

鲜食玉米花青素含量及其对品质的影响

蒋超, 谢世兴, 尹文旭, 董晓旭, 刘晨, 赵海超, 卢海博, 刘松涛, 黄智鸿

(河北北方学院/河北省农产品食品质量安全分析检测重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要: 以12个鲜食玉米品种为试验材料, 分析不同类型鲜食玉米花青素含量, 研究鲜食玉米花青素含量及其对品质的影响。结果表明, 12个品种鲜食玉米花青素含量在0.17~1.88 g/kg, 黑甜糯188的花青素含量最高, 澳早60的花青素含量最低。不同品种花青素含量随着灌浆进程推进, 总体呈先上升后下降的变化趋势, 花青素增加的速率为先缓后快。通过测定4种玉米的子粒花青素, 其含量在授粉后25 d达到最大值。在授粉后9~17 d, 黑色和彩色品种花青素含量无显著差异, 二者花青素含量均大于白色、黄色品种; 品质特性方面, 各品种子粒的可溶性糖含量在14.23~26.54 mg/g, 可溶性蛋白含量在7.32~11.02 mg/g, 淀粉含量在49.26%~66.57%。子粒花青素含量与可溶性蛋白含量之间呈极显著负相关, 与淀粉含量呈极显著正相关。黑甜糯188综合营养价值最优, 适宜作为在冀西北地区推广种植。

关键词: 鲜食玉米; 花青素; 农艺性状; 营养品质

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

The Content of Anthocyanins in Fresh Corn and Its Effect on Quality

JIANG Chao, XIE Shi-xing, YIN Wen-xu, DONG Xiao-xu, LIU Chen, ZHAO Hai-chao,

LU Hai-bo, LIU Song-tao, HUANG Zhi-hong

(Key Laboratory of Analysis and Inspection of Agricultural Products and Food Safety of Hebei Province, Key Laboratory of Quality and Safety of Characteristic Agricultural Products of Zhangjiakou City, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: To investigate the anthocyanin content in fresh corn and its impact on quality, 12 fresh corn varieties were used as experimental materials to analyze the anthocyanin content across different types. The results showed that the anthocyanin content in the 12 varieties ranged from 0.17 to 1.88 g/kg, with Black Sweet Glutinous 188 having the highest content and Aozao 60 the lowest. The anthocyanin content of different varieties showed an overall trend of increasing first and then decreasing as the filling process progresses, with the rate of anthocyanin increase being slow first and then fast. Measurement of anthocyanin content in the grains of four corn types revealed that the content reached its peak at 25 days after pollination. From 9 to 17 days after pollination, there was no significant difference in anthocyanin content between black and colored varieties, and both varieties had higher anthocyanin content than white and yellow varieties. In terms of quality characteristics, the soluble sugar content in the seeds ranged from 14.23 to 26.54 mg/g, soluble protein content ranged from 7.32 to 11.02 mg/g, and starch content from 49.26% to 66.57%. There was a highly significant negative correlation between anthocyanin content and soluble protein content, and a highly significant positive correlation with starch content. Among the 12 varieties, Black Sweet Glutinous Rice 188 had the best comprehensive nutritional value, making it suitable for promotion and cultivation in the north-west region of Hebei.

Key words: Fresh corn; Anthocyanin; Agronomic trait; Nutritional quality

录用日期: 2024-06-26

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系“寒旱区春玉米抗逆高产栽培岗位专家”(HBCT2023020202)、河北省创新能力提升计划项目“甜糯玉米生产技术集成与示范”(20526401D)、张家口市科技局项目(2311025C)、河北省农产品食品质量安全分析检测重点实验室绩效补助经费项目(22567613H)

作者简介: 蒋超(1999-), 男, 河北张家口人, 硕士, 研究方向为作物栽培。E-mail: 18031357308@163.com

黄智鸿为本文通信作者。E-mail: hbnhzh@163.com

鲜食玉米营养丰富,易于被消化吸收,是一种优良的全谷物食品,其营养价值和公众可接受性远高于传统粒用玉米^[1-2]。由于其风味独特、富含糖、脂肪、蛋白质及钙镁等多种矿质元素,具有新型营养保健食品、绿色蔬菜等美誉深受人们的喜爱^[3-5]。此外,彩色鲜食玉米还含有其他玉米几乎没有的花青素,可用于抗氧化、抗衰老、抗癌的功能食品的开发,提高了其研究价值。花青素属于多酚类化合物中的类黄酮类,是一种天然的水溶性色素,在自然界中广泛存在^[6]。花青素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,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^[7-8]。近年来,花青素的保健功能得到公众的广泛关注和认可,含有花青素的鲜食玉米很受消费者的欢迎,具有广阔的市场前景^[9]。

