

# 玉米根系活力杂种优势及其与光合特性的关系

周小平<sup>1,2</sup>, 张岁岐<sup>1,2\*</sup>, 杨晓青<sup>2</sup>, 刘小芳<sup>2</sup>, 刘立生<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 对大田不同水分处理条件下玉米杂交种及其亲本在经济产量形成期的根系活力及其衰退的杂种优势进行了研究,并分析了根系活力与叶片光合特性之间的关系。结果表明,水分亏缺显著降低了玉米的根系活力;充分供水和水分亏缺条件下,玉米杂交种根系活力都具有显著的杂种优势;杂交玉米种根系活力衰退速率具有显著的负优势,抽雄后灌水能够显著降低玉米根系活力衰退速率。杂交玉米种在抽雄期各水分处理下的光合速率显著大于亲本;玉米根系活力与光合速率之间具有显著的正相关关系,随着根系活力的增高,玉米光合速率、气孔导度和蒸腾速率均增高。因此,杂交种较高的抗旱性是根冠共同作用的结果。在玉米育种和栽培中,要充分考虑到根系对地上部生理活性的影响。

**关键词:** 杂种玉米;根系活力;光合特性;杂种优势

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1004-1389(2008)04-0084-07

## Heterosis of Maize Root Activity and Its Relationship with Photosynthetic Characteristics

ZHOU Xiao-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Sui-qi<sup>1,2\*</sup>, YANG Xiao-qing<sup>2</sup>,  
LIU Xiao-fang<sup>2</sup> and LIU Li-sheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau Institute of Water and Soil Conservation,

Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. Chinese Academy of Sciences and

Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The use of heterosis was an important method to increase the yield of maize, but the studies of heterosis was centralized in the shoot of maize, whether the root activity has heterosis and the relationship of root activity and photosynthetic characteristics were not clear. The present field shelter-out rain experiment with hybrid maize and its parents under three soil water conditions was designed to study the heterosis on root activity and its declined properties and its relationship with photosynthetic characteristics. The root activity at the start of Head stage and at one month after Head stage, the photosynthetic characteristic and the root activity declined value were measured. The results indicated that for all the three maize genotypes, root activity decreased under drought stress. The root activity had obvious heterosis regardless drought stress or not at two stages, the heterosis on root activity declined under drought stress at the start of Head stage. The root activity declined rate has negative heterosis, root activity declined rate decreased under drought stress, and irrigation after Head stage distinctly reduced the rate of root activity declined. The photosynthetic rate of hybrid was larger than its parents. Analysis results showed that there were significant positive correlation between root activity and photosynthetic characteristics, which meant photosynthetic parameters increased with the in-

收稿日期: 2007-11-30 修回日期: 2008-02-11

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA100202); 国家自然科学基金(30571127); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目。

作者简介: 周小平(1981-), 女, 甘肃康乐人, 在读硕士, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: xiaopingzh2005@126.com

\*通讯作者: 张岁岐, 男, 陕西岐山人, 研究员, 博士, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

crease of root activity. Therefore, the higher drought resistance of hybrid resulted from the combination of root and shoot, the influence of root activity on the shoot physiologic activity should be adequately considered in the breeding and planting practice of maize.

**Key words:** Hybrid maize; Root activity; Photosynthetic characteristics; Heterosis

干旱是造成粮食减产的主要原因。玉米是世界上最主要的粮饲兼用的作物之一,在我国,约有2/3的玉米种植在干旱半干旱地区,常年受旱面积为40%,减产幅度为30%<sup>[1]</sup>。同时,玉米也是耗水量较大的作物,因此,如何通过提高玉米的抗旱性来提高其产量,一直是人们关注的热点之一。杂种优势的利用是作物育种上提高作物产量的主要手段之一,玉米是世界上杂种优势利用面积最大的作物<sup>[2]</sup>。我国从20世纪80年代开始大量研究玉米的杂种优势,主要集中在籽粒性状(籽粒重,籽粒体积,穗粒数,百粒重等)<sup>[3]</sup>、生理生化研究(地上部干重、呼吸速率、光合速率、叶绿素含量、同工酶等)<sup>[4-5]</sup>和品质性状(淀粉含量、氨基酸含量和油份含量等)等<sup>[6]</sup>。根系活力是衡量根系主动吸收能力大小的重要指标之一,玉米根系对水分、养分的吸收与其地上部生理过程密切相关,但关于玉米根系活力的杂种优势,尤其是在干旱条件下玉米根系活力杂种优势方面的研究并不多见。光合作用是植物进行物质生产和产量形成的基本过程,研究表明,玉米杂交种在光合特性上具有杂种优势,但关于玉米杂种优势的研究大多较为分散,对地上部和地下部杂种优势之间的关联研究极少,玉米根系活力的杂种优势与光合作用之间是否有关也并不清楚。

