.91\% \pm 3.48\%$ , 以 ‘金钻’ 最高, ‘金艳’ 最低。DPPH 自由基清除率在 20.16% ~ 37.09% 之间, 平均值为  $27.61\% \pm 4.85\%$ , 以 ‘金钻’ 最高, ‘金艳’ 最低。亚硝酸盐清除率在 41.32% ~ 61.00% 之间, 平均值为  $50.27\% \pm 5.34\%$ , 以 ‘金钻’ 最高, ‘蜜宝’ 最低。从 3 个指标

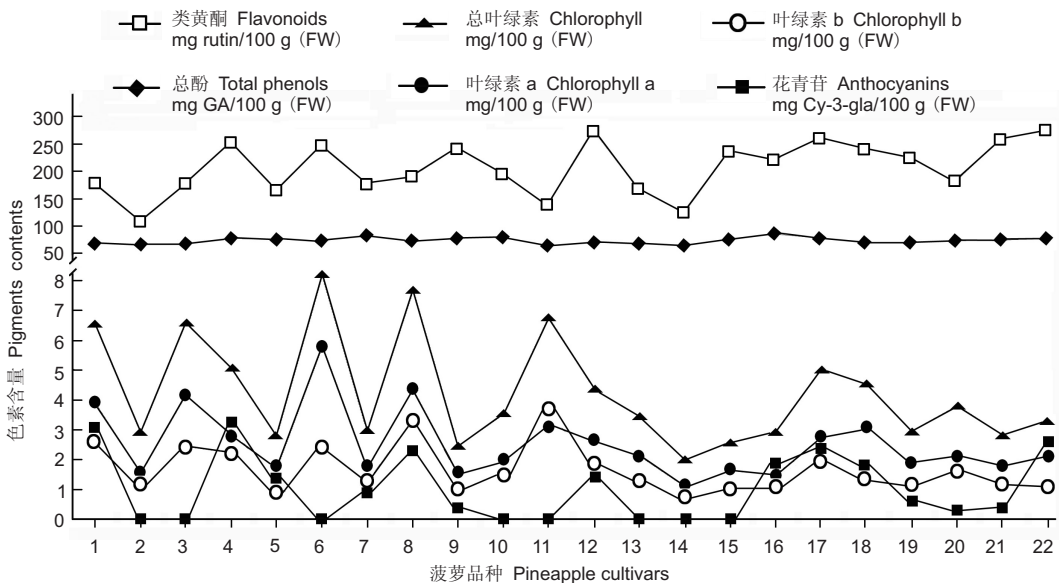


图 2 菠萝不同品种叶片中叶绿素、花青苷、类黄酮和总酚的含量  
Fig. 2 Contents of chlorophyll, anthocyanins, flavonoids and total phenols in pineapple leaves



的累积清除率来看，以‘金钻’和‘红菠萝’的累积清除率最高，‘金艳’最低。

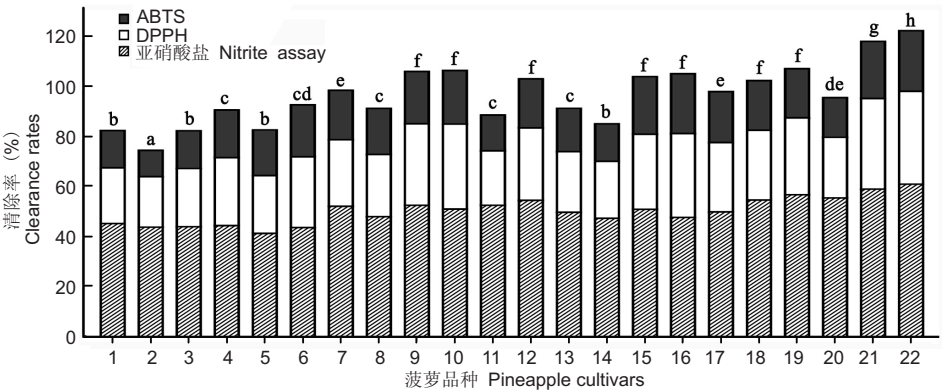
2.4 菠萝叶片色泽、主要色素含量和抗氧化活性的相关性分析

菠萝 22 个品种叶片色泽、主要色素含量、抗氧化活性等指标的相关性分析结果显示，花青苷、类黄酮、总酚含量，3 种抗氧化活性指标均与色泽参数  $a^*$  值呈极显著正相关，均与  $h^*$  值呈显著或极显著负相关(表 2)。因此，在菠萝果实加工成熟期，随着菠萝叶色变红( $a^*$  值越大)或变黄( $h^*$  值越小)，其主要色素(花青苷、类黄酮、总酚)含量越高，抗氧化活性越强。因此， $a^*$  和  $h^*$  值可以作为菠萝叶片指示色泽、主要色素含量和抗氧化活性变化的重要指标。分析结果也表明，类黄酮、总酚含量与 3 种抗氧化活性指标呈极显著正相关；类黄酮与总酚含量呈显著正相关；3 种抗氧化活性指标之间呈极显著正相关；总叶绿素含量与其它指标无