一些研究对紫玉米不同组织(即子粒、穗轴、皮和丝)提取物中的花青素含量进行了研究,并测试了其生物保护作用^[10]。谷壳和玉米芯提取物比果仁提取物含有更丰富的花青素。玉米芯和谷壳的含量分别为0.49%~4.6%和1.25%~13.18% (w/w 干料)^[11]。一方面,紫玉米具有广泛的工业用途,可作为太阳能电池的光敏剂、天然着色剂、乙醇燃料等^[12-14];另一方面,花青素的抗氧化作用较早引起了研究者的注意^[15]。玉米花青素具有抗氧化能力和其他生物效应。紫玉米中的花青素比普通玉米具有更强的清除自由基的能力。

目前,前人关于彩色鲜食玉米的研究选用的种质数量普遍较少,而且多侧重分析氨基酸和矿质元素含量等营养指标。关于不同鲜食玉米品种农艺性状、营养品质等性状的研究尚未见报道。以搜集的12个鲜食玉米品种为试材,对其农艺性状和营养品质进行系统地比较分析,以筛选综合性状优良的鲜食玉米品种,为其后期的农业生产和市场应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试鲜食玉米品种共12个,分别为万糯2000、万糯188、彩糯1号、万甜糯218、京科糯2000、黑甜糯188、万糯2018、澳早60、万彩糯6号、佳彩甜糯、黄粘玉米、白优1号。试验材料来源于河北省玉米产业技术体系团队。

1.2 试验设计

试验选用12个鲜食玉米品种,按随机区组试验

设计,2行区,3次重复,行距60 cm,株距30 cm,四周设4行保护行,试验采用随机排列,共12个处理,每个处理3次重复。试验单粒播种,施600 kg/hm²玉米专用肥,其他管理措施同大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 鲜食玉米品质指标的测定

收获期,各品种随机采收果穗30穗,标记好后带回实验室,放于-20℃冰箱中保存,实验前烘干过筛,用于食用品质各项指标测定,可溶性糖、淀粉含量的测定采用蒽酮比色法,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250法进行测定。

1.3.2 农艺性状

鲜食玉米采收期,每个品种取中间两行果穗,摘掉苞叶后称鲜重。之后随机取其中10穗,主要调查项目包括穗长、穗粗、穗行数、行粒数、秃尖长和鲜百粒重等指标。

1.3.3 鲜食玉米花青素含量测定

分别在玉米灌浆期的5、10、15、20、25、30 d,取玉米子粒测量花青素含量,并在收获期测量玉米子粒的花青素含量。

采用乙醇与HCl的混合液提取花青素,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 HCl体积比为85:15),80℃水浴浸取30 min,冷却后用分光光度计测定浸取液OD₅₃₅值,3次重复。

1.4 数据处理与分析

采用Office 2016对试验中数据进行统计分析,并整理,并利用SPSS25.0进行差异显著性分析、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同颜色鲜食玉米品种果穗性状差异分析

对不同颜色鲜食玉米品种的穗长、穗粗、穗行数、行粒数以及鲜百粒重进行分析,结果如表1所示。穗长在18.44~23.33 cm,WN188(万糯188)的穗最长,为23.33 cm,其次为JKN2000(京科糯2000)与HTN188(黑甜糯188),分别为22.5 cm与22.3 cm;AZ60(澳早60)的穗最短,为18.44 cm。穗粗在4.43~5.78 cm,WN188的穗最粗,为5.78 cm;其次为JCTN(佳彩甜糯)与WN2000(万糯2000),分别为5.56 cm与5.27 cm。JKN2000、HTN188及WN188的行粒数为40~46粒,显著高于其他品种。WN2000、WTN218(万甜糯218)及BY1(白优1号)的穗行数为16~18行,显著高于其他品种。WN188、JCTN及WN2000的鲜百粒重为42~43 g,显著高于其他品种。由表1可以看出,不同颜色玉米品种果穗性状

有差异,与玉米子粒颜色没有直接相关性。多数白色品种穗长较长,但穗行数较小;黑色品种穗长、穗粗和穗行数都较大;彩色品种穗长较小,但鲜百粒重较大。同种颜色品种间,穗行数、穗长和行粒数有不同,黑色品种与其他品种相比差异显著。

表 1 不同颜色鲜食玉米品种穗部性状比较
Table 1 Comparison of ear traits among different colored fresh corn varieties

