

# 冀西北半干旱补灌玉米超高产产量性能研究

吕爱枝<sup>1</sup>, 丁成方<sup>1</sup>, 王晓波<sup>2</sup>, 王美云<sup>2</sup>, 赵明<sup>2</sup>

(1. 河北北方学院农业科学系, 河北 张家口 075000; 2. 中国农业科学院作物与种质资源研究所, 北京 100081)

**摘要:**以“三合模式”的产量性能量化( $mLAI \times D \times mNAR \times HI = EN \times GN \times GW$ )为基础,于2007年针对冀西北雨养补灌玉米进行高产挖潜的研究。结果表明:通过有效密植高产栽培,冀西北雨养补灌地区玉米获得了高于 $1.845 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 的产量,其产量性能为:全生育期平均叶面积系数( $mLAI$ )达4.22,全生育期( $D$ )为149 d,平均净同化率( $mNAR$ )达 $5.54 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,收获指数( $HI$ )维持0.53左右;在选择耐密性品种的基础上,密度( $EN$ )达91 800株/ $\text{hm}^2$ ,穗粒数( $GN$ )528粒/穗,千粒重( $GW$ )384.75 g。由此可见,冀西北雨养补灌地区玉米获得高产突破是产量性能综合指标优化配合,其中密植条件下维持光合性能与产量构成的有效配置是十分重要的。

**关键词:** 玉米;三合模式;超高产;半干旱区

**中图分类号:** S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0168-04

玉米是世界重要的粮食和饲料作物之一,种植面积仅次于小麦、水稻而居第三位,总产量仅次于小麦居第二位,单位面积产量居第一位。我国玉米单产与世界其他发达国家相比相对较低。为此,挖掘现有玉米品种的产量潜力,不断提高籽粒产量是玉米生产的主攻目标之一。有关玉米产量形成方面的研究已有许多,对产量形成内在和外在的影响因素进行了深入分析<sup>[1-4]</sup>。特别是赵明等基于作物产量构成、源库学说、光合性能提出的三合结构模式,用系统的观点研究作物产量,把作物的产量看作一个系统。以源库为主体,源与光合性能理论相连,库端联系了产量构成理论,以流(物质、能量、信息)连接诸有关性状构成产量形成过程的网络关系<sup>[2]</sup>。三合结构模式对指导作物超高产栽培具有重要作用<sup>[6,7]</sup>。近几年来,国内外玉米产量均有重大突破。2002年美国 Francis Childs 创造了 $2.735 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 的世界纪录,密度为 $10.852 \times 10^4$ 株/ $\text{hm}^2$ ;2005年山东莱州夏玉米创造了 $2.104 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 的全国纪录,密度为 $9.861 \times 10^4$ 株/ $\text{hm}^2$ 。2006年在桦甸示范区建设的 $0.24 \text{ hm}^2$ 超高产田平均达到 $1.683 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ,其中最高的 $0.09 \text{ hm}^2$ 超高产田产量达到 $1.726 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ,创造了东北春玉米的超高产纪录。2007年桦甸示范区又创 $17\ 752.35 \text{ kg/hm}^2$ 全国春玉米高产新纪录。冀西北半干旱雨养补灌玉米主产区的玉米产量一直徘徊在 $1.2 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 之间。基于“三合模式”,对产量水平高于 $1.845 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 以上的玉米群体生产性能进行研

究在国内外还未见报道。本研究以“三合模式”为基础,从产量构成、光合性能方面对产量超过 $1.845 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 的超高产玉米群体的生产性能进行分析,进一步探讨超高产机理和栽培方法,为指导玉米超高产栽培提供科学的理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

本试验于2007年在冀西北雨养补灌玉米主产区张家口市高新区姚家房镇(北纬40.7,东经114.8)进行。前茬为春玉米。从播种到成熟试验点 $10^\circ\text{C}$ 以上活动年积温 $3\ 478.7^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量 $270.6 \text{ mm}$ 左右。试验地土壤类型属沉积土,呈微碱性,耕层较深厚,土壤有机质含量为 $30 \sim 35 \text{ g/kg}$ 。

