

高产玉米‘郑单958’和‘先玉335’的灌浆和叶片光合特性的比较

齐琦*, 胡凯*, 张敖, 吕江博, 崔震海, 阮燕晔, 朱延姝, 张立军**

沈阳农业大学生物科学技术学院, 沈阳110866

摘要: 本实验以玉米高产品种‘郑单958’和‘先玉335’为材料, 测定在45 000株·hm⁻² (低密度)和75 000株·hm⁻² (高密度)下灌浆期的百粒重、叶面积指数、比叶重、叶绿素和类胡萝卜素含量、光合速率、叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的变化。结果表明, 在低密度下, ‘郑单958’灌浆期的叶面积指数大于‘先玉335’, 但百粒重、比叶重、叶绿素含量和光合速率低于‘先玉335’; 在高密度下‘郑单958’灌浆期的叶面积指数、百粒重、比叶重、叶绿素含量和光合速率都低于‘先玉335’; 密度增大对‘郑单958’灌浆和光合能力的影响大于‘先玉335’; 灌浆前期的物质积累速率对籽粒的增重更为重要, 其与同期的叶面积指数、比叶重和光合速率相关; 在灌浆期, 两个品种的叶绿素荧光参数 F_v/F_m 没有明显的差异; 灌浆期的比叶重与籽粒灌浆能力、叶片光合速率和叶绿素含量有良好的一致性。

关键词: 玉米; 百粒重; 叶面积; 比叶重; 类胡萝卜素; 叶绿素荧光参数

Comparion of Grain Filling and Leaf Photosynthetic Characteristics in High-Yield Maize ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’

QI Qi*, HU Kai*, ZHANG Ao, LÜ Jiang-Bo, CUI Zhen-Hai, RUAN Yan-Ye, ZHU Yan-Shu, ZHANG Li-Jun**

Biotechnology and Bioscience College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: In this experiment, high-yield maize hybrids ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ were planted under 45 000 plants·hm⁻² (low density) and 75 000 plants·hm⁻² (high density). During the grain-filling stage, the changes in the weights per 100 kernels, leaf area index, specific leaf weights, chlorophyll and carotenoid contents, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence parameter F_v/F_m were measured. The results showed that, in low density, leaf area index of ‘Zhengdan 958’ was higher than that of ‘Xianyu 335’, but the weights per 100 kernels, specific leaf weights, chlorophyll contents and photosynthetic rates of ‘Zhengdan 958’ were lower than those of ‘Xianyu 335’ during the grain-filling stage. In high density, leaf area index, the weights per 100 kernels, specific leaf weights, chlorophyll contents and photosynthetic rates of ‘Zhengdan 958’ were lower than those of ‘Xianyu 335’. The increase of plant density imposed greater effect on the grain filling and leaf photosynthetic characteristics in ‘Zhengdan 958’ than in ‘Xianyu 335’. The accumulation rate of assimilates at the earlier stage of grain filling was more important to the final weight of kernels. The assimilate accumulation rate was related to leaf area index, specific leaf weight and photosynthetic rate. There was no significant difference in chlorophyll fluorescence parameter F_v/F_m of the grain-filling stage between the two hybrids. The specific leaf weight of the grain-filling stage had a good correlation with the grain filling capacity, photosynthetic rate and chlorophyll content.

Key words: maize (*Zea mays*); weight per 100 kernels; leaf area; specific leaf weight; carotenoid; chlorophyll fluorescence parameters

获得高额和稳定的玉米籽粒产量一直是育种工作者追求的目标, 然而, 玉米籽粒产量表现受复杂生理过程和发育特性的影响(Luque等2006; 常建智等2011; Antonietta等2014)。虽然目前在玉米高产生理方面的研究取得了一些进展(Ciampitti等2012; Santiago等2013; Radenovich等2014), 但是, 尚不能提出直接指导高产育种实践的综合生理指

收稿 2015-04-03 修定 2015-08-11

资助 国家自然科学基金面上项目(31370283)、辽宁省科技厅科技攻关重大项目(01132412001)、教育部博士点基金博导类(20102103110001)、国家自然科学基金(31201141)和中国博士后科学基金面上项目(2014M561097)。