品 种 Variety	穗长(cm) Ear length	穗粗(cm) Ear diameter	穗行数(行) Ear rows	行粒数(粒) Grains per row	鲜百粒重(g) Fresh 100- grain weight	子粒颜色 Corn color
万糯2000	21.50±0.68 ab	5.27±0.07 bc	18.00±3.60 a	36.56±1.23 cd	42.06±2.87 a	白色
万糯188	23.33±1.60 a	5.78±0.08 a	14.67±0.00 bc	40.78±3.62 bc	43.40±2.61 a	白色
彩糯1号	20.94±1.72 abc	4.73±0.18 de	14.78±0.31 c	33.67±0.94 de	28.13±0.91 cd	彩色
万甜糯218	20.33±1.50 bc	5.11±0.24 bcd	16.89±1.13 ab	39.78±1.77 bc	26.02±1.87 cd	白色
京科糯2000	22.50±0.71 ab	4.95±0.21 cd	14.78±0.63 c	46.89±1.85 a	32.95±0.73 b	白色
黑甜糯188	22.30±0.14 ab	5.22±0.08 bc	16.33±0.94 bc	42.11±2.53 ab	28.57±2.17 bcd	黑色
万糯2018	21.83±0.36 ab	5.02±0.25 cd	14.67±0.54 bc	40.44±0.63 bc	40.47±1.90 a	白色
澳早60	18.44±1.78 c	4.43±0.24 e	16.00±0.47 ab	30.11±2.69 e	33.03±1.81 b	白色
万彩糯6号	21.83±1.16 ab	5.17±0.14 bc	14.78±0.63 c	37.44±1.91 bcd	40.07±2.23 a	彩色
佳彩甜糯	21.72±0.77 ab	5.56±0.16 ab	14.44±0.83 bc	37.00±1.09 cd	42.81±2.14 a	彩色
黄粘玉米	21.34±0.53 bc	5.21±0.29 bc	16.11±0.31 bc	37.44±1.29 bcd	24.43±0.39 d	黄色
白优1号	21.44±0.57 ab	5.16±0.07 bcd	16.67±0.27 bc	36.44±1.85 cd	30.76±1.52 bc	白色

注:不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。
Note: Different lowercase letters indicated a significant difference at the 0.05 level.

2.2 不同鲜食玉米品种花青素含量

如图1所示,各品种玉米的花青素含量在0.17~1.88 g/kg, HTN188>CN1(彩糯1号)>WCN6(万彩糯6号)>JCTN>HN(黄粘玉米)>WN2018(万糯2018)>WTN218>JKN2000>WN188>WN2000>BY1>AZ60,花青素含量最高的品种为HTN188,不同品种间花青素含量存在差异。对各品种的花青素含量进行系统聚类分析,在阈值为3时可将试验品种分为3大类,第1类包括WTN218、JKN2000、

WN2018、WN188、HN、AZ60、BY1和WN2000共8个品种,这类品种花青素含量较低(0.17~0.54 g/kg);第2类包括CN1、WCN6和JCTN共3个品种,这类品种花青素含量中等(0.73~0.95 g/kg);第3类为HTN188这1个品种,花青素含量较高,为1.88 g/kg。

如图2所示,彩色鲜食玉米的花青素含量与白色、黄色品种相比具有显著差异,且黑色鲜食玉米品种花青素含量最高。如图3所示,随着灌浆进程推进,4种玉米品种的子粒花青素含量变化趋势一致,

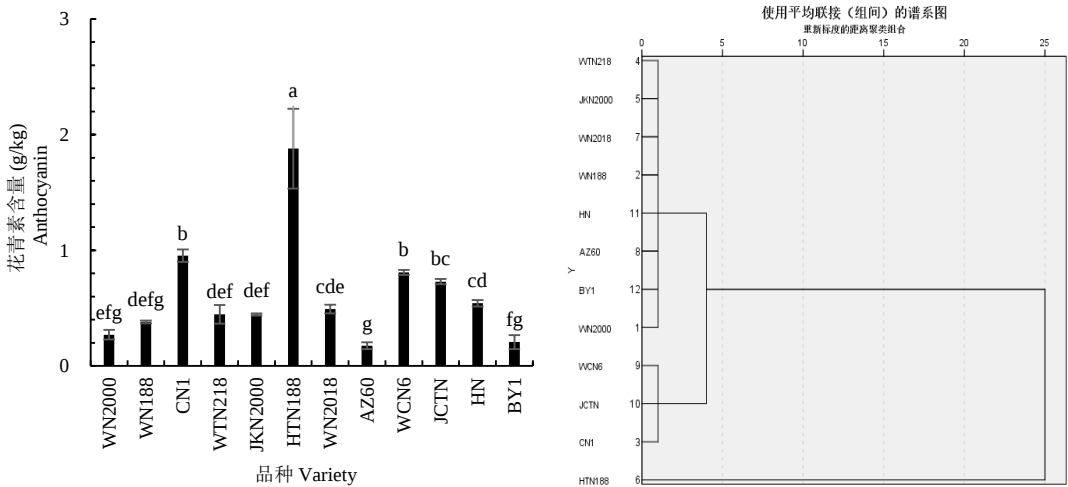


图1 不同鲜食玉米品种花青素含量(A)及聚类分析(B)
Fig.1 Anthocyanin content in different fresh corn varieties(A) and cluster analysis(B)

