

基于 Lab 颜色模式快速检测黑米中总花青素含量

张 珣^{1,2} 李胤均^{1,2} 丁 华^{1,2} 刘 姣^{1,2} 李妍依^{1,2} 桂夫豪^{1,2} 杨 洁^{1,2}

(1. 湖北省农科院农业质量标准与检测技术研究所, 湖北 武汉 430064;

2. 农产品营养品质与安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430064)

摘要: [目的] 建立一种快速检测黑米中花青素含量的方法。[方法] 利用智能手机“ColorMax”软件, 在特定条件下获取花青素标准溶液和黑米样品溶液的颜色参数, 建立了花青素颜色参数与其浓度之间的关系曲线, 并将该曲线应用于黑米样品的检测。[结果] 所建立方法的检测范围为 3.33~12.50 $\mu\text{mol/L}$, 标准曲线相关系数 $R^2 > 0.99$ 。利用该方法对 27 个黑米样品的花青素含量进行了检测, 并与 NY/T 2640—2014 标准方法进行了对比, 两种方法的回归分析相关系数 $R^2 > 0.84$ 。[结论] 该方法快速、高效且准确性较高, 适用于现场或家庭场景下的花青素筛查。

关键词: 黑米; 花青素; 快速检测; Lab 颜色模式; 智能手机

Rapid detection of total anthocyanin content in black rice based on Lab color modes

ZHANG Xun^{1,2} LI Yinjun^{1,2} DING Hua^{1,2} LIU Jiao^{1,2} LI Yanyi^{1,2} GUI Fuhao^{1,2} YANG Jie^{1,2}

(1. Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agro-Products, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan, Hubei 430064, China; 2. Hubei Key Laboratory of Nutritional Quality and Safety of Agro-Products, Wuhan, Hubei 430064, China)

Abstract: [Objective] To develop a method for the rapid detection of anthocyanin content in black rice. [Methods] This study adopts smartphone software "ColorMax" to obtain color parameters of anthocyanin standard solutions and black rice sample solutions in specific conditions. A relationship curve between color parameters of anthocyanin and its concentration is established and applied to the detection of black rice samples. [Results] The detection range of the proposed method is from 3.33 to 12.50 $\mu\text{mol/L}$, with the standard curve correlation coefficient (R^2) of more than 0.99. The proposed method is employed to detect the anthocyanin content in 27 black rice samples, and the results are compared with those obtained by utilizing the NY/T 2640—2014 standard method. Regression analysis on both methods has a correlation coefficient (R^2) of more than 0.84. [Conclusion] This method is rapid, efficient, and highly accurate, featuring applicability to on-site or household anthocyanin screening.

Keywords: black rice; anthocyanin; rapid detection; Lab color mode; smartphone

花青素属于多酚类黄酮化合物, 在自然界中鉴定出 6 000 多种, 常见的 6 种及其衍生物约占总数的 92%, 分别是飞燕草色素、矢车菊素、矮牵牛素、天竺葵素、芍药色素、锦葵色素^[1]。花青素作为天然抗氧化剂具有一定的营养保健和药理作用, 如抗氧化、抗炎、保护心血管、增强免疫力等作用。自然界中富含花青素的食物有黑米、黑枸

杞、紫玉米、紫薯、葡萄、蓝莓等^[2-3]。黑米作为一种功能性稻米, 具有降血糖、抗炎、抗过敏、减少肥胖和心脏病等发病率、改善消化系统, 甚至具有一定的抗衰老和延长寿命的功效^[4-5]。黑米中花青素的测定能帮助人们评估其营养价值, 为相关科学研究提供数据支持。

目前常用的总花青素检测方法按检测原理分主要

基金项目: 国家重点研发计划子课题 (编号: 2024YFF1105705); 湖北省农业科学院青年基金 (编号: 2025NKYJJ32)

通信作者: 杨洁 (1969—), 女, 湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所研究员。E-mail: yangjie1127@163.com

收稿日期: 2025-03-13 **改回日期:** 2026-01-16

引用格式: 张珣, 李胤均, 丁华, 等. 基于 Lab 颜色模式快速检测黑米中总花青素含量[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 68-74.

Citation: ZHANG Xun, LI Yinjun, DING Hua, et al. Rapid detection of total anthocyanin content in black rice based on Lab color modes [J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 68-74.

