

华鹤良, 赵青, 李国生, 等. 玉米籽粒灌浆特性及其与茎秆糖分的关系[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1239-1246.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.06.006

玉米籽粒灌浆特性及其与茎秆糖分的关系

华鹤良^{1,2}, 赵青¹, 李国生^{2,3}, 曹振奇¹, 王杰¹, 卞云龙¹

(1.扬州大学粮食作物现代产业技术协同创新中心/教育部植物功能基因组学重点实验室, 江苏扬州 225009; 2.扬州大学实验农牧场, 江苏扬州 225009; 3.扬州市扬大康源乳业有限公司, 江苏扬州 225004)

摘要: 籽粒充实的优劣直接关系到粒质量和产量高低, 以先玉 335 和郑单 958 及其亲本为材料, 研究玉米果穗不同粒位籽粒灌浆特性并分析灌浆速率(平均)与茎秆糖分的关系。就不同粒位籽粒灌浆速率而言, 上部最低, 峰值时, 上部与中部、下部差异最大, 中部、下部差异较小, 峰值前下部高于中部, 峰值后下部稍低于中部。灌浆速率基本都表现低-高-低的变化趋势, 但也存在基因型差异。不同粒位籽粒含水量都表现为下部>中部>上部, 中部、下部差异较小; 随着灌浆期的延长, 籽粒含水率均呈逐渐下降趋势。茎秆糖分与灌浆速率之间存在密切关系, 随着灌浆速率提高, 茎秆糖分呈下降趋势; 茎秆糖消耗量最大时, 灌浆速率基本上处于峰值。

关键词: 玉米; 果穗不同粒位籽粒; 灌浆速率; 茎秆糖含量

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)06-1239-08

Kernel filling characteristics and their relationship with stalk sugar content in maize

HUA He-liang^{1,2}, ZHAO Qing¹, LI Guo-sheng^{2,3}, CAO Zhen-qi¹, WANG Jie¹, BIAN Yun-long¹

(1. Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Key Laboratory of Plant Functional Genomics of the Ministry of Education, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Experimental Farm of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Yangzhou Yangda Kangyuan Dairy Ltd., Yangzhou 225004, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of grain filling are directly related to the grain weight and the yield of different varieties. Two maize hybrids Xianyu 335 and Zhengdan 958 and their parents were used as the materials to analyze kernel filling characteristics and their relationship with stalk sugar content in maize. The result showed that the filling rate of the apical kernels was lower than that of the middle and basal kernels and the difference was in maximum when filling rate reached its peak value. Furthermore, the relative difference between the middle and basal kernel filling rate was small. However, before the peak value, the filling rate of basal kernel was higher than that of middle, and after the peak value, the filling rate of basal kernel was a little bit lower than that of middle. The kernel filling rates basically presented the tendency of low-high-low, but the genotype differences were also existed. The water content of kernels at the different positions of the ear in the basal position was bigger than that in the middle position, and that in the middle position was bigger than that in the apical. The difference of water content in kernels between the middle and the basal position was small. With the extension of the kernel filling period, the moisture content rate of kernels decreased gradually. The sugar content of stalk had a close relation-

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31071426); 江苏省科学基金项目(BK20171291); 扬州市科技项目(YZ2015031)

作者简介: 华鹤良(1964-), 男, 博士, 高级农艺师, 主要从事玉米品种选育及推广工作。(E-mail) hlhua@yzu.edu.cn

通讯作者: 卞云龙, (E-mail) ylbian@yzu.edu.cn

ship with the kernel filling rate, with the increase of grain filling rate, the sugar content of stem decreased. When the consumption of the stalk sugar was in maximum value, the filling rate of kernels was basically at its peak value.

Key words: maize; kernels at different positions on an ear; grain filling rate; stalk sugar content

玉米是中国种植面积大、总产量高的粮饲作物。玉米产量主要取决于单位面积籽粒数量和粒质量^[1],粒质量因其在穗上着生位置的不同而有较大差异。一般来说,着生在果穗下部和中部的籽粒充实好,粒质量高,称之为强势粒;着生在果穗上部的籽粒充实差,粒质量低,称之为弱势粒^[2-3];果穗上部籽粒还会退化^[4],形成秃顶。关于弱势粒灌浆差的原因,水稻上已有大量研究,也存在多种解释,包括源限制^[5-6]、库容限制^[7-8]、库活性低^[9-10]和同化物运输不畅^[11-12]等,其机理仍不完全清楚。玉米籽粒灌浆的粒位效应前人多从籽粒生长发育^[3,13]、氮肥运筹^[14-16]、籽粒物理性状^[17]、激素^[2,18]、密度^[19-20]及基因型^[21-22]等方面进行研究。蔗糖是重要的光合产物,是植物体内运输的主要物质,也是茎秆糖分的主要成分^[23-24]。光合产物需要不断通过茎秆向玉米籽粒运输,才能完成籽粒灌浆、干物质积累等过程。目前,关于玉米茎秆糖分含量与籽粒灌浆关系鲜有报道。本试验以先玉 335 和郑单 958 及其亲本为材料,研究玉米不同粒位籽粒灌浆特性,并探讨灌浆速率与茎秆糖分的关系,旨在进一步解析玉米籽粒灌浆机理,为提高玉米产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以先玉 335 和郑单 958 杂交种及其亲本为试验材料,2015–2016 年供试品种的主要生育时期见表 1。

