

基于图像 RGB 特征值的甘薯色素与肉色关系初步探讨

沈升法, 吴列洪, 李 兵

(浙江省农业科学院作物与核技术利用研究所, 杭州 310021)

摘要:为明确甘薯色素、干率与肉色的关系,给图像 RGB 特征值评估甘薯色素含量提供依据,测定了甘薯 240 份品系的胡萝卜素含量及 234 份品系的花青素含量、干率和薯肉 RGB 颜色特征值。结果表明,甘薯胡萝卜素含量与 RGB 值的相关系数 $r = -0.913$,偏相关系数为 -0.872 ,花青素含量与 RGB 值的相关系数 $r = -0.838$,偏相关系数为 -0.836 ,说明甘薯色素含量与肉色是高度正相关的,是肉色的决定因子,但胡萝卜素与肉色关系更紧密。干率与胡萝卜素 RGB 值的相关系数 $r = 0.597$,偏相关系数为 0.273 ,干率与花青素 RGB 值的相关系数 $r = -0.273$,偏相关系数为 0.255 ,说明干率与对肉色有极明显的负面影响,但是在 RGB 值 ≥ 200 的低胡萝卜素(约含量 $3 \text{ mg}/100 \text{ g} \cdot \text{FW}$ 以下)群体中,干率与 RGB 值的偏相关系数为 -0.0066 ($P = 0.9426$),干率对低胡萝卜素含量品系的肉色没有影响。采用 R 值、G 值、B 值、干率的二次多项式回归模型,RGB 值 ≥ 200 的低胡萝卜素群体、RGB 值 < 200 的较高或高胡萝卜素群体和花青素群体的拟合方程的复相关系数 R 分别为 0.975 、 0.982 和 0.937 ,说明拟合值与实测值关系十分密切。对胡萝卜素含量高于 $3 \text{ mg}/100 \text{ g} \cdot \text{FW}$ 的品种,拟合值能达到约 90% 的精确度,对胡萝卜素含量低于 $3 \text{ mg}/100 \text{ g} \cdot \text{FW}$ 的品种,也能达到约 83% 的精确度,对花青素品种能达到约 86% 的精确度。因此,图像 RGB 特征值法不仅能够很好地反映甘薯品种间的色素差异,还能较精确地估测甘薯色素含量,可为甘薯早代育种的大批量样品提供便捷、客观的色素含量评估方法。

关键词:甘薯;色素;肉色;干率;RGB 特征值

Preliminary Study on Relationship of Pigments with Flesh Color of Sweetpotato Based on RGB Characteristic Values of Images

SHEN Sheng-fa, WU Lie-hong, LI-Bing

(Institute of Crops and Nuclear Technology Utilization, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021)

Abstract: In order to clear the relationship of pigment and dry matter content with flesh color of sweetpotato, and provide estimation methods for pigment content based on the RGB characteristic values of images, the carotene content in 240 strains, anthocyanin content in 234 strains, the relative dry matter content and RGB characteristic value were determined. The results showed that the correlation coefficient of carotene content with RGB value was -0.913 , and their partial correlation coefficient was -0.872 , while the correlation coefficient of anthocyanin content with RGB value was -0.838 , and their partial correlation coefficient was -0.836 , indicating that pigment content was a determining factor and high positive correlation with root flesh color, however there was a closer relationship between carotene content and root flesh color. The correlation coefficient of dry matter content with carotene RGB value was 0.597 , and their partial correlation coefficient was 0.273 , while correlation coefficient of dry matter content with anthocyanin RGB value was -0.273 , and their partial correlation coefficient was 0.255 , indicating that dry matter content had very obviously negative effects. But in low carotene (about $3 \text{ mg}/100 \text{ gFW}$ or less) group with the RGB value ≥ 200 , the partial correlation coefficient of dry matter content with RGB value was -0.0066 ($P =$

收稿日期:2014-06-15 修回日期:2014-08-12 网络出版日期:2015-06-10

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20150610.1604.006.html>

基金项目:浙江省科技创新团队项目(2011R50026-16)

第一作者研究方向为薯类育种与推广。E-mail: shensf88@sina.com

通信作者:吴列洪,研究方向为薯类育种与推广。E-mail: zwsgsz@mail.zaas.cn

0.9426), so dry matter content had no effect on root flesh color of low carotene strains. The pigment content estimation achieved good fitting results using the quadratic polynomial regression model with R value, G value, B value, and dry matter. Multiple correlation coefficients of fitting equations in low carotene group with RGB values < 200, high or moderately high carotene group with RGB values ≥ 200 , and anthocyanin group, were respectively 0.975, 0.982, and 0.937, indicating that the fitting values had close relationships with measured values, and their fitting values could reach respectively about the accuracy of 90%, 83%, and 86%. Therefore, the RGB characteristic value might be used as not only a good indicator of pigment content difference on varieties, but also a relatively accurate estimation for their pigment content, it could provide a convenient and objective evaluation method of pigment content for large sums of samples in the early-generation selection of sweetpotato.