总体上呈先升后降的变化趋势,花青素增加的速率为先缓后快。通过测定4种玉米的子粒花青素,发现其含量在授粉后25 d达到最大值。在授粉后9~

17 d,黑色和彩色品种花青素含量无显著差异,二者花青素含量均大于白色、黄色品种;在授粉后17~25 d,黑色品种花青素含量最高,增速最快。

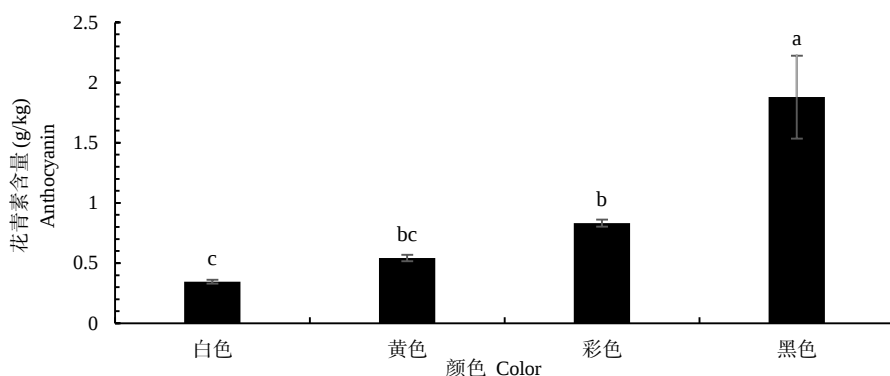


图2 不同颜色玉米花青素含量

Fig.2 Content of anthocyanins in corn of different colors

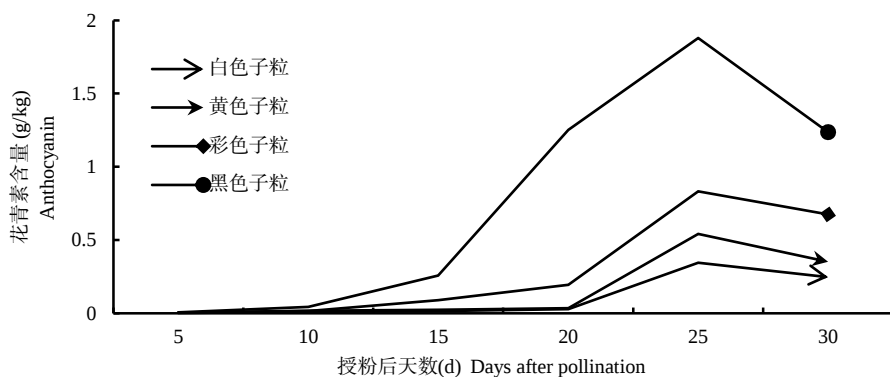


图3 灌浆期子粒花青素积累变化

Fig.3 Changes in anthocyanin accumulation in grains during grain filling period

2.3 不同鲜食玉米品种品质特性比较

2.3.1 不同鲜食玉米品种子粒品质特征

如图4所示,不同鲜食玉米品种子粒可溶性蛋白含量在7.32~11.02 mg/g, WN188>AZ60>WN2018>BY1>HN>JKN2000>WN2000>WTN218>JCTN>HTN188>CN1>WCN6,其中可溶性蛋白含量最高的品种为WN188,与其他品种呈显著性差异($P<0.05$)。对各品种子粒的可溶性蛋白含量进行系统聚类分析,在阈值为6左右时可将试验品种分为3大类,第1类包括WN2000、WCN6、WN188、JCTN和JKN2000共5个品种,这类品种子粒可溶性蛋白含量中等(9.17~9.78 mg/g);第2类包括HTN188、HN、CN1、和WTN218共4个品种,这类品种子粒可溶性蛋白含量较高(10.28~11.02 mg/g);第3类为WN2018、BY1和AZ60共3个品种,子粒可溶性蛋白含量较低。

如图5所示,各品种子粒的淀粉含量在49.26%~66.57%, WCN6>WTN218>JKN2000>HTN188>JCTN>WN2000>CN1>HN>WN2018>WN188>AZ60>BY1,淀

粉含量最高的品种为WCN6,不同品种间子粒淀粉含量存在差异。对各品种子粒的淀粉含量进行系统聚类分析,在阈值为4左右时可将试验品种分为3大类,第1类包括WN188、AZ60、WN2018和BY1共4个品种,这类品种子粒淀粉含量较低(49.26%~53.24%);第2类包括CN1、HN和WN2000共3个品种,这类品种子粒淀粉含量中等(58.79%~60.24%);第3类为WTN218、WCN6、JKN2000、HTN188和JCTN共5个品种,子粒淀粉含量较高,为62.25%~66.57%。

如图6所示,各品种子粒的可溶性糖含量在14.23~26.54 mg/g, HTN188>JKN2000>BY1>HN>WCN6>WTN218>WN2000>WN2018>JCTN>CN1>WN188>AZ60,12个鲜食玉米品种中,HTN188子粒的可溶性糖含量最高,与其他品种形成显著性差异($P<0.05$)。对各品种子粒的可溶性糖含量进行系统聚类分析,在阈值为3左右时可将试验品种分为4类,第1类为HN、BY1、WCN6、JKN2000和HTN188共5个品种,这类品种子粒可溶性糖含量较高(24.82~