有:分光光度法、高效液相色谱法(HPLC)、液相色谱—质谱联用法(LC-MS)、pH 示差法^[6]。分光光度法简单、快速,适用于大规模样品的快速检测,刘长姣等^[7]以矢车菊为标准物质,建立标准曲线,测定黑米中花青素。该方法检测波长为 520 nm,检出限为 0.058 mg/L。液相色谱法是一种高精度的分析方法,可以准确测定花青素的不同种类和含量,如张念等^[8]使用 BEH C₁₈ 色谱柱,流动相 A 相为 1% 甲酸水溶液, B 相为 1% 甲酸乙腈,经梯度洗脱,检测波长 530 nm,以矢车菊-3-葡萄糖苷等 6 种常见标样,分析了葡萄、蓝莓、洋葱等 14 种植物源性花青素。液相色谱—质谱联用法是一种结合了液相色谱的分离能力和质谱的检测能力的分析方法,特别适用于复杂样品中花青素的鉴定和含量测定,如胡超琼^[9]利用高效液相色谱—串联质谱检测了茶叶中 6 种花青素类物质含量,该方法在 25~2 500 $\mu\text{g/L}$ 范围内线性关系良好,相关系数均大于 0.99。pH 示差法是一种利用分光光度计来测定花青素含量的方法,该方法操作简便,但准确性受到其他颜色成分的干扰,如易渡等^[2]用 pH 示差法测定多种植物中的总花青素含量。

色彩模式是计算机图形学和数字图像处理中用来描述和表示颜色的方法。不同的色彩模式适用于不同的应用场景,常见的适合数据分析色彩模式有 RGB 模式和 Lab 模式两种。RGB 模式包含光的三原色:红色(red)、绿色(green)、蓝色(blue),即 R、G、B 3 个通道,通过调整这 3 种颜色的光线混合比例来生成各种颜色,3 种颜色的值介于 0 与 255 之间,三者均为 0(最弱)时为黑色,均为 255(最强)时为白色,3 种颜色可以任意组合。毛月英^[10]利用高锰酸钾溶液浓度与颜色 RGB 值之间的数学模型,建立图像比色测定高锰酸钾含量的方法,其测定结果与分光光度法结果高度一致。Lab 模式是一种与设备无关的色彩模式,它同样通过 3 个通道来描述颜色:L 通道代表亮度,其值(0~100)的变化不影响颜色;a 通道代表颜色信息绿色—中性灰—红色,其值为-120~120;b 通道代表颜色信息蓝色—中性灰—黄色,其值为-120~120。Lab 模式可以包含 RGB 模式中所有的颜色,弥补了 RGB 色彩模式的不足。李郎等^[11]研究了不同美国枫叶的 L、a、b 值与叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、花青素含量变化的关系,通过回归分析确定了枫叶的色彩参数与色素含量关系的呈色模型。

研究拟以花青素在酸性缓冲溶液中颜色深浅随浓度的变化而变化的特性^[12-13]为基础,通过智能手机收集样品溶液在特定 pH 下颜色数据,建立颜色参数与样品中花青素浓度相关模型,以期仅通过样品在特定 pH 条件下的图像测得其花青素浓度,为花青素的快速检测提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

27 个黑米样品:市售。

1.2 试验试剂

飞燕草色素(CAS: 528-53-0, 纯度 $\geq 97.0\%$)、矢车菊素(CAS: 528-58-5, 纯度 $\geq 96.0\%$)、矮牵牛素(CAS: 1429-30-7, 纯度 $\geq 95.0\%$)、天竺葵素(CAS: 134-04-3, 纯度 $\geq 97.0\%$)、芍药色素(CAS: 134-01-0, 纯度 $\geq 97.0\%$)和锦葵色素(CAS: 643-84-5, 纯度 $\geq 97.0\%$) 6 种标准品: 法国 Extrasynthese 公司;

盐酸:优级纯,国药集团化学试剂有限公司;

柠檬酸、氢氧化钠、乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

乙腈、甲酸、无水乙醇:色谱纯,上海甄准生物科技有限公司。

1.3 试验仪器

超高效液相色谱仪:ACQUITY UPLC H-CLASS 型,沃特世科技有限公司;

