

# 种植方式对华北春玉米密植群体冠层结构的调控效应\*

吴霞 陈源泉\*\* 隋鹏 高旺盛 闫鹏 陶志强

(中国农业大学农学与生物技术学院, 循环农业研究中心, 北京, 100193)

**摘要** 在大田同等密度条件下, 设计了单、双株与对、错位组合的4种植方式, 研究其对华北春播“郑单958”密植群体的冠层结构、功能及产量的影响。结果表明: 相比常规单株对位种植方式, 双株错位、双株对位和单株错位种植方式下玉米群体的冠层垂直分布呈现叶和茎的干重权重比例下移、群体叶片垂直分布趋于“纺锤形”; 植株个体穗下层茎叶夹角显著增加 $2.4^{\circ}\sim 3.4^{\circ}$ , 尤其双株错位和双株对位有效扩展了个体生态位, 显示了耐密调控能力; 灌浆期前, 各处理群体LAI及叶片功能活性略显劣势, 但在此之后LAI、穗位叶及穗下叶片中SPAD值衰减速度延缓, 功能期延长; 3个处理比常规种植方式增产11.2%~12.7%, 但差异未达显著水平; 抗倒性强、空秆率低、千粒重显著增多是产量较高的主要因素; 密植条件下改变传统的单株对位种植, 能够改善密植群体冠层结构, 优化个体形态, 提高生育后期冠层中下部叶片功能活性, 从而实现耐密、增产、稳产。

**关键词** 华北平原; 春玉米; 种植方式; 冠层结构

中图分类号 S712 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)1-0018-07

**Effect of planting geometries on canopy structure of spring maize under high-density condition in North China Plain.** WU Xia, CHEN Yuan-quan\*\*, SUI Peng, GAO Wang-sheng, YAN Peng, TAO Zhi-qiang (*Research Center of Circular Agriculture, College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 18-24.

**Abstract:** A field experiment was conducted to compare the effects of planting geometries on the canopy structure, functional properties and yield of the spring maize variety Zhengdan-958 planted under high density condition. Four planting geometries were adopted: one plant per clump opposite in adjacent rows (DD), one plant per clump staggered in adjacent rows (DC), two plants per clump opposite in adjacent rows (SD), and two plants per clump staggered in adjacent rows (SC). The results indicated that in the SD and SC treatments, the vertical distribution of canopy exhibited a spindle-shaped morphological tendency with an accumulation of the dry matter in stem and leaf in the layer of 0-90 cm (under ear leaf) and 90-180 cm (ear leaf), the stem-leaf angle under the lamina of the ear increased significantly by  $2.4^{\circ}\sim 3.4^{\circ}$ . The treatments clumps with two plants (SD and SC) provided more niche space for each plant and enhanced tolerance to high-density planting. Compared with the conventional DD planting pattern, leaf area index (LAI) and chlorophyll relative content (SPAD) values before the filling stage for clumped and scattered planting geometries were lower, while the opposite phenomenon occurred at the filling stage. Compared to the control, the grain yields in these clumped and scattered planting treatments were increased by 11.2%~12.7% but were not significantly different, largely due to increased lodging resistance and higher ear number and thousand-kernel weight. Our results confirmed that the population structure and shoot morphological structure under high-density condition were effectively regulated by the clumped and scattered planting geometries, which improved photosynthesis capacity of middle-down leaves at the filling stage and revealed a great potential of high-yielding structure and tolerance to high-density planting.

**Key words:** North China Plain; spring maize; planting geometry; canopy structure.

\*“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD16B15)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: rardc@163.com

收稿日期: 2014-04-18 接受日期: 2014-10-10

玉米是目前中国的第一大粮食作物,提高玉米单产是保证粮食安全的重要途径之一。随着品种耐密性的提高,增加种植密度成为目前生产上提高玉米单产的有效途径之一(王志刚等,2007;李宗新等,2012)。但随着种植密度的增加,群体内个体的生长空间就会受限,引起群体个体间竞争加剧,生产力下降(严云等,2010;李宗新等,2012)。研究表明,通过改变种植方式、调节个体分布状况可以有效提高种植密度而获得高产(王志刚等,2007)。宽窄行(吴雪梅等,2012)、大垄双行(武志海等,2005;曹娜等,2006)及不同株行距配置(Mattera *et al.*, 2013)等种植方式构建的不均一群体结构,人为创造边行效应,增大群体内部各层光截获量,能够有效改善群体冠层内行间的通风透光条件,在一定程度上缓解密植条件下群体和个体矛盾。但若继续缩小株行距来增加密度,同时也将缩小了玉米个体营养的吸收范围,容易导致高密玉米群体结构失衡、生产力下降。因此,如何在保障玉米个体营养吸收范围的同时,还能有继续提高密度的空间、进一步提高群体产量,成为目前栽培学者关注的重要问题。据报道,一穴双株(葛立胜等,2010;刘震等,2013)、蜂巢式或邻行错位(范厚明等,2004;王传光等,2011;Ramezani *et al.*, 2011)等种植方式,通过相对增加局部竞争,释放群体空间或植株交错排布,缓解个体拥挤等植株间的几何配置,可显著增加群体密度,降低空穗率,增强抗耐胁迫能力,显示出增密增产的潜力。但是,据目前一穴双株和邻行错位种植方式的研究来看,对象多为单一方式,角度多集中于田间生长表现及增密增产效果,而对于其耐密增产效应尚缺乏机理解释。因此,本研究在前人基础上将单、双株与行间对、错位两种种植方式进行组合,以目前生产上大面