* 共同第一作者。

** 通讯作者(E-mail: lijunzhang8@aliyun.com; Tel: 024-88490080)。

标体系。因此,加强玉米高产品种的生理解析将有助于玉米高产机制的阐明。‘郑单958’和‘先玉335’是中国目前播种面积大、稳产性强的两个重要玉米品种。这两个品种虽然分布地域和产量水平相近,但在倒伏(刘武仁等2014)、光合作用、叶片衰老(黄智鸿等2008)、籽粒灌浆(黄智鸿等2007)、籽粒含水量和物质积累(白志英等2010)等生理特性方面存在明显差异。譬如,‘郑单958’叶片持绿时间长、籽粒灌浆持续时间长,籽粒成熟时含水量高(王春虎等2009);‘先玉335’叶片后期失绿早、籽粒灌浆前期快,籽粒成熟时含水量低。这两个品种对强光和弱光的适应也存在差异(张善平等2014)。光合作用是作物生长和产量形成的物质来源,与叶片衰老、籽粒灌浆和倒伏等生理特性密切相关(Zhu等2010; Evans 2013; Reynolds等2013)。然而,尚未见两个品种在灌浆特性和灌浆期叶片光合特性详细比较研究。本试验以‘郑单958’和‘先玉335’为材料,测定两个密度下灌浆期百粒重、叶面积指数、比叶重、光合色素含量、光合速率和叶绿素荧光参数的变化,比较两个品种的灌浆特性和光合特性差异,以期在光合作用方面为玉米高产育种提供思路和理论依据,为玉米高产种质资源的筛选提供参考指标。

材料与方 法

1 材料种植和处理

实验于2014年在沈阳农业大学实验基地进行。玉米(*Zea mays* L.)杂交种‘郑单958’和‘先玉335’于5月4日播种,9月27日收获,种植密度为45 000株·hm⁻²(低密度)和75 000株·hm⁻²(高密度)。采取裂区设计,3次重复,每小区种植36行,行距为60 cm,面积为70 m²。在孕穗期从每个小区中部选取生长一致的植株挂牌标记,在吐丝前套袋,7月25日统一摘袋授粉。

2 测定指标和方法

授粉后20 d开始每隔10 d取有代表性的5株,取果穗中部100粒,烘干称重,计算百粒重。

在每个小区选取生长一致的5株玉米,从授粉开始每10 d测量单株叶面积(长×宽×0.75),计算叶面积指数。叶面积指数=玉米单株叶面积×单位土地面积上玉米株数/单位土地面积。

在每个小区选取生长一致的5株玉米,从授粉开始每10 d在穗位叶打取直径为2 cm的叶圆片20个,110 °C杀青15 min,80 °C烘干至恒重,称重,计算比叶重。比叶重(g·m⁻²)=叶总干重/叶总面积。

在每个小区选取生长一致的5株玉米,从授粉开始每10 d在穗位叶打取叶圆片,依Arnon (1949)法测定叶绿素含量和类胡萝卜素含量。

在每个小区选取生长一致的5株玉米,从授粉开始每10 d在10~14点之间用CIRAS-1便携式光合仪测量穗位叶光合速率,用英国汉莎公司的Hand-PEA植物效率仪(饱和脉冲光的光强为μmol·m⁻²·s⁻¹,持续时间为1 s)测定叶绿素荧光参数(F_v/F_m)。

实验结果

1 ‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期百粒重的变化

如图1所示,‘郑单958’和‘先玉335’的籽粒灌浆过程可分为两个阶段。第1个阶段从授粉开始至授粉后40 d,百籽粒增重迅速。在授粉后第40天,在低和高两个密度下,‘郑单958’的百粒重分别达到31.7和25.7 g,‘先玉335’的百粒重分别达到32.7和29.3 g。灌浆的第2个阶段从授粉第40天开始至灌浆结束(第60天)。在这个阶段,低和高两个密度下,‘郑单958’的百粒重分别增加11.7%和31.0%,‘先玉335’的百粒重增加16.8%和21%。从数据中可以发现,增大种植密度显著降低第1个阶段的籽粒灌浆速率,而且,密度的抑制效应主要发生在授粉后的20~40 d期间。在授粉后第20天,在低和高两个密度下,‘郑单958’的百粒重分别达到9.1和10.1 g,‘先玉335’的百粒重分别达到11.4和14.7 g,在不同密度之间没有表现出规律性的差异。而从授粉的第20~40 d,在低和高两个密度下,‘郑单958’的百粒重分别增加249%和152%,‘先玉335’的百粒重增加187%和99%。在灌浆前期百粒重的增加速率都随密度的增加而下降。就品种而言,在本实验的土壤和气候条件下,‘郑单958’前期灌浆速率受密度增加的影响,下降的幅度大于‘先玉335’。