电子天平:MS205DU/A 型,梅特勒—托利多科技有限公司;

离心机:TDL-40B 型,上海安亭科学仪器厂;

高速台式离心机:TGL-18C-C 型,上海安亭科学仪器厂;

超声波清洗器:KQ-250B 型,昆山市超声仪器有限公司;

分析研磨机:A11 basic 型,艾卡仪器设备有限公司;

旋涡混合器:MS1 型,艾卡仪器设备有限公司;

智能手机:iPhone SE2 型,美国苹果公司。

1.4 试验方法

1.4.1 缓冲液配制

(1) 花青素提取液配制:取 200 mL 无水乙醇、100 mL 水和 100 mL 盐酸混匀。

(2) 盐酸—柠檬酸:先配制 0.5 mol/L 的柠檬酸溶液,加入盐酸调至 pH 1.0。

1.4.2 数据采集 如图 1 所示,在日光灯照射下,以白色 A4 纸为底,使用智能手机拍摄图片,将显色照片上传至颜色处理软件“ColorMax”,在 RGB、Lab 两种模式下采集图

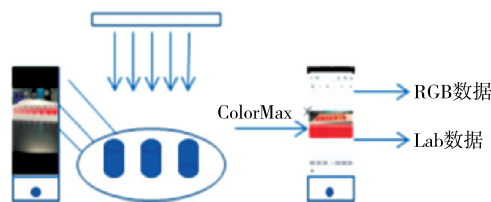


图 1 数据采集图示

Figure 1 Data acquisition

片数据。

1.4.3 数据处理 在“ColorMax”软件上选择 RGB 模式，然后在每个样品图片上选择 3 个点的平均值作为样品的 R、G、B 值，同理在软件上选择 Lab 模式，得到样品的 L 、 a 、 b 值。

1.4.4 方法的建立

(1) 数据采集：分别称取矢车菊素和芍药素标准物质 3.23, 3.37 mg，用盐酸—柠檬酸(pH 1.0)缓冲液溶解并定容至 10 mL 制成储备液，然后将储备液稀释 10 倍制成浓度为 1.0×10^{-4} mol/L 的工作液。将工作液继续用缓冲液(1.4.1)分别稀释至 2.50, 3.33, 4.00, 5.00, 6.67, 10.00, 12.50 $\mu\text{mol/L}$ 且总体积为 5 mL，采集图片在 RGB 模式和 Lab 模式下 R、G、B、L、a、b 通道值。

(2) 标准物质选择：利用 SPSS 比较矢车菊和芍药素在 RGB 模式和 Lab 模式下的 6 组数据差异，同时考虑两种花青素在黑米中的占比，选择其中一种进行后续研究。

(3) 标准曲线建立：以所选择的标准物质 6 个通道值为横坐标，以标准物质浓度($\mu\text{mol/L}$)为纵坐标建立 6 组标准曲线。

1.4.5 样品检测

(1) 花青素的提取：黑米样品用粉碎机粉碎过 40 目筛，放入干燥器中避光保存备用。准确称取 1.0 g 上述样品，放入到 50 mL 具塞比色管中，加入花青素提取液(1.4.1)定容至刻度，摇匀，常温超声提取 30 min，补充提取液至刻度，离心过滤后待测。

(2) Lab 模式或 RGB 模式检测：取 1 mL 待测样于

10 mL 离心管内，加入相应的缓冲液(1.4.1)和少量氢氧化钠溶液调节 pH，使得总体积为 5 mL。将离心管并排横放在白色 A4 纸上拍照，采集通道数据，根据之前建立的 6 种“通道—浓度”关系曲线计算样品花青素浓度。