Key words: sweetpotato; pigment; root flesh color; dry matter content; RGB characteristic value

甘薯色素包含胡萝卜素和花青素。胡萝卜素是维生素 A 的前体,而且胡萝卜素含量丰富的甘薯品种往往具有更高的维生素 C 和抗氧化活性^[1-2]。花青素有很强的抗氧化活性功能,能清除人体内会产生有害物质的氧自由基;抗突变活性、抑菌杀菌、抑制肿瘤活性;防止血管紧张、恢复正常血压;防止肝组织缺血,恢复肝功能正常;改善记忆力,放射防护等保健功效^[3]。因此,胡萝卜素和花青素含量是鲜食用、食品加工用或色素提取用甘薯的重要指标之一,高胡萝卜素、高花青素是国内外甘薯育种的主攻方向之一^[4-5],我国高胡萝卜素甘薯品种要求含量在 10 mg/100 g · FW 以上,高花青素甘薯品种要求含量在 30 mg/100 g · FW 以上。甘薯胡萝卜素是脂溶性物质,含量的定量测定方法有溶剂分配法、柱层析法和纸层析法等,这些测定方法操作繁琐、耗时,难以应用于大批量样品,李洪民^[6]、李坚等^[7]提出了丙酮提取直接比色测定法,该方法简便、快速,可应用于大批量样品。甘薯花青素是水溶性物质,目前广泛使用柠檬酸-磷酸氢二钠缓冲液提取比色法测定含量^[8]。在甘薯早代育种上,面对大批量育种材料,化学测定法工作量大、耗时较长,因此,常用肉色目测分级法对色素含量进行评估^[9-11],但目测分级法含量估测范围过于宽泛,主观性大,且极易受甘薯干率影响^[12],常带来肉色分级混乱,色素评价不客观、不确切等问题,影响甘薯定向育种。图像分析已应用于动、植物分类^[13-16],图像 RGB 特征值可应用于作物病害诊断或分级、水果成熟度甄别、培养植株叶绿素含量实时变化等^[17-21]。本研究基于图像 RGB 特征值分析甘薯胡萝卜素含量、花青素含量、干率与肉色的关系,为便捷、客观、较精确地应用图像 RGB 特征值评估甘薯胡萝卜素及花青素含量提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 2013 年本院甘薯育种选种圃含胡萝卜素品系 240 份,包含 2009 年以来 30 余个杂交组合的各级选种圃选留品系,含花青素品系 234 份,包含 2006 年以来 40 余个杂交组合的各级选种圃选留品系。

1.2 试验方法

所有测定在鲜薯收获后 90 d 左右开始,每品系选取一个中等大小薯块,横向对切,一半用于图像扫描,一半用于测定鲜薯干率、色素含量。

干率测定:用鲜薯烘干计重法,鲜薯刨丝,80 °C 烘干至恒重,测定干率。

胡萝卜素含量测定:用丙酮提取直接比色测定,胡萝卜素计算公式: $CA = 0.004 \times A \times V/M \times 100$ ^[22]。其中:CA:胡萝卜素含量(mg/100g · FW);V:定容体积(mL);M:样品质量(g);A:在 454 nm 下的丙酮提取液吸光度值;0.004:吸光值转换为胡萝卜素含量的经验系数;100:单位转换系数。

花青素测定:按柠檬酸-磷酸氢二钠缓冲液法提取甘薯花青素并测定 530 nm 的吸光值,花青素计算公式: $C = V/100 \times 1/M \times A \times 100000/958$ ^[8]。其中:C:花青素含量(mg/100g · FW);V:定容体积(mL);M:样品质量(g);A:吸光度值;958:吸光值转换为花青素含量的经验系数;100000:单位转换系数。

图像扫描与 RGB 特征值:薯块横切约 2 mm 厚的薄片,扫描面用 0.7% 柠檬酸液浸泡 5 ~ 10 s 护色后,再用吸水纸吸干表面水分,马上进行扫描并存储图像;用 Adobe Photoshop CS5 软件在直方图中读取图像的 RGB(肉色)值、RGB 标准差、R(红色)值、G(绿色)值、B(蓝色)值。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2003 和 DPS v3.01 统计软件进行相关性分析、回归分析。