1.2 种植方法

于 2015 年 7 月、2016 年 7 月将先玉 335 和郑单 958 杂交种及其亲本共 6 份试验材料播于扬州大学实验农牧场的玉米试验田中,采用随机区组设计,2 次重复,每份材料每个重复种植 6 行,每行 10 株,行距 0.60 m,株距 0.25 m,试验田前茬为空茬,沙壤土,地力中等,施纯氮 241.5 kg/hm²,苗期防治地老虎,大喇叭口期防治玉米螟,其他田间管理措施同一般大田。

1.3 取样方法

选取长势相对整齐一致的单株 40 株(行首和行尾的植株除外),挂牌并记载相关生育期(抽雄期、散粉期、吐丝期),吐丝前统一套硫酸纸袋隔离;全部采用人工自交授粉,每个材料在同一天进行饱和授粉,确保各果穗结实粒数基本一致,对不同材料授粉日期进行记录,以便记录取样时间。

表 1 主要生育时期

Table 1 The growth stages of the tested varieties

年份	材料	播种期 (月-日)	抽雄期 (月-日)	散粉期 (月-日)	吐丝期 (月-日)
2015	郑单 958	07-13	09-03	09-05	09-04
	郑 58	07-13	09-06	09-10	09-09
	昌 7-2	07-13	09-08	09-11	09-12
	先玉 335	07-13	09-05	09-05	09-04
	PH6WC	07-13	09-07	09-11	09-12
	CPH4CV	07-13	09-08	09-10	09-10
2016	郑单 958	07-11	08-31	09-02	09-02
	郑 58	07-11	09-04	09-07	09-08
	昌 7-2	07-11	09-05	09-10	09-12
	先玉 335	07-11	09-02	09-09	09-08
	PH6WC	07-11	09-04	09-08	09-08
	CPH4CV	07-11	09-07	09-10	09-11

1.4 灌浆速率与脱水速率测定

在每个供试材料各自授粉后的第 10 d、20 d、30 d、40 d 和 50 d 分别取样,每次选取 8 个长势一致的果穗。早上 7:00–8:00 取样,迅速脱粒。

按籽粒粒位分别取上部 3~10 环籽粒(从果穗最顶端数起),中部 13~22 环(从果穗最下部数起)和下部 8~12 环籽粒(从果穗最下部数起)分别为上部样粒、中部样粒、下部样粒。各部位样粒混匀后随机选出 50(自交系)或 100(杂交种)粒称鲜质量。迅速将鲜质量材料转入 105℃ 烘箱 30 min,然后 80℃ 烘干至恒质量,测干质量。

1.5 茎秆糖分含量测定

当日用于测定籽粒灌浆速率与脱水速率的植株去掉叶片、叶鞘及雄穗等,用榨汁机(恒联 TYZ-8.0)分别榨出每个植株的全茎秆汁液于培养皿中,充分混合后,微量移液器吸取 100 μl,用手持测糖仪(PAL-1,日本生产)测定糖分含量。为了降低测糖仪的测定误差,每次每个植株茎秆汁液重复测定 3 次,取其平均值作为该植株的茎秆汁液糖分含量。

1.6 计算公式:

籽粒灌浆速率=(后 1 次取样百粒干质量-前 1 次取样百粒干质量)/取样间隔。

籽粒含水率=(百粒鲜质量-百粒干质量)/百粒鲜质量×100%。

籽粒含水量是指每 100 粒玉米中水分的质量。

茎秆糖分消耗量 = 前后 10 d 茎秆含糖量之差的绝对值。

1.7 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理、作图, 用 SPSS16.0 版软件进行数据统计与分析。两年数据趋势一致, 数据分析以 2015 年为主, 部分数据为 2015 年和 2016 年平均值。

2 结果与分析

2.1 茎秆糖分含量变化

2 个杂交种及其亲本授粉后 10 d 至 50 d 茎秆含糖量整体都呈下降趋势, 亲本自交系茎秆含糖量普遍高于其杂交种; 先玉 335(图 1) 和郑单 958(图 2) 2 个杂交种茎秆含糖量下降趋势基本相似, 但先玉 335 从授粉 20 d 至 30 d 茎秆含糖量下降幅度较郑单 958 大, 这可能与先玉 335 灌浆特性有关。2 个杂交种亲本的茎秆含糖量下降速率有较大差异, 先玉 335 的 2 个亲本 PH6WC 和 CPH4CV 下降缓慢, 相比而言郑单 958 的 2 个亲本郑 58 和昌 7-2 下降较快。