(3) 高效液相色谱检测：按 NY/T 2640—2014《植物源性食品中花青素的测定 高效液相色谱法》执行。

1.4.6 结果比较分析 将颜色分析得到的花青素结果与高效液相色谱法的检测结果进行比较分析，选定最佳的色彩分析模型，并评价其准确性。

2 结果与分析

2.1 方法建立

2.1.1 标准物质选择 查阅文献[14—15]，黑米中的花青素主要是芍药素和矢车菊两种。表 1 和表 2 分别为芍药素和矢车菊在 7 个浓度下的 R、G、B 通道值，经过差异显著性分析，其莱文方差等同性检验显著性分别为 0.576, 0.709, 0.853，表明样本方差一致，满足方差齐性，平均值同性 t 检验 sig.(双尾)分别为 0.695, 0.576, 0.705 ($P > 0.05$)，表明芍药素与矢车菊在 7 个浓度下的 R、G、B 值无显著差异。同理，芍药素与矢车菊在 7 个浓度下的 L、a、b 通道值，莱文方差等同性检验显著性分别为 0.535, 0.622, 0.827，表明样本方差一致，满足方差齐性，平均值同性 t 检验 sig.(双尾)分别为 0.736, 0.846, 0.987 ($P > 0.05$)，表明芍药素与矢车菊在 7 个浓度下的 L、a、b 通道值也无显著差异。因此，在不区分花青素种类的前提下，选择芍药素和矢车菊中的一种建立模型即可。由于黑米中矢车菊的含量高于芍药素^[16]，故选择矢车菊标准物质建立模型。

表 1 不同浓度下两种标准物质 RGB 通道值

Table 1 RGB channel values of two standard substances at different concentrations

花青素浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	矢车菊			芍药素		
	R 通道	G 通道	B 通道	R 通道	G 通道	B 通道
2.50	245.0±0.0	154.7±0.6	152.7±0.6	248.0±1.0	159.7±1.5	157.7±0.6
3.33	253.0±1.0	140.3±0.6	147.7±0.6	253.7±1.2	147.3±0.6	150.3±0.6
4.00	254.0±1.7	135.7±0.6	141.7±0.6	254.7±0.6	145.0±1.0	145.0±1.0
5.00	253.7±0.6	122.3±0.6	130.7±0.6	254.7±0.6	131.0±1.0	136.0±1.7
6.67	253.7±0.6	114.7±0.6	115.7±0.6	254.3±0.6	115.3±0.6	120.7±0.6
10.00	254.7±0.6	90.7±0.6	95.7±0.6	255.3±0.6	90.3±0.6	93.0±1.0
12.50	250.0±0.6	73.3±1.2	72.0±1.0	248.7±0.6	75.0±1.0	75.3±0.6

2.1.2 标准曲线建立 以矢车菊浓度—通道数据制作标准曲线如表 3 所示，由于 R 通道值在不同浓度下无明显变化，故无法建立标准曲线。在制作标准曲线的过程中，当花青素浓度为 2.50 $\mu\text{mol/L}$ 时，对拟合曲线相关系数有较大影响，故舍去该点。5 条标准曲线数据采集的点位完全一样，检测范围均为 3.33~12.50 $\mu\text{mol/L}$ 。从灵敏度看，L、

a、b 通道曲线斜率较大；从截距上看，b 通道最小；从相关系数看，a 通道最优，3 种曲线各有特点。综合分析标准曲线数据指标，选择 a 通道曲线作为最优曲线。a 通道反映样品颜色由绿转为红的程度，花青素浓度与样品的红色程度相关。a 通道一阶标准曲线虽满足 $R^2 \geq 0.99$ 的要求，考虑到曲线相关性对检测结果的影响也建立了相对应的

表 2 不同浓度下两种标准物质 Lab 通道值

Table 2 Lab channel values of two standard substances at different concentrations

花青素浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	矢车菊			芍药素		
	L 通道	a 通道	b 通道	L 通道	a 通道	b 通道
2.50	72.7 ± 1.5	33.7 ± 0.6	15.7 ± 0.6	75.0 ± 1.0	32.7 ± 0.6	16.0 ± 1.0
3.33	71.3 ± 0.6	44.0 ± 1.0	16.0 ± 0.0	73.3 ± 0.6	41.3 ± 0.6	17.7 ± 0.6
4.00	71.0 ± 1.0	46.7 ± 0.6	17.7 ± 0.6	71.7 ± 0.6	43.0 ± 0.0	18.7 ± 0.6
5.00	68.0 ± 0.0	50.0 ± 1.0	21.3 ± 0.6	70.3 ± 0.6	46.7 ± 0.6	20.0 ± 0.0
6.67	66.3 ± 1.5	53.7 ± 1.5	27.0 ± 1.0	65.7 ± 0.6	54.7 ± 1.5	25.0 ± 1.0
10.00	61.7 ± 0.6	61.7 ± 0.6	33.3 ± 1.2	62.0 ± 1.0	63.7 ± 1.5	35.0 ± 0.0
12.50	58.7 ± 0.6	67.0 ± 1.0	42.3 ± 0.6	59.0 ± 1.0	66.0 ± 0.0	40.3 ± 1.5