2 结果与分析

2.1 甘薯色素含量、干率、肉色特征值的分布概况

在 240 份胡萝卜素甘薯材料中,低胡萝卜素含量(3 mg/100 g·FW 以下)与较高或高胡萝卜素含量(大于 3 mg/100 g·FW)的比例约各占 50%,胡萝卜素的变异系数(CV)最大(表 1),为 100.92%,说明甘薯胡萝卜素含量变异范围很大,单纯高胡萝卜素育种并不困难,干率变异系数相对胡萝卜素而言较小,仅为 18.36%。234 份紫肉甘薯材料的平均花青素含量为 54.83 mg/100 g·FW,群体花青素含量处于较高的水平,这与近几年高花青素育种导向有关,变异系数为 45.59%,说明单纯高花

青素育种同样不难,干率变异系数同样较小,干率平均值为 32.59%,比胡萝卜素群体平均值高 2.86 个百分点。在肉色 RGB 特征值中,RGB 值表示薯块肉色的平均水平,由软件根据 R 值、G 值、B 值自动计算而来,色值由颜色的灰度或亮度值表示,与人眼感知正好相反,色值越大,颜色越浅,因此,花青素平均含量是胡萝卜素平均含量的约 12 倍,花青素肉色平均 RGB 值反而比胡萝卜素肉色平均 RGB 值小了近 1 倍,同时肉色变异系数比色素含量变异系数要小得多。在 R、G、B 3 种色值中,不管是胡萝卜素群体还是花青素群体,各品系的 R 值总在优势地位,但胡萝卜素群体的 R 值变异系数极小,变化范围较窄;胡萝卜素肉色 G 值处在居中位置,而花青素肉色 B 值处在居中位置,但处于最小地位的胡萝卜素肉色 B 值或花青素肉色 G 值的变异系数在 3 种色值中反而是最大的。

表 1 色素含量、干率、肉色 RGB 特征值的数据统计

Table 1 Statistical data of pigment content, dry matter content, and RGB characteristic values of root flesh color

试验群体 Test group	项目 Article	色素含量 (mg/100 g·FW) Pigment	干率(%) Dry matter	RGB	RGB 标准差 SD of RGB	R	G	B
胡萝卜素 Carotene	最小值 Min.	0.04	12.30	143.26	10.00	183.50	134.44	94.24
	最大值 Max.	18.84	42.40	237.50	70.39	253.40	242.25	240.39
	平均值 Average	4.54	29.73	200.40	35.05	239.29	197.72	164.72
	标准差 SD	4.58	5.46	23.05	12.89	8.05	30.61	35.71
	变异系数(%) CV	100.92	18.36	11.50	36.78	3.37	15.48	21.68
花青素 Anthocyanin	最小值 Min.	14.86	16.93	76.35	19.94	91.24	48.88	83.51
	最大值 Max.	129.46	43.15	148.55	39.27	189.54	108.42	161.35
	平均值 Average	54.83	32.59	103.50	30.24	132.85	67.03	110.27
	标准差 SD	25.00	4.69	14.56	4.48	18.89	11.14	15.53
	变异系数(%) CV	45.59	14.38	14.07	14.82	14.22	16.61	14.08

2.2 甘薯色素含量与干率的相关性

甘薯胡萝卜素含量与干率的相关系数 $r = -0.553^{**}$,呈极显著的负相关,说明干率随着甘薯胡萝卜素含量增大有很明显的下降趋势,因此,甘薯聚合高胡萝卜素高干率难度较大。甘薯花青素含量与干率的相关系数 $r = 0.471^{**}$,呈极显著的正相关,说明干率随着甘薯花青素含量增大有很明显的上升趋势,因此,甘薯聚合高花青素低干率反而难度较大,干率与胡萝卜素、花青素的关系反差,是花青素群体干率水平比胡萝卜素群体相对较高的主要原因。

2.3 甘薯色素含量、干率与肉色的关系

相关系数和偏相关系数均可表示甘薯色素含量、干率与图像 RGB 特征值的关系,但偏相关系数由于除去了色素含量与干率的相互关系干扰,更能真实表示色素含量或干率与 RGB 特征值两者之间的关系。在相关分析结果(表 2)中,甘薯胡萝卜素、花青素含量与 RGB 值的相关系数分别为 -0.913 、 -0.838 ,偏相关系数分别为 -0.872 、 -0.836 ,说明甘薯色素含量与肉色呈极显著正相关,而且关系十分密切,色素含量是肉色的决定因子,但相对而言,胡萝卜素含量与肉色关系更紧密,图像 RGB 值对甘薯品种间肉色差异有很好的辨识度;RGB 标准差反