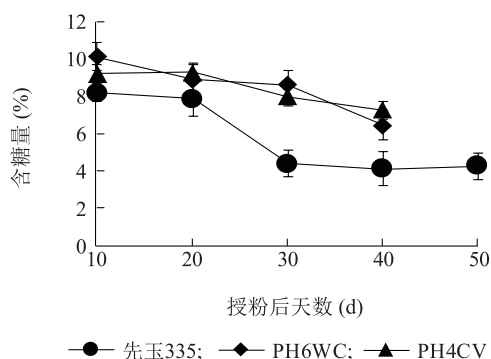


图 1 先玉 335 及其亲本不同测定时期茎秆含糖量变化

Fig.1 Stalk sugar content of Xianyu 335 and the parent in different measurement stage

2.2 不同粒位籽粒灌浆动态

不同粒位(上、中、下)籽粒灌浆速率在灌浆初期差异很小, 随着灌浆期的延长差异渐大, 但中部、下部粒位籽粒灌浆速率差异仍然较小, 在灌浆速率达到峰值时, 上部与中部、下部籽粒灌浆速率差异达最大(图 3)。从图 3 可以看出, 授粉后 30 d 杂交种灌浆速率达到高峰期, 亲本自交系(PH4CV 除外)灌浆速率高峰期早于杂交种。高峰期前后果穗不同粒位籽粒灌浆速率表现不同, 高峰期及之前杂交种和亲本自交系灌浆速率基本表现为下部籽粒>中部籽

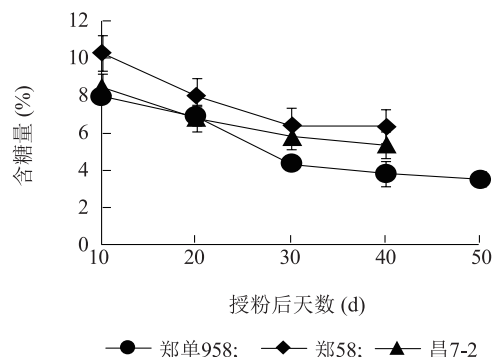


图 2 郑单 958 及其亲本不同测定时期茎秆含糖量变化

Fig.2 Stalk sugar content of Zhengdan 958 and the parent in different measurement stage

粒>上部籽粒; 高峰期结束后, 中部籽粒灌浆速率较下部高, 上部籽粒灌浆速率仍然最低。供试材料先玉 335、PH4CV 及郑 58 果穗上部籽粒灌浆速率在灌浆后期仍然呈现上升趋势。据此, 作者认为如果栽培措施得当, 生育后期进一步增加果穗上部籽粒粒质量是可能的。

灌浆速率存在粒位效应, 同时也存在基因型差异。自交系 PH4CV 不同粒位籽粒灌浆速率从授粉后 10~40 d 均呈现上升趋势, 而其他供试材料籽粒灌浆速率基本都表现低-高-低的变化趋势。自交系 PH4CV 的籽粒灌浆特性对其杂交种先玉 335 果穗上部籽粒灌浆速率持续上升应该是有作用的。尽管郑单 958 母本郑 58 果穗顶部(上部)灌浆速率趋势与先玉 335 父本 PH4CV 相似, 但其中部、下部籽粒灌浆速率在达峰值后呈现快速下降, 上部虽有上升但不足以抵消整体下降趋势, 可能与郑单 958 果穗上部籽粒灌浆速率也表现慢-快-慢有关。要保持杂交种上部籽粒在后期仍有高的灌浆速率, 至少一个亲本整体籽粒灌浆速率在后期要有此特性。

2.3 不同粒位籽粒水分动态

授粉后 10~50 d, 6 个供试材料果穗不同粒位籽粒含水量都表现为下部>中部>上部, 但中、下部差异较小(图 4); 中、下部籽粒含水量在授粉后 20 d 达峰值, 上部籽粒含水量峰值出现时间供试材料间有差异, 2 个杂交种上部籽粒含水量在授粉后 30 d 达峰值, 自交系 PH6WC 和昌 7-2 上部籽粒含水量达峰值时间与杂交种相同, 另外 2 个自交系(PH4CV、郑 58)上部籽粒含水量则是在授粉后 10 d 最高。随着籽粒灌浆期的延长, 籽粒含水量在达峰值后, 均呈现下降趋势(图 4)。