表 3 不同通道的标准曲线†

Table 3 Standard curves of different channels

通道	一阶标准曲线		二阶标准曲线	
	线性方程	相关系数 R^2	曲线方程	相关系数 R^2
R	/	/	/	/
G	$Y=-0.139\ 6X+22.687\ 1$	0.991	$Y=0.000\ 4X^2-0.229\ 9X+27.289\ 3$	0.994
B	$Y=-0.124X+21.486\ 7$	0.993	$Y=0.000\ 1X^2-0.156X+23.145\ 2$	0.993
L	$Y=-0.738\ 6X+55.785\ 3$	0.985	$Y=0.021\ 1X^2-3.499\ 4X+145.477\ 8$	0.994
a	$Y=0.405X-14.954\ 7$	0.992	$Y=0.005\ 5X^2-0.212\ 5X+1.840\ 2$	0.999
b	$Y=0.362\ 7X-2.572\ 8$	0.989	$Y=0.000\ 01X^2+0.362X-2.564$	0.989

† R 通道虽代表红色的变化,但其数值并未表现出与花青素浓度的相关性。

二阶标准曲线,但标准曲线的选择应结合后续样品实际检测的情况。

2.2 样品测定

2.2.1 Lab 模式检测结果 27 个样品按照 Lab 模式检测方法处理后,得到图 2 所示的结果。从图 2 可以看出,在酸性环境下,不同样品由于花青素含量不同呈现出不同的红色,使用智能手机“ColorMax”软件采集图 2 中 a 通道的数据,代入一阶和二阶标准曲线,得到表 4 的花青素数据。

表 4 中的数据经过 t 检验 ($t=0.717>0.05$) 发现差异

不显著,两组数据相关系数 $R^2=0.996$,说明两组数据大致相同,但也有细微差异。一阶标准曲线测定总花青素含量平均值为 $1.93\ \mu\text{mol/g}$,最大标准差 $0.17\ \mu\text{mol/g}$ 。二阶标准曲线测定总花青素含量平均值为 $1.82\ \mu\text{mol/g}$,最大标准差 $0.20\ \mu\text{mol/g}$ 。一阶标准曲线检测结果偏高,当检测值比较大时标准差会较低。在实际检测中,两种曲线最大的差别在于低浓度的样品检测,从图 2 中可以看到 BR26 样品有明显的淡红色,如利用一阶标准曲线检测结果为 $-0.40\ \mu\text{mol/g}$,二阶标准曲线检测结果为 $0.20\ \mu\text{mol/g}$,显然二阶标准曲线结果更加合理(表明二阶标准曲线可



图 2 样品显色处理

Figure 2 Sample color rendering processing

表 4 A 通道一阶标准曲线测定结果[†]

Table 4 Standard curve determination for channel A (first-order)

样品 编号	花青素含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)		样品 编号	花青素含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)		样品 编号	花青素含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	
	一阶标准曲线	二阶标准曲线		一阶标准曲线	二阶标准曲线		一阶标准曲线	二阶标准曲线
BR1	2.13 ± 0.11	2.00 ± 0.11	BR10	2.27 ± 0.06	2.15 ± 0.06	BR19	2.57 ± 0.06	2.49 ± 0.07
BR2	/	/	BR11	1.60 ± 0.06	1.48 ± 0.05	BR20	2.67 ± 0.06	2.61 ± 0.07
BR3	1.96 ± 0.12	1.83 ± 0.12	BR12	1.73 ± 0.00	1.60 ± 0.00	BR21	2.17 ± 0.06	2.04 ± 0.06
BR4	/	/	BR13	1.60 ± 0.06	1.48 ± 0.05	BR22	1.70 ± 0.06	1.57 ± 0.05
BR5	/	/	BR14	1.76 ± 0.06	1.63 ± 0.06	BR23	1.09 ± 0.06	1.05 ± 0.05
BR6	2.44 ± 0.17	2.34 ± 0.20	BR15	2.61 ± 0.05	2.53 ± 0.07	BR24	1.60 ± 0.06	1.48 ± 0.05
BR7	2.10 ± 0.06	1.97 ± 0.06	BR16	2.54 ± 0.10	2.45 ± 0.12	BR25	1.43 ± 0.00	1.33 ± 0.00
BR8	2.13 ± 0.11	2.00 ± 0.11	BR17	1.63 ± 0.00	1.51 ± 0.00	BR26	/	/
BR9	1.22 ± 0.10	1.16 ± 0.08	BR18	1.70 ± 0.06	1.57 ± 0.05	BR27	1.66 ± 0.06	1.54 ± 0.05

