

# 不同品种紫玉米籽粒花青素与主要营养成分的动态比较

于文博, 汪正鑫, 吴贻波, 孙未伟, 宋有洪\*

(安徽农业大学农学院, 合肥 230036)

**摘要:** 选取3种不同基因型紫玉米品种即水果黑糯、黑甜糯631和晋糯20为试验材料, 比较了不同品种间灌浆期籽粒种皮颜色变化以及种皮颜色(R、G、B值)与花青素含量的相关性, 并分析了灌浆期籽粒花青素和主要营养成分的动态积累。结果表明: 籽粒RGB值与花青素含量呈显著负相关( $P < 0.05$ ); 随着籽粒的发育, 花青素、可溶性总糖和蔗糖含量呈动态变化, 变化趋势均为先上升后下降。可溶性总糖和蔗糖含量均在授粉后13 d达到最大值; 花青素含量在授粉后25 d达到最大值; 可溶性蛋白含量呈下降趋势, 支链淀粉和直链淀粉含量呈增加趋势。花青素含量与可溶性总糖、蔗糖和可溶性蛋白极显著负相关( $P < 0.05$ ), 与淀粉含量极显著正相关( $P < 0.05$ )。上述结果3个品种表现一致。由此可见, RGB值可作为快速检测花青素含量的指标, 另外, 授粉后21~25 d可作为紫玉米最佳采收期。

**关键词:** 紫玉米粒; 种皮颜色; 花青素; 营养成分; 采收期

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2022)06-0861-06

## Dynamic comparison of anthocyanins and main nutrients in different varieties of purple corn

YU Wenbo, WANG Zhengxin, WU Yibo, SUN Weiwei, SONG Youhong

(School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** In this study, three different genotypes of purple corn (*Zea mays* L.) including FHN, HN631 and JN20 were used to study the changes in seed coat color and the correlation between seed coat color (R, G and B values) and anthocyanin content among different varieties during grain filling period. The dynamic accumulation of anthocyanins and main nutrients in grains at grain filling stage was analyzed. The results showed that there was a significant negative correlation between RGB value and anthocyanin content ( $P < 0.05$ ) in all the three varieties. Along with the grain development, the dynamic curves of anthocyanin, total soluble sugar and sucrose contents were similar, both increasing and then decreasing gradually. The contents of the total soluble sugar and sucrose reached the maximum at the 13<sup>th</sup> day after pollination, while the anthocyanin content of grains reached the maximum at the 25<sup>th</sup> day after pollination. The soluble protein content showed a decreasing trend, while amylopectin and amylose contents showed an increasing trend. The anthocyanin content was negatively correlated with the total soluble sugar, sucrose and soluble protein contents ( $P < 0.05$ ), while it was positively correlated with the starch content ( $P < 0.05$ ). In conclusion, RGB value can be used as an effective indicator for detecting anthocyanin content, 21-25 days after pollination can be used as the optimum harvest time of purple corn.

**Key words:** purple corn seed; coat color; anthocyanin; nutrient content; harvest time

紫玉米也被称为黑玉米, 原产自南美洲山区, 是玉米家族的一个类型, 黑紫籽粒为其主要特征, 我国东北、华北、华南地区均有种植。紫玉米不仅可以满足人们对于食物口味<sup>[1]</sup>的要求而且含有较高的营养成分, 且研究表明籽粒的颜色与其营养价值

呈正相关<sup>[2]</sup>。张效梅等<sup>[3]</sup>的研究发现紫玉米所含的蛋白质、脂肪、淀粉、纤维素及矿物质元素等含量均高于普通玉米, 其所含的氨基酸也显著高于普通玉米。此外, 紫玉米还含有其他玉米几乎没有的花青素, 其提高了紫玉米的研究价值。