显著相关性。由此可见，类黄酮和总酚是菠萝叶片抗氧化活性的主要功效成分。

2.5 基于菠萝叶片色泽、主要色素含量和抗氧化活性的聚类分析

对菠萝 22 个品种叶片的色泽参数、主要色素含量和抗氧化活性等 14 个指标采用欧氏距离平方法和组间连接聚类法进行聚类分析(图 4)。结果显示，在欧氏距离 5.0 处可以将 22 个品种分为 3 组。第 I 组共有 12 个品种，所有品种叶片的类黄酮含量较高，抗氧化活性较强。第 II 组共有 7 个品种，大部分品种叶片的总叶绿素含量较高，但抗氧化活性较弱。第 III 组共有 3 个品种，这些品种叶片的  $h^*$  值较高，颜色为翠绿色，但其类黄酮和花青苷含量较低且抗氧化活性较弱。通过聚类分析，可以将色泽参数、主要色素含量和抗氧化活性水平相近的品种进行聚类，有利于对不同育种目标的品种开展进一步的筛选。



不同小写字母表示累积清除率在 0.05 水平上的差异显著性。  
Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 for cumulative clearance rate.

图 3 菠萝不同品种叶片中 ABTS 自由基、DPPH 自由基和亚硝酸盐的清除能力  
Fig. 3 Antioxidant activities of pineapple leaves determined by ABTS, DPPH and nitrite assay

表 2 菠萝叶片色泽、主要色素含量和抗氧化活性之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of color parameters, main pigment contents and antioxidant activities in pineapple leaves

指标 Indicators	L *	a *	b *	c *	h *	叶绿素 Chlorophyll	花青苷 Anthocyanins	类黄酮 Flavonoids	总酚 Total phenols	ABTS	DPPH
叶绿素	0.08	-0.12	0.08	0.05	0.07						
花青苷	-0.27	0.70 **	-0.09	0.21	-0.55 **	0.24					
类黄酮	-0.40	0.64 **	-0.04	0.16	-0.55 **	0.03	0.41				
总酚	-0.19	0.67 **	-0.06	0.12	-0.66 **	-0.29	0.33	0.50 *			
ABTS	-0.31	0.66 **	-0.10	0.15	-0.50 *	-0.23	0.24	0.81 **	0.75 **		
DPPH	-0.41	0.65 **	-0.02	0.21	-0.43 *	-0.33	0.12	0.76 **	0.63 **	0.90 **	
亚硝酸盐	-0.25	0.62 **	-0.01	0.07	-0.52 *	-0.33	-0.01	0.66 **	0.65 **	0.66 **	0.72 **

注：\* 表示相关性显著 ( $P < 0.05$ )；\*\* 表示相关性极显著 ( $P < 0.01$ )。  
Notes: \* indicates significant correlation at 0.05; \*\* indicates significant correlation at 0.01.

