

种植方式对夏玉米光合生产特征和光温资源利用的影响*

朱元刚¹ 董树亭^{1*} 张吉旺¹ 刘 鹏¹ 杨今胜^{1,2} 贾春兰² 柳京国² 李登海²

(¹ 山东农业大学农学院作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; ² 山东登海种业股份有限公司, 山东莱州 261448)

摘 要 为研究套种与直播两种种植方式对夏玉米光合生产特征和光温资源利用的影响,选取郑单958和登海661为研究对象,设置3个播期,密度为67500株·hm⁻²,以地上干物质积累量和作物生长速率、叶面积指数、穗位叶的单叶光合速率来评价夏玉米的光合生产特征;以Richards模型拟合籽粒灌浆过程;结合气象数据计算夏玉米光能利用率.结果表明:直播处理比套种处理籽粒产量增加1.17%~3.33%($P<0.05$),但千粒重显著降低;生育期随播期提前而延长;直播条件下叶面积指数和单叶光合速率在灌浆前期显著高于套种,但灌浆后期下降较快;与套种相比,直播开花前和开花后具有较高的干物质积累量和较快的作物生长速率. Richards模型解析表明,直播处理达到最大灌浆速率的时间明显早于套种,起始势较套种高,但灌浆期、活跃灌浆期和灌浆速率最大时的生长量均低于套种;与套种相比,直播处理生育期间总积温和总辐射量分别减少150~350℃·d和200~400MJ·m⁻²,但籽粒光能利用率较套种提高10.5%~24.7%.因此,直播较套种有优势,在夏玉米大田生产条件下,重视叶片的光合生产特征,延缓叶片衰老,有利于提高夏玉米的光能利用率,进一步挖掘增产潜力.

关键词 夏玉米 套种 直播 光合生产特征 光温资源利用

文章编号 1001-9332(2010)06-1417-08 **中图分类号** S513 **文献标识码** A

Effects of cropping patterns on photosynthesis characteristics of summer maize and its utilization of solar and heat resources. ZHU Yuan-gang¹, DONG Shu-ting¹, ZHANG Ji-wang¹, LIU Peng¹, YANG Jin-sheng^{1,2}, JIA Chun-lan², LIU Jing-guo², LI Deng-hai² (¹State Key Laboratory of Crop Biology, College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China; ²Shandong Denghai Seed Co. Ltd, Laizhou 261448, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(6): 1417-1424.

Abstract: In order to investigate the effects of interplanting and direct seeding on the photosynthesis characteristics of summer maize and its utilization of solar and heat resources, two summer maize cultivars (Zhengdan 958 and Denghai 661) were planted in the farmlands of Denghai Seed Co. Ltd in Laizhou City of Shandong Province, with 67500 plants·hm⁻² and three sowing dates. The above-ground biomass, plant growth rate, leaf area index, and net photosynthetic rate per ear leaf were measured to reveal the photosynthesis characteristics of test cultivars. In the meantime, the characters of grain-filling were simulated by Richards' model, and the solar resource utilization efficiency of the cultivars was calculated, in combining with meteorological data. Comparing with interplanting, direct seeding increased the grain yield by 1.17%~3.33%, but decreased the thousand-grain weight significantly. Growth stages were extended under earlier sowing. The leaf area index and net photosynthetic rate from flowering to 30 d after anthesis were significantly higher under direct seeding than under interplanting, but after then, they decreased faster. Direct seeding induced a higher accumulation of dry matter and a faster plant growth rate before and after flowering. Under direct seeding, the maximum grain-filling rate reached earlier, the starting potential was higher, but the grain-filling period, active grain-filling period, and W_{max} were lower, compared with those under

* 国家科技支撑计划项目(2007BAD31B04, 2006BAD02A09-JS02, 2006BAD02A13-2-2)、国家自然科学基金项目(30871476)、公益性行业科研专项(nyhyzx07-003, 200903003)、国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118602)和山东省玉米良种工程项目(2009-7)资助.

** 通讯作者. E-mail: stdong@sdau.edu.cn

2009-08-21 收稿, 2010-03-24 接受.

interplanting. Also under direct seeding, the total accumulative temperature and solar radiation during growth period decreased by $150\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ and $200\text{--}400\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively, but the solar resource utilization efficiency of grain increased by $10.5\%\text{--}24.7\%$. All the results suggested that direct seeding was superior to interplanting for the summer maize production under field condition. In order to enhance solar and heat utilization efficiency and excavate yield potential, it would be essential to improve the leaf photosynthesis efficiency and postpone leaf aging.

Key words: summer maize; interplanting; direct seeding; photosynthesis characteristics; utilization of solar and heat resources.