收稿日期: 2022-03-18

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFD0301307)资助。

作者简介: 于文博, 硕士研究生。E-mail: zlz2821096@163.com

\* 通信作者: 宋有洪, 教授, 博士生导师。E-mail: uqysong@163.com

花青素属于类黄酮化合物,是植物体内重要的水溶性天然色素,可提高植物抗氧化能力和增强植物抗逆性<sup>[4]</sup>,对于人体具有抗氧化、延缓衰老、抑制肿瘤、预防心脑血管疾病和保护肝脏明目等多种生理功能<sup>[5]</sup>。由于花青素较高的经济价值使其含量高、快速的鉴别成为当下花青素领域的研究热点。现阶段国内已有利用自制智能手机光谱仪测量紫薯花青素的方法,同时薛其勤等<sup>[6]</sup>也利用 RGB 值量化了花生种皮颜色与种皮花青素含量之间的关系并建立了相关模型。但目前对于快速、高通量鉴别紫玉米籽粒花青素含量方法的研究较少,这很大程度上阻碍了我国紫玉米产业的进一步发展。

紫玉米籽粒中不仅含有大量的花青素,还含有糖类、蛋白质、淀粉等营养成分。有研究表明在不同的玉米品种间,籽粒灌浆期营养成分的积累差异显著。如特用玉米中的甜玉米和糯玉米与普通玉米相比在可溶性总糖和蔗糖含量方面二者均先上升后下降,出现峰值的时间分别在灌浆前期和灌浆中期;在蛋白质含量方面特用玉米蛋白质含量变化幅度小于普通玉米;在淀粉含量方面也存在明显差异,特用玉米淀粉含量不断上升,普通玉米淀粉含量先升后降。这些营养成分变化趋势的不同,造成不同玉米品种间营养成分含量不同,而营养成分含量的高低不仅会对玉米的营养品质产生影响,同时还会对食用品质产生重要影响<sup>[7-9]</sup>。目前我国已有许多关于玉米灌浆期营养成分动态变化的报道,但对紫玉米的研究大多集中在花青素含量的变化上,综合花青素含量和营养成分动态变化,确定紫玉米最佳收获期的研究较少,而且同一品种采收过早或过迟都会造口感和品质的显著差异,所以选择适宜的采收期是保证紫玉米食用品质的重要因素<sup>[10]</sup>。

因此,本研究以 3 个紫玉米品种(水果黑糯、黑甜糯 631 和晋糯 20)为材料,在灌浆期对种皮颜色、籽粒花青素和营养成分进行动态监测,分析种皮 RGB 值与籽粒花青素含量的相关性,明确花青素与其他营养成分的动态变化规律,以期在紫玉米籽粒花青素含量和营养成分较高的前提下,确定合理收获期,为紫玉米种植及收获提供理论参考和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料种植和取样

试验选用品种为水果黑糯、黑甜糯 631 和晋糯 20,于 2021 年 6 月 24 日播种在安徽农业大学高新技术农业园种植(117°27'E, 31°85'N)。每亩 3 500 株进行人工点播,每穴 2 粒,三叶期间补苗,每个

品种 3 次重复,进行随机区组试验。施肥采取尿素、过磷酸钙和硫酸钾混合后施用,纯 N 施用量为 187.5 kg·hm<sup>-2</sup>,基追比 5:5,拔节期追肥,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60.0 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 75.0 kg·hm<sup>-2</sup>。其他田间管理参照常规大田栽培技术措施实施。从授粉后第 9 天开始,每隔 4 d 取样直至授粉后 33 d。每个小区 3 次重复,取鲜样测定表型后烘干至恒重,取烘干后的籽粒样品放入粉碎机种进行粉碎,粉碎后的籽粒样品过 100 目筛,置于 -20 °C 冰箱保存,用于花青素含量与营养成分测定。

### 1.2 方法

**1.2.1 RGB 值测量** 取紫玉米籽粒置于红色底板,使用统一照度为 500 Lx 灯光进行照射,像素为 1 200 万摄像机拍摄可见光图像,传输至计算机。利用 Adobe Photoshop 2020 软件(<https://www.adobe.com/products/photoshop.html>)通过调整明度减弱光照的影响,从而完成图像预处理操作。参考张毅等<sup>[11]</sup>对有色大麦种子种皮颜色的分析,对预处理样本图像通过颜色分析方法提取紫玉米籽粒种皮 RGB 值。