积推广的紧凑耐密型“郑单 958”为材料,在相对较高密度下,探究不同种植方式下玉米群体及个体冠层结构形态、功能特性和产量表现,从结构和功能角度明确其耐密增产效应,阐释其耐密增产机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

试验于 2013 年在中国农业大学吴桥实验站(37°41'02"N, 116°37'23"E)进行。实验站位于河北省黑龙港流域中部,年均气温 12.6 °C,全年  $\geq 0$  °C 积温 4862.9 °C,年均降雨量 562 mm。试验地 0~20 cm 土层的基础养分情况为:有机质 14.5 g · kg<sup>-1</sup>,全氮 0.98 g · kg<sup>-1</sup>,碱解氮 65.2 g · kg<sup>-1</sup>,速效钾 124.9 g · kg<sup>-1</sup>,有效磷(Olsen-P) 15.3 g · kg<sup>-1</sup>。

供试材料为紧凑耐密型品种“郑单 958”,播种密度设  $8.3 \times 10^4$  株 · hm<sup>-2</sup>。在种植方式设计上,本研究基于山东农业大学谭秀山等(2010)提出的“双行交错稀植”与本课题组进行的“双株错位”(李宗新等,2012;吴雪梅,2012)种植方式的研究,以生产上常规种植方式单株对位(DD)为对照,设单株错位(DC)、双株对位(SD)、双株错位(SC)3 种植方式处理(图 1),3 次重复,小区面积 46.6 m<sup>2</sup>(7.4 m × 6.3 m)。试验玉米于 4 月 18 日播种,8 月 29 日收获。总施氮量 211.5 kg · hm<sup>-2</sup>,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 102.7 kg · hm<sup>-2</sup>,钾(K<sub>2</sub>O) 61.5 kg · hm<sup>-2</sup>,猪粪(干猪粪 1250 kg · hm<sup>-2</sup>)和磷肥(磷酸二铵)于播前以底肥施入,尿素分别于播前、拔节和大喇叭口期耩施,抽雄吐丝追施,比例为(2:3:2:3)。硫酸钾于播前和大喇叭口配合尿素耩施,比例为(3:2)。全生育期于拔节期灌水 75 mm,后期降雨充足未灌水,其他管理同一般大田。

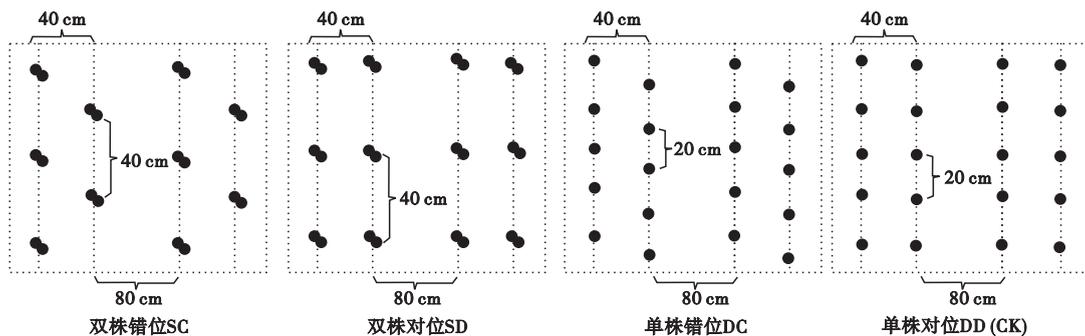


图 1 试验处理示意图

Fig.1 Schematic diagram of planting geometries

●与●●分别代表玉米单株、双株种植。SC.双株错位,SD.双株对位,DC.单株错位,DD.单株对位(CK)。下同。

## 1.2 测定项目与方法

**1.2.1 冠层群体垂直结构** 采用大田切片法(郭庆法等,2004)测定吐丝期群体结构,各小区取样面积  $2\text{ m}^2$ ,层高 30 cm,植株冠层底部起,从下往上按照预定层高分层割取样品,每层按叶片、茎鞘、果穗和雄穗分样,烘干法取干重。以层高为横坐标,各器官干重为纵坐标,按各层高度绘制出群体结构垂直分布图。