2 ‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期叶面积指数的变化

‘郑单958’和‘先玉335’的籽粒灌浆期叶面积变化过程也可分为两个阶段(图2)。第1个阶段从授粉开始至授粉后40 d,叶面积比较稳定。在低、高密

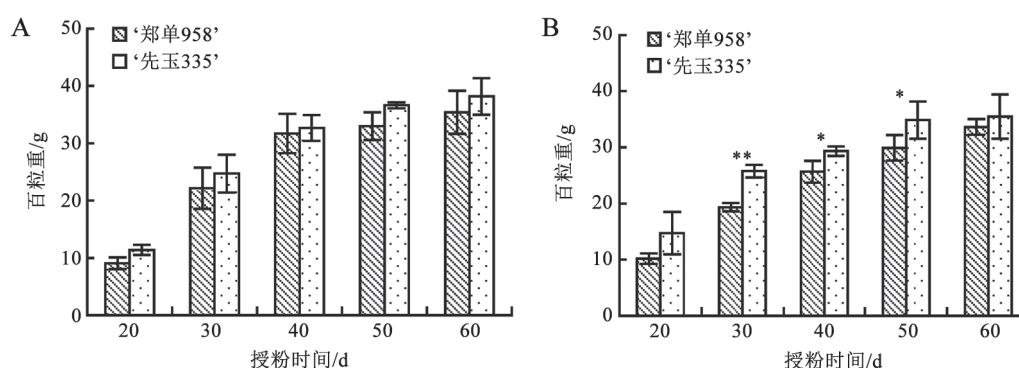


图1 不同栽培密度下‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期百粒重的变化

Fig.1 Changes of weight per 100 kernels in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ of different cultivation densities during grain filling stage
A: 45 000株·hm⁻²; B: 75 000株·hm⁻². *: 不同品种间差异显著($P<0.05$), **: 不同品种间差异极显著($P<0.01$); 下图同此。

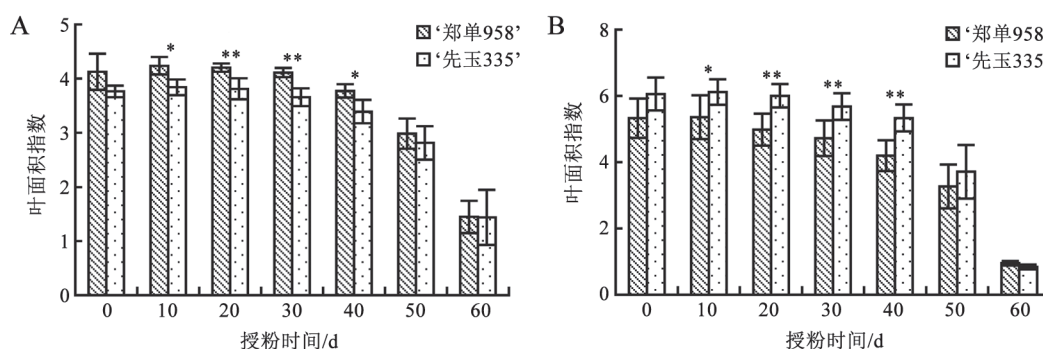


图2 不同栽培密度下‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期叶面积指数的变化

Fig.2 Changes of leaf area index in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ of different cultivation densities during grain filling stage
A: 45 000株·hm⁻²; B: 75 000株·hm⁻²。