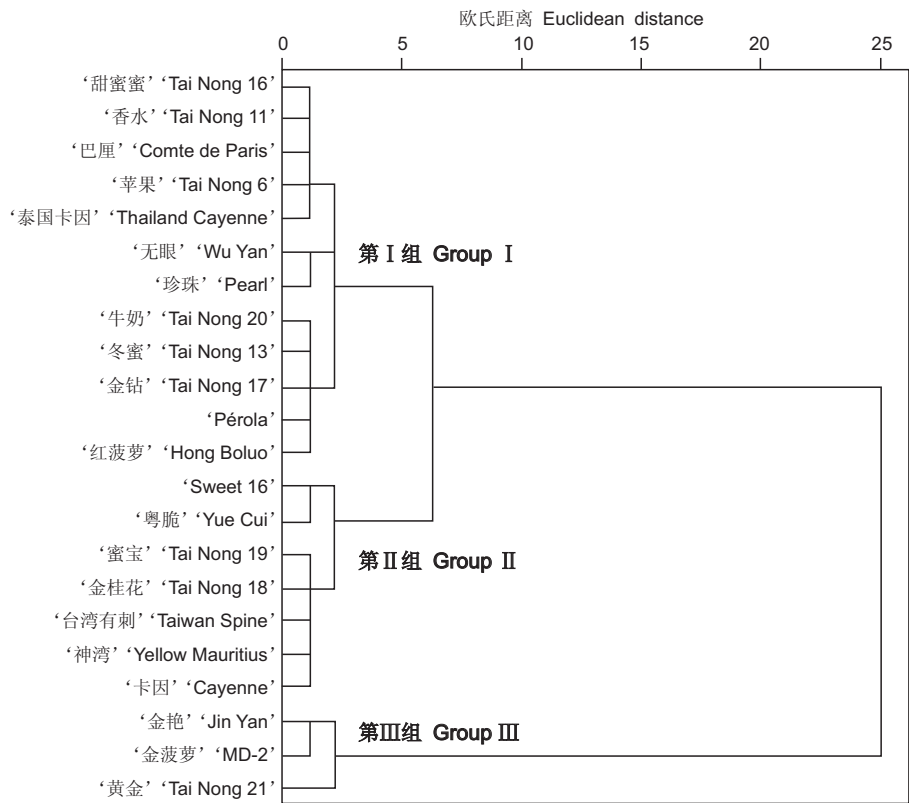


图 4 基于叶片色泽、主要色素含量和抗氧化活性的菠萝品种聚类图  
Fig. 4 Phylogenetic tree of pineapple varieties based on color parameters, main pigment contents, and antioxidant activities in leaves

3 讨论

3.1 叶片色泽与色素含量变化的相关性

色泽是果实外观品质的核心指标之一，也是影响彩叶植物和花卉观赏价值的重要因素。叶绿素、类胡萝卜素、类黄酮和花青苷等色素都属于次生代谢物质，色素的种类和含量决定了植物花、果实、叶片的外观色泽和着色深度<sup>[12,13,21]</sup>。自然界中，丰富多彩的植物叶片富含多种不同种类的色素。探讨叶片色泽形成的物质基础以及色泽与色素间的相互关系，是阐明叶色形成机制的关键所在。目前，国内外学者大多采用色差计进行植物叶片色泽与色素的相关研究，且多数以彩叶植物为实验材料。在彩叶植物中， $a^*$  和  $b^*$  值可作为彩叶叶绿素、花青苷、类胡萝卜素、类黄酮等主要色素含量变化的重要指标<sup>[22,23]</sup>。在本研究中， $a^*$  和  $h^*$  值不仅可作为菠萝叶片指示色泽和主要色素含量变化的重要指标，还可作为叶片抗氧化活性变化的重要指标。

色素种类及其含量的变化，将会导致植物叶片

颜色的变化。随着秋季来临，温度下降、日照时间缩短以及叶片逐渐衰老，叶绿素开始分解，而类胡萝卜素含量却相对稳定，导致秋季的叶色多呈黄色<sup>[22]</sup>，有些植物叶片因花青苷的合成与积累而呈彩叶或红叶<sup>[1,23,24]</sup>。因此，花青苷和类胡萝卜素是彩叶、红叶或黄叶植物叶片呈色及其变化的重要因素，尤其是这 2 类色素的比例变化会导致叶片在秋季变为红色或黄色。然而，这种现象在绿叶植物中并非如此。绿叶富含叶绿素，可吸收更多的红光，使光敏色素的合成效应降低，从而抑制花青苷的合成<sup>[25]</sup>，但相关研究鲜有报道。在本研究中，绿叶菠萝主要含有叶绿素、类黄酮和总酚以及少量花青苷，几乎不含类胡萝卜素。因此，叶绿素、类黄酮和总酚是菠萝叶肉细胞的主要组成色素，对于菠萝叶片显色发挥重要作用。

3.2 叶片色素含量与抗氧化能力的相关性

自然界中，类胡萝卜素、类黄酮和花青苷等天然色素具有很强的抗氧化活性<sup>[4,7,8]</sup>。其中，类黄酮和总酚中的酚羟基结构极易氧化成醌类结

构, 它对活性氧等自由基具有很强的捕捉能力, 使其具有较强的抗氧化性和自由基清除能力<sup>[26]</sup>。本研究中, 菠萝叶片抗氧化活性与类黄酮和总酚含量呈极显著正相关。对于其它植物, 如金露梅 (*Potentilla fruticosa* L.)、西藏沙棘 (*Hippophae tibetana* Schlechtend.) 等 12 种高寒草甸植物<sup>[27]</sup>, 7 种紫珠属 (*Callicarpa*) 植物<sup>[28]</sup>, 以及银杏 (*Ginkgo biloba* L.) 等 70 种药用植物<sup>[29]</sup> 叶片的抗氧化活性研究也得出相同的结论。可见, 类黄酮和总酚是菠萝叶片抗氧化活性的主要功效成分。而且, 本研究还发现不同的抗氧化体系与菠萝叶片类黄酮和总酚含量的相关性表现各异, 这可能是由于类黄酮和总酚的种类及结构不同所导致, 有必要对其组分种类、化学结构及构效关系进行深入研究。