**1.2.2 花青素含量的测定** 参考赵霞等<sup>[12]</sup>的方法,采用乙醇与 HCl 的混合液提取花青素,方法如下:取 0.2 g 过筛样品,加入 25 mL 乙醇-HCl 混合液(95%乙醇与 1.5 mol·L<sup>-1</sup> HCl 体积比为 85:15),80 °C 水浴浸取 30 min,冷却后用分光光度计测定浸取液 OD<sub>535</sub> 值,重复 3 次,以 OD<sub>535</sub>=1 时的色素浓度为一个花青素单位,用每 1 g 样品中所含的花青素单位(U)表示花青素含量。

**1.2.3 糖含量的测定** 参考孙海燕等<sup>[13]</sup>的方法,可溶性糖和蔗糖含量采用蒽酮-硫酸法。

**1.2.4 可溶性蛋白含量的测定** 参考刘啸笑等<sup>[14]</sup>的方法,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定。

**1.2.5 淀粉含量的测定** 支链淀粉与直链淀粉含量采用双波长法测定<sup>[15]</sup>。

**1.2.6 数据分析** 采用 Excel 2010 软件进行数据处理,并计算数据的平均值、标准差以及图表制作;用 SPSS 22.0 软件进行统计分析;采用 LSD 法( $P < 0.05$ )进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫玉米籽粒花青素的积累变化

随着灌浆进程推进,可以看出 3 种紫玉米的籽粒花青素含量变化趋势一致,总体上呈现为先上升后下降的变化趋势,花青素增加的速率为先缓后快(图 1)。通过测定 3 种紫玉米的籽粒花青素,发现其含量在授粉后 25 d 达到最大值,此时晋糯 20 比

水果黑糯和黑甜糯 631 的花青素含量分别高 26.54% 和 36.56%。不同紫玉米品种的花青素含量变化在授粉后趋势不一致, 在授粉后 9~17 d, 晋糯 20 和黑甜糯 631 花青素含量无显著差异, 二者花青素含量均大于水果黑糯; 在授粉后 17~25 d, 晋糯 20 花青素含量最高, 增速最快, 黑甜糯 631 的花青素含量最低, 增速最慢; 在花青素含量下降期, 晋糯 20 的花青素含量下降幅度最大, 水果黑糯次之, 黑甜糯 631 下降的幅度最小。

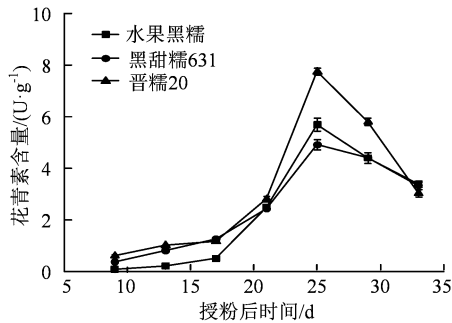


图 1 灌浆期籽粒花青素积累变化

Figure 1 Variation of anthocyanin accumulation in grains at grain filling stage



图 2 不同时期紫玉米种皮颜色变化

Figure 2 Variation of seed coat color of purple corn in different periods

## 2.2 紫玉籽粒种皮颜色与花青素含量相关性

由图 2 可以看出, 随着灌浆进程推进, 紫玉米中部开始出现有色籽粒, 花青素持续积累扩散到顶部与底部, 紫玉米籽粒种皮颜色由白色变为黑紫色, 最后变为酒红色。RGB 值与颜色深浅程度有关, 利用 RGB 值量化紫玉米种皮颜色变化, 发现紫玉米籽粒 RGB 值随籽粒颜色变化先减后增, RGB 值越