### 1.2 试验材料

试验材料选用典型耐密玉米代表品种登海601,种植面积分别为 $0.13 \text{ hm}^2$ ,种植密度为 $93\ 000$ 株/ $\text{hm}^2$ 。

### 1.3 试验设计

4月27日播种,种植方式为大小行,宽行 $80 \text{ cm}$ ,窄行 $40 \text{ cm}$ ,株距 $20 \text{ cm}$ 以内。试验田全部人工精细点播,深浅一致。窄行上覆膜,播种覆膜同日进行,覆膜前喷施玉米田专用除草剂。

在肥料运筹上(参照玉米高产田),施N肥(尿素) $600 \text{ kg/hm}^2$ ;K肥(硫酸钾) $225 \text{ kg/hm}^2$ ,施硫酸锌 $15 \text{ kg/hm}^2$ 。P肥(过磷酸钙) $300 \text{ kg/hm}^2$ ;磷酸二铵 $375 \text{ kg/hm}^2$ 。播种时在小行中间集中深施( $20 \sim 25$

收稿日期:2010-03-04

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划“粮食丰产科技工程”项目(2006BAD02A13)

作者简介:吕爱枝(1970—),女,河北尚义人,副教授,主要从事玉米育种和栽培研究。E-mail: aizhi\_l@yahoo.com.cn。

通讯作者:赵明(1955—),男,河北涿源人,研究员,博导,主要从事作物耕作和栽培研究。

cm),将氮肥总量的 30%左右及全部磷、钾、锌肥全部施入,在小口期小行中间集中追施(15~20 cm)总氮量 15%。穗肥在玉米大喇叭口期(第 11~12 片叶展开)追施总氮量的 40%左右。花粒肥在籽粒灌浆期追施总氮量的 15%。

#### 1.4 取样及项目调查

1.4.1 生育期调查 在登海 601 生长期间记载生育期,即出苗期、拔节期、小喇叭口、大喇叭口、抽雄期、灌浆期、乳熟期、蜡熟期、完熟期。

1.4.2 取样方法 于拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、乳熟期、蜡熟期和完熟期在种植大田对角线分 5 点取样,每样点随机取 5 株。

(1) 叶面积。于拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、乳熟期、蜡熟期和完熟期各期,测量春玉米单叶长  $L$ (表示叶片中脉长度)和叶宽  $W$ ( $W$  表示叶片最大宽度)。

单株叶面积( $LA$ )计算, $LA = L \times W \times 0.75$ (式中 0.75 为校正系数,未展开叶的系数为 0.5)。

(2) 干物质积累。于拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、乳熟期、蜡熟期和完熟期各期,将玉米植株按器官分为叶、茎鞘(包含茎)、雄穗、雌穗部分,分别装入纸袋中,放入烘箱,105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘干至衡重,再称各部分重和总干物质重。

(3) 室内考种。蜡熟期实际考种,调查单株穗粒重、穗粒数、千粒重等。

(4) 单位面积产量。采用专家验收测产结果。

1.4.3 数据处理 试验数据用 Excel、SAS V8 和 Curve expert1.3 等软件进行统计分析和作图。

叶面积指数( $LAI$ )计算, $LAI(m^2/hm^2) = LA/GA$ ( $GA$  为土地面积, $LA$  为该土地面积上的总叶面积,总叶面积( $m^2$ ) = 单株叶面积  $\times$  单位土地面积上总株数)。

平均叶面积指数  $mLAI(m^2/hm^2)$  等于平均相对  $LAI$  与作物最大  $LAI$  的乘积

$$\text{净同化率 } NAR[g/(m^2 \cdot d)] = \left[ \frac{\ln L_2 - \ln L_1}{L_2 - L_1} \right] \times \left[ \frac{(W_2 - W_1)/(t_2 - t_1)}{W_2 - W_1} \right]$$

式中, $W_1$  为前一次取样测得单位土地面积上的生长量; $W_2$  为后一次取样测得单位土地面积上的生长量; $t_1$  为前一次取样的日期; $t_2$  为后一次取样的日期; $L_1$  为前一次叶面积指数; $L_2$  为后一次叶面积指数。