**1.2.2 植株个体形态** 于吐丝期无风天,每处理选择 15 株,测定株高、穗位高、茎粗,并采用教学用量角器逐叶测量穗位上层(穗位叶以上)、穗位叶(穗位叶 3 片)及穗位下层(穗位叶以下)各层位茎秆与叶片下部之间的茎叶夹角  $\theta$ (度),各层测定数值取平均值。

**1.2.3 叶面积指数(LAI)** 分别在 9 叶展、13 叶展、吐丝期、灌浆中期(吐丝 19 d)、灌浆后期(吐丝 27 d)测定。计算方法:叶面积=长 $\times$ 宽 $\times$ 系数(未展开叶和展开叶的校正系数分别为 0.5 和 0.75),LAI=单株叶面积 $\times$ 单位土地面积内株数/单位土地面积。

**1.2.4 SPAD 值** 在 13 叶展、吐丝期、灌浆期(吐丝后 26 d),采用日本美能达公司产手持式 SPAD-502 型叶绿素计对植株的穗位叶、穗上叶层(穗位叶以上第 3 叶)和穗下叶层(穗位叶以下第 3 叶)进行测定,每片叶测定叶顶、叶中、叶基部,求取平均值,每小区选择 3 株进行测定。

**1.2.5 收获测产** 收获前田间调查统计各处理倒伏率、空秆率及有效穗数。另选取代表性 10 穗进行室内穗部性状及产量构成因素考种测定。

## 1.3 数据处理

试验数据处理采用 Excel 2010 和 SPSS 13.0 进

行统计分析。采用 SPSS 13.0 软件包进行单因素方差分析(ANOVA),用 Duncan 检验进行各组均数的多重比较, $\alpha=0.05$ ,采用 Pearson 法对产量和各指标进行相关分析,文中图表由 Excel 2010 和 SigmaPlot 10.0 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植方式下群体冠层结构垂直分布

在开花期对不同种植方式下的“郑单 958”群体冠层进行大田切片分析(表 1 与图 2)。由表 1 可见,相比常规 DD 种植方式,其他处理开花期的单位面积群体茎、叶、果穗及冠层总干重均降低,其中以 DC 降低幅度最大,而 SC 次之;从各器官所占比例来看,SC、SD、DC 的群体冠层叶的比例明显增加,而茎有所降低;从各器官垂直结构的分布发现,SC、SD、DC 种植处理 0~90 cm(穗下层)的茎和 90~180 cm(穗位层)的叶的比例权重明显增多,比常规 DD 种植相应层位分别提高 8.8%、7.4%、9.8%和 7.9%、3.7%、6.1%(表 1),改变常规 DD 种植的“蘑菇型”垂直结构,使群体冠层叶和茎的比例权重分布下移,分别集中于穗位叶层和植株基部,使冠层叶的垂直分布趋于“纺锤形”,其中以双株种植(SD、SC)更为明显(图 2)。而这种光合器官(叶片)和非光合器官(茎秆等)在空间的配置分布有助于扩大紧凑型“郑单 958”群体冠层中下部叶层光合面积,增强植株个体抗倒性。

### 2.2 不同种植方式下植株个体形态特征

由表 2 可知,除茎叶夹角外,不同种植处理下紧凑型“郑单958”植株个体形态表现无显著差异。

表 1 不同种植方式下吐丝期群体冠层结构(干重)

Table 1 Dry matter weight of population canopy at silking stage under different planting geometries

处理	器官干重( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )					器官干重占总干重比例(%)				各器官干重在垂直各层次中的分布(%)			
	茎	叶	雌穗	雄穗	总	茎	叶	雌穗	雄穗	0~90 cm 茎	0~90 cm 叶	90~180 cm 茎	90~180 cm 叶
SC	474.31	318.20	82.81	36.14	911.46	52.04	34.91	9.09	3.97	58.80	19.41	38.18	57.93
SD	490.92	331.94	84.14	36.24	943.23	52.05	35.19	8.92	3.84	57.36	18.82	37.69	53.72
DC	437.85	299.36	67.21	39.58	843.99	51.88	35.47	7.96	4.69	59.82	18.80	36.16	56.14
DD	513.76	323.81	86.09	36.47	960.13	53.51	33.73	8.97	3.80	50.98	17.38	36.76	50.62