低, 紫玉米籽粒颜色越深。由紫玉米籽粒花青素含量与种皮颜色相关性分析结果 (表 1) 可知, 紫玉米籽粒花青素含量与种皮颜色 RGB 值呈显著负相关, R、G、B 值与花青素含量的相关系数分别为 -0.857、-0.726 和 -0.858, 说明紫玉米籽粒花青素含量与紫玉米种皮颜色呈显著正相关, 颜色越深籽粒花青素含量越高。

表 1 紫玉米种皮颜色与花青素含量相关分析

Table 1 Correlation analysis between seed coat color and anthocyanin content of purple corn

性状	花青素含量	红色 (R 值)	绿色 (G 值)	蓝色 (B 值)
花青素含量	1			
红色 (R 值)	-0.857**	1		
绿色 (G 值)	-0.726**	0.949**	1	
蓝色 (B 值)	-0.858**	0.959**	0.998**	1

注: \*和\*\*分别表示 0.05 及 0.01 水平上的显著性差异。

## 2.3 可溶性总糖含量与蔗糖含量的积累变化

随着灌浆进程推进, 3 种紫玉米的籽粒可溶性总糖含量的变化均为先升后降。由图 3 可以看出, 在授粉后 13 d 之前, 可溶性总糖含量增加, 授粉后 13 d 之后开始下降, 在授粉后 13 d 时晋糯 20 的可溶性总糖含量最高比水果黑糯和黑甜糯 631 分别高 53.13 和 79.98  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。紫玉米籽粒蔗糖含量变化趋势与可溶性总糖含量几乎相同, 但在授粉后 13 d 时水果黑糯蔗糖含量最高, 比晋糯 20 和黑甜糯 631 分别高 21.04 和 54.47  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。不同品种间紫玉米籽粒灌浆期不同时间可溶性总糖含量与蔗糖含量差异显著。在可溶性总糖含量方面, 水果黑糯和晋糯 20 玉米籽粒的可溶性总糖含量最大值均高于黑甜糯 631 籽粒可溶性总糖含量, 而不同的品种可溶性总糖含量积累变化的速率差异显著, 水果黑糯和晋糯 20 可溶性总糖含量上升和下降的速率均大于黑甜糯 631。在蔗糖含量方面, 黑甜糯 631 蔗糖含量最大值虽然低于水果黑糯和晋糯 20, 但是其蔗糖含量的下降速率低于水果黑糯和晋糯 20。

## 2.4 支链淀粉含量与直链淀粉含量的积累变化

随着灌浆进程推进, 3 种紫玉米籽粒的支链淀粉含量与直链淀粉含量变化趋势相同, 在灌浆期均呈不断增加的趋势。在支链淀粉含量方面, 由图 4 可以看出, 在授粉后第 33 天水果黑糯、晋糯 20 籽粒支链淀粉含量分别较黑甜糯 631 高 11.06% 和 2.06%。在支链淀粉增长速率方面, 水果黑糯、晋糯 20 均大于黑甜糯 631。在直链淀粉含量方面, 晋糯 20 直链淀粉含量高于黑甜糯 631 和水果黑糯,