26.54 mg/g);第2类为WN2000和WTN218共两个品种,这类品种子粒可溶性糖含量中等(21.18 ~ 21.78 mg/g);第3类为CN1、JCTN、WN188和WWN2018

共4个品种,子粒可溶性糖含量较低(16.09 ~ 18.21 mg/g)。第4类为AZ60这1个品种,可溶性糖含量为14.23 mg/g。

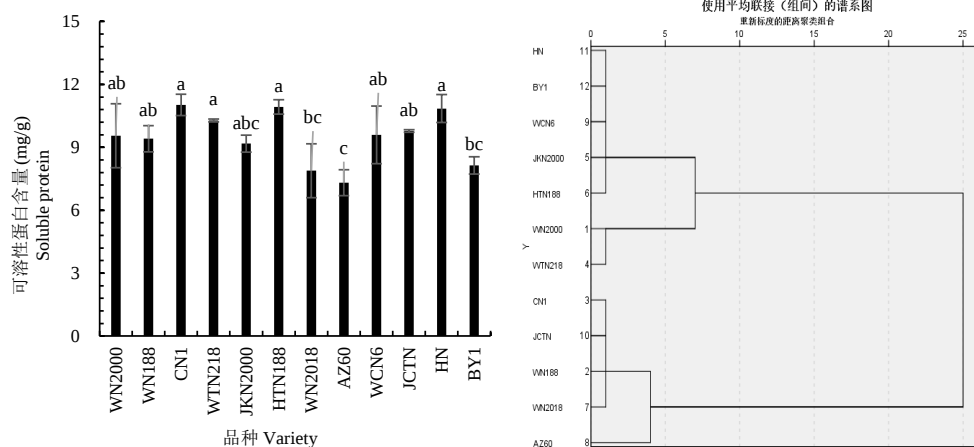


图4 不同鲜食玉米品种可溶性蛋白含量(A)及聚类分析(B)

Fig.4 Soluble protein content in different fresh corn varieties(A) and cluster analysis(B)

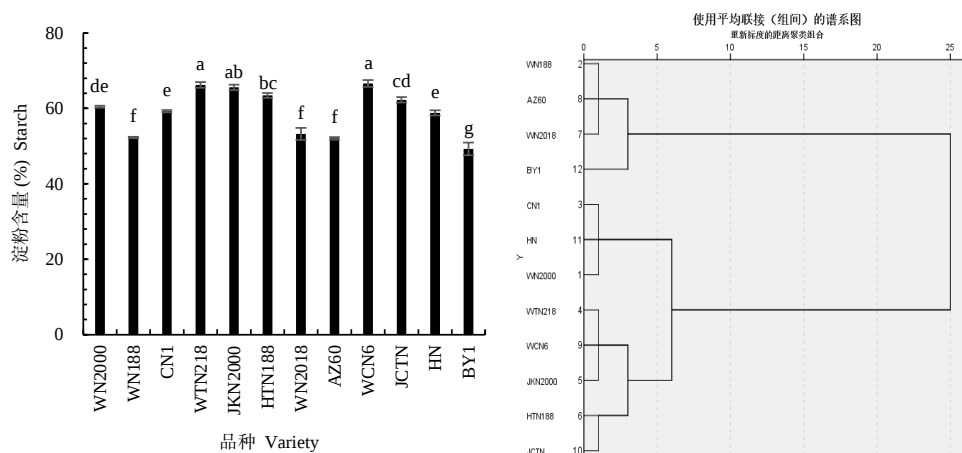


图5 不同鲜食玉米品种淀粉含量(A)及聚类分析(B)

Fig.5 Starch content of different fresh corn varieties(A) and cluster analysis(B)

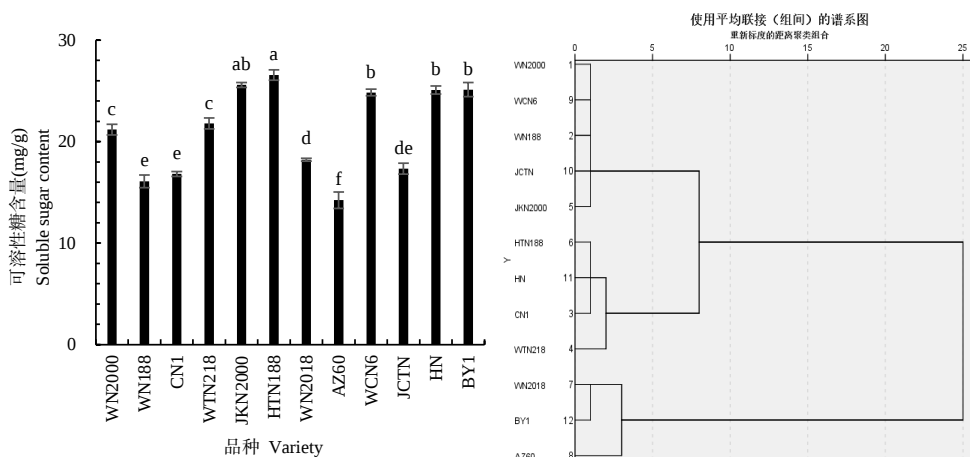


图6 不同鲜食玉米品种可溶性糖含量(A)及聚类分析(B)