度下, 授粉后第10天出现最大叶面积指数。在低密度下, 从授粉开始至授粉后第50天, ‘郑单958’的叶面积指数都显著高于‘先玉335’; 但是在高密度下, 从授粉开始至授粉后第50天, ‘郑单958’的叶面积指数都低于‘先玉335’。授粉10和40 d, 在高密度下‘郑单958’叶面积指数比低密度下的增加26.4%和11.1%, ‘先玉335’则增加59.3%和57.2%。与授粉0 d相比, 授粉后第40天, 在低和高两个密度下, 郑单958的叶面积指数分别下降8.5%和21.2%, ‘先玉335’的叶面积指数分别下降9.9%和11.9%, 在高密度下, ‘郑单958’的叶面积指数下降幅度大于‘先玉335’。叶面积变化的第2个阶段从授粉第40天开始至灌浆结束(第60天), 与阶段开始时相比, 在这个阶段, 在低和高两个密度下, ‘郑单958’的叶面积指数分别下降61.6%和77.3%, ‘先玉335’的叶面积指数分别下降57.6%和84.3%, 增大种植密度对于灌浆后期‘郑单

958’叶面积指数下降的影响显著大于对‘先玉335’的影响。

3 ‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期比叶重的变化

在籽粒灌浆期, ‘郑单958’和‘先玉335’的比叶重都呈下降趋势, 但是比叶重大小和下降过程及对密度的反应存在明显的差异(图3)。在两个密度下, ‘郑单958’的比叶重都低于‘先玉335’, 授粉0 d两者差异最大, 随着灌浆的延续, 两个品种比叶重的差距缩小。与授粉0 d比较, 在灌浆结束时, 在低、高密度下, ‘郑单958’比叶重分别下降14.7%和7.0%, ‘先玉335’比叶重分别下降23.7%和18.8%; 两个品种的比叶重降低主要发生在授粉后30 d内, 灌浆40 d后, 比叶重变化减小。表明‘先玉335’在灌浆期叶片除光合产物的即时输出外还有更多物质转移到籽粒; 随密度增大, 从叶片转移出去物质的比例变小。

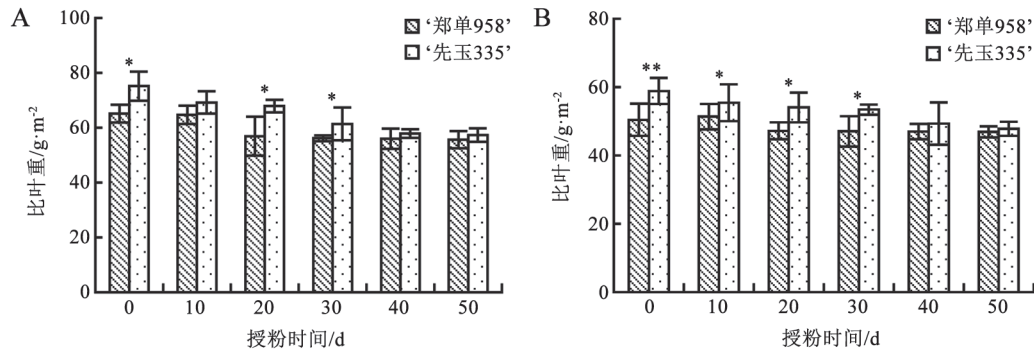


图3 不同栽培密度下‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期比叶重的变化

Fig.3 Changes of specific leaf weight in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ of different cultivation densities during grain filling stage
A: 45 000株·hm⁻²; B: 75 000株·hm⁻².

4 ‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期光合色素含量和比值的变化

在籽粒灌浆期, ‘郑单958’和‘先玉335’的叶绿素含量在授粉10 d最高, 然后都呈持续下降趋势, 但是两个品种的光合色素含量高低和下降过程及对密度的反应存在明显的差异(表1)。在低密度下, ‘先玉335’在灌浆前期(10~30 d)叶绿素含量高于‘郑单958’, 然后迅速下降, 在授粉50 d时, ‘先玉335’的叶绿素含量低于‘郑单958’。在高密度下, ‘先玉335’在灌浆期的叶绿素含量高于‘郑单958’, 尽管在灌浆前期叶绿素含量下降迅速, 但是在灌浆后期(40~50 d)下降速率慢于‘郑单958’。在整个灌浆期, 两个玉米品种的叶绿素a/b比值大小和变化趋势相近, 没有表现出有规律的显著差异。

在籽粒灌浆期, 2个品种的一类胡萝卜素含量在授粉10 d最高, 然后都呈波动性下降(表1)。从整体上看, 在整个灌浆期, ‘先玉335’的一类胡萝卜素含量高于‘郑单958’, 但是, 随着密度的增大, 两者的差异缩小。在低密度下, 在灌浆后期(50 d)两者的类胡萝卜素含量相近; 在高密度下, 在灌浆后期‘先玉335’的一类胡萝卜素含量高于‘郑单958’。从总体上看, ‘先玉335’的一类胡萝卜素/叶绿素的比值大于‘郑单958’。