3种紫玉米的直链淀粉含量最高分别为2.35%、3.36%和3.54%，含量均在2%~4%之间。在支链淀粉

粉含量上水果黑糯虽然大于黑甜糯631和晋糯20，但其直链淀粉含量低于其他2个品种。

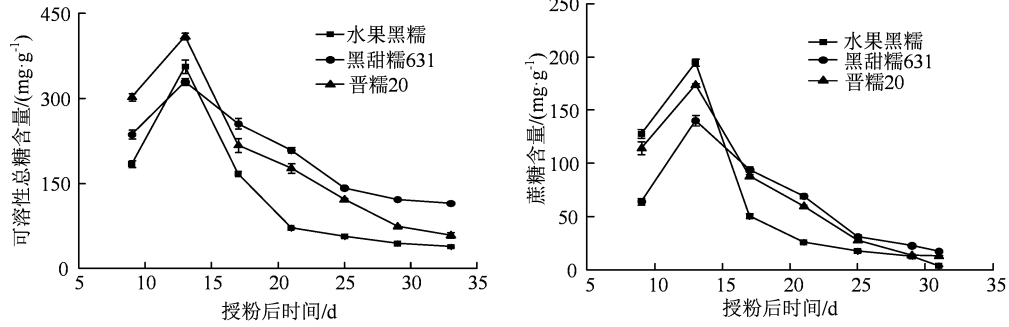


图3 灌浆期籽粒可溶性糖与蔗糖含量积累变化

Figure 3 Variation of grain solubility and sucrose accumulation during grain filling stage

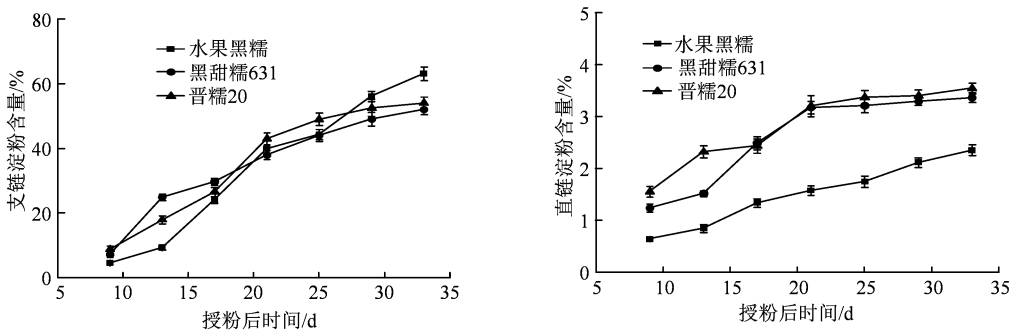


图4 灌浆期籽粒直链淀粉与支链淀粉积累变化

Figure 4 Variation of amylose and amylopectin accumulation in grains during grain filling stage

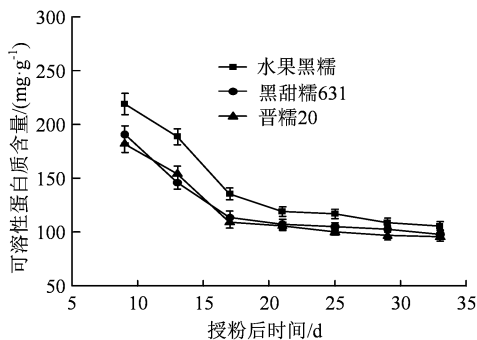


图5 灌浆期籽粒可溶性蛋白积累变化

Figure 5 Variation of soluble protein accumulation in grains during grain filling stage

2.5 可溶性蛋白含量的积累变化

随着灌浆进程推进,3种紫玉米的籽粒可溶性蛋白含量变化趋势相同,在灌浆期均呈现不断减少的趋势。由图5可以看出,可溶性蛋白含量从第9天到第17天快速下降,之后可溶性蛋白含量变化幅度变小,在授粉后9d时紫玉米籽粒可溶性蛋白含量最高,水果黑糯、黑甜糯631、晋糯20可溶性蛋白含量分为219.37、191.02和182.15 mg·g<sup>-1</sup>,在授粉后第17天黑甜糯631和晋糯20可溶性蛋白含量先趋于稳定,在授粉后第21天后3种紫玉米可溶性蛋白含量均维持在10%左右,其中水果黑糯可溶性蛋白含量始终高于其余两个品种。

表2 灌浆期籽粒花青素含量与主要营养成分的相关分析

Table 2 Correlation analysis of anthocyanin content and main nutrients in grains at grain filling stage

性状	花青素含量	可溶性总糖含量	蔗糖含量	可溶性蛋白含量	支链淀粉含量	直链淀粉含量
花青素含量	1					
可溶性总糖含量	-0.784**	1				
蔗糖含量	-0.780**	0.997**	1			
可溶性蛋白含量	-0.722**	0.760**	0.777**	1		
支链淀粉含量	0.812**	-0.868**	-0.861**	-0.925**	1	
直链淀粉含量	0.809**	-0.866**	-0.864**	-0.947**	0.988**	1