映同一薯块内肉色的差异程度,胡萝卜素、花青素含量与 RGB 标准差的相关系数分别为 0.913、-0.704,偏相关系数分别为 0.874、-0.672,说明胡萝卜素含量与薯块内肉色差异呈极显著正相关,含量越高,肉色差异越大,而花青素含量与薯块内肉色差异呈极显著负相关,含量越高,肉色差异越小,色素含量同样也是同一薯块内肉色差异的决定因子。干率与胡萝卜素、花青素的 RGB 值的相关系数分别为 0.597 和 -0.273,偏相关系数分别为 0.273、0.255,说明尽管在相关系数上干率与胡萝卜素肉色呈极显著负相关,而与花青素肉色呈极显著正相关,但偏相关系数表明,干率对两种色素的肉色均有极

显著的负面影响,即色素含量相同的品种,干率越高,肉色越浅。相关分析结果同样可以表明,胡萝卜素含量对图像 R 值有显著的负面影响,但对 G 值、B 值均呈极显著的负面影响,而且相互关系密切;花青素含量对 R、G、B 3 种色值均有极显著的负面影响,而且相互关系密切;干率对胡萝卜素图像 R 值有较弱的正面影响,但对 G 值、B 值均有极显著的正面影响;尽管在相关系数上干率与花青素图像 R、G、B 3 种色值均呈极显著负相关,但在偏相关系数上,干率对花青素图像 R、G、B 3 种色值均有极显著的正面影响。

表 2 色素、干率与肉色 RGB 特征值的相关系数和偏相关系数

Table 2 Correlation coefficients and partial correlation coefficients of pigments and dry matter with RGB characteristic values of root flesh color

试验群体 Test group	相关类型 Relation type	性状 Trait	RGB	RGB 标准差 SD of RGB	R	G	B
胡萝卜素 Carotene	相关系数 CC	含量 Content	-0.913 **	0.913 **	-0.263 **	-0.928 **	-0.913 **
		干率 Dry matter	0.597 **	-0.556 **	0.224 **	0.606 **	0.582 **
	偏相关系数 PCC	含量 Content	-0.872 **	0.874 **	-0.168 *	-0.894 **	-0.873 **
		干率 Dry matter	0.273 **	-0.150 *	0.104	0.299 **	0.227 **
花青素 Anthocyanin	相关系数 CC	含量 Content	-0.838 **	-0.704 **	-0.806 **	-0.812 **	-0.771 **
		干率 Dry matter	-0.273 **	-0.291 **	-0.276 **	-0.241 **	-0.248 **
	偏相关系数 PCC	含量 Content	-0.836 **	-0.672 **	-0.798 **	-0.816 **	-0.773 **
		干率 Dry matter	0.255 **	0.065	0.199 **	0.275 **	0.213 **

CC:Correlation coefficient,PCC:Partial correlation coefficient. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$

2.4 图像 RGB 特征值法评估甘薯色素含量的回归分析

2.4.1 回归模型的选择 将甘薯肉色 RGB 特征值(x)与色素含量(y)作关系图,仔细分析 RGB 值、R 值、G 值、B 值分别与色素含量的数据点分布以及关

系式的决定系数 R^2 (表 3),结果表明除了 R 值与胡萝卜素含量的关系式是线性的,其余 RGB 特征值与色素的关系式应该是二次多项式曲线,而非线性关系,这说明用甘薯肉色 RGB 特征值对胡萝卜素含量作回归分析用二次多项式互动模型比线性模型更好。

表 3 肉色 RGB 特征值与色素不同关系式的决定系数(R^2)

Table 3 Determination coefficients(R^2) of different relational expressions of pigments with RGB characteristic values of root flesh color

试验群体 Test group	关系式类型 Relational expression type	RGB	R	G	B
胡萝卜素 Carotene	线性 Linear	0.834	0.069	0.861	0.833
	二次多项式 Quadratic polynomial	0.890	0.069	0.943	0.945
花青素 Anthocyanin	线性 Linear	0.703	0.650	0.659	0.604
	二次多项式 Quadratic polynomial	0.752	0.662	0.790	0.655

2.4.2 不同胡萝卜素含量群体的甘薯干率对肉色的影响 从 RGB 值与胡萝卜含量的关系(图 2)中仔

细分析,图中二次多项式关系仍难以很好地表达胡萝卜素含量趋向 0 时的 RGB 值趋势,大约以胡萝卜

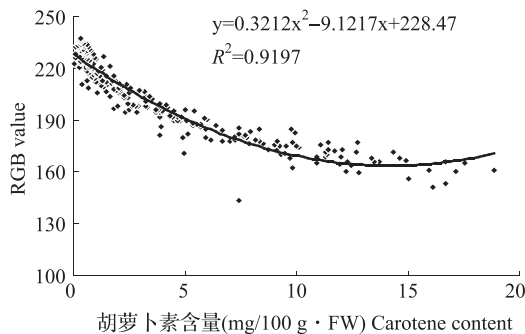


图1 肉色 RGB 值与胡萝卜素含量的关系
Fig.1 Relationship of carotene content with RGB values of root flesh color