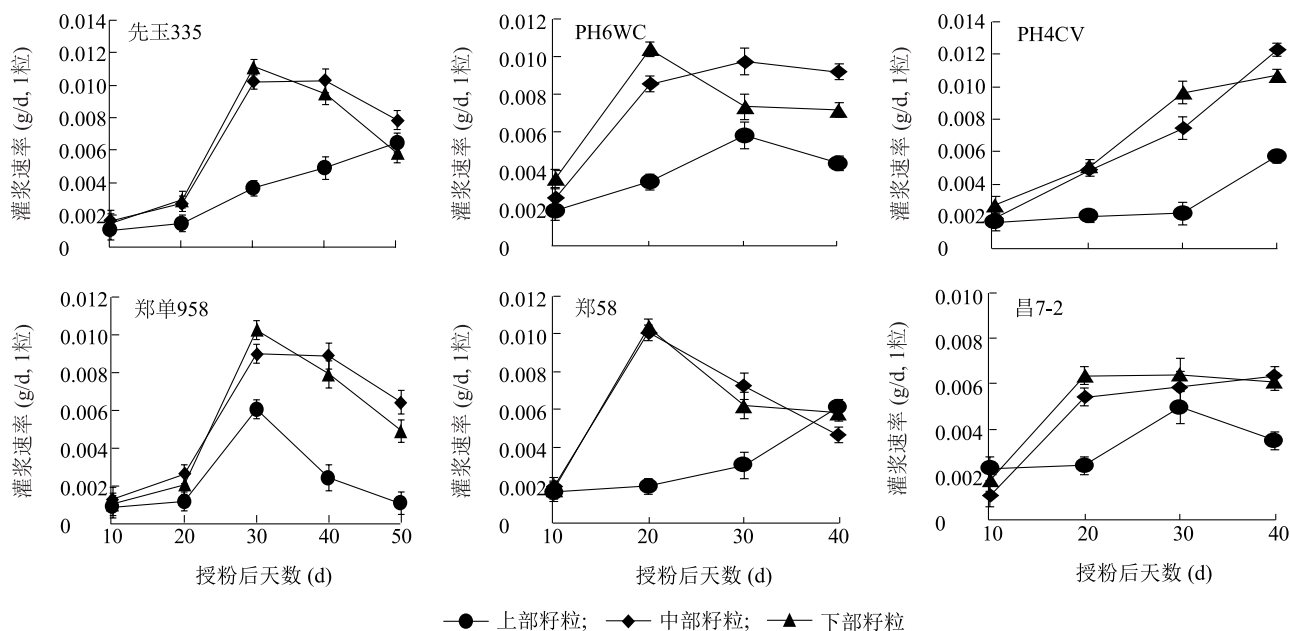


图3 不同粒位籽粒灌浆速率

Fig.3 Grain filling rate at different grain positions of maize ear

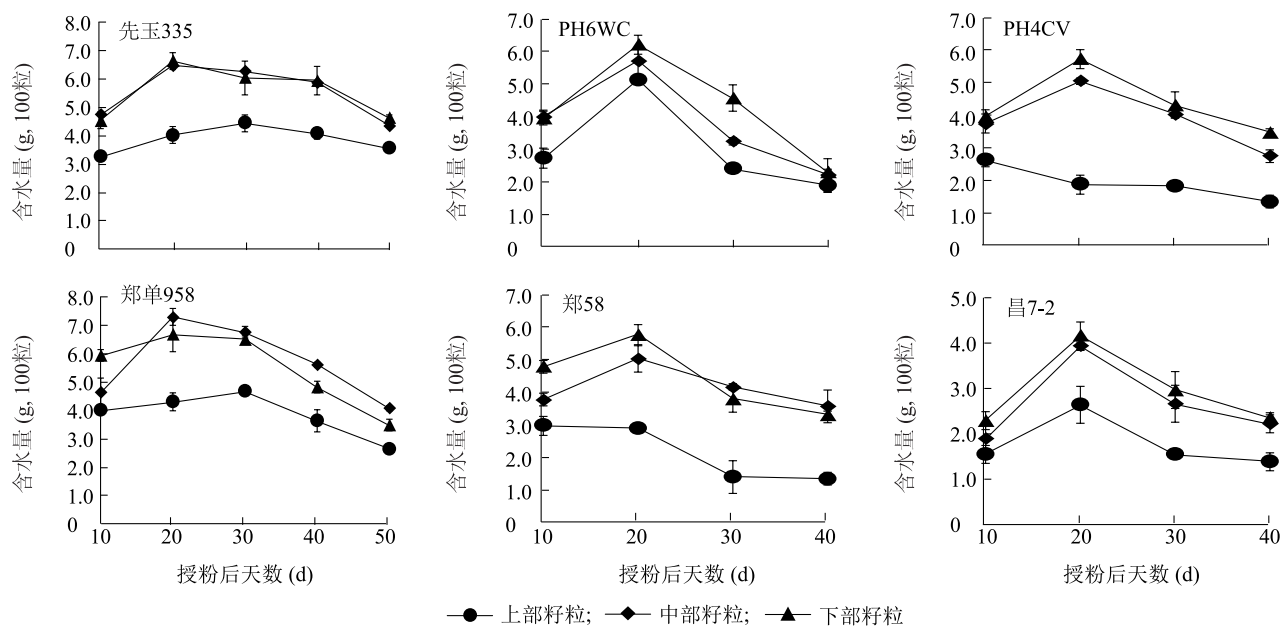


图4 不同粒位籽粒含水量

Fig.4 Grain moisture content at different grain positions of maize ear

从图5可以看出,无论是杂交种还是自交系果穗不同粒位籽粒含水率从授粉后10~50 d变化趋势一致,第一次取样(授粉后10 d)籽粒含水率最高,然后逐渐下降。相对来说,授粉后10 d中、下部籽粒含水率比上部高,随着籽粒干物质的不断积累,3个粒位籽粒含水率相近。先玉335在授粉30 d后籽粒含水率下降速度快于郑