Fig.6 Soluble sugar content in different fresh corn varieties(A) and cluster analysis(B)

2.3.2 花青素与不同营养成分之间的相关关系

鲜食玉米子粒花青素含量与营养成分之间的相关性如表2所示。子粒花青素含量与可溶性蛋白含量之间呈极显著负相关,子粒花青素含量与淀粉含

量呈极显著正相关。表明玉米子粒花青素含量越高,种皮颜色越深,淀粉含量越高,可溶性蛋白含量越低。花青素含量与可溶性糖含量无显著差异。

表2 花青素与不同营养成分之间的相关分析
Table 2 The correlation between anthocyanins and different nutritional components

性状 Trait	花青素含量 Anthocyanin content	可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	淀粉含量 Starch content
花青素含量	1			
可溶性糖含量	0.327	1		
蛋白含量	-0.567**	-0.337*	1	
淀粉含量	0.433**	0.440**	-0.569**	1

注:“*”和“**”分别在0.05和0.01水平上差异显著。
Note: * and ** indicated significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 结论与讨论

3.1 花青素对彩色鲜食玉米价值的影响

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,包括种皮颜色与种子活力、子粒颜色与营养特性和抗氧化性相关性等^[16-17]。于文博等研究表明,花青素含量与种皮颜色的深浅程度有显著的相关性,子粒种皮颜色越浅花青素含量越低,子粒种皮颜色越深花青素含量越高,与紫色油麦菜、紫色油菜的花青素积累规律相同^[18-19]。紫玉米中的花青素含量和营养成分是评价子粒品质的重要因素。子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;花青素含量直接决定了玉米品质的优劣^[20]。因此,需要综合研究玉米的子粒花青素和子粒营养成分的积累动态,以花青素最大含量作为参考。

甜玉米因具有抑制糖分向淀粉转化的遗传特性,所以乳熟期含糖量较高,口味香甜易消化^[21]。糯玉米子粒胚乳淀粉大部分为支链淀粉,其淀粉的分子量比直链淀粉小,食用消化率高,赖氨酸含量较高,煮熟后柔软细腻、甜黏清香。随着人民生活水平的提高及保健意识的加强,消费者对甜玉米、糯玉米的营养保健功效提出了更高的要求,富含花青素和赖氨酸的甜糯玉米深受消费者喜爱,发展前景十分广阔^[22-23]。花青素玉米子粒中含有丰富的支链淀粉、蛋白质、维生素、微量元素,其果皮中蕴含丰富的花青素,兼具营养价值、保健作用及美容、抗衰等功能。另外从黑糯玉米中提取的天然色素稳定性好,可以作为“功能因子”,用于抗氧化、抗衰老、抗癌的功能食品的研究与开发^[24]。花青素玉米的子粒、穗

轴也可以作为产品开发的原料,从食品和饮品方面入手,其剩余的苞叶、雄穗等也是提取花青素的优质原料^[25-27]。张家口万全区具有“中国鲜食玉米之乡”的品牌,从产品回报率、产品深化程度、品牌影响力3个方面可以提升花青素玉米农业生产的经济效益^[28-30]。

3.2 花青素对鲜食玉米品质的影响机理

本研究选用12个鲜食玉米品种作为试验材料,分析彩色鲜食玉米与白色鲜食玉米在农艺性状和营养品质性状方面的差异。经过分析发现,彩色玉米在某些性状方面具有一定优势。HTN188、JCTN等材料的穗粒数和千粒重都比较高。千粒重是体现种子大小与饱满程度的一个重要指标,也是田间预测产量的重要依据^[31]。单粒重较大,子粒比较饱满,可为丰产、高产奠定基础^[32]。

花青素是糖酵解途径产生的次生代谢产物^[33],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^[34-35],说明糖类与花青素的合成有紧密的联系。本研究中花青素含量与可溶性糖并不同步,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。随着子粒的生长发育,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。王野等研究发现,淀粉含量高,子粒柔嫩性、风味越好^[36]。蛋白质是营养成分的重要指标之一,蛋白质含量变高,不仅可以提高玉米子粒的总能量水平,也调节了玉米子粒的营养成分,使玉米的应用变得更加广泛^[37]。本研究中子粒花青素含量与可溶性蛋白含量之间呈极显著负相关,子粒花青素含量与淀粉含量呈极显著正相关。综合来看,玉米子粒