表 2 不同种植方式下植株个体形态特征

Table 2 Plant type characteristics under different planting geometries

处理	株高 (cm)	穗位高 (cm)	茎粗 (cm)	茎叶夹角( $^{\circ}$ )		
				穗下叶	穗位叶	穗上叶
SC	251.0 a	120.2 a	2.65 a	20.2 $\pm$ 4.4 a	18.3 $\pm$ 0.9 a	15.3 $\pm$ 1.9 a
SD	248.3 a	115.8 a	2.60 a	20.5 $\pm$ 1.1 a	16.0 $\pm$ 2.2 a	15.8 $\pm$ 0.6 a
DC	251.2 a	118.6 a	2.63 a	19.5 $\pm$ 1.1 a	16.0 $\pm$ 2.2 a	15.8 $\pm$ 0.6 a
DD	249.9 a	116.8 a	2.66 a	17.1 $\pm$ 2.1 b	16.2 $\pm$ 0.7 a	16.6 $\pm$ 2.0 a

不同的字母表示在 0.05 水平差异显著( $n=3$ )。

相比单株对位常规种植方式,SC、SD 和 DC 3 种不同种植排布下的各层位茎叶夹角均有不同程度的增加。尤其是双株种植 SC 和 SD 处理穗位以下的茎叶夹角,分别增加了 3.1° 和 3.4° ( $P < 0.05$ )。这说明,一穴双株与行间错位能显著扩展高密群体内植株个体的空间生态位,有效调节紧凑密植的植株个

体穗下部叶片舒展,优化株型,有利于光能截获,避免早衰发生。

### 2.3 不同种植方式下叶面积指数变化

叶片在冠层结构中起着最主要的作用,其与光分布和光能利用有密切的关系。如图 3 所示,不同种植方式处理的叶面积指数均随生育进程呈单峰曲线的变化态势,9 叶展后 LAI 上升迅速,吐丝期达到最大值,此后,下部叶片相继死亡脱落,LAI 下降。在灌浆期之前,常规 DD 种植的 LAI 均高于其他种植方式处理,灌浆期之后迅速下降。而其他 3 种植物处理的 LAI 在吐丝前差异不明显,到吐丝期之后,SC 的衰减速度小于其他处理,灌浆后期仍保持较高的 LAI 值,比其他处理明显高出 19.5%~24.2%,在一定程度上显示了高效冠层的潜势。

### 2.4 不同种植方式下叶片 SPAD 值变化

叶绿素含量与叶片光合性能高低密切相关,是反映叶片生理活性的重要指标之一。SPAD 值(叶色值)常用来表示活性叶片中叶绿素的相对含量(左振朋等,2010)。除穗下叶层,灌浆期前不同处理叶片 SPAD 值随生育进程而升高,各叶层的 SPAD 值大小表现为穗位叶 > 穗上叶 > 穗下叶(图 4)。不同生育时期,各种处理对叶片 SPAD 值影响不同。在 13 叶展和吐丝期,3 种植物处理下叶片 SPAD 值均低于常规 DD 种植,尤其以 DC 处理最低,双株处理下的 SC、SD 次之。而至灌浆期,SC、SD、DC 处理之间叶片 SPAD 值差异不明显,但中下部叶片的 SPAD 值明显高于常规 DD 种植,穗下叶和穗位叶分别高出 3.31%、4.32%、3.69% 和 2.09%、2.72%、5.01%。这说明,双株种植和行间错位种植所形成的冠层结构有利于紧凑型密植群体后期冠层中下部