注:\*和\*\*分别为0.05及0.01水平上的显著性差异。

## 2.6 花青素与不同营养成分之间的相关关系

紫玉米籽粒花青素含量与营养成分之间的相关性(表 2)结果显示,籽粒花青素含量与可溶性总糖含量、蔗糖含量和可溶性蛋白含量之间呈极显著负相关;籽粒花青素含量与支链淀粉含量、直链淀粉含量呈极显著的正相关。这表明,紫玉米籽粒花青素含量与营养成分相关性极高,籽粒种皮越深,支链淀粉含量、直链淀粉含量越高,可溶性蛋白含量、可溶性总糖含量和蔗糖含量越低。

## 3 讨论

### 3.1 紫玉米籽粒颜色与花青素含量相关性

目前,有许多利用作物种皮颜色与自身其他性状的相关性研究,如种皮颜色与种子活力、籽粒颜色与营养特性和抗氧化性相关性等<sup>[16-17]</sup>。在种皮颜色与花青素含量的相关性方面,已有研究表明紫薯表皮 RGB 值与其花青素含量显著负相关,薛其勤等<sup>[9]</sup>在花生中也得出相同规律。本研究结果表明 3 种紫玉米花青素含量均与 RGB 值呈显著负相关,说明花青素含量与种皮颜色的深浅程度有显著的相关性,籽粒种皮颜色越浅花青素含量越低,籽粒种皮颜色越深花青素含量越高,这与紫色油麦菜、紫色油菜的花青素积累规律相同<sup>[18]</sup>,表明紫玉米种皮 RGB 值能作为判断花青素积累的指标<sup>[19]</sup>,也为快速、高通量筛选紫玉米品种提供了理论依据。

### 3.2 紫玉米籽粒花青素与营养成分的积累动态

前人研究发现,玉米籽粒花青素含量在灌浆不同阶段有显著差异,变化趋势为先增后减,呈单峰曲线变化<sup>[20]</sup>,这与本研究的紫玉籽粒花青素动态积累规律相同。花青素是糖酵解途径产生的次生代谢产物<sup>[21]</sup>,并且除酰基化修饰、甲基化修饰之外还会与糖类进行糖基化修饰<sup>[22-23]</sup>,说明糖类与花青素的合成有紧密的联系,但本研究中花青素含量变化趋势与可溶性糖和蔗糖并不同步,一方面可能由于糖类作为能量物质需要供应细胞的生命活动,另一方面可能存在其他物质与花青素竞争糖类。本研究结果表明紫玉米不同品种籽粒的蔗糖含量与可溶性总糖含量呈极显著正相关,其含量变化与可溶性总糖含量变化相同,呈现先增加后减少的趋势。这是由于随着灌浆进程的不断推进,叶片光合作用形成的碳水化合物以蔗糖形式不断向籽粒供应,籽粒中蔗糖分解为葡萄糖和果糖用以合成淀粉,因此在灌浆前期蔗糖等可溶性总糖含量持续增加;随着籽粒的生长发育,可溶性总糖快速转化为淀粉积累,可溶性总糖含量减少,淀粉含量增加。紫玉米籽粒直链

淀粉含量与支链淀粉含量变化趋势相同,均呈不断增加的趋势。随着籽粒灌浆的进行,3 种紫玉米支链淀粉含量从 10%左右增长到 50%以上,与李水琴等<sup>[7]</sup>研究中的非糯玉米品种对比,本研究中 3 种紫玉米支链淀粉含量均大于 50%,大于其他非糯玉米品种,这与其在支链淀粉含量上得出的糯玉米>甜糯玉米>其他非糯玉米的结论一致。直链淀粉含量与支链淀粉含量相比变化较小,3 种紫玉米中直链淀粉最大增幅度只有 2%左右。本研究中紫玉米籽粒中可溶性蛋白含量的积累动态呈一直减少的趋势,灌浆初期籽粒可溶性蛋白含量最高,随着灌浆的进行及籽粒不断地发育,玉米籽粒的贮藏物质增加,可溶性蛋白含量降低。另外,蔗糖含量与可溶性蛋白含量密切相关,可能是蔗糖转化为氨基酸的过程受到了限制,影响了可溶性蛋白的合成<sup>[24]</sup>。