素含量3 mg/100 g · FW 作分界点,若作直线关系分析,胡萝卜素含量 3 mg/100 g · FW 以下的群体的直线斜率 (|b| = 9.984) 比胡萝卜素含量超过 3 mg/100 g · FW 的群体的直线斜率 (|b| = 2.716) 明显要大得多,这提示了用甘薯肉色 RGB 特征值、干率对胡萝卜素含量作回归分析时,以胡萝卜素含量 3 mg/100 g · FW 为分界,分低胡萝卜素群体和较高或高胡萝卜素群体进行分类处理可能是必要的。有 33 个品系的胡萝卜素含量在 0.5 mg/100 g · FW 以下,最小的仅 0.04 mg/100 g · FW,若作全体处理,拟合方程的随机扰动项 ε 会较大,从而影响这部分极低含量预测值的精确度,甚至出现负值。胡萝卜素含量 3 mg/100 g · FW 分界点的位置,RGB 值大约为 200,以 RGB 值 200 为分界,RGB 值 200 以上的低胡萝卜素群体有 122 份品系,RGB 值 < 200 的较高或高胡萝卜素群体有 118 份品系。

表 4 甘薯色素含量的回归分析结果

Table 4 Regression analysis results of sweetpotato pigments content

试验群体 Test group	项目 Article	结果 Result
RGB≥200 低胡萝卜素 Low carotene	最优方程	$Y = -2.07 + 0.185X_1 - 0.184X_3 - 0.000685X_1X_2 + 0.000720X_2X_3$
	Optimal equation	
	F 值检验 F value test	$R = 0.975, F = 546.46, P = 0$
	实际检验 Practical test	$MAE = 0.14 \text{ mg/100 g} \cdot \text{FW}, MRE = 16.95\%$
RGB < 200 较高或高胡萝卜素 High or moderately high carotene	最优方程	$Y = -52.74 + 1.503X_1 - 1.234X_2 - 0.00259X_{12} + 0.00363X_{22} - 0.00115X_1X_2 + 0.000192X_3X_4$
	Optimal equation	
	F 值检验 F value test	$R = 0.982, F = 495.94, P = 0$
	实际检验 Practical test	$MAE = 0.65 \text{ mg/100 g} \cdot \text{FW}, MRE = 9.58\%$
花青素 Anthocyanin	最优方程	$Y = 81.55 - 6.014X_2 + 13.358X_4 - 0.058X_{42} + 0.030X_1X_2 - 0.0622X_1X_4$
	Optimal equation	
	F 值检验 F value test	$R = 0.937, F = 331.40, P = 0$
	实际检验 Practical test	$MAE = 6.76 \text{ mg/100 g} \cdot \text{FW}, MRE = 13.56\%$

MAE; Mean absolute error, MRE; Mean relative error

在低胡萝卜素群体中,甘薯干率对 RGB 值的偏相关系数为 -0.0066 ($P = 0.9426$),说明干率在胡萝卜素含量低于 3 mg/100 g · FW 的群体中对肉色没有影响。在较高或高胡萝卜素群体中,干率对 RGB 值的偏相关系数为 0.251 ($P = 0.0063$),说明干率在胡萝卜素含量高于 3 mg/100 g · FW 的群体中对肉色有极显著的负面影响。因此,用甘薯肉色 RGB 特征值、干率对胡萝卜素含量作回归分析时,干率在低胡萝卜素群体和较高或高胡萝卜素群体的拟合方程中的作用应该是完全不同的。

2.4.3 用甘薯的肉色 RGB 特征值、干率对色素含量估算的最优拟合方程 由于图像 RGB 值是由 R、G、B 3 个指标综合计算而来,因此 R、G、B 色值变化能更好地反映肉色的变化,以 R 值(x_1)、G 值(x_2)、B 值(x_3)、干率(x_4)为自变量,色素含量(y)为因变量,以多元二次多项式回归模型: $y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_1^2 + b_6x_2^2 + b_7x_3^2 + b_8x_4^2 + b_9x_1x_2 + b_{10}x_1x_3 + b_{11}x_1x_4 + b_{12}x_2x_3 + b_{13}x_2x_4 + b_{14}x_3x_4 + \varepsilon$ 进行逐步回归分析,结果(表 4)表明,RGB 值 ≥ 200 的低胡萝卜素群体、RGB 值 < 200 的较高或高胡萝卜素群体和花青素群体的拟合方程的复相关系数 R 分别为 0.975、0.982 和 0.937,说明拟合值与实测值关系十分密切,拟合结果能够很好地反映品种间的色素差异。RGB 值 ≥ 200 的低胡萝卜素群体,干率未能进入最优多项式拟合方程,拟合值与实测值的平均绝对误差(MAE)为 0.14 mg/100 g · FW,平均相对误差(MRE)为 16.95%;在 RGB 值 < 200 的较高或高胡