单958。

籽粒含水量是籽粒水分的绝对量,籽粒含水率是籽粒水分的相对量,2者变化趋势不同,籽粒含水量在授粉后20 d出现峰值。玉米授粉后15~20 d为籽粒形成期,籽粒体积增加很快,干物质积累较少,含水量迅速上升。因此,研究结果符合玉米籽粒的形成与充实特性。

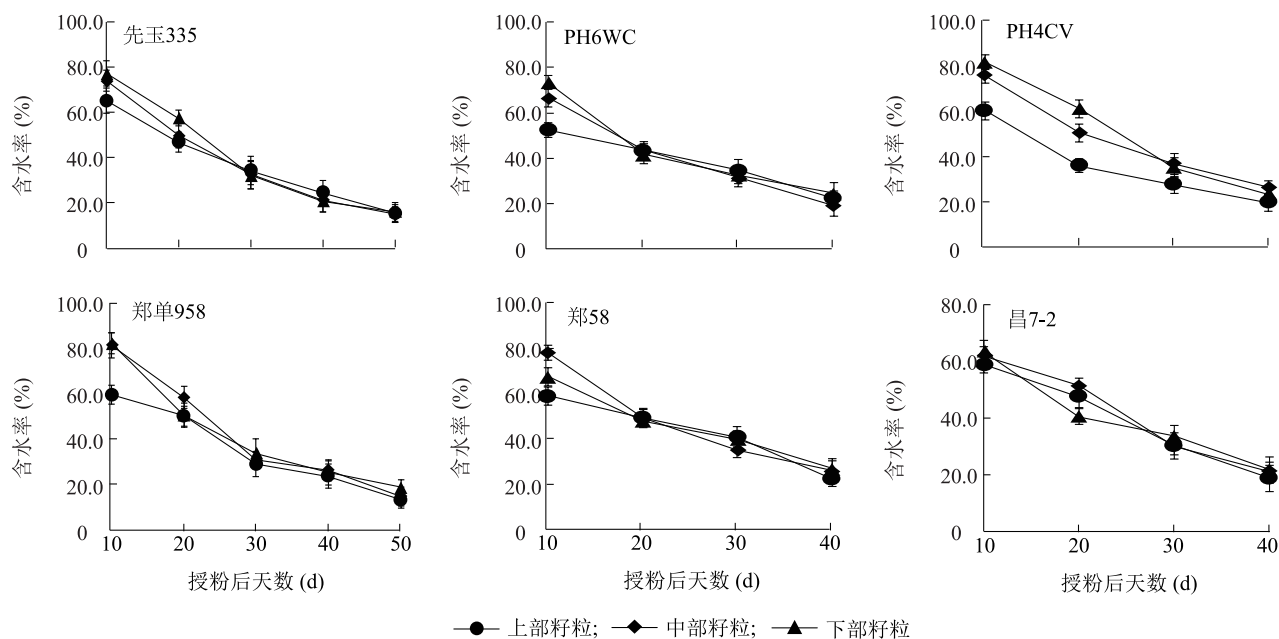


图5 不同粒位籽粒含水率

Fig.5 Grain moisture content percentage at different grain positions of maize ear

2.4 茎秆糖分含量与籽粒灌浆速率关系

蔗糖是重要的光合产物,是植物体内运输的主要物质,也是茎秆糖分的主要成分^[23]。玉米茎秆是叶片光合产物向籽粒运输的主要通道,茎秆糖分含量与籽粒灌浆速率的关系值得关注。授粉后 10 d 是玉米籽粒形成期,干物质积累较少,茎秆糖分含量处于高水平阶段。随着籽粒灌浆速率提高,茎秆糖分含量呈下降趋势(图 1、图 2、图 3)。在茎秆糖分消耗量与灌浆速率关系方面,2 个杂交种先玉 335 和郑单 958 表现一致(图 6),授粉后 30 d 籽粒灌浆速率最高,茎秆糖分消耗量也最大。与郑单 958 相比,先玉 335 授粉后 30~50 d 茎秆糖分含量没有下降且相对稳定(图 1),对先玉 335 在后期(30~50 d)仍有较高的灌浆速率是有利的。4 个自交系茎秆糖分与灌浆速率关系表现不一致(图 6),除了 PH4CV,其他 3 个自交系茎秆糖分消耗量最大时,灌浆速率基本上也达最高值。相比而言,先玉 335 的 2 个亲本(PH6WC, PH4CV)后期茎秆糖分消耗量较高,可能与籽粒灌浆速率下降缓慢有关。

郑单 958 父母本的茎秆糖分消耗量在 20 d、30 d 达到最大,郑单 958 的茎秆糖分消耗量在 20 d、30 d 也达到最大(图 6,表 2),说明杂交种的茎秆糖分消耗量与父母本存在一定联系。

3 讨论

玉米是中国第一大粮饲作物,玉米高产是一个永恒的话题。Johnson 等^[25]和 Engledow 等^[26]把产量分解为几个构成因素:产量=穗数×穗粒数×粒质量。在农业生产中,这 3 个产量构成因素中的穗数和穗粒数是相对容易调整的^[27],增密增产的理念已经得到广泛应用。在黄淮海地区,夏玉米灌浆时间短,灌浆期阴雨寡照天气多,另外农民还有早收的习惯,粒质量不稳成为黄淮海地区夏玉米产量出现年际间大幅度波动的主要原因^[28]。因此应把提高粒质量作为玉米超高产研究的主攻方向。