5 ‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期叶片光合速率的变化

随着籽粒灌浆的延续, 2个玉米品种的光合速率总体呈下降趋势, 而且随密度的升高, 光合速率下降, 而且‘先玉335’的光合速率都高于‘郑单958’。

表1 不同栽培密度下‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期叶片光合色素的变化

Table 1 Changes of leaf photosynthetic pigment contents in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ in different cultivation densities during grain filling stage

栽培密度	时间/d	叶绿素含量/g·m ⁻²		叶绿素a/b		类胡萝卜素含量/g·m ⁻²		类胡萝卜素/叶绿素	
		‘郑单958’	‘先玉335’	‘郑单958’	‘先玉335’	‘郑单958’	‘先玉335’	‘郑单958’	‘先玉335’
低密度	10	609±24	686±91	3.15±0.19	3.21±0.18	95±5*	110±8	0.158±0.006	0.162±0.011
	20	568±35**	581±40	3.26±0.13	3.27±0.07	66±4*	75±7	0.117±0.002	0.130±0.007
	30	545±59	553±61	3.15±0.12	2.98±0.03	71±6	67±2	0.132±0.003	0.124±0.015
	40	485±42*	460±40	2.89±0.39	2.88±0.13	59±8*	69±9	0.124±0.013	0.152±0.022
	50	539±51*	497±62	3.17±0.17	3.10±0.08	74±3	75±7	0.139±0.007	0.153±0.006
高密度	10	545±54	560±23	3.16±0.07	3.16±0.04	71±3*	76±4	0.132±0.013	0.137±0.007
	20	436±23*	470±63	3.23±0.11	3.08±0.13	48±3	46±4	0.112±0.004	0.099±0.018
	30	546±31	522±43	2.69±0.29	2.83±0.08	59±5	59±5	0.109±0.008	0.115±0.009
	40	368±73*	430±23	2.92±0.21	2.89±0.15	43±9*	55±1	0.117±0.004	0.129±0.008
	50	442±39*	523±56	2.73±0.31	2.88±0.27	56±4*	69±7	0.127±0.007	0.133±0.009

*: 不同品种间差异显著($P<0.05$); **: 不同品种间差异极显著($P<0.01$)。

(图4)。在低密度下,在授粉0和50 d时,‘先玉335’的光合速率分别为20.9和10.6 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,‘郑单958’的光合速率分别为17.66和8.73 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

在低密度下,在授粉0 d和50 d时,‘先玉335’的光合速率分别为11.38和5.83 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,‘郑单958’的光合速率分别为10.7和5.43 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

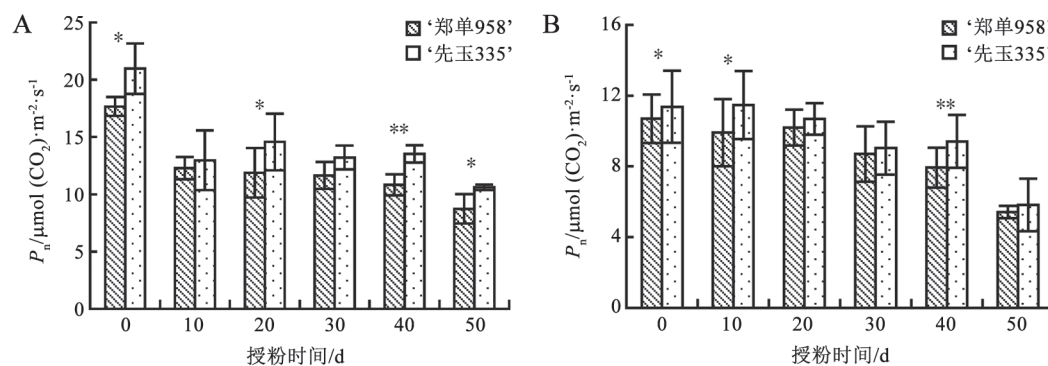


图4 不同栽培密度下‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期叶片光合速率的变化
Fig.4 Changes of leaf photosynthesis rates in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ of different cultivation densities during grain filling stage
A: 45 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$; B: 75 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