本文对不同水分条件下玉米杂交种及其亲本在经济产量形成期的根系活力和光合特性的杂种优势及其相互关系进行了研究,以期对玉米抗旱杂交育种和栽培实践提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试品种为黄土高原主栽玉米杂交种户单4号( $F_1$ 代)及其父本803( )、母本天四( ),均由西北农林科技大学农业科学院作物所玉米育种研究室提供。

### 1.2 试验处理

于2007年3月~2007年9月在陕西水土保持研究所大型活动防雨棚内和棚外田间进行。干旱池四周有2 m水泥层隔离以防不同水分处理

之间水的水平方向渗透影响。小区面积6 m<sup>2</sup> (2 m ×3 m),株行距为40 cm ×50 cm(点播)。水分处理为3水平,充分供水处理(T1):位于防雨棚外的大田中,根据降雨情况随时灌水,保持土面湿润(1 m土层的土壤含水量保持在田间持水量的80% ±5%);处理2(T2):苗期充分供水,拔节中期灌水600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,其余时期不灌水;处理3(T3):苗期充分供水,抽雄中期灌水600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,其余时期不灌水。每处理3重复,3组处理均随机区组排列,共27小区。除水分处理外,其他栽培条件完全一致,田间管理同高产玉米田间管理。

### 1.3 测定项目和方法

叶水势的测定:在测定根系活力同天黎明6:00左右,用压力室(3005型,美国产)法测定叶水势以确定植株水分胁迫状况,3重复。

根系活力的测定用伤流法<sup>[7]</sup>:于抽雄第1 d和抽雄第30 d分别测定,从距地面5 cm处横切玉米,用一装有脱脂棉的已称重的塑料自封袋收集伤流液,24 h后取下自封袋称重,求出每小时的根系伤流量( $g \cdot plant^{-1} \cdot h^{-1}$ ),3重复。

活力衰退值按下式计算<sup>[7]</sup>:根系活力衰退值 = [(抽雄时根系伤流量 - 抽雄后30 d的根系伤流量) / 抽雄时根系伤流量] ×100%。 $F_1$ 的杂种优势计算按下列公式进行:中亲优势 = [( $F_1$  - MP) / MP] ×100%,超亲优势 = [( $F_1$  - HP) / HP] ×100%。式中, $F_1$ 、MP和HP分别表示杂种一代、双亲平均和高值亲本的根系伤流量及其衰退值。

气体交换参数光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )及蒸腾速率( $T_r$ )采用美国LI-COR公司生产的LI-6400便携式光合作用测定仪,叶室CO<sub>2</sub>浓度为340~370 μL/L,光子通量(PFD)约为1 200 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,温度为30 ±2。分别于抽雄期第1 d和抽雄30 d后在晴朗天气上午9:00~11:00期间测定,每处理3小区重复,每小区重复5次,共15重复。

数据用microsoft excel和SAS软件进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 杂交种与亲本在不同水分处理下叶水势变化

叶水势是衡量植物水分状况的指标。从图 1 和图 2 可知 3 种水分处理下各基因型玉米的水分状况有明显差异。在抽雄初期,拔节期灌水的 T2 处理和拔节期末灌水的 T3 水分处理下 3 基因型玉米叶水势明显低于充分灌水的 T1 处理 ( $P < 0.0001$ ),玉米胁迫程度为  $T3 > T2 > T1$ 。