玉米粒质量因其在穗上着生位置的不同而有较大差异。一般来说,着生在果穗下部和中部籽粒充实好、粒质量高,称之为强势粒;着生在果穗上部的籽粒充实差、粒质量低,称之为弱势粒^[2]。玉米不同粒位籽粒灌浆速率存在粒位效应^[14,29-30];本研究结果表明,灌浆速率的粒位效应在灌浆速率峰值前后有差异,峰值期及之前 2 个杂交种(先玉 335、郑单 958)和亲本自交系灌浆速率基本表现为下部籽粒>中部籽粒>上部籽粒;高峰期结束后,中部籽粒灌浆速率较下部高,上部籽粒灌浆速率仍然最低。顶部小花分化发育晚,花丝抽出迟,在自然传粉情况

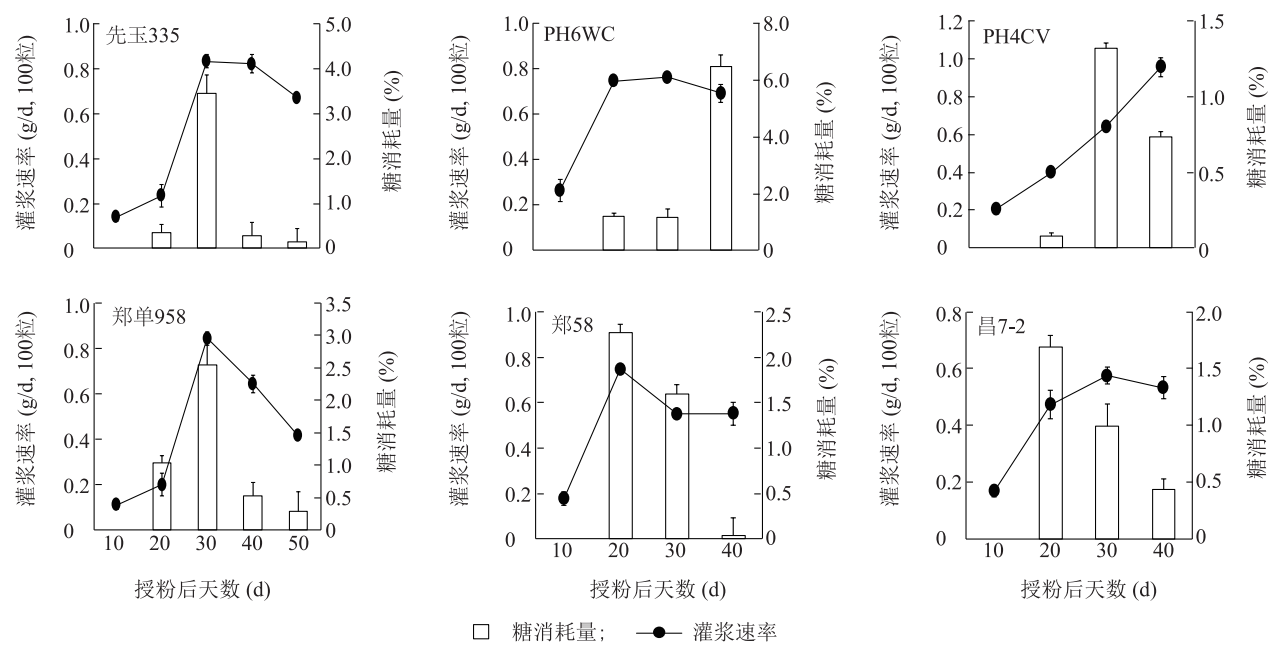


图 6 茎秆糖分消耗量与籽粒灌浆速率的关系
Fig.6 The relations between grain filling rate and stalk sugar consumption

表 2 不同籽粒灌浆时期茎秆糖分消耗量
Table 2 Stalk sugar consumption of different maize varieties at grain filling stage

供试材料	性 状	授粉后天数(d)				
		10	20	30	40	50
先玉 335	灌浆速率(g/d, 100 粒)	0.14	0.24	0.83	0.82	0.67
	糖分消耗量 (%)		0.34	3.46	0.29	0.14
PH6WC	灌浆速率(g/d, 100 粒)	0.26	0.74	0.76	0.69	
	糖分消耗量 (%)		1.21	1.16	6.46	
PH4CV	灌浆速率(g/d, 100 粒)	0.21	0.40	0.64	0.96	
	糖分消耗量 (%)		0.08	1.32	0.73	
郑单 958	灌浆速率(g/d, 100 粒)	0.11	0.20	0.84	0.64	0.42
	糖分消耗量 (%)		1.04	2.54	0.53	0.29
郑 58	灌浆速率(g/d, 100 粒)	0.18	0.75	0.55	0.55	
	糖分消耗量 (%)		2.27	1.60	0.03	
昌 7-2	灌浆速率(g/d, 100 粒)	0.17	0.47	0.57	0.53	
	糖分消耗量 (%)		1.69	0.99	0.43	