类黄酮和总酚也是水果、蔬菜和谷物中最主要的抗氧化活性物质的来源<sup>[30]</sup>, 由于物种生长环境和基因型的差异, 导致所含类黄酮和总酚的组成、含量与抗氧化活性具有差异<sup>[31]</sup>。本研究通过聚类分析将叶片主要色素含量和抗氧化活性水平相近的菠萝品种聚到一起, 有利于对不同育种目标的品种进行筛选, 尤其对菠萝叶片抗氧化活性物质的开发与综合利用具有重要价值。

## 参考文献:

- [1] 王振兴, 于云飞, 陈丽, 秦红艳, 刘迎雪, 艾军, 赵滢, 杨义明, 李晓燕, 王广富, 孙丹, 王春伟, 范书田. 彩叶植物叶片色素组成、结构以及光合特性的研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 52(1): 1-7.  
Wang ZX, Yu YF, Chen L, Qin HY, Liu YX, Ai J, Zhao Y, Yang YM, Li XY, Wang GF, Sun D, Wang CW, Fan ST. Advances in leaf pigment composition, structure and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants[J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(1): 1-7.
- [2] Fraser PD, Bramley PM. The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids[J]. *Prog Lipid Res*, 2004, 43(3): 228-265.
- [3] Tanaka T, Shnimizu M, Moriwaki H. Cancer chemoprevention by carotenoids. *Molecules*, 2012, 17(3): 3202-3242.
- [4] Agati G, Azzarello E, Pollastri S, Tattini M. Flavonoids as antioxidants in plants: location and functional significance[J]. *Plant Sci*, 2012, 196: 67-76.
- [5] Izzi V, Masuelli L, Tresoldi I, Sacchetti P, Modesti A, Galvano F, Bei R. The effects of dietary flavonoids on the regulation of redox inflammatory networks[J]. *Front Biosci*, 2012, 17: 2396-2418.
- [6] Hribar U, Ulrich NP. The metabolism of anthocyanins[J]. *Curr Drug Metab*, 2014, 15(1): 3-13.
- [7] Han RM, Zhang JP, Skibsted LH. Reaction dynamics of flavonoids and carotenoids as antioxidants[J]. *Molecules*, 2012, 17(2): 2140-2160.
- [8] Skibsted LH. Carotenoids in antioxidant networks. Colorants or radical scavengers[J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(10): 2409-2417.
- [9] 郭依俐, 唐铁鑫, 杨得坡, 岑山, 朱龙平, 徐新军. 粗叶悬钩子叶中多酚类与三萜类化合物的研究[J]. 植物科学学报, 2013, 31(2): 191-197.  
Guo YL, Tang TX, Yang DP, Cen S, Zhu LP, Xu XJ. Polyphenols and triterpenoids in *Rubus aleaefolius* Poir. leaves[J]. *Plant Science Journal*, 2013, 31(2): 191-197.
- [10] Rivera SM, Christou P, Canela-Garayoa R. Identification of carotenoids using mass spectrometry[J]. *Mass Spectrom Rev*, 2014, 33(5): 353-372.
- [11] de Villiers A, Venter P, Pasch H. Recent advances and trends in the liquid-chromatography-mass spectrometry analysis of flavonoids[J]. *J Chromatogr A*, 2016, 1430: 16-78.
- [12] Tadmor Y, Burger J, Yaakov I, Feder A, Libhaber SE, Portnoy V, Meir A, Tzuri G, Sa'ar U, Rogachev I, Aharoni A, Abeliovich H, Schaffer AA, Lewinsohn E, Katzir N. Genetics of flavonoid, carotenoid, and chlorophyll pigments in melon fruit rinds[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(19): 10722-10728.
- [13] Khoo HE, Prasad KN, Kong KW, Jiang Y, Ismail A. Carotenoids and their isomers: color pigments in fruits and vegetables[J]. *Molecules*, 2011, 16(2): 1710-1738.
- [14] 杨祥燕, 蔡元保, 李绍鹏, 孙光明. 菠萝果实不同发育阶段色泽和色素的变化[J]. 热带作物学报, 2009, 30(5): 579-583.  
Yang XY, Cai YB, Li SP, Sun GM. Changes of color and pigments in pineapple fruit flesh at different developmental phase[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2009, 30(5): 579-583.
- [15] 杨祥燕, 蔡元保, 孙光明. 菠萝果肉颜色的形成与类胡萝卜素组分变化的关系[J]. 果树学报, 2010, 27(1): 135-139.  
Yang XY, Cai YB, Sun GM. Relationship between color formation and change in composition of carotenoids in flesh of pineapple fruit[J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(1): 135-139.
- [16] 张秀梅, 孙光明, 刘胜辉, 李苗苗, 杨清照, 杜丽清. 菠萝果实的抗氧化性研究[J]. 热带作物学报, 2013, 34(4): 700-703.  
Zhang XM, Sun GM, Liu SH, Li MM, Yang QZ, Du LQ. Antioxidant activity of pineapple flesh[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(4): 700-703.