萝卜素群体中,拟合值与实测值的 MAE 为 0.65 mg/100 g · FW, MRE 为 9.58%;在花青素群体中,拟合值与实测值的 MAE 为 6.76 mg/100 g · FW, MRE 为 13.56%。说明图像 RGB 特征值法可以比较精确地估测色素含量,而对胡萝卜素含量高于 3 mg/100 g · FW 的品种,能达到约 90% 的精确度,对胡萝卜素含量低于 3 mg/100 g · FW 的品种,也能达到约 83% 的精确度,对花青素品种能达到约 86% 的精确度。

以 0.5 mg/100 g · FW 为组距,可将含量介于 0~3 mg/100 g · FW 鲜薯的低胡萝卜素群体分成 6 个组群,分析组群平均胡萝卜素含量与拟合值平均相对误差的关系(图 2),可以发现胡萝卜素含量越低,拟合误差越大,在 0~0.5 mg/100 g · FW 组群中, MRE 达到 25.43%,在 2.5~3.0 mg/100 g · FW 组群中, MRE 仅有 8.39%。可能原因一是含量与色度的测定均超出线性范围下限,二是提取液中痕量杂质对胡萝卜素含量的比色测定干扰作用显现。

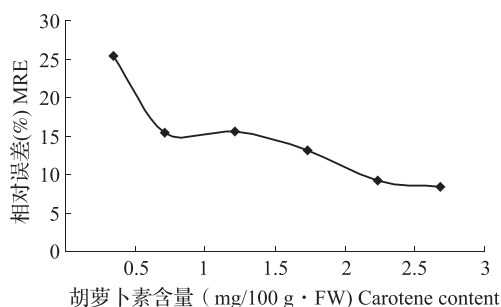


图 2 低胡萝卜含量对拟合误差的影响

Fig. 2 Effects of low carotene content on fitting errors

3 讨论

张黎玉等^[10]通过 10 个组合 895 个品系的目测分级和胡萝卜素含量测定后认为,甘薯胡萝卜素含量与肉色有密切的关系,根据肉色深浅可分为深橘红、橘红、深橘黄、橘黄、黄色、淡黄或白色 6 个等级,在 100 g 鲜薯中,胡萝卜素含量分别为 10~19 mg、8~10 mg、5~8 mg、3~5 mg、1~3 mg 和 0~1 mg;蔺定运等^[11]用黄桃罐头比色卡和色差计测定了 31 个甘薯品种肉色,发现胡萝卜素含量与比色卡目测的肉色级别呈显著的正相关性($r=0.6396$),与色差计测定的肉色主波长和兴奋纯度呈极显著的正相关,相关系数 r 分别为 0.8173 和 0.7068。在紫肉甘薯的育种实践中,由于甘薯花青素相对胡萝卜素而言整体处在较高的含量水平,用目测法区分高花青

素品系间色素含量的差异,其实是非常困难的。本试验测定了 240 份品系的胡萝卜素含量、234 份品系的花青素含量以及肉色 RGB 特征值,结果显示甘薯胡萝卜素含量与 RGB 值的相关系数 $r = -0.913$,偏相关系数为 -0.872 ,花青素与 RGB 值的相关系数 $r = -0.838$,偏相关系数为 -0.836 ,表明甘薯色素含量与肉色是高度正相关的,胡萝卜素与肉色关系更紧密,RGB 特征值对肉色有很好的辨识度,这为利用图像 RGB 颜色特征值评估色素含量确立了良好的基础。

谢逸萍等^[12]对 22 个组合 570 个品系采用 5 级目测分级法,发现 3 级以上品系中,薯肉橘黄色深度相同时,干率高的要比干率低的品系胡萝卜素含量高,认为薯肉色的深浅不能完全代表胡萝卜素含量的高低,而是还与品系的干率高低有密切关系,但没有研究二者的相关性。本试验研究表明,干率与胡萝卜素肉色 RGB 值的相关系数为 0.597,偏相关系数为 0.273 ($P=0.00002$),干率与花青素 RGB 值相关系数为 -0.273 ,偏相关系数为 0.255 ($P=0.00009$),干率对薯肉色有极显著的负面影响,而在 RGB 值 ≥ 200 的低胡萝卜素群体(含量约为 3 mg/100 g · FW 以下)中,干率与肉色 RGB 值的偏相关系数为 -0.0066 ($P=0.9426$),干率对低胡萝卜素含量品系的肉色没有影响。