以适当向下延长)。故一阶标准曲线简单直观,在浓度较高时计算结果与二阶标准曲线差异小,但其检测限要高于二阶标准曲线。

2.2.2 高效液相色谱法测定结果 图 3 是典型的黑米样品液相色谱图,在 27 份黑米样品中只检测出矢车菊(Cy)和芍药素(Pn),这与谭亮等^[15]的结论相符,验明了只研究矢车菊与芍药素的合理性。从图 3 可以看出,NY/T 2640—2014 检测条件下,液相分析需要 15 min,两种花青素分离效果良好。

黑米样品花青素用高效液相色谱检测结果如表 5 所示,液相法有着更低的检出限,可以检测出 BR2、BR4、BR5、BR26 的花青素含量。为了方便与 Lab 模式测定结果比较,将数据单位进行了统一并计算总花青素含量。在 27 份黑米花青素液相检测结果中,所有样品的矢车菊素含量均高于芍药素,且矢车菊素含量是芍药素的 3~10 倍,进一步证实矢车菊素是该体系中的主要成分。

2.3 结果的比较分析

为了验证 Lab 模式检测黑米中总花青素的可靠性,分

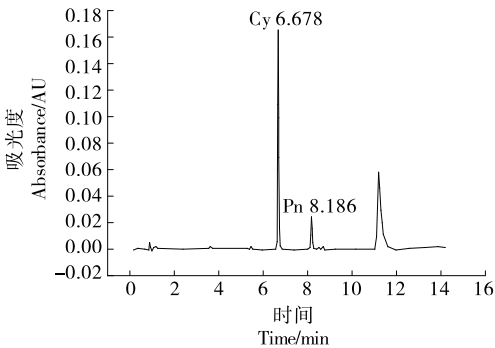


图 3 黑米样品的液相图谱

Figure 3 Liquid chromatogram of black rice samples

别将其一阶曲线、二阶曲线检测结果同高效液相色谱法检测结果进行差异显著性分析。结果表明:一阶曲线检测样品结果与高效液相色谱法检测结果差异不显著($P=0.416>0.05$);二阶曲线与高效液相色谱法同样差异不显著($P=0.678>0.05$)。以高效液相法检测结果为纵坐标,Lab 模式一阶或二阶曲线检测结果为横坐标作图进行结

表 5 液相测定结果

Table 5 Liquid phase determination results

样品编号	花青素含量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	样品编号	花青素含量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	样品编号	花青素含量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)
BR1	1.78 ± 0.00	BR10	2.56 ± 0.47	BR19	2.14 ± 0.04
BR2	0.02 ± 0.00	BR11	1.77 ± 0.01	BR20	2.61 ± 0.06
BR3	1.96 ± 0.02	BR12	1.40 ± 0.01	BR21	1.91 ± 0.04
BR4	0.10 ± 0.00	BR13	1.69 ± 0.01	BR22	1.16 ± 0.01
BR5	0.02 ± 0.00	BR14	1.84 ± 0.01	BR23	0.72 ± 0.01
BR6	1.80 ± 0.03	BR15	3.27 ± 0.04	BR24	1.03 ± 0.02
BR7	1.61 ± 0.01	BR16	2.40 ± 0.03	BR25	0.91 ± 0.01
BR8	2.19 ± 0.01	BR17	1.21 ± 0.01	BR26	0.09 ± 0.00
BR9	0.71 ± 0.00	BR18	0.85 ± 0.01	BR27	1.56 ± 0.01