下授粉受精晚,中下部小花的早受精子房对顶部小花有库位抑制作用^[31-32]。本研究采用人工同步授粉的方法,排除授粉受精早晚对顶部小花发育的影响,但上部籽粒灌浆速率仍然处于劣势状态。上部籽粒的糖分(光合产物)供应不足,导致上部籽粒物质积累较低^[29],同化物的供应不均衡可能是导致顶

部与中下部籽粒发育差异的一个重要原因^[14]。本研究发现,不同材料后期籽粒灌浆速率下降趋势不同,作者认为后期仍有较高的灌浆速率或灌浆速率下降缓慢(如 PH4CV)对提高上部籽粒粒质量是有利的。玉米果穗一般呈圆筒型或圆锥型,上部直径总是小于中下部,玉米果穗籽粒分布几何空间也影

响了上部籽粒库容(籽粒体积);Tollenaar 等^[4]研究也认为库容是导致上部籽粒干物质积累慢的主要原因,选育圆筒型果穗玉米品种有利于提高果穗上部籽粒粒质量。粒质量是玉米产量的重要组成部分,籽粒充实的优劣直接关系到粒质量和产量的高低,加强玉米弱勢粒(上部籽粒)灌浆特征及机理研究非常重要。

玉米粒质量与淀粉的积累密切相关。可溶性糖总含量(蔗糖和还原糖)的高低对于淀粉的积累具有决定性的意义。申丽霞等^[14]研究结果表明顶部籽粒蔗糖、总糖含量均明显低于中下部籽粒,且总糖含量与灌浆速率的下降相一致,说明同化物的供应不均衡是导致顶部与中下部籽粒发育差异的一个重要原因。华鹤良等^[33]研究认为玉米茎秆糖分含量不同生育时期的变化趋势与籽粒灌浆速率、光合产物合成量及植株自身消耗量等因素相关。玉米茎秆糖分是籽粒灌浆的重要物质来源,本研究中茎秆糖分消耗量最大时,籽粒灌浆速率基本上处于峰值,2个杂交种表现尤为明显。当然玉米抽雄开花后茎秆糖分除了供给果穗籽粒灌浆,还要参与植株自身的代谢活动,生育后期的植株早衰、贪青晚熟等现象都与茎秆糖分的积累、消耗有关。玉米茎秆糖分是玉米整个生长过程中光合产物积累的结果,本研究中自交系 PH4CV 茎秆糖分消耗处于峰值时,籽粒灌浆速率只有每百粒籽粒每天 0.64 g,相对较低,可能其茎秆糖分消耗用于其他器官的生长发育。

郑单 958 和先玉 335 是目前中国种植面积较大的玉米品种,且生育期相近,但收获时籽粒含水率差别显著且籽粒脱水速率存在较大差异^[34]。在本研究中,先玉 335 授粉后 30 d、40 d 和 50 d 的籽粒含水率分别为 33.0%、22.1%和 15.6%;郑单 958 授粉后 30 d、40 d 和 50 d 的籽粒含水率分别为 31.1%、25.0%和 15.5%。依据田间实际成熟情况,2个杂交种在授粉后 40 d 处于生理成熟期,说明先玉 335 生理成熟时籽粒含水率明显低于郑单 958。早期较大的生理脱水速率使先玉 335 生理成熟时的籽粒含水率显著低于郑单 958。宋朝玉等^[35]比较先玉 335 和郑单 958 的脱水过程,先玉 335 比郑单 958 籽粒脱水快的优势在于其前期脱水快,并认为选育快速脱水品种应注重前期脱水强度的选择。

参考文献:

[1] CHAPMAN S C, EDMANDES G O. Selection improves drought

tolerance in tropical maize populations; II. Direct and correlated responses among secondary traits[J]. Crop Sci, 1999, 39: 1315-1324.