本试验采用 R 值、G 值、B 值、干率的二次多项式回归模型的拟合结果能够很好地反映甘薯品种间的色素含量差异,表明用图像 RGB 特征值法能相对精确地估测甘薯色素含量,这为下一步的甘薯色素图像估测软件开发提供了依据,将为甘薯早代育种的大批量样品提供一种便捷、客观的评估方法。

由于同一薯块不同部位色素含量和干率均存在一定的差异,尤其胡萝卜素含量,顶部含量可以是底部的 2~3 倍^[1],这容易引起色素、干率测定取样与图像扫描取样出现差异,尽管本试验尽量相互靠近取样,但差异总是存在的。甘薯褐变主要来源于多酚氧化酶(PPO)活性,刘鲁林等^[23]测定了 35 个甘薯品种的 PPO 活性,发现 PPO 活性变异幅度较大 ($CV=48.37\%$);许正虹等^[24]发现 PPO 活性最适 pH 值为 7.0,随着 pH 值下降而下降,褐变体系反应速度也随之变缓;赵梅等^[25]认为用 0.75% 左右的柠檬酸溶液可以获得良好的甘薯护色效果。本试验用 0.7% 的柠檬酸溶液护色,整体效果不错,但仍有个别轻度褐变发生,因此,取样和褐变是影响利用甘薯肉色 RGB 特征值、干率估算色素含量的重要因素。

另外在试验中还发现低胡萝卜素含量对拟合误差也有影响,含量越低拟合相对误差越大,这种影响可能来源于提取液中痕量杂质对色素比色测定的干扰,所以,取样、护色、色素测定线性范围确定技术的精确化,以进一步修正拟合方程和图像扫描的样品处理技术,需要进一步探讨。

参考文献

- [1] 谢一芝,邱瑞镰,戴起伟,等. 甘薯胡萝卜素含量的变化及高胡萝卜素育种[J]. 国外农学—杂粮作物,1998,18(4):43-46
- [2] 唐忠厚,李洪民,马代夫. 不同肉色甘薯抗氧化特性的基因型差异及其相关性研究[J]. 中国粮油学报,2009,24(5):47-51
- [3] 傅玉凡. 稀有植物紫肉甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 主要性状与影响因子研究[D]. 重庆:西南大学,2008
- [4] 谢逸萍,马飞,李洪民,等. 高胡萝卜素甘薯亲本材料的引进、筛选、创新与应用[J]. 杂粮作物,2004,24(4):209-211
- [5] 谢一芝,郭小丁,贾赵东,等. 紫心甘薯育种现状及展望[J]. 植物遗传资源学报,2012,13(5):709-713
- [6] 李洪民. 甘薯块根胡萝卜素的快速测定[J]. 中国甘薯,1988(2):120-121
- [7] 李坚,滕葭,柳琪,等. 甘薯中胡萝卜素含量测定方法的探讨[J]. 莱阳农学院学报,1991,8(2):154-157
- [8] 刘桂玲,李海霞,郭宾会,等. 不同提取方法对甘薯花青素含量测定的影响[J]. 中国农学通报,2007,23(4):91-94
- [9] 陆漱韵,刘庆昌,李惟基,等. 甘薯育种学[M]. 北京:中国农业出版社,1998:271
- [10] 张黎玉,谢一芝. 甘薯块根肉色遗传以及与其它性状的相关性分析[J]. 江苏农业学报,1988,4(2):30-34
- [11] 蔺定运,李炜,刘晓阳. 甘薯块根类胡萝卜素与薯肉色的研究[J]. 作物学报,1989,15(3):260-266
- [12] 谢逸萍,马飞,李洪民,等. 甘薯 F₁ 胡萝卜素含量测定及遗传趋势探讨[J]. 江苏农业科学,2006(3):54-65
- [13] 程小梅. 基于图像的昆虫识别研究与设计[D]. 西安:西北大学,2008
- [14] 张蕾,陈小琳,侯新文,等. 实蝇科果实蝇属昆虫数字图像自动识别系统的构建和测试[J]. 昆虫学报,2011,54(2):184-196
- [15] 李欣. 田间杂草的图像识别技术研究[D]. 保定:河北农业大学,2007
- [16] 朱敏,高爱平,罗石荣,等. 杧果花瓣与花药色彩的数字化描述[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(1):159-166
- [17] 赖军臣,李少昆,明博,等. 作物病害机器视觉诊断研究进展[J]. 中国农业科学,2009,42(4):1215-1221
- [18] Sabine D, Bauer F K, Wolfgang F. The potential of automatic methods of classification to identify leaf diseases from multispectral images[J]. Precip Agric, 2011,12:361-377
- [19] Mansor A R, Othman M, Bakar M N A, et al. Fuzzy ripening mango index using RGB colour sensor model[J]. J Art Sci Com, 2014,5(2):1-9
- [20] Arefi A, Motlagh A M, Mollazade K, et al. Recognition and localization of ripen tomato based on machine vision[J]. Aust J Crop Sci, 2011,5(10):1144-1149
- [21] Gupta S D, Ibaraki Y, Pattanayak A K. Development of a digital image analysis method for real-time estimation of chlorophyll content in micropropagated potato plants[J]. Plant Biotechnol Rep, 2013,7:91-97
- [22] Ma D F, Li Q, Li X Y, et al. Selection of parents for breeding edible varieties of sweetpotato with high Carotene Content[J]. Agric Sci China, 2009,8(10):1166-1173
- [23] 刘鲁林,木泰华,孙艳丽. 不同品种甘薯块根营养成分及相关性分析[J]. 中国粮油学报,2008,23(1):39-43
- [24] 许正虹,刘璇,高彦祥. 紫甘薯多酚氧化酶性质研究[J]. 食品与发酵工业,2006,32(8):18-23
- [25] 赵梅,慕鸿雁,张晶. 甘薯护色研究[J]. 保鲜与加工,2008(4):20-22