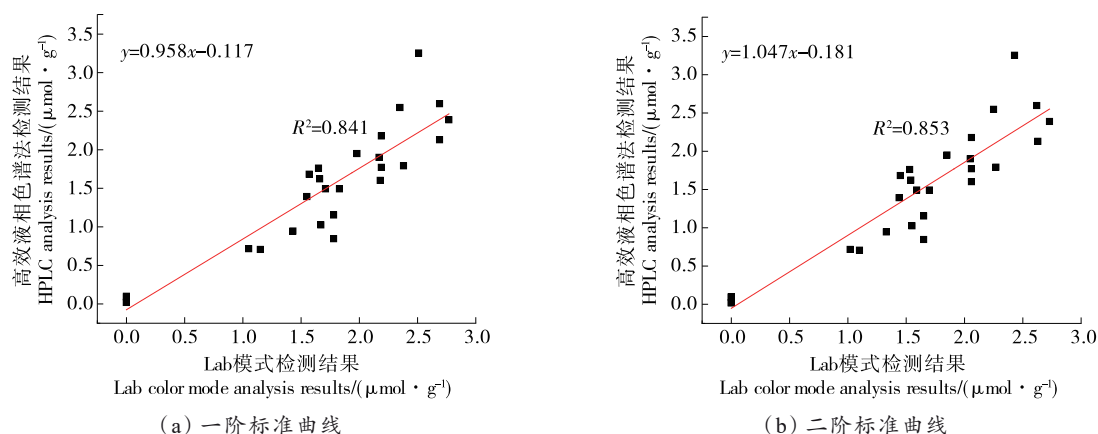


图4 Lab模式—高效液相色谱法结果拟合

Figure 4 Fitting results of Lab mode-high performance liquid chromatography

果相关性分析,如图4所示,两种方法检测结果有着良好的一致性(斜率 $b \approx 1.0$ 且相关性 $R^2 > 0.84$)。黑米花青素含量在 $1.60 \mu\text{mol/g}$ 以下时,Lab模式结果往往高于高效液相色谱法检测结果,在黑米花青素含量高于 $2.00 \mu\text{mol/g}$ 后,则无明显规律,分析原因可能是:黑米中有其他成分,当花青素浓度低时溶液红色较浅,杂质对结果影响较大,当花青素浓度较高时溶液颜色深,对检测数值影响小。综上所述,Lab颜色模式可应用于黑米花青素的检测,无论是一阶曲线还是二阶曲线检测结果与液相法检测结果在统计学上均无显著差异,当花青素浓度较高时可选择一阶曲线,更为简单便捷,当花青素浓度较低时($< 3.33 \mu\text{mol/L}$ 应选择二阶曲线),有更低的检测限(标曲加入 $2.25 \mu\text{mol/L}$ 浓度点后仍然有拟合相关性 $R^2 > 0.99$)。

3 结论

该研究基于智能手机图像Lab颜色模式,建立了一种快速、低成本的黑米花青素检测方法。通过与液相法的对比验证,该方法检测结果与标准方法基本一致($R^2 > 0.84$),且操作简便,无须依赖专业设备,适用于现场或家庭场景下的花青素筛查。

该方法得益于Lab模式中 a 值与分光光度法 530 nm 检测吸收波长的互补色原理,与已有研究中RGB值替代吸光度的思路一致,进一步证实了色彩数字化在定量分析中的潜力。然而,方法的普适性仍需进一步优化:①不同花青素种类的适应性。如葡萄皮中的锦葵素与黑米矢车菊素显色差异,需建立针对性校准模型。②设备标准化。通过统一拍摄参数(如光源、距离)减少不同手机成像的偏差。③技术集成。未来可开发专用软件,结合多颜色参数(如Lab/RGB)实现多类型花青素的快速检测。