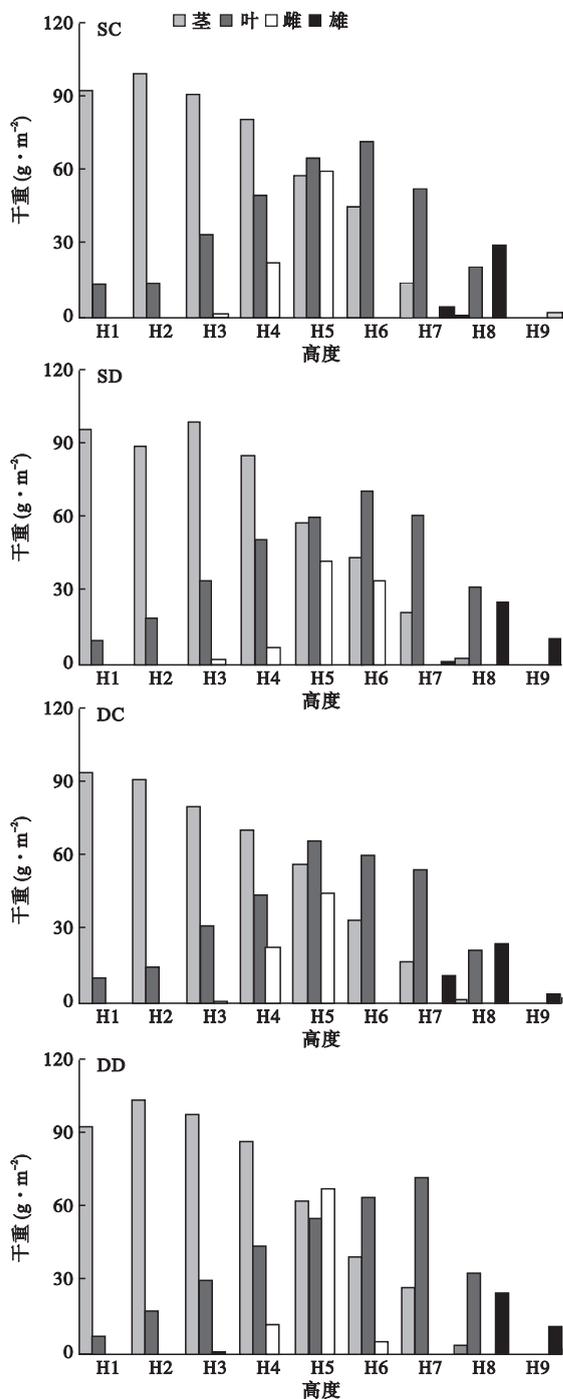


图 2 不同种植方式下吐丝期冠层结构垂直分布  
Fig.2 Vertical distribution on canopy structure at silking stage under different planting geometries

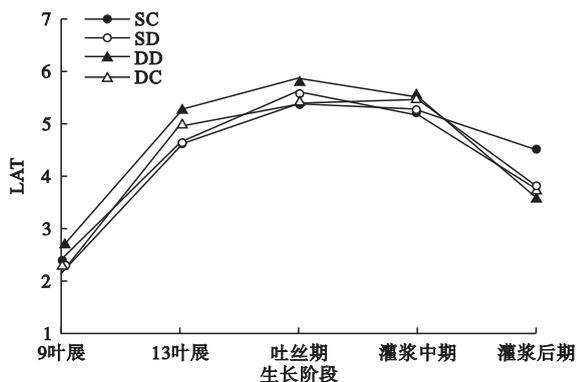


图 3 不同种植方式下叶面积指数(LAI)  
Fig.3 Leaf area index (LAI) under different planting geometries

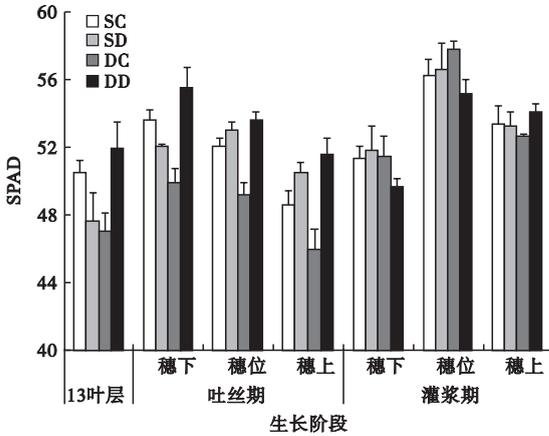


图 4 不同种植方式下叶片 SPAD 值

Fig.4 SPAD value of leaves under different planting geometries

叶片活性和功能的提高,保证籽粒充分灌浆。

### 2.5 不同种植方式下产量及田间表现

由表 3 所示,SC、SD、DC 处理的产量表现差异较小,且均高于常规 DD 种植,分别增产 11.2%、12.7%和 11.4%,但差异均未达到显著水平。从产量构成因素来看,3 种植处理虽然穗粒数稍低于常规 DD,但是实际有效穗数和千粒重均高于常规 DD 种植,尤其是 DC 与 DD 的千粒重差异达到了显著水平,最终使得 3 种植方式的产量均高于 DD 常规种植方式,平均高出 11.8%。

表 4 不同种植方式下产量与冠层结构、功能指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among yield, canopy structure and function indexes