平均净同化率  $mNAR[g/(m^2 \cdot d)] = Y/(mLAI \times D \times HI)$

式中, $Y$  为单位面积籽粒产量; $mLAI$  为平均叶面积

指数; $D$  为生育期天数; $HI$  为收获指数。收获指数  $HI = \text{经济产量}(kg) / \text{生物产量}(kg)$

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米高产叶面积动态特征与平均叶面积系数( $mLAI$ )

叶片是玉米进行光合作用而生产干物质的主要器官,叶面积的大小关系着叶片光合能力的强弱,影响着其干物质的生产能力<sup>[8]</sup>。由表 1 可见,从拔节到灌浆,登海 601 的群体叶面积随生育期的推进呈增长趋势。小喇叭口期至大喇叭口期增长速度最快,其增长量也较大,达 35 082.2  $m^2/hm^2$ ;大喇叭口期至灌浆期,单株叶面积增幅在逐渐减小。乳熟期及以后呈负增长趋势。抽雄期至灌浆期,登海 601 群体叶面积持续保持高值(72 987.4  $m^2/hm^2$  和 73 007.5  $m^2/hm^2$ )。蜡熟期的叶面积保持在 36 464.2  $m^2/hm^2$  的水平。结果表明,登海 601 群体叶面积前期增长较快,灌浆期达到最大值 73 007.5  $m^2/hm^2$ ;后期衰老慢,保绿性好,对产量形成和提高有利。

表 1 不同生育时期群体叶面积

Table 1 Population leaf area with the growth development of maize

生育期 Growth stage	叶面积 ( $m^2/hm^2$ )	增幅( $m^2/hm^2$ ) Amplitude
拔节期 Jointing	13135.8	—
小喇叭口 Little trumpet	22641.2	9505.4
大喇叭口 Big trumpet	57723.4	35082.2
抽雄期 Heading	72987.4	15264
灌浆期 Filling	73007.5	20.1
乳熟期 Milk	64767.1	-8240.4
蜡熟期 Dough	36464.2	-28302.9

从拔节期到抽雄期,登海 601 的  $LAI$  随生育期的推进呈增长趋势,抽雄期和灌浆期的  $LAI$  分别保持 7.27、7.29 的高值。灌浆期以后, $LAI$  随生育期的推进逐渐呈下降趋势。抽雄期至蜡熟期,登海 601 的叶面积指数下降了 50.05%。通过相对化  $LAI$  动态模拟(见图 1),全生育期登海 601 的相对平均叶面积指数达 0.55,平均叶面积指数  $mLAI$  为 4.22,最大叶面积指数为 7.68。结果表明,登海 601 叶面积指数较大,生育后期下降幅度较小。说明登海 601 在生育后期保持较高且相对稳定的叶面积指数,使叶保持了较高的生产能力。

### 2.2 登海 601 发育过程及生育历时

登海 601 全生育期历时 149 d。出苗~拔节期历时 34 d,占全生育期的 23%;拔节~小喇叭口历时 6 d,占全生育期的 3%;小喇叭口、大喇叭口、抽

雄期及灌浆期相邻两生育期历时均为 13~14 d,各自占全生育期比例约 9%;灌浆期~蜡熟期历时 47 d,占全生育期的 32%。可见,在登海 601 全生育期,前期营养生长期阶段历时较长,为后期的生殖生长打下重要的物质基础。籽粒形成期历时较长,从时间上为玉米获得稳产、高产提供了必要的发育条件。