参考文献

- [1] 牛钰, 李晶, 王俊文, 等. 高等植物花青素生物合成、调控、生物活性及其检测的研究进展[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 978-996.
NIU Y, LI J, WANG J W, et al. Research progress of anthocyanin biosynthesis, regulation, bioactivity and detection in higher plants[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36 (4): 978-996.
- [2] 易渡, 李凡, 李锦晶, 等. pH示差法和高效液相色谱法测定多种富含花青素植物中总花青苷含量的对比研究[J]. 中国食品工业, 2024(4): 68-71.
YI D, LI F, LI J J, et al. A comparative study on the determination of total anthocyanin content in anthocyanin-rich plants using the pH differential method and high-performance liquid chromatography[J]. China Food Industry, 2024(4): 68-71.
- [3] PENG B, HE J H, ZHANG R W. Extraction and comparison of anthocyanin content in seeds of different black rice varieties using water bath solution extraction method[J]. Journal of Biotechnology Research, 2024, 10(1): 1-8.
- [4] 赵明超. 黑米花青素生物合成分子机制研究及其营养价值评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021: 2.
ZHAO M C. Study on molecular mechanisms of anthocyanin biosynthesis in black rice and its nutritional value evaluation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021: 2.
- [5] 贺方清. 基于挤压膨化联合固态发酵的黑米制品开发与应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2024: 3.
HE F Q. Development and application of black rice products based on extrusion combined with solid-state fermentation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024: 3.
- [6] 聂静雯, 余静, 郑欣, 等. 植源性农产品中花青素含量的测定[J]. 农产品质量与安全, 2024(2): 31-35.
NIE J W, YU J, ZHENG X, et al. Determination of anthocyanin content in plant-based agricultural products[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2024(2): 31-35.

- [7] 刘长姣, 郑霞, 熊湘炜, 等. 分光光度法测定黑米花青素方法的建立[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(1): 73-77.
- LIU C J, ZHENG X, XIONG X W, et al. Detection of anthocyanin in black rice by spectrophotometry[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(1): 73-77.
- [8] 张念, 彭怡霖, 陈细羽, 等. 超高效液相色谱法检测植物源性食品中花青素[J]. 分析科学学报, 2022, 38(1): 17-23.
- ZHANG N, PENG Y L, CHEN X Y, et al. Determination of anthocyanins in plant origin products by ultra-high performance liquid chromatography[J]. Journal of Analytical Science, 2022, 38(1): 17-23.
- [9] 胡超琼. 川茶中儿茶素、茶黄素、花青素检测方法的建立及判别标志物的筛选[D]. 成都: 西华大学, 2023: 51-53.
- HU C Q. Establishment of detection methods for catechins, theaflavins and anthocyanins in Sichuan tea and screening of discriminatory markers[D]. Chengdu: Xihua University, 2023: 51-53.
- [10] 毛月英. RGB 模式快速图像比色法测定高锰酸钾[J]. 化学分析计量, 2024, 33(2): 67-71.
- MAO Y Y. Determination of potassium permanganate by rapid image colorimetric based on RGB mode[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2024, 33(2): 67-71.
- [11] 李邯, 周家奇, 刘艳芬, 等. 基于 Lab 特征值的美国红枫叶片呈色模式分析[J/OL]. 分子植物育种. (2024-12-04) [2025-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20241204.1023.002.html>.
- LI H, ZHOU J Q, LIU Y F, et al. Analysis of color pattern of acer rubrum l leaf based on lab eigenvalues[J/OL]. Molecular Plant Breeding. (2024-12-04) [2025-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20241204.1023.002.html>.
- [12] CHOI I, LEE J Y, LACROIX M, et al. Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 122-128.
- [13] ZENG F S, YE Y Q, LIU J N, et al. Intelligent pH indicator composite film based on pectin/chitosan incorporated with black rice anthocyanins for meat freshness monitoring[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100531.
- [14] 丁华, 喻小兵, 王婧, 等. 植物源性农产品中花青素含量的研究[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(S1): 187-190.
- DING H, YU X B, WANG J, et al. Study on the determination of anthocyanin contents in plant origin agricultural products[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(S1): 187-190.
- [15] 谭亮, 李玉林, 杲秀珍, 等. 改进 pH 示差法检测不同植物源性食品中花青素的方法[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21): 276-285.
- TAN L, LI Y L, GAO X Z, et al. Determination of anthocyanidins in different plant origin foods by improved pH differential method[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(21): 276-285.
- [16] 王蕾, 孙汉巨, 刘淑芸, 等. 黑米花青素对食源性肥胖小鼠脂代谢紊乱及肠道菌群的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 1-10.
- WANG L, SUN H J, LIU S Y, et al. Effect of black rice anthocyanins on lipid metabolism disorders and intestinal flora in food-derived obese mice[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 1-10.