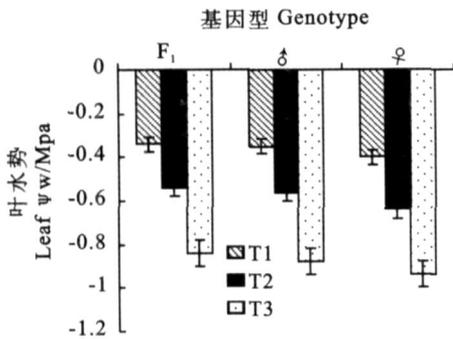


图 1 抽雄初期 3 种水分处理下 3 基因型玉米叶水势

Fig. 1 The leaf  $\Psi_w$  of three maize genotypes under three water level at the start of head stage

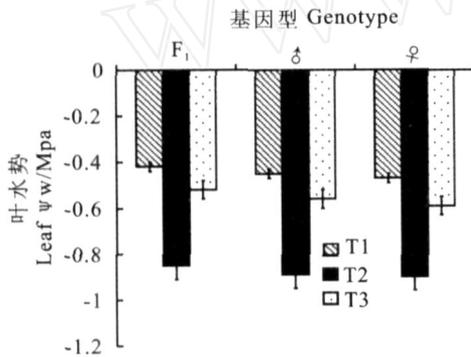


图 2 抽雄 30 d 后 3 种水分处理下 3 基因型玉米叶水势

Fig. 2 The leaf  $\Psi_w$  of three maize genotypes under at a month after head stage

抽雄 30 d 后,由于 T3 处理在抽雄中期灌水,使得玉米在 T3 处理下叶片水势升高,而 T2 处理下 3 基因型玉米的叶片水势显著下降。

### 2.2 杂交种与亲本在不同水分处理下根系活力变化

2.2.1 抽雄初期不同水分处理下 3 基因型玉米根系活力变化 在抽雄初期对 3 种水分处理的 3 基因型玉米品种的根系活力进行了测定(图 3),结果表明 3 基因型玉米根系活力都是  $T1 > T2 > T3$ ,水分亏缺显著降低了玉米根系活力 ( $P < 0.0001$ ),在 3 种水分处理下,杂交玉米种的根系活

力都大于亲本 ( $P < 0.0001$ )。但父母本之间差异不显著。

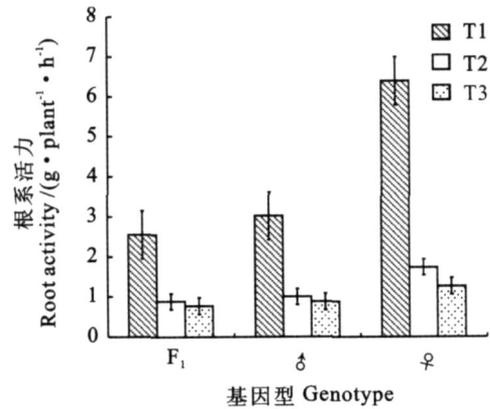


图 3 抽雄初期 3 种水分处理下 3 基因型玉米的根系活力

Fig. 3 The root activity of three maize genotypes under three water level at the start of head stage

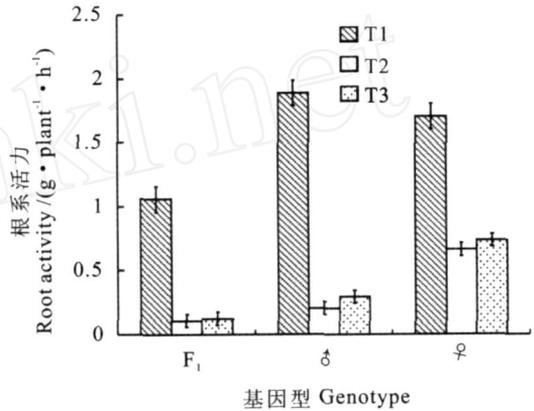


图 4 抽雄一月后 3 种水分处理下 3 基因型玉米的根系活力

Fig. 4 The root activity of three maize genotypes under three water level at a month after head stage