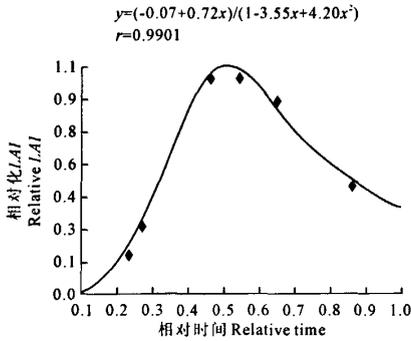


图 1 登海 601 玉米相对化 LAI 变化曲线

Fig.1 Normalized LAI simulating curve on Denghai 601 maize

### 2.3 登海 601 高产群体的净同化率动态过程

净同化率(NAR)反映了玉米叶片进行光合作用生产干物质的速率。由图 3 可看出,登海 601 的净

同化率在拔节至小喇叭口期达最高峰, NAR 达 10.62  $g/(m^2 \cdot d)$ 。小口期至大口期的净同化率 NAR 次之, 达 7.07  $g/(m^2 \cdot d)$ 。这些时段是玉米叶片光合作用最强的阶段。可见,拔节后玉米群体生长迅速,叶面积增长迅速,净同化率也较高。登海 601 的净同化率(NAR)在生育过程中呈“M”形变化(见图 3),其第二高峰期出现在灌浆期到乳熟期。大喇叭口以后,由于植株增大,玉米群体叶片相互郁蔽程度加大,所以净同化率降低。抽雄期至乳熟期,随着生育进程的推进,叶面积和干物质的积累 NAR 又呈小幅上升趋势。乳熟期以后,由于叶面积的减少, NAR 再次下降。全生育期  $mNAR$  未达 5.54  $g/(m^2 \cdot d)$ 。净同化率最低的阶段为乳熟~蜡熟期,其 NAR 为 3.65  $g/(m^2 \cdot d)$ 。净同化率的阶段性变化,反映了各叶位叶片光合能力的差异。生育前期,光合能力较强的上位叶片不断长出,叶片不相互荫蔽,所以净同化率提高很快,随着植株继续生长,叶片相互荫蔽,平均受光强度降低,净同化率开始下降,到生育后期,籽粒灌浆需要大量光合产物,加上下部叶片死亡,叶片平均受光强度升高,净同化率转而升高,成熟期,玉米叶片衰老,净同化率降低<sup>[7]</sup>。

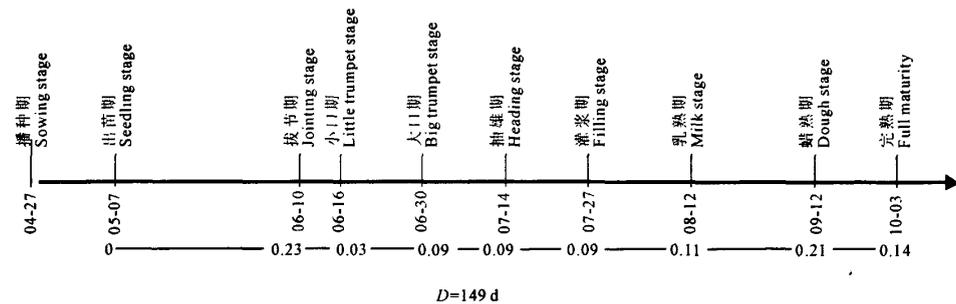


图 2 春玉米生长发育时期

Fig.2 Growing period of spring maize

### 2.4 产量及其构成因素的分析

单位面积穗数、穗粒数和千粒重是玉米产量构成因素。登海 601 穗数为 91 800 穗/ $hm^2$ 时,其单株穗粒数为 528 粒,穗粒重为 182 g,千粒重为 384.75 g,收获指数达 0.53。由此可见,相对较高的单位面积穗数、单株穗粒数和千粒重,也能够诠释登海 601 的 18 450  $kg/hm^2$  的超高产现象。

### 2.5 产量性能构成综合分析

通过有效的密植高产栽培,提高群体平均叶面积指数,通过延长生育期,提高净同化率,保持较高的收获指数,可以有效地提高玉米产量。由表 2 数据可见,在冀西北雨养补灌地区,玉米获得了高于

1.845  $\times 10^4$   $kg/hm^2$  的产量,群体密度在 91 800 株/ $hm^2$ 的水平下,全生育期平均叶面积系数( $mLAI$ )达 4.22,全生育期( $D$ )为 149 d,平均净同化率( $mNAR$ )达 5.54  $g/(m^2 \cdot d)$ ,收获指数( $HI$ )提高到 0.53 以上;穗粒数( $GN$ )达 528 粒/穗,千粒重( $GW$ )达 384.75 g。