### 3.3 紫玉米籽粒花青素和营养成分与采收期关系

紫玉米中的花青素含量和营养成分是评价籽粒品质的重要因素。例如籽粒糖类物质的含量决定玉米的甜度;蛋白质决定玉米的糊化程度<sup>[25]</sup>;花青素作为紫玉米特有的物质,其含量直接决定了紫玉米品质的优劣<sup>[26]</sup>。本研究中,3 种紫玉米在授粉后 13 d 可溶性总糖含量和蔗糖含量达到最大,3 种紫玉米籽粒的可溶性总糖和蔗糖上升速率大致相同,但水果黑糯和晋糯 20 可溶性总糖含量和蔗糖含量下降速率快。王娜等<sup>[27]</sup>研究发现可溶性糖含量和蔗糖含量越高,甜玉米籽粒的口感越好、甜度越高,保持较高的可溶性总糖含量和蔗糖含量,有利于采收期的延长,而可溶性总糖和蔗糖含量快速下降,则会导致采收期缩短。所以,可以通过糖含量变化来确定采收期的长短。蛋白质是营养成分的重要指标之一,蛋白质含量变高,不仅可以提高玉米籽粒的总能量水平,也调节了玉米籽粒的营养成分,使玉米的应用变得更加广泛<sup>[28]</sup>。蛋白质含量与作物品质和食用品质的关系在稻米方面已经开始研究,但在玉米方面鲜有报道,未来蛋白质与风味的深入研究或为玉米的采收期做出重要贡献。直链淀粉含量与籽粒柔韧性之间,支链淀粉含量与风味之间均呈极显著正相关,说明淀粉含量高,籽粒柔嫩性、风味越好<sup>[29]</sup>。目前试验中大多选取授粉后天数作为确定采收期的标准,然后进行玉米品质的测评。研究表明采收过早,则干物质少、花青素含量低、含水量高、甜度高;采收过晚,则干物质过多、含水量低、甜度低、花青素含量低;适宜采收期则籽粒饱满、口味甜、糯、香。本研究中 3 种紫玉米籽粒的花青素含量整体与可溶性总糖含量、蔗糖含量、可溶性蛋

白呈显著负相关,同时与支链淀粉与直链淀粉显著正相关。综合来看,紫玉米籽粒花青素含量达到峰值前5 d内,是均衡花青素含量与营养品质的适宜采收期。

#### 4 结论

通过 RGB 值比较籽粒种皮颜色深浅可作为辅助筛选高花青素含量紫玉米品种的重要表型指标。另外,在本研究中考虑花青素与各个营养成分的含量,提出授粉后21~25 d可作为最佳采收期,但紫玉米最佳采收时间是否具有统一性和普遍性还需要进一步探究。