指标	叶比例	基部茎比例	穗层叶比例	穗下茎叶夹角	灌浆后期 LAI	灌浆期穗下叶 SPAD	灌浆期穗位叶 SPAD	穗数	千粒重	籽粒产量
结构	叶比例	1								
	基部茎比例	0.954*	1							
	穗层叶比例	0.731	0.901	1						
	穗下茎叶夹角	0.863	0.865	0.752	1					
功能	灌浆后期 LAI	0.238	0.492	0.799	1					
	灌浆期穗下叶 SPAD	0.957*	0.906	0.699	0.963*	0.321	1			
	灌浆期穗位叶 SPAD	0.922	0.858	0.604	0.601	0.005	0.775	1		
产量	穗数	0.865	0.945	0.921	0.949	0.681	0.906	0.654	1	
	千粒重	0.767	0.738	0.540	0.354	-0.052	0.549	0.949	0.478	1
	籽粒产量	0.952*	0.936	0.775	0.976*	0.424	0.993**	0.761	0.949	0.546

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 。

### 3 讨论

玉米以群体进行光合生产,合理的群体结构分布和功能特性是提高光能利用率以获得高产的重要条件(齐华等,2010)。栽培措施通过调整冠层结构

表 3 不同种植方式下产量及构成因素

Table 3 Yield and components under different planting geometries

处理	穗数 ( $\times 10^4$ 穗 $\cdot$ $\text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
SC	7.0 a	357.4 a	315.57 ab	6726.0 a
SD	6.8 a	369.3 a	315.11 ab	6817.2 a
DC	6.8 a	351.1 a	330.93 a	6738.1 a
DD	6.1 a	373.4 a	309.86 b	6048.2 a

不同的字母表示在 0.05 水平差异显著 ( $n=3$ )。

### 2.6 不同种植方式下产量与冠层结构、功能指标的相关性

由表 4 可见,不同种植方式下,冠层群体结构指标叶比例、穗位层叶比例及基部茎比例与植株个体穗下茎叶夹角指标均呈正相关( $r=0.752 \sim 0.954$ ),表明改变种植方式后,玉米冠层群体叶与茎器官的垂直分布及群体与个体之间均存在同步的改变响应。群体叶比例、穗下茎叶夹角与灌浆后期 LAI、灌浆期穗下 SPAD 及穗位 SPAD 呈显著正相关( $r=0.957, r=0.963, P < 0.05$ ),说明密植条件下,穗层叶比例增加和穗下茎叶夹角增大等冠层结构成分的改变,有助于玉米生育中后期下部叶片的扩展及光合性能的增强。冠层结构和功能等指标与籽粒产量及穗数、千粒重均呈正相关,表明冠层结构成分的改善及光合性能的提高有助于增强田间生长表现,优化产量构成因素,增产稳产。

组成成分来影响冠层结构(Maddonna *et al.*, 2001),进而影响群体光能截获和利用以及各器官功能的发挥。相比种植密度,种植方式对群体冠层结构和植株个体形态影响程度较小(Maddonna *et al.*, 2001),但在特定密度下,种植方式能有效调节冠层结构成

分,进而改善群体质量。

### 3.1 一穴双株和邻行错位种植方式能够改善密植群体结构,优化个体形态

在群体结构研究上,前人认为,密植条件下冠层群体各器官干重的垂直分布呈现比例权重向冠层上部升高的趋势(李宗新等,2012),植株个体对周围空间感知及对生长中后期荫蔽环境的趋避都会使植株形态发生调整,如各层茎叶夹角变小,株高增加,茎变细等(吕丽华等,2008)。本研究利用大田切片法,观察了不同种植方式下“郑单 958”群体冠层各器官的垂直分布,相比常规单株对位种植,双株错位、双株对位和单株错位种植方式下冠层总干重及各器官干重略有降低,但叶的比例相对增加,群体冠层叶和茎的比例权重分布下移,分别集中于 90~180 cm(穗位层)和 0~90 cm(穗下植株基部),改常规 DD 种植密植群体的“蘑菇型”垂直结构更趋于“纺锤形”。从植株个体形态对种植方式改变的响应来看,“郑单 958”各层位茎叶夹角均有不同程度的增大,尤其穗下层叶对双株种植(SC、SD)响应最为显著,分别提高 3.1°和 3.4°。而且从冠层群体与个体结构指标间的相关分析来看,叶与茎等器官的垂直分布及群体与个体之间均存在同步的改变响应。因此,群体冠层和个体结构形态的这种改变,均显示了双株种植和行间错位种植方式能有效调控冠层群体各器官空间配置,相对扩展密植群体内个体的空间生态位,进而也解释了前人报道的关于双株种植和邻行错位种植靠增加有效种植密度以获得较高群体生产力的论断。