2.2.2 抽雄 30 d 后不同水分处理下 3 基因型玉米叶水势及根系活力变化 抽雄 30 d 后对 3 种水分处理的 3 个基因型玉米的根系活力进行了测定(图 4)。抽雄 30 d 后,由于 T3 处理抽雄期灌水,T3 处理下土壤水分状况较好(见前玉米叶水势),但仍然可以从本试验结果分析 3 种水分条件下不同基因型玉米的根系活力特性。结果表明,抽雄 30 d 后,不同水分处理下,3 基因型玉米品种根系活力均差异显著 ( $P < 0.0001$ ),大小依次为  $T1 > T3 > T2$ ,3 种水分处理下,杂交种的根系活力均显著高于亲本 ( $P < 0.0001$ )。

2.2.3 不同水分处理下 3 基因型玉米根系活力的衰退值比较 对不同水分处理下 3 个基因型玉米的根系活力衰退值进行了计算,结果表明(图 5),在充足供水条件下,杂交种玉米根系活力衰退

值大于亲本,这可能是由于其在抽雄初期根系活力较高,而使得衰退值较高。不充足灌水处理(T2, T3)下,亲本根系活力衰退值均增高,说明水分亏缺使得亲本根系活力衰退速度加快,不利于后期经济产物的形成,但杂交种玉米在不充足灌水处理(T2, T3)下,其根系活力衰退值降低,说明杂交

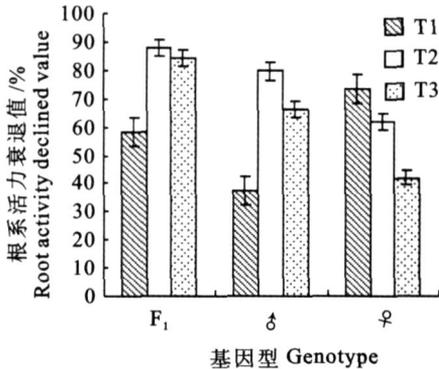


图5 3基因型玉米在不同水分处理下的根系活力衰退值

Fig. 5 The root activity declined value of three maize genotypes under three water level.

表1 杂交种玉米在抽雄第1 d和抽雄30 d根系活力以及根系活力衰退值的杂种优势

Table 1 F<sub>1</sub> heterosis on root activity and its declined value at the first of head stage and at a month after head stage

处理 Treat	抽雄初期根系活力/ % Root activity at the start of head stage		抽雄初期根系活力/ % Root activity at a month after head stage		根系活力衰退值/ % Declined value	
	中亲优势 HMP	超亲优势 HHP	中亲优势 HMP	超亲优势 HHP	中亲优势 HMP	超亲优势 HHP
T1	129.14a	111.32a	15.6814a	-9.70a	0.525185a	0.949157a
T2	84.48b	73.84b	325.093b	224.6593b	-26.101b	-22.271b
T3	53.89c	44.50c	251.883c	149.2346c	-44.135c	-36.702c

根系活力衰退值越大,其根系活力衰退越快,因此根系活力衰退值杂种优势为负值才能体现杂交种的杂种优势,由表1可以看出,在充足水分供应下,根系活力衰退值中亲优势和超亲优势为正值,说明就根系活力衰退值这一指标来说,杂交种在充分水分供应下并没有表现出杂种优势,但在不充足灌水处理下(T2, T3),根系活力衰退值中亲优势和超亲优势皆为负值,表明杂交种在不充足灌水条件下根系活力衰退值具有明显的杂种优势。

### 2.3 不同水分处理下杂交种与亲本玉米光合参数变化

于抽雄期第1 d和抽雄30 d后对不同水分处理不同基因型玉米的光合参数进行了测定(与根系活力测定同天),这里仅对抽雄初期光合测定结果进行分析。由图6A可以看出,水分亏缺普遍降低了玉米的光合速率,但无论是水分充足还是