花青素含量达到峰值,是均衡花青素含量与营养品质的适宜时期。

参试玉米品种间的花青素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量以及淀粉含量均存在不同程度的差异,其中HTN188的花青素含量和可溶性糖含量均最高,WN188的可溶性蛋白含量最高,淀粉含量最高的品种为WCN6。通过花青素含量的高低可作为衡量玉米营养品质的指标。玉米子粒花青素含量与营养成分之间存在一定的相关性,但具体机理仍需要进一步探究。

参考文献:

- [1] 刘海忠,宋炜,王宝强,等. 120份欧美玉米自交系的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2018,19(4):676-684.
LIU H Z, SONG W, WANG B Q, et al. Genetic diversity analysis of 120 European and American maize inbred lines[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(4): 676-684. (in Chinese)
- [2] 邢政. 东北地区主要糯玉米自交系聚类分析及杂种优势的利用[D]. 长春:吉林农业大学,2017.
- [3] 徐秀兰,吴学宏,张国珍,等. 甜玉米种子携带真菌与种子活力关系分析[J]. 中国农业科学,2006(8):1565-1570.
XU X L, WU X H, ZHANG G Z, et al. Analysis of the relationship between fungi carried by sweet corn seeds and seed vigor[J]. Chinese Agricultural Science, 2006(8): 1565-1570. (in Chinese)
- [4] 郝小琴,吴子恺. 鲜食甜糯玉米主要营养品质的遗传规律研究[J]. 安徽农业科学,2006(21):5457-5460.
HAO X Q, WU Z K. A study on the genetic law of the main nutritional qualities of fresh sweet glutinous corn[J]. Anhui Agricultural Science, 2006(21): 5457-5460. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] SILVA S, COSTA E M, CALHAU C, et al. Anthocyanin extraction from plant tissues: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(14): 3072-3083.
- [7] 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.
LU G, LI L M, TAO X Y, et al. The effects of Pb and Cu stress on the growth, cytochrome synthesis, and heavy metal absorption characteristics of maize(*Zea mays* L.)[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(5): 905-911. (in Chinese)
- [8] 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]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(13): 2223-2230.
- [9] 杨文竹,陈茹梅. 花青素玉米的育种进展[J]. 中国农业科技导报,2022,24(8):18-24.
YANG W Z, CHEN R M. The breeding progress of anthocyanin corn[J]. China Agricultural Science and Technology Journal, 2022, 24(8): 18-24. (in Chinese)
- [10] YANG Z D, ZHAI W W. Identification and antioxidant activity of anthocyanins extracted from the seed and cob of purple corn(*Zea mays* L.)[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 11(1): 169-176.
- [11] LI C Y, KIM H W, WON S. Corn husk as a potential source of anthocyanins[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(23): 11413-11416.
- [12] BARBA F J, RAJHA H N, DEBS E, et al. Optimization of polyphenols' recovery from purple corn cobs assisted by infrared technology and use of extracted anthocyanins as a natural colorant in pickled turnip[J]. Molecules, 2022, 27(16): 5222.
- [13] JUVIK J A, CHATHAM L A. Gwas and genomic selection for increased anthocyanin content in purple corn[J]. BioRxiv, 2020.
- [14] KURAMBHATTI C, KUMAR D, RAUSCH K D, et al. Improving technical and economic feasibility of water based anthocyanin recovery from purple corn using staged extraction approach[J]. Industrial Crops Products, 2020, 158(1): 1-15.
- [15] KACHARAVA N, CHANISHVILI S, BADRIDZE G, et al. Effect of seed irradiation on the content of antioxidants in leaves of kidney bean, cabbage and beet cultivars[J]. Australian Journal of Crop Science, 2009, 3(3): 137-145.
- [16] 宗学风,张建奎,李帮秀,等. 小麦子粒颜色与抗氧化作用[J]. 作物学报,2006(2):237-242.
ZONG X F, ZHANG J K, LI B X, et al. Wheat grain color and antioxidant activity[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006(2): 237-242. (in Chinese)
- [17] 宗学风,张建奎,余国东,等. 小麦子粒颜色与营养特性的相关研究[J]. 中国粮油学报,2006(5):24-27.
ZONG X F, ZHANG J K, YU G D, et al. A study on the correlation between wheat grain color and nutritional characteristics[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2006(5): 24-27. (in Chinese)
- [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.
YAO H K, ZHENG Y L, ZHOU A W, et al. Determination and analysis of anthocyanin content in five purple vegetables[J]. Southern Horticulture, 2020, 31(3): 14-18. (in Chinese)
- [19] Department of Central Area Crop Science, National Institute of Crop Science, RDA, Suwon-si 16429, Republic of Korea. 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] 于文博,汪正鑫,吴贻波,等. 不同品种紫玉米子粒花青素与主要营养成分的动态比较[J]. 安徽农业大学学报,2022,49(6):861-866.
YU W B, WANG Z X, WU Y B, et al. Dynamic comparison of anthocyanins and main nutritional components in different varieties of purple corn seeds[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(6): 861-866.
- [21] 马守科,张浩,祁军. 甜玉米的营养价值和加工食用方法[J]. 新疆农业科技,2006(1):37.
MA S K, ZHANG H, QI J. Nutritional value and processing and consumption methods of sweet corn[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2006(1): 37. (in Chinese)
- [22] 张胜恒,蔡治荣,徐红智,等. 加甜型糯玉米选育研究[J]. 南方农业,2007(1):9-12.