6 ‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的变化

在籽粒灌浆期间,‘郑单958’和‘先玉335’叶绿素荧光参数 F_v/F_m 都呈现稳定的下降趋势(图5)。无论是在低密度还是高密度下,不同品种的 F_v/F_m 不存在

显著差异。在低密度下, F_v/F_m 的下降幅度较小,与授粉10 d相比,在50 d时,‘先玉335’和‘郑单958’的 F_v/F_m 分别下降5.1%和3.3%。在低密度下,‘郑单958’ F_v/F_m 的下降幅度增大,与授粉10 d相比,在50 d时,‘先玉335’和‘郑单958’的 F_v/F_m 分别下降3.6%和6.3%。

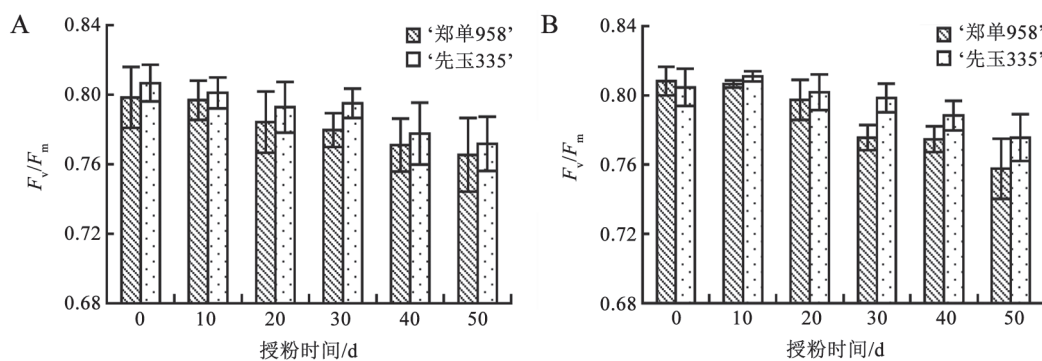


图5 不同栽培密度下‘郑单958’和‘先玉335’灌浆期叶片 F_v/F_m 的变化
Fig.5 Changes of leaf F_v/F_m in ‘Zhengdan 958’ and ‘Xianyu 335’ of different cultivation densities during grain filling stage
A: 45 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$; B: 75 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

讨 论

从‘郑单958’和‘先玉335’在低密度(45 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$)和高密度(75 000株 $\cdot\text{hm}^{-2}$)下的灌浆表现看,两个品种的玉米灌浆前期的物质积累速率高,对籽粒的增重更为重要。在授粉40 d时,‘郑单958’在低

密度和高密度下的百粒重分别达到最终粒重的89.5%和76.3%,‘先玉335’分别达到85.6%和82.6%。授粉40 d,‘郑单958’高密度下的粒重比低密度降低19.0%,‘先玉335’降低10.3%;授粉60 d,‘郑单958’高密度下的百粒重比低密度的降低5.0%,‘先玉335’降低7.0%。所以,不论是‘郑单958’还是‘先玉

335', 灌浆前40 d百粒重随密度增加而下降, 且幅度都大于最终粒重的下降幅度, 说明这个时期是玉米籽粒增重受密度影响的关键期。

本实验结果表明无论是在低密度还是高密度下, '郑单958'的灌浆速率都低于'先玉335', 而且在高密度下的差异更大(图1), 但是与之相关的光合系统的变化不同。在低密度下, '郑单958'从授粉开始至50 d的叶面积指数都大于'先玉335' (图2), 然而整个灌浆期叶片光合速率始终低于'先玉335' (图4), 这表明在低密度下, 单位叶面积的光合速率对籽粒的增重影响更大。但是, 在高密度下, '郑单958'从授粉开始至50 d的叶面积指数和光合速率始终低于'先玉335'。这表明, 在高密度下维持群体叶面积稳定的能力对于维持高的籽粒增重速率非常重要。