种更能适应干旱环境,生育后期根系仍具有较父母本高的吸收能力,有助于提高其在水分亏缺环境下的产量。

2.2.4 杂交种玉米的根系活力及根系活力衰退值的杂种优势分析 对各水分处理下杂交玉米种根系活力及衰退值的杂种优势进行了分析,结果表明(表1),抽雄第1 d,杂交种根系活力中亲杂种优势和超亲优势在3种水分处理下都为正值,说明杂交种根系活力具有明显的杂种优势,不仅优于亲本平均值,也优于亲本高值。但水分亏缺显著降低了根系活力杂种优势值。抽雄30 d后,在充分水分处理下,杂交种玉米和亲本玉米都具有较高的根系活力,因此在T1处理下,杂交种玉米根系活力没有表现出明显的杂种优势,但T2和T3处理下,杂交种表现出显著的杂种优势,这是因为杂交种在水分亏缺的条件下,在生育后期仍能保持较高的吸收能力,但亲本根系吸收活力在生育后期下降较大。

亏缺,杂交种光合速率都明显高于父母本( $P < 0.05$ )。拔节期不浇水使得玉米受旱,光合速率降低。

由图6B可以看出,水分亏缺明显降低了玉米的蒸腾速率,但对各品种蒸腾速率的影响存在差异,父本T1处理与T2处理差异不明显,但母本与杂交种T1处理蒸腾速率明显高于T2处理( $P < 0.05$ ),在拔节期不浇水的T3处理下,3基因型玉米的蒸腾速率明显降低,这可能是因为不同玉米种对水分反应的敏感度不同,对于同样的水分亏缺程度,不同基因型玉米的反应不同。

由图6C可以看出,充分供水条件下,杂交种的气孔导度大于父母本。T2处理下,杂交种气孔导度降低幅度明显大于父母本,在T3处理下,父母本气孔导度较T2处理的降低幅度明显高于杂交种,杂交种在水分亏缺下仍保持较父母本高的气孔导度,有利于减小水分亏缺下气孔对光合速

率的限制。气孔导度的降低,一方面可以减小蒸腾速率,节约水资源;另一方面,气孔导度过低会限制光合速率,影响植物的生长。T2 处理灌水量小于 T1 处理,杂交玉米种气孔导度在 T2 处理下下降明显,有利于节约水源,但在 T3 处理下,杂交种具有较亲本高的气孔导度,其气孔限制值小于亲本(杂交种气孔限制值为 0.32,父本为 0.46,母本为 0.52),可以减小对光合速率的限制。

由图 6D 可以看出, T2 处理下杂交种和母本

的水分利用效率高于 T1 处理,说明一定程度的水分亏缺有利于提高其单叶水分利用效率,但是父本的单叶水分利用效率并没有提高。T3 处理下,3 基因型玉米的水分利用效率普遍提高,表明水分亏缺对蒸腾速率的影响要大于对光合速率的影响。杂交种在 T3 处理下光合速率较高,因此其水分利用效率明显高于亲本,而母本气孔导度的降低使得其蒸腾速率大幅下降,进而使得其单叶水分利用效率高于父本。