- ZHANG S H, CAI Z R, XU H Z, et al. Research on the breeding of sweet glutinous corn[J]. Southern Agriculture, 2007(1): 9–12. (in Chinese)
- [23] 谢孝颐,蔡志飞,印志同,等. 糯玉米育种概论[J]. 玉米科学, 2003(S2):58–67.
- XIE X Y, CAI Z F, YIN Z T, et al. Introduction to glutinous corn breeding[J]. Journal of Maize Sciences, 2003(S2): 58–67. (in Chinese)
- [24] 俞尧. 鲜食玉米子粒花青素和维生素B₂种质鉴定及其含量累积动态研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2022.
- [25] 黑玉米深加工大有可为[J]. 农村新技术, 2008(8):18.
- Deep processing of black corn has great potential[J]. Rural New Technology, 2008(8): 18.
- [26] 王勇,胡云红,王国兴,等. 一种黑玉米芯代茶加工方法: CN202110948647.7[P]. 中国专利: CN202110948647.7, 2024–03–13.
- [27] 李爱萍,郑开斌. 黑玉米加工利用及前景分析[C]. 北京:中国营养学会营养资源与保健食品学会. 中国营养学会第五次营养资源与保健食品学术会议论文摘要汇编. 福建省农科院:1999:2.
- [28] 徐丽,赵久然,卢柏山,等. 我国鲜食玉米种业现状及发展趋势[J]. 中国种业, 2020(10):14–18.
- XU L, ZHAO J R, LU B S, et al. The current situation and development trends of fresh corn seed industry in China[J]. China Seed Industry, 2020(10): 14–18. (in Chinese)
- [29] 郭丽华,尉京红,马蕴菲,等. 河北省鲜食玉米产业发展形势及高质量发展建议[J]. 中国蔬菜, 2022(3):9–13.
- GUO L H, WEI J H, MA Y F, et al. The development situation and high quality development suggestions of fresh corn industry in Hebei Province[J]. China Vegetable, 2022(3): 9–13. (in Chinese)
- [30] 史亚兴,徐丽,赵久然,等. 中国糯玉米产业优势及在“一带一路”发展中的机遇[J]. 作物杂志, 2019(2):15–19.
- SHI Y X, XU L, ZHAO J R, et al. Advantages of China's waxy corn industry and opportunities in the development of the "the Belt and Road"[J]. Crops, 2019(2): 15–19. (in Chinese)
- [31] 库尔班江,赛丽曼. 碘量法测水果蔬菜中维生素C的含量[J]. 伊犁师范学院学报(自然科学版), 2007(3):28–32.
- KU E B J, SAI L M. Iodometric method for measuring the content of vitamin C in fruits and vegetables[J]. Journal of Ili Normal University(Natural Science Edition), 2007(3): 28–32. (in Chinese)
- [32] 段骅,苏京平,傅亮,等. 耐热耐旱性不同水稻品种的农艺和生理性状[J]. 植物生理学报, 2015, 51(10):1658–1668.
- DUAN H, SU J P, FU L, et al. The agronomic and physiological characteristics of different rice varieties with heat and drought resistance[J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 51(10): 1658–1668. (in Chinese)
- [33] 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.
- YU Y, ZHU Y, LIU H, et al. Research progress on anthocyanins in eggplant vegetables[J]. Guizhou Agricultural Science, 2021, 49(8): 120–127. (in Chinese)
- [34] 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.
- XU Q, ZHANG C, WU J W, et al. Research progress in the biosynthesis of anthocyanins[J]. Forest Chemistry and Industry, 2020, 40(3): 1–11. (in Chinese)
- [35] 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.
- YOU L, SUI Q Q, ZHAO Y X, et al. Research progress on molecular structure modification and physiological activity of anthocyanins[J]. Food Science, 2019, 40(11): 351–359. (in Chinese)
- [36] 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.
- WANG Y, CHEN H, WANG X Y, et al. Correlation analysis between amylopectin content and cooking quality of glutinous corn[J]. Jilin Agriculture, 2016(23): 76. (in Chinese)
- [37] 张晓林,徐韦,李坦,等. 玉米子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.
- ZHANG X L, XU W, LI T, et al. The correlation between the main traits of corn kernels and protein content[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2014, 42(12): 104–106. (in Chinese)

(责任编辑:栾天宇)