## 3 结论与讨论

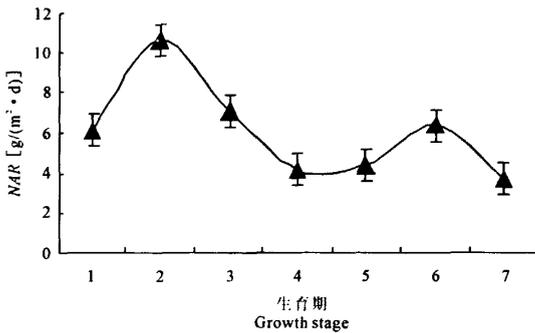
在冀西北雨养补灌玉米产区,由于连年耕作粗放,土壤养分消耗多,补给少,该区土壤普遍缺氮少磷。玉米产量普遍低于 1.5  $\times 10^4$   $kg/hm^2$ 。由于其特殊的地理与生态环境,可以补灌 1~2 次山洪水,具

有一定的培肥地力作用。选用优质的玉米杂交种, 够实现较大面积的超高产。优化栽培技术, 重施 N、P、K 肥, 补施锌肥, 在该区能

表 2 高产水平下玉米“三合结构”定量表达式

Table 2 Quantitative expression equation of “three-combination structure” of high yield maize

品种 Variety	光合参数 Photosynthetic parameter				产量构成参数 Yield component			产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )
	<i>mLAI</i>	<i>D</i>	<i>mNAR</i>	<i>HI</i>	密度(株/hm <sup>2</sup> ) <i>EN</i>	穗粒数 <i>GN</i>	千粒重(g) <i>GW</i>	
登海 601 Denghai 601	4.22	149	5.54	0.53	91800	528	384.75	18450



注: 1. 苗期~拔节期; 2. 拔节期~小口期; 3. 小口期~大口期; 4. 大口期~抽雄期; 5. 抽雄期~灌浆期; 6. 灌浆期~乳熟期; 7. 乳熟期~蜡熟期  
Note: 1. Seedling ~ Jointing; 2. Jointing ~ Little trumpet; 3. Little trumpet ~ Big trumpet; 4. Big trumpet ~ Heading; 5. Heading ~ Filling; 6. Filling ~ Milk; 7. Milk ~ Dough

图 3 登海 601 群体净同化率

Fig. 3 NAR dynamic models of Denghai 601 maize

登海 601 属耐密性高产品种, 合理的群体结构和有效的栽培方法是保证其高产的重要途径。本试验以“三合模式”为基础, 从登海 601 的光合性能和产量构成等方面探究其超高产机理。张宾根据三合结构模式二级结构层中各因素间的关系, 建立了三合模式的定量表达式:  $mLAI \times D \times mNAR \times HI = EN \times GN \times GW = Y$  (籽粒产量)<sup>[9]</sup>。张胜在小区试验中, 掖 13 品种在 87 990 株/hm<sup>2</sup> 的密度下, 获得了 17.42 t 的玉米产量, 其 *mLAI* 为的 3.46, *mNAR* 为 6.19, 全生育期为 149 d<sup>[10]</sup>。本研究与张胜的小区试验结果相比, 在生育期相当的情形下, 登海 601 的 *mLAI* 较高(见表 3), *mNAR* 偏低。本研究中玉米获

得 18 450 kg/hm<sup>2</sup> 以上的超高产水平的光合性能参数指标为 *mLAI* 达到 4.22 以上, 生育期达到 150 d, *mNAR* 达到 5.54 g/(m<sup>2</sup>·d), 收获指数维持在 0.53 的水平; 产量构成因子为单位面积穗数在 91 800 株/hm<sup>2</sup>, 穗粒数到 530 粒/穗以上, 千粒重达 385 g 以上。这些参数是其获得超高产的重要理论依据。由此可见, 在稳定收获指数和千粒重的基础上, 适当延长生育期, 提高平均叶面积指数和平均净同化率, 提高种植密度和穗粒数对于进一步挖掘玉米高产潜力具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 张志军, 张建新, 刘文国. 玉米高产群体与其源库平衡关系的分析[J]. 农业与技术, 2000, 20(6): 14—16.
- [2] 赵明, 李少昆. 论作物产量研究的“三合结构”模式[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(4): 359—363.
- [3] 陆卫平, 陈国平, 郭景伦, 等. 不同生态条件下玉米产量源库关系的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(6): 727—733.
- [4] 徐庆章, 王忠孝, 王庆成, 等. 玉米增库保源及增穗保叶高产栽培理论与实践[J]. 玉米科学, 1994, 2(2): 27—29.
- [6] 黄振喜, 王永军, 赵明, 等. 产量 15 000 kg/hm<sup>2</sup> 以上夏玉米灌浆期间的的光合特性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1898—1906.
- [7] 陈传永, 董志强, 赵明, 等. 低温冷凉地区超高产春玉米群体生长分析研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 75—79.
- [8] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 不同类型饲用玉米群体光合生理特性的研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(3): 536—540.
- [9] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物产量“三合结构”定量表达及高产分析[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1674—1681.
- [10] 张胜, 贾振业, 高炳德, 等. 公顷产量 13.7—16.1 t 春玉米光合性能及群体生理指标的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2000, 21: 55—61.