- [2] 徐云姬,顾道健,张博博,等. 玉米果穗不同部位籽粒激素含量及其与胚乳发育和子粒灌浆的关系[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1452-1461.
- [3] CHEN Y J, HOOGENBOOM G, MA Y T, et al. Maize kernel growth at different floret positions of the ear[J]. Field Crops Res, 2013, 149: 177-186.
- [4] TOLLENAAR M, DAYNARD T B. Dry weight, soluble sugar content, and starch content of maize kernels during the early postsilking period[J]. Can J Plant Sci, 1978, 58: 199-206.
- [5] WANG Y. Effectiveness of supplied nitrogen at the primordial panicle stage on rice characteristics and yields[J]. Int Rice Res Newsl, 1981, 6: 23-24.
- [6] MURTY P S S, MURTY K S. Spikelet sterility in relation to nitrogen and carbohydrate contents in rice[J]. Indian J Plant Physiol, 1982, 25: 40-48.
- [7] KATO T. Effect of spikelet removal on the grain filling of Akenohoshi, a rice cultivar with numerous spikelets in a panicle[J]. J Agric Sci, 2004, 142: 177-181.
- [8] YANG J, ZHANG J, WANG Z, et al. Post-anthesis development of inferior and superior spikelets in rice in relation to abscisic acid and ethylene[J]. Exp Bot, 2006, 57: 149-160.
- [9] NAKAMURA Y, YUKI K, PARK S Y. Carbohydrate metabolism in the developing endosperm of rice grains[J]. Plant Cell Physiol, 1989, 30: 833-839.
- [10] ISHIMARU T, HIROSE T, MATSUDA T, et al. Expression patterns of genes encoding carbohydrate-metabolizing enzymes and their relationship to grain filling in rice (*Oryza sativa* L.): comparison of caryopses located at different positions in a panicle[J]. Plant Cell Physiol, 2005, 46: 620-628.
- [11] 黄升谋,邹应斌,刘春林. 杂交水稻两优培九强、弱勢粒结实生理研究[J]. 作物学报, 2005, 31(1): 102-107.
- [12] XIAO D X, PAN X H, SHI Q H. A preliminary study on the vascular bundle characters and its relation to the filled-grain rate in two lines hybrid rice (F_1) [J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 1993, 15(S2): 50-55.
- [13] TOLLENAAR M, DAYNARD T B. Kernel growth and development at two positions on the ear of maize (*Zea mays*) [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1978, 58: 189-197.
- [14] 申丽霞,王璞,张红芳,等. 施氮对夏玉米不同部位籽粒灌浆的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(4): 532-534.
- [15] 吕静瑶,申丽霞,晁晓乐. 施氮对不同氮效率玉米籽粒碳代谢的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 64-68.
- [16] 杨升辉,杨恒山,李洪杰,等. 不同氮肥运筹下春玉米籽粒灌浆特性的分析[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 91-95.
- [17] 张丽,张吉旺,周伟,等. 玉米不同粒位籽粒容重与籽粒物理性状的相关分析[J]. 玉米科学, 2015, 23(2): 64-68.
- [18] 李东,郑殿峰,冯乃杰,等. 植物生长调节剂对玉米籽粒形态

- 及鲜重产量的影响[J].南方农业学报,2016,47(8):1285-1289.
- [19] 王晓燕,张洪生,盖伟玲,等. 种植密度对不同玉米品种产量及籽粒灌浆的影响[J]. 山东农业科学,2011(4):36-38.
- [20] 刘娟,董树亭,刘鹏,等. 增密与施氮对不同耐密型玉米产量及籽粒灌浆特性的影响[J].山东农业科学,2017,49(1):38-47.
- [21] 张海艳,董树亭,高荣岐. 不同类型玉米籽粒灌浆特性分析[J]. 玉米科学,2007,15(3):67-70.
- [22] 岳海旺,陈淑萍,彭海成,等. 玉米籽粒灌浆特性品种间比较[J].江苏农业学报,2016,32(5):1043-1048.
- [23] BIAN Y L, YAZAKI S J, INOUE M K, et al. QTLs for sugar content of stalk in sweet sorghum (*sorghum bicolor* L. moench) [J]. Agricultural Sciences In China, 2006, 5(10):736-744.
- [24] 史建国,崔海岩,赵斌,等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J].中国农业科学,2013,46(21):4427-4434.
- [25] JOHNSON D R, TANNER J W. Comparisons of corn (*Zea mays* L.) inbreds and hybrids grown at equal leaf area index, light penetration and population[J].Crop Sci, 1972, 12: 482-485.
- [26] ENGLENDOW L, WADHAM M. Investigation on yield in the cereal, Part I [J]. J Agric Sci (Camb), 1923, 13(1): 390-439.
- [27] 曹承富,汪芝寿,孔令聪. 氮肥运筹对夏玉米产量及籽粒灌浆的影响[J].安徽农业科学,1993,21(3):236-240.
- [28] 王云奇,陶洪斌,王璞,等. 施氮模式对夏玉米产量和籽粒灌浆的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(12):1594-1598.
- [29] 乔江方,李川,刘京宝,等. 夏玉米籽粒含水率和籽粒灌浆的粒位差异及其关系研究[J].玉米科学,2016,24(1):56-62.
- [30] 闫淑琴,苏俊,李春霞,等. 玉米籽粒灌浆、脱水速率的相关与通径分析[J].黑龙江农业科学,2007(4):1-4.
- [31] OTEGUI M E, ANDRADE F H, SUERO E E. Growth, water use and kernel abortion of maize subjected to drought at silking[J]. Field Crops Res, 1995, 40:87-94.
- [32] JORDELINA C, MARTIN U, LUCAS B, et al. Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize [J]. Crop Sci, 2000, 40:1056-1061.
- [33] 华鹤良,赵青,周宇,等. 玉米棒三叶光合性状对茎秆糖含量的影响[J]. 玉米科学,2016,24(3):92-98.
- [34] BORRÁS L, SLAFER G A, OTEGUI M E. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal [J]. Field Crops Res, 2004, 86: 131-146.
- [35] 宋朝玉,朱丕生,高峻岭,等. 玉米籽粒脱水评价指标与收获期判断标准的辨析[J]. 山东农业科学,2015,47(8):20-24.

(责任编辑:陈海霞)