(上接第 887 页)

参考文献

- [1] 张文堂,王建中,杨立新. 豆沙系列饮料生产工艺的试验与研究[J]. 食品工业,1994(4):36-38
- [2] 邱国文. 豆沙饮料生产工艺[J]. 软饮料工业,1997(48):37-38
- [3] 陈振家,狄建兵,李玉娥. 不同乳化剂对红芸豆沙老化度影响的研究[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2011,31(5):451-455
- [4] 邓媛媛,濮绍京,刘正坪,等. 糖对红小豆豆馅品质的影响[J]. 中国农业科技导报,2011,13(3):78-84
- [5] 钟焕贵,陈中,林伟锋. 改性淀粉对月饼豆沙馅料品质影响的研究[J]. 现代食品科技,2009,25(10):1216-1219
- [6] 胡嘉鹏. 赤豆豆沙的加工与品质[J]. 食品工业科技,1984(1):32-36
- [7] 金文林,濮绍京,赵波,等. 红小豆种质资源子粒色泽及出沙率的遗传变异[J]. 华北农学报,2005,20(6):28-33
- [8] 金文林,濮绍京,赵波,等. 小豆种质资源群体百粒重及淀粉粒大小的遗传变异[J]. 华北农学报,2006,21(6):41-44
- [9] 郑卓杰. 中国食用豆类品种资源目录[M]. 北京:中国农业出版社,1987
- [10] 郑卓杰. 中国食用豆类品种资源目录[M]. 北京:农业出版社,1990
- [11] 胡家蓬,程须珍,王佩芝. 中国食用豆类品种资源目录[M]. 北京:中国农业出版社,1996
- [12] 王丽侠,程须珍,王素华. 小豆种质资源研究与利用概述[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(3):440-443
- [13] 武晓娟,薛文通,张惠. 不同品种红小豆的品质评价研究[J]. 中国粮油学报,2011(9):20-24
- [14] 武晓娟,薛文通,王小东,等. 豆沙质地特性的感官评定与仪器分析[J]. 食品科学,2011,32(9):87-90
- [15] 黄英,王小东,张波,等. 绿豆沙品质评价方法及原料适应性研究[J]. 食品科技,2012,37(2):93-97
- [16] 徐宁,程须珍,王素华,等. 以地理来源分组、利用表型数据构建中国小豆核心种质[J]. 作物学报,2008,34(8):1366-1373
- [17] 白鹏,程须珍,王丽侠,等. 小豆遗传差异、群体结构和连锁不平衡水平的 SSR 分析[J]. 作物学报,2014,40(5):788-797
- [18] 王丽侠,程须珍,王素华,等. 应用 SSR 标记对小豆种质资源的遗传多样性分析[J]. 作物学报,2009,35(10):1858-1865
- [19] 王丽侠,程须珍,王素华,等. 基于 SSR 标记的小豆种质资源遗传多样性分析[J]. 中国农业科学,2009,42(8):2661-2666
- [20] 王丽侠,程须珍,王素华,等. 我国小豆应用核心种质的生态适应性及评价利用[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(5):794-799
- [21] 刘振兴,程须珍,王丽侠,等. 天津和唐山小豆地方品种遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(5):679-685
- [22] 程须珍,王述民. 中国食用豆类品种志[M]. 北京:中国农业出版社,2009
- [23] 黄英,张波,武晓娟,等. 基于主成分分析的绿豆沙加工用品种筛选[J]. 食品科学,2012,33(13):104-107