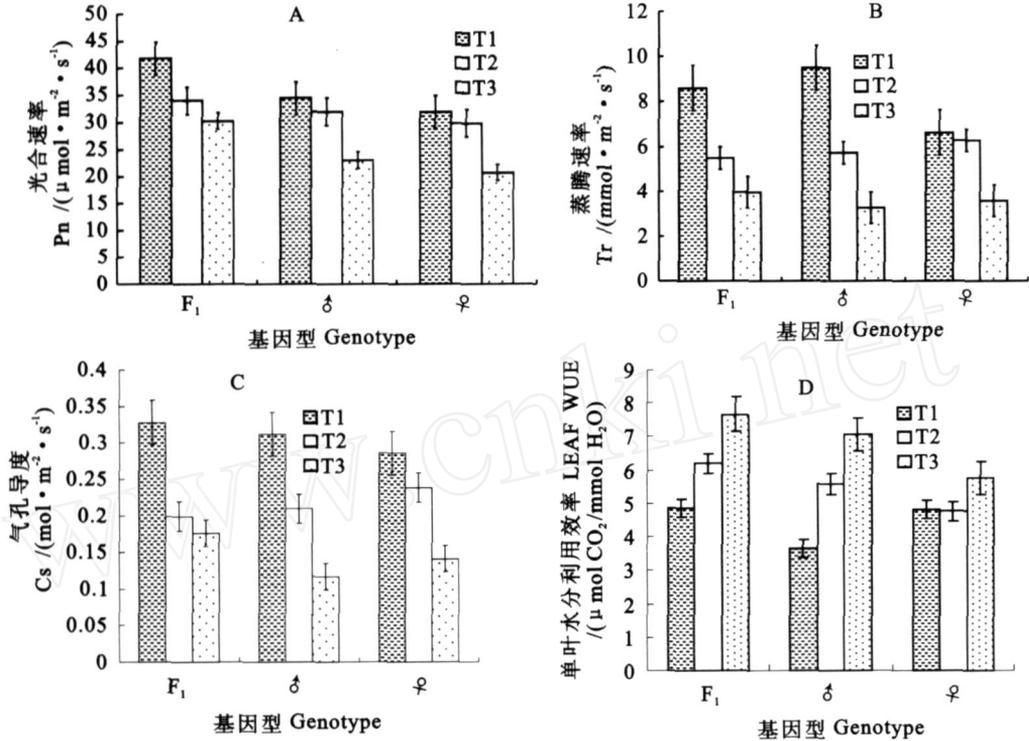


图 6 抽雄初期 3 种基因型玉米在 3 种水分处理下的气体交换参数

Fig. 6 Gas exchange parameters for three maize genotype under three water level

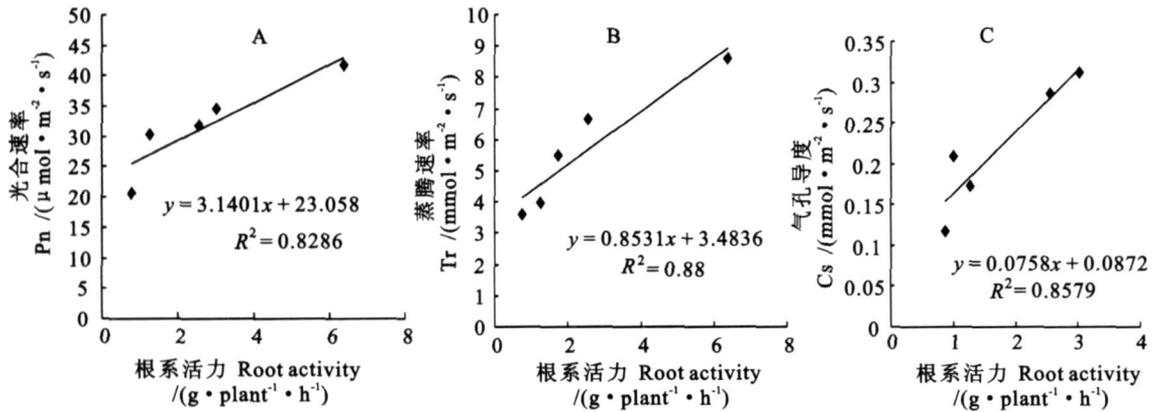


图 7 玉米根系活力与气体交换参数的关系

Fig. 7 The relationship between maize root activity and leaf gas exchange parameters.

2.4 玉米根系活力与叶片气体交换参数的关系  
对抽雄初期和抽雄 30 d 后玉米根系活力和

气体交换参数(光合速率、蒸腾速率、气孔导度)进行了相关分析,2 次分析结果趋势相同,这里就抽

雄初期分析结果举例分析。结果表明,根系活力与光合速率、蒸腾速率和气孔导度有显著的正相关关系,即随着根系活力的增大,光合速率、蒸腾速率和气孔导度也明显增高。根系活力强,有利于根系吸收水分<sup>[8]</sup>。根系活力的大小,表征着作物根系从土壤中吸收水分和传输水分的能力,决定着向叶片传输水分的状况,调节气孔开度,进而影响叶片气体交换参数。