### 3.2 一穴双株和邻行错位种植方式有利于增强密植群体冠层功能,提高叶片光合活性

群体结构的改变进而会引起群体质量和功能的改变。李宗新等(2012)研究发现,密植条件下,双株配置有利于平展型和紧凑型品种冠层中下部叶片的建成与积累,扩大了群体受光面积,相对增强了生育后期“源”供应能力,有效延缓后期 LAI 和叶绿素含量的衰减。与前人研究结果一致,本研究中双株错位、双株对位及单株错位种植方式下的玉米灌浆后期冠层 LAI、穗位叶及穗下叶片中 SPAD 值含量在灌浆期之后的衰减速度小于常规单株对位种植,尤其是以双株处理(SC、SD)最为明显。灌浆后期 LAI、灌浆期穗下 SPAD 及穗位 SPAD 与冠层部分结构指标达到了显著相关水平( $r = 0.957$ ,  $r = 0.963$ ,  $P < 0.05$ ),说明更改种植方式后,穗位层叶比例增加

及穗下茎叶夹角的增大,促进了下部叶片的扩展及其光合活性的提高,延缓了早衰,保证了籽粒灌浆期间同化物“源”供应能力。但从生长前期来看,3 种植处理下群体干物质积累、LAI 及叶片中 SPAD 值均低于常规单株对位种植,处理之间以单株错位最低,而双株种植下的 SD 及 SC 处理略低于常规单株种植。李宗新(2012)研究也指出,由于存在穴间局部的竞争,在特定密度下双株种植单株干物质达到最大积累量的时间表现延迟。虽然前期的营养生长是后期取得经济产量的基础,但前期营养生长过盛反而不利于后期同化物向经济器官的分配(郭庆法等,2004; Krishnareddy *et al.*, 2009)。所谓的高产群体关键在于经济器官生长期较高的光合效能和物质积累量(凌启鸿等,1984),尤其是保证密植群体中后期穗位层及穗下层适宜的光照空间,防止叶片早衰(郭晓华,2000),促进更多同化物向结实器官转化。

### 3.3 一穴双株和邻行错位种植方式可提高密植群体耐密稳产能力,有效增加产量

从产量表现上,由于 3 种处理灌浆期穗位及穗下叶光合面积和光合性能的相对优势,其籽粒产量均高于常规单株对位种植,增产 11.2%~12.7%,但差异未达显著水平。从产量构成因素来看,3 种植方式下实际有效穗数和千粒重均高于常规 DD 种植,尤其是单株错位千粒重增加显著( $P < 0.05$ )。已有研究报道,在气候多变及产量较低的中低产田,一穴多株、一穴双株及邻行错位种植方式能相对增强植株抗倒性,抗逆胁迫能力强(吴雪梅等,2012);高密种植下,空穗率降低,经济系数及千粒重均显著增大(范厚明等,2004;葛立胜等,2010;王传光等,2011; Ramezani *et al.*, 2011),已成为多变气候区的重要稳产技术。因此,不同种植方式下玉米产量的差异主要是由有效穗数和千粒重变化引起。

综合前面分析,本研究设计的一穴双株和邻行错位种植方式能够起到“耐密增产”的机理主要是(图 5):密植条件下通过种植方式调整,使得群体冠层叶比例增加,垂直分布呈现叶与茎的干重权重分布比例下移,群体叶片垂直分布趋于“纺锤形”,个体植株穗下层茎叶夹角显著增大。这些改变使得高密群体内部空间和植株个体生态位得到了有效释放和扩展,缓和了高密群体内部个体间竞争拥挤。同时也有利于密植群体生育中后期冠层中下部叶片光合面积的扩展及光合性能的提高,进而促进籽粒的