(英文摘要下转第 192 页)

- 理特性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(2): 164—166.
- [34] 廖升荣, 毛小云, 张昭其, 等. SOD 模拟物对玉米幼苗抗盐害作用效果及机理研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 962—965.
- [35] 林庆斌, 丁 杨, 王海波, 等. 盐胁迫下 SOD 模拟物对水稻幼苗生物量及 SOD 活性的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1163—1166.
- [36] 曹诣斌, 阮永明, 刘淑兰. 一种含铜 SOD 模拟化合物在植物生长调节中的作用[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2003, 26(2): 183—186.

## Effects of PGRs on starch content and quality of potato tubers

GONG Zhan-yuan<sup>1,2</sup>, XIANG Hong-tao<sup>2</sup>

(1. Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

2. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

**Abstract:** Taking a potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivar named Holand - 212 as the material, different PGRs (plant growth regulators) were sprayed under the condition of field cultivation to study the regulatory effect of spraying of PGRs on the quality of potato tubers by comparing the activities of invertase and amylase, and the content of sucrose, starch, reduced sugar and vitamin C, etc. The results show that: Diethyl aminoethyl hexanoate (DTA - 6) has great influence on the activities of invertase, the content of vitamin C and soluble protein, while the other treatments have mild regulatory effect on potato tubers at the growth period. For the purpose of tuber quality, SOD mimics (SOD<sub>M</sub>) can significantly increase the content of starch and sugar content of tubers, significantly decrease the content of hydroxybenzene, soluble protein and vitamin; Choline chloride (Cc) can significantly increase the content of soluble protein and vitamin, significantly reduce the content of starch, hydroxybenzene and sugar; DTA - 6 treatment has little effect on the quality of potato tubers.

**Keywords:** PGRs (plant growth regulators); potato tuber; starch content; quality

(上接第 171 页)

## Yield characteristics of spring maize with super-high yield in the irrigatable semiarid area of Hebei

LU Ai-zhi<sup>1</sup>, DING Cheng-fang<sup>1</sup>, WANG Xiao-bo<sup>2</sup>, WANG Mei-yun<sup>2</sup>, ZHAO Ming<sup>2</sup>

(1. Agronomy Department, Hebei North University, Zhangjiakou, Hebei 075131, China;

2. Institute of Crop and Germplasm Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The theory of three-combination structure was composed in yield components, photosynthetic characteristics and source-sink characteristics. On the basis of the three combination structures, a field trial was conducted to reveal the relationship among photosynthetic characteristics and yield component factors and yield potential of Denghai 601 hybrid with high yield potential beyond 18 450 kg/hm<sup>2</sup> in the rain-fed and compensatory irrigation farming region of north-west Hebei province. The results showed that the variety was tolerant in density. Plant density was 91 800 plant/hm<sup>2</sup>. Mean leaf area index (mLAI) was 4.22, which was high in the stage of economic yield shaping. Average net assimilation rate (mNAR) was 5.54 g/(m<sup>2</sup>·d). The harvest index was 0.53. The number of grains of every ear was 528. The weight of thousand of grains was 384.75 g. In the three combination structure, at the meantime, yield components and photosynthetic characteristics should play an important role in yield.

**Keywords:** maize; three-combination structure; super-high yield; semiarid area