### 3 讨论

3.1 目前表示根系活力的指标主要有以下几个: - 萘胺氧化能力、根系呼吸强度、TTC 还原量、活跃表面积及根系的伤流强度。前 3 种指标在测定过程中,由于根系表面附着大量的微生物,在具体的测定过程中很难将微生物所造成的呼吸部分排除掉,因此测定结果往往偏高,而且很不稳定,而且由于不同部位的根系其根系活力不同,在大田试验中所取样品不具有代表性,容易造成误差,所得结果也不能代表整株的根系活力,因此不便在大田试验中运用,而根系伤流量可以比较准确反映根系活力的变化。伤流强度是指单位时间内植株流出的伤流量<sup>[9]</sup>。伤流强度的大小反映了植物主动吸收水分能力的强弱,从一定意义上讲,植物伤流强度代表了根系生理活动的强弱<sup>[10]</sup>。研究表明,根系伤流强度可作为根系活力的指标,能比较准确地反映根系活性的变化<sup>[11-14]</sup>。

大量的研究表明,逆境下(如干旱、盐害和重金属胁迫等)作物根系活力下降<sup>[15-18]</sup>。本试验在不同水分条件下就玉米根系活力杂种优势的研究表明在水分亏缺下,3 种品种的玉米根系活力都显著下降,但杂交种根系活力下降幅度小于父母本,且在水分亏缺条件下根系活力具有显著的杂种优势,这也是杂交种具有较高抗旱能力的原因之一。根系活力跟作物产量有密切的关系,根系活力越大,相应的生物产量和经济产量也就越大<sup>[19-20]</sup>。因此,杂交种在水分亏缺条件下根系活力表现出来的杂种优势有利于其在水分亏缺条件下能获得较高产量。

3.2 大多数玉米光合作用的杂种优势研究表明玉米杂交种在光合作用等特性上为正优势。杂交种的光合强度平均值一般为亲本自交系平均值的 107.6%~128.5%<sup>[21]</sup>,韩庚辰研究表明玉米杂交种光合速率显著高于亲本,且较父母本高的光合

速率与其较高的产量密切相关<sup>[22]</sup>。本研究进一步表明,杂交玉米种在 3 种水分处理下都具有较亲本高的光合速率,表现出显著的杂种优势。水分亏缺下,杂交种的光合速率杂种优势表现的更为明显。光合速率杂种优势从源上为杂交种的高产提供了保障。

3.3 根冠是相互依存的统一体。根系作为地上部光合产物的消耗库,其形态构建和功能的维持都需要光合产物的维系,同时,光合器官的维持和功能的发挥需要根系吸收的矿物质和水分的参与<sup>[23]</sup>,因此,根系吸收活力和地上部光合速率的变化密切相关<sup>[24]</sup>。赵全志对籽粒灌浆小麦的研究表明根系活力和群体光合速率间关系密切<sup>[24]</sup>。慕自新对玉米根系水力学导度和光合作用的关系做了研究,结果表明根系水力学导度与光合速率之间存在显著的正相关关系<sup>[25]</sup>,这说明根系吸收能力与地上部光合特征间有密切联系。本研究对经济产量形成期玉米根系根系活力和光合速率的相互关系研究表明,玉米根系活力与光合速率间存在显著的正相关关系。

梁建生研究发现,抽穗后根系活性与叶片衰老密切相关<sup>[11]</sup>。作物根系活力在生育后期衰退缓慢,就可以通过较好的吸收能力来减缓叶片的衰老速率,进而使作物在经济器官形成期始终保持较高的光合速率。近年来,人们日益认识到激素的调节和叶片衰老关系的重要性,用 BA 和玉米素处理水稻叶片可延缓叶片的衰老进程,而 ABA 处理则加速叶片衰老进程,ABA 影响叶片衰老似乎与抑制叶片蛋白质合成,加速叶片蛋白和核酸分解有关,而根系可以合成 ABA,且合成 ABA 的能力随着根系所处环境而变化。根系活力下降,使得根系吸收水分的能力下降,根系水分状况下降可能激发根系产生更多的 ABA,加速叶片的衰老程度,加速光合作用的下降<sup>[11]</sup>。本研究表明,杂交种抽雄期根系活力的衰退值表现出显著的负优势,说明杂交种根系活力在经济器官形成期衰退速率较低,保证了其在水分亏缺条件下根系较强的吸收能力,进而减缓叶片光合能力的衰退,为其高产提供了保障。无论是拔节期干旱还是抽雄期干旱,都加快了玉米根系活力的衰退速率,但杂交种在水分亏缺下,抽雄 30 d 后其根系活力仍较高,表现出显著的杂种优势。