自 20 世纪 90 年代以来世界粮食增产速度减缓^[1],粮食短缺是未来几十年全世界面临的重要问题^[2].随着我国人口增加和经济发展,可利用耕地面积不断减少,水资源日益短缺,粮食安全问题日趋严峻.要在耕地面积刚性减少的情况下保证粮食总产量,只有提高单位面积产量,而如何提高单产已成为当今世界作物科学的重要研究课题之一.玉米是 C_4 作物,是我国第二大粮食作物,具有光合效率高和产量潜力大的特点,因此提高玉米单产对保障未来我国的粮食安全具有深远意义.光合作用是作物产量形成的基础,作物干物质 90% 以上来源于光合作用.玉米光合特性的研究一直备受关注^[3-6].前人从单叶光合^[3-4,7-8]、群体光合特征^[5,9-11]、光合产物积累与分配^[12-13]及株型对光合特性的影响^[8]等方面进行了系统的研究,但较多集中于气象因子和肥水等栽培措施对光合特性的影响^[3-4,6,12,14-17],目前不同种植方式对夏玉米光合生产特性与光温资源利用的影响研究较少.

山东省属黄淮海夏玉米区,是我国重要的粮食生产基地,冬小麦-夏玉米一年两熟是该地区典型的生产种植制度,其中冬小麦套种夏玉米占总面积的 80% 以上.该地区传统套播夏玉米一般在麦收前 7~10 天左右,由于麦收前玉米苗期受小麦遮光,严重影响了后期的生长发育,限制了产量潜力的发挥.加之近几年河南、河北、山东、山西和江苏等省市相继大面积发生夏玉米粗缩病危害(以 2008 年为例,据山东省农业部门统计全省玉米粗缩病危害面积达 62万 hm^2 ^[18]),使夏玉米空秆率呈逐年上升趋势,最终严重影响了夏玉米的产量.同时随着农业机械化程度的不断提高,套种种植方式已经不适应现实生产的需要.本文以夏玉米品种登海 661 和郑单 958 为研究对象,通过设置不同播期,研究了套种和直播两种种植方式对夏玉米光合生产特征和光温资源利用的影响,为进一步挖掘夏玉米产量潜力,提高光温资源利用率提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2008 年在山东省登海种业股份有限公司第 16 试验场($37^{\circ}20.7'\text{N}$, $119^{\circ}56.6'\text{E}$,海拔 7.9 m)进行.前茬作物为小麦,沙壤土,耕层(0~20 cm)土壤有机质 $9.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效氮 $32.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $11.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $61.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 值 6.68.

1.2 试验设计

选用目前我国推广面积最大的郑单 958 (ZD958)和具有高产潜力的登海 661 (DH661)两个品种为研究对象.每个品种均设置 3 个播期,分别为 5 月 26 日冬小麦田套种、6 月 5 日冬小麦田套种、6 月 17 日小麦收获后直播,种植密度均为 $67500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,行距 66.7 cm,株距 21.2 cm,小区面积 90 m^2 ,3 次重复.按播期早晚由北向南顺序排列,以避免前一播期对后一播期的影响.玉米播种后于当天浇水,整个生育进程参照常规生产管理,生育期内保证良好的肥水供应,拔节期追施复合肥(N:P:K=15:15:15,总养分 $\geq 45\%$) $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,硫酸钾(含钾量 $\geq 50\%$) $112\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,大口期追施尿素(含氮量 $\geq 46\%$) $245\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.冬小麦于 6 月 16 日收获.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生育时期和叶面积指数 调查记载出苗期、三叶期、拔节期、大口期、开花期、乳熟期、完熟期天数.各处理选取 5 株代表性植株挂牌标记,于拔节期、小喇叭口期、大口喇叭口期、开花期、乳熟期和完熟期采用长宽系数法测定植株叶面积,计算叶面积指数(LAI).

1.3.2 光合速率 各处理于开花之日起,每隔 15 d 用英国 PP System 公司生产的 CIRAS-2 便携式光合作用测定系统测定穗位叶净光合速率(P_n),选择晴朗无云天气于 10:00—12:00 测定.

1.3.3 干物质积累 于拔节期、大口期、开花期、乳熟期和成熟期在每个处理小区选取代表性植株 5

株,分为茎(含叶鞘和穗轴)、叶(含苞叶)和果穗(开花后)3部分,置于105℃烘箱杀青30 min,80℃烘干至恒量,计算作物生长率(CGR):

$$CGR=(M_2-M_1)/(T_2-T_1)$$

式中: M_1 、 M_2 分别为 T_1 、 T_2 时间的干物质积累量^[19].