在灌浆前期'郑单958'叶片的光合速率低于'先玉335', 同期叶片的叶绿素含量也低于'先玉335', 然而, 叶绿素a/b比值、类胡萝卜素、类胡萝卜素/叶绿素比值与光合速率没有呈现出有规律的一致关系。叶绿素荧光参数 F_v/F_m 代表叶片的光反应效率。在灌浆的前40 d, F_v/F_m 在两个品种之间和密度之间没有明显的差异。这表明对于这两个品种, 光反应都不是光合作用的主要限制因子。这也暗示叶片 CO_2 的固定和还原能力限制两个品种光合作用的进一步提高。

在本实验中, 在灌浆前期两个品种比叶重与籽粒的灌浆能力、叶片光合速率和叶绿素含量都有良好的一致性, '郑单958'的相关系数分别为0.891、0.851和0.903, '先玉335'的相关系数分别为0.908、0.907和0.824, 差异极显著($P<0.01$)。单位叶面积厚重意味着含有更多的光合作用机构和酶及光合产物(Thompson等1996), 因此比叶重可以在一些特定实验中替代光合速率作为灌浆期衡量叶片光合能力的重要指标。因为光合速率虽然是表示叶片光合能力的最重要指标, 但是实际应用时受测定时间、叶片发育时期、天气等多种因素的影响非常大, 不方便用于多处理或材料光合能力的比较实验。

参考文献

- 白志英, 李存东, 郑金凤, 毕常锐, 唐光雷(2010). 种植密度对玉米先玉335和郑单958生理特性、产量的影响. 华北农学报, 25 (S1): 166~169
- 常建智, 张国合, 李彦昌, 闫丽慧, 李潮海(2011). 黄淮海超高产夏玉米生长发育特性研究. 玉米科学, 19 (4): 75~79
- 黄智鸿, 李秀娟, 梁焯赫, 孙刚, 申林, 曹阳, 吴春胜(2008). 超高产玉米品种叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用研究. 江苏农业科学, (2): 29~32
- 黄智鸿, 王思远, 申林, 曹洋, 孙刚, 郝满, 吴春胜(2007). 超高产玉米籽粒的灌浆特性. 西北农业学报, 16 (4): 14~18
- 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 郑洪兵, 李瑞平, 李伟堂(2014). 自然倒伏对玉米根系和产量的影响. 吉林农业科学, 39 (1): 6~9
- 王春虎, 欧行奇, 王昊(2009). 玉米郑单958等高产品种的生理生态机理研究. 种子, 28 (8): 41~44
- 张善平, 冯海娟, 马存金, 李耕, 刘鹏, 董树亭, 赵斌, 张吉旺, 杨今胜(2014). 光质对玉米叶片光合及光系统性能的影响. 中国农业科学, 47 (20): 3973~3981
- Arnon DI (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiol, 24 (1): 1~15
- Antonietta M, Fanello, DD, Acciaresi HA, Guiamet JJ (2014). Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina. Field Crop Res, 155 (1): 111~119
- Ciampitti IA, Zhang H, Friedemann P, Vyn TJ (2012). Potential physiological frameworks for mid-season field phenotyping of final plant nitrogen uptake, nitrogen use efficiency, and grain yield in maize. Crop Sci, 52 (6): 2728~2742
- Evans JR (2013). Improved photosynthetic efficiency is necessary to increase potential crop yield. Appl Photosynth Res Improve Food Crops, 140: 27~34
- Luque SF, Cirilo AG, Otegui ME (2006). Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. Field Crop Res, 95 (2): 383~397
- Radenovich C, Filipovich M, Babich M, Andzhelkovich V, Jovanovich Z, Sechanski M, Stankovich G (2014). Characteristics of new high quality maize inbred lines with efficient photosynthetic functions. Russ Agr Sci, 40 (3): 170~174
- Reynolds MP, Condon AG, Parry MA, Furbank RT (2013). Status of photosynthetic and associated research in wheat and prospects for increasing photosynthetic efficiency and yield potential. Appl Photosynth Res Improve Food Crops, 140: 43~51
- Santiago R, Barros-Rios J, Malvar RA (2013). Impact of cell wall composition on maize resistance to pests and diseases. Int J Mol Sci, 14 (4): 6960~6980
- Thompson JA, Schweitzer LE, Nelson RL (1996). Association of specific leaf weight, an estimate of chlorophyll, and chlorophyll concentration with apparent photosynthesis in soybean. Photosynth Res, 49 (1): 1~10
- Zhu XG, Long SP, Ort DR (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. Ann Rev Plant Biol, 61 (6): 235~261