## 参考文献:

- [1] 王泽立,李新征,郭庆法,等.玉米抗旱性遗传与育种[J].玉米科学,1998,6(3):9-13.
- [2] 李凤海.杂交当代玉米杂交效应初探[J].辽宁农业科学,1999,(2):32-38.
- [3] 李少昆,赵明,王树安,等.不同玉米基因型叶片呼吸速率的差异及与光合特性的关系[J].中国农业大学学报,1998,3(3):59-65.
- [4] 张喜华,史振声.玉米杂交F<sub>0</sub>代的生化分析[J].沈阳农业大学学报,1994,25(2):145-148.
- [5] 王振华,王永普,张新,等.普通玉米主要品质性状的杂种优势及其相关分析[J].河南农业科学,1998,(2):3-6.
- [6] 史振生,张喜华.玉米当代杂种优势研究回顾[J].玉米科学,2004,12(1):3-7.
- [7] 曹树青,邓志瑞,翟虎渠,等.粳型杂交水稻根系活力及其衰退特性的配合力及杂种优势分析[J].中国水稻科学,2002,16(1):19-23.
- [8] 宋海星,王学立.玉米根系活力及吸收面积的空间分布变化[J].西北农业学报,2005,14(1):137-141.
- [9] 姚万山,宋连启.夏玉米高产群体生理动态质量指标的研究[J].华北农业学报,1999,14(4):54-59.
- [10] 常江,张自立,郜红建,等.外源稀土对水稻伤流组分的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(5):522-525.
- [11] 梁建生,曹显祖.杂交水稻叶片的若干生理指标与根系伤流强度关系[J].江苏农学院学报,1993,14(4):25-30.
- [12] 白书农,肖翊华.杂交水稻根系生长与呼吸强度的研究[J].作物学报,1998,14(3):53-59.
- [13] 邱鸿步,陆定志.粳型水稻的叶片老化与植株伤流强度及产量的研究[J].浙江农业科学,1981,(4):175-178.
- [14] 陆定志,邱鸿步.连晚杂交水稻汕优6号伤流强度的研究[J].浙江农业科学,1982,4(6):194-196.
- [15] 宋海星,李生秀.水、氮供应对玉米伤流及其养分含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):574-578.
- [16] 张永清,苗果园.不同施肥水平下黍子根系对干旱胁迫的反应[J].作物学报,2006,32(4):601-606.
- [17] 苗海霞,孙明高.盐胁迫对苦楝根系活力的影响[J].山东农业大学学报:自然科学版,2005,36(1):9-12.
- [18] 张利红,李雪梅,陈强,等.铅对不同品种玉米幼苗抗氧化酶活性及根系活力的影响[J].吉林农业大学学报,2006,28(2):119-122.
- [19] 周广生,梅方竹,陈艳华.冬小麦根系活力与产量性状关系的研究[J].华中农业大学学报,2001,20(6):531-534.
- [20] 田丰,张永成.马铃薯根系吸收活力与产量相关性研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):105-107.
- [21] 赵明,王美云,李少昆.玉米杂交种与亲本主要光合性状的比较[J].华北农学报,1997,12(2):39-43.
- [22] 韩庚辰.玉米主要光合性状与产量的关系及遗传效应分析[J].作物学报,1982,(4):237-244.
- [23] 王志芬,陈学留,余美炎,等.冬小麦群体根系<sup>32</sup>P吸水活力与群体光合速率关系的研究[J].作物学报,1999,25(4):458-465.
- [24] 赵全志,吕德彬,程西永,等.杂种小麦群体光合速率及伤流强度优势研究[J].中国农业科学,2002,35(8):925-928.
- [25] 慕自新,张岁岐,梁爱华,等.玉米整株根系水导与其表型抗旱性的关系[J].作物学报,2005,31(2):203-208.