1.3.4 籽粒灌浆过程的模拟 从开花后每隔10 d 取样一次,每个处理取5个果穗,选取中部籽粒100粒,至烘箱内105℃杀青30 min,然后在80℃下烘干至恒量.以开花后天数(t)为自变量,以开花后每隔10 d测得的百粒重为因变量(W),参照朱庆森等^[20]和顾世梁等^[21]的方法,用Richards方程 $W=A(1+Be^{-Ct})^{-1/D}$ 对籽粒灌浆速率过程进行模拟.通过CurveExpert 1.3软件进行拟合,得到Richards方程参数 A 、 B 、 C 、 D (其中, A 为终极生长量, B 为初级参数, C 为生长速率参数, D 为形状参数.当 $D=1$ 时即为Logistic方程).计算下列灌浆特征参数:达最大灌浆速率时的天数 $T_{max}=(\ln B-\ln D)/C$;灌浆速率最大时的生长量 $W_{max}=A(D+1)^{-1/D}$;最大灌浆速率 $G_{max}=(CW_{max}/D)[1-(W_{max}/A)^D]$;积累起始势 $R_0=C/D$;灌浆活跃期(大约完成总积累量的90%) $P=(D+2)/C$.

1.3.5 产量构成因素 成熟期收获每个小区中间的三行果穗(24 m²),记录收获穗数,并随机选取20果穗进行考种,包括穗粒数、千粒重,收获穗全部脱粒后自然风干,用水分仪测定水分后,按14%含水量折合成公顷产量.

1.3.6 生育期内光合有效辐射、≥10℃有效积温和光能利用率 气象资料由莱州市气象局提供,包括第一期播种到最后一期收获时的日平均气温、日照时数和降水量等.太阳辐射数据由日照时数广泛使用的AP模型计算得到^[22].参考严定春等^[23]的方法计算≥10℃有效积温.

$$RUE=(\Delta W\cdot H)\sum s^{-1}\times 100\%$$

式中: RUE 为光能利用率; ΔW 为测定期间干物质或者籽粒产量的增量,单位是g·m⁻²; H 是能量转换系数,表示1 g干物质或者籽粒所含的能量,取值为17.5 KJ·g⁻¹; s 是测定期间每日太阳辐射总量,单位是MJ·m⁻²^[24].

1.4 数据处理

用Microsoft Excel 2003软件进行数据处理和作图,用DPS 7.05软件进行方差分析和多重比较(Duncan法).

2 结果与分析

2.1 种植方式对夏玉米产量及产量构成因素的影响

由表1可以看出,直播(6月17日直播,下同)的玉米产量均高于套种1(5月26日套种,下同)和套种2(6月5日套种,下同)($P<0.05$).其中,DH661直播籽粒产量比套种1和套种2分别提高3.33%和1.58%,ZD958直播籽粒产量比套种1和套种2分别提高2.72%和1.17%.进一步分析产量构成因素可以看出,直播比套种具有较高的收获穗数,主要是直播的空秆率远远低于套种,其中DH661直播的空秆率比套种1和套种2分别降低了89.0%和85.5%,ZD958直播的空秆率比套种1和套种2分别降低了86.4%和81.7%.但直播的千粒重低于套种,其中DH661直播的千粒重比套种1和套种2分别降低了1.68%和0.55%,ZD958直播的千粒重比套种1和套种2分别降低了4.97%和4.22%.直播和套种处理的穗粒数因品种不同而表现出不同的差异.可见,保持较高的收获穗数,提高千粒重,是进一步提高夏玉米产量的有效途径.

2.2 种植方式对夏玉米生育进程的影响

套种玉米生育期较直播长,套种时间越早生育期越长.由表2可以看出,从播种到出苗,套种1和套种2的天数基本相同,而直播较套种早出苗2 d左右;从出苗到开花,套种2与直播基本相同,而套种1较两者长7~9 d;从开花到成熟,直播比套种少3~5 d.因此,套种对玉米生育进程的影响主要表现在开花前,而对开花至成熟期的进程影响不大.

表1 种植方式对夏玉米产量及产量构成因素的影响
Tab.1 Effects of cropping patterns on yield and yield components of summer maize

品种 Cultivar	播 期 Sowing date	穗粒数 Grains number per ear	千粒重 1000-grains mass (g)	收获穗数 Harvest ears (hm ⁻²)	籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)
DH661	05-26	475.7b	380.9a	61965c	11307c
	06-05	482.4a	376.6b	63315b	11502b
	06-17	466.4c	374.5c	66893a	11684a
ZD958	05-26	502.9c	345.6a	63788c	11088c
	06-05	507.2b	342.9b	64733b	11258b
	06-17	517.7a	328.4c	66994a	11390a

同列数据后的不同字母表示同一品种不同播期间差异显著($P<0.05$) Values followed by different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among sowing dates for the same cultivar. 下同 The same below.

表 2 种植方式对夏玉米生育进程的影响
Tab.2 Effects of cropping patterns on growth course of summer maize

品种 Cultivar	播 期 Sowing date	播种至出 苗天数 Days from sowing to emergence (d)	出苗至 