#### 参考文献:

- [1] 张沛敏. ‘黑甜糯 631’ 玉米的品质鉴定与繁育技术研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019.
- [2] 马越, 赵晓燕, 徐亚民. 黑玉米的营养价值与保健作用[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(9): 115-117.
- [3] 张效梅, 穆志新, 王志, 等. 黑玉米种质资源的研究与利用[J]. 作物品种资源, 1998(4): 12-13.
- [4] 陆干, 李磊明, 陶祥运, 等. Pb、Cu 胁迫对玉米(*Zea mays* L.)生长、细胞色素合成以及重金属吸收特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(5): 905-911.
- [5] YOUSUF B, GUL K, WANI A A, et al. Health benefits of anthocyanins and their encapsulation for potential use in food systems: a review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2016, 56(13): 22.
- [6] 薛其勤, 别茹, 常宇涵, 等. 花生种皮颜色及花青素含量的遗传分析[J]. 花生学报, 2020, 49(1): 19-24.
- [7] 李水琴, 罗吉, 朱志妍, 等. 不同鲜食玉米灌浆期子粒主要营养成分的积累动态[J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 77-85.
- [8] 李水琴. 不同类型鲜食玉米主要品质形成规律的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017.
- [9] 张中东, 郭正宇, 宫帅, 等. 不同玉米品种籽粒营养成分及灌浆动态变化研究[J]. 耕作与栽培, 2017(2): 1-3, 6.
- [10] 董宗宗, 乔勇进, 刘晨霞, 等. 不同采收期对鲜食糯玉米品质影响的研究[J]. 上海农业学报, 2020, 36(4): 19-24.
- [11] 张毅, 冯西博, 马跃峰, 等. 有色大麦种子种皮颜色与种子活力相关性分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 18-29.
- [12] 赵霞, 刘然方. 黑米灌浆特性对花青素积累的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 51-58, 69.
- [13] 孙海燕, 孔德庸, 胡慧影, 等. 腐植酸浸种对低温胁迫下玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5385-5397.
- [14] 刘啸笑, 何章, 夏冬冬, 等. 温度与土壤水分对玉米幼苗生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 72-77.
- [15] 金玉红, 张开利, 张兴春, 等. 双波长法测定小麦及小麦芽中直链、支链淀粉含量[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(1): 137-140.
- [16] 宗学风, 张建奎, 李帮秀, 等. 小麦籽粒颜色与抗氧化作用[J]. 作物学报, 2006, 32(2): 237-242.
- [17] 宗学风, 张建奎, 余国东, 等. 小麦籽粒颜色与营养特性的相关研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(5): 24-27.
- [18] 姚华开, 郑元利, 周安韦, 等. 5种紫色蔬菜花青素含量测定分析[J]. 南方园艺, 2020, 31(3): 14-18.
- [19] KIM J T, YI G, CHUNG I M, et al. Timing and pattern of anthocyanin accumulation during grain filling in purple waxy corn (*Zea mays* L.) suggest optimal harvest dates[J]. ACS Omega, 2020, 5(25): 15702-15708.
- [20] 崔丽娜, 高荣岐, 孙爱清, 等. 不同基因型玉米籽粒类胡萝卜素与花色苷色素积累规律[J]. 作物学报, 2010, 36(5): 818-825.
- [21] 于洋, 朱月, 刘晗, 等. 茄果类蔬菜花青素研究进展[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(8): 120-127.
- [22] 许倩, 张晨, 吴嘉维, 等. 花青素的生物合成研究进展[J]. 林产化学与工业, 2020, 40(3): 1-11.
- [23] 由璐, 隋茜茜, 赵艳雪, 等. 花色苷分子结构修饰及其生理活性研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 351-359.
- [24] 王艳芳, 崔震海, 张立军, 等. 玉米籽粒灌浆期可溶性糖含量变化与可溶性蛋白积累关系的研究[J]. 辽宁化工, 2006, 35(1): 9-10, 12.
- [25] 刘萍, 陆卫平, 陆大雷. 鲜食糯玉米品质差异及适宜采收指标的研究[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 5-8.
- [26] HONG H T, NETZEL M E, O'HARE T J. Anthocyanin composition and changes during kernel development in purple-pericarp supersweet sweetcorn[J]. Food Chem, 2020, 315: 126284.
- [27] 王娜, 史振声, 王志斌, 等. 甜玉米品质研究进展[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 47-50.
- [28] 张晓林, 徐韦, 李坦, 等. 玉米籽粒主要性状与蛋白质含量的相关性[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(12): 104-106.
- [29] 王野, 陈豪, 王小云, 等. 糯玉米支链淀粉含量与蒸煮品质相关分析[J]. 吉林农业, 2016(23): 76.