- [17] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 267–270.  
Wang XK. Biochemical Experiment Principle and Technology of Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 267–270.
- [18] Csepregi K, Kocsis M, Hideg E. On the spectrophotometric determination of total phenolic and flavonoid contents[J]. *Acta Biol Hung*, 2013, 64(4): 500–509.
- [19] Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. *Free Radic Biol Med*, 1999, 26(9–10): 1231–1237.
- [20] Locatelli M, Gindro R, Travaglia F, Coisson J D, Rinaldi M, Arlorio M. Study of the DPPH scavenging activity: Development of a free software for the correct interpretation of data[J]. *Food Chem*, 2009, 114(3): 889–897.
- [21] Zhao DQ, Wei MR, Liu D, Tao J. Anatomical and biochemical analysis reveal the role of anthocyanins in flower coloration of herbaceous peony[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2016, 102: 97–106.
- [22] 葛雨萱, 王亮生, 周肖红, 甘长青. 香山黄栌叶色和色素组成的相互关系及时空变化[J]. 林业科学, 2011, 47(4): 38–42.  
Ge YX, Wang LS, Zhou XH, Gan CQ. Correlation between the leaf color and pigments composition of *Cotinus coggygria* in Fragrant Hills Park and their temporal and spatial variation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(4): 38–42.
- [23] Hughes NM, Carpenter KL, Cannon JG. Estimating contribution of anthocyanin pigments to osmotic adjustment during winter leaf reddening[J]. *J Plant Physiol*, 2013, 170(2): 230–233.
- [24] Zhang ZQ, Pang XQ, Ji JL, Jiang YM. Role of anthocyanin degradation in litchi pericarp browning[J]. *Food Chem*, 2001, 75(2): 217–221.
- [25] Jaakola L. New insights into the regulation of anthocyanin biosynthesis in fruits[J]. *Trends Plant Sci*, 2013, 18(9): 477–483.
- [26] Velioglu YS, Mazza G, Gao L, Oomah BD. Antioxidant activity and total phenolics in selected fruits, vegetables, and grain products[J]. *J Agric Food Chem*, 1998, 46(10): 4113–4117.
- [27] 廉美娜, 朱玉环, 徐长林, 尚占环, 龙瑞军. 祁连山东段高寒草甸植物总酚和黄酮含量及抗氧化活性研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(12): 2492–2497.  
Lian MN, Zhu YH, Xu CL, Shang ZH, Long RJ. Contents of total polyphenols and flavonoids from alpine plants from Qilianshan mountains and their antioxidant activity[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(12): 2492–2497.
- [28] 宁德生, 李典鹏, 黄胜, 刘金磊, 谷陟欣, 颜小捷, 潘争红. 七种紫珠属植物水提取物中总黄酮、总酚酸及其抗氧化活性的测定[J]. 广西植物, 2012, 32(6): 845–848.  
Ning DS, Li DP, Huang S, Liu JL, Gu ZX, Yan XJ, Pan ZH. Determination of total flavonoids, total phenols and antioxidant activity in aqueous extract of seven *Callicarpa* species[J]. *Guihaia*, 2012, 32(6): 845–848.
- [29] Katalinic V, Milos M, Kulisic T, Jukic M. Screening of 70 medicinal plant extracts for antioxidant capacity and total phenols[J]. *Food Chem*, 2006, 94(4): 550–557.
- [30] Liu RH. Health benefits of fruit and vegetables are from additive and synergistic combinations of phytochemicals[J]. *Am J Clin Nutr*, 2003, 78(3): 517–520.
- [31] Naczek M, Shahidi F. Phenolics in cereals, fruits and vegetables: occurrence, extraction and analysis[J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2006, 41(5): 1523–1542.

(责任编辑: 周 媛)