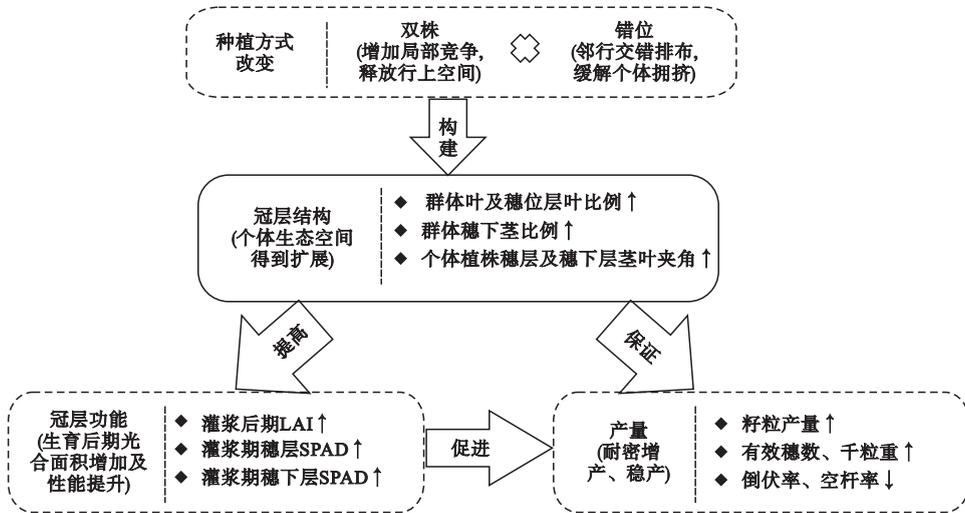


图5 一穴双株和邻行错位种植方式耐密增产调控效应机制

Fig.5 Mechanism of raising yield and being tolerant to high density for two plants per clump and clumps staggered in adjacent rows planting geometries

充分灌浆,增加千粒重;个体基部茎比例的增大也增强了密植群体内个体抗倒性,降低了空秆率,保证了有效穗数,最终实现耐密、增产、稳产。

#### 参考文献

- 曹娜,于海秋,王绍斌,等. 2006. 高产玉米群体的冠层结构及光合特性分析. 玉米科学, **14**(5): 94-97.
- 范厚明,梁黔云. 2004. 玉米宽窄行单株错位定植综合栽培技术. 作物杂志, (1): 36-38.
- 葛立胜,景希强,何晶,等. 2010. 玉米双株叶片定向超高产栽培技术研究. 辽宁农业科学, (4): 38-40.
- 郭庆法,王庆成,汪黎明. 2004. 中国玉米栽培学. 上海: 上海科学技术出版社.
- 郭晓华. 2000. 生态因子对玉米产量构成因素的调控作用. 生态学杂志, **19**(1): 6-11.
- 李宗新,陈源泉,王庆成,等. 2012. 密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响. 生态学报, **32**(23): 7391-7401.
- 凌启鸿,凌励. 1984. 水稻不同层次根的功能及对产量形成作用的研究. 中国农业科学, **17**(4): 3-11.
- 刘震,傅俊范,景殿玺,等. 2013. 双株定向栽培模式对玉米纹枯病发生和流行影响的初步研究. 玉米科学, **21**(5): 131-135.
- 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等. 2008. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性. 作物学报, **34**(3): 447-455.
- 齐华,梁熠,赵明,等. 2010. 栽培方式对玉米群体结构的调控效应. 华北农学报, **25**(3): 134-139.
- 谭秀山,毕建杰,刘建栋,等. 2010. 玉米种植方式的发展趋势. 山东农业科学, (5): 57-58, 61.
- 王传光,国兆新,谭秀山,等. 2011. “双行交错”种植方式的玉米光合特性研究. 河北农业科学, **15**(4): 1-4.
- 王志刚,高聚林,任有志,等. 2007. 春玉米超高产群体冠层

- 结构的研究. 玉米科学, **15**(6): 51-56.
- 吴雪梅,陈源泉,李宗新,等. 2012. 玉米空间布局种植方式研究进展评述. 玉米科学, **20**(3): 115-121.
- 吴雪梅. 2012. 不同种植方式对夏玉米群体光、水利用及生长发育的影响(硕士学位论文). 北京: 中国农业大学.
- 武志海,张治安,陈展宇,等. 2005. 大垄双行种植玉米群体冠层结构及光合特性的解析. 玉米科学, **13**(4): 62-65.
- 严云,廖成松,张福锁,等. 2010. 密植条件下玉米冠根生长抑制的因果关系. 植物营养与肥料学报, **16**(2): 257-265.
- 左振朋,王婧,董鲁浩,等. 2010. 不同品质类型玉米籽粒充实期的胚乳细胞增殖与生理活性比较. 作物学报, **36**(5): 848-855.
- Krishnareddy SR, Stewart BA, Payne WA, et al. 2009. Grain sorghum tiller production in clump and uniform planting geometries. *Journal of Crop Improvement*, **24**: 1-11.
- Maddonna GA, Otegui ME, Cirilo AG. 2001. Plant population density row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Research*, **71**: 183-193.
- Mattera J, Romero LA, Cuatrin AL, et al. 2013. Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (*Medicago sativa* L.) in response to row spacing. *European Journal of Agronomy*, **45**: 87-95.
- Ramezani M, Abandani RRS, Mobasser HR, et al. 2011. Effects of row spacing and plant density on silage yield of corn (*Zea mays* L. cv. sc704) in two plant pattern in North of Iran. *African Journal of Agricultural Research*, **6**: 1128-1133.

作者简介 吴霞,女,1990年生,硕士研究生,主要从事农田生态和作物栽培研究. E-mail: wxwly20@163.com  
责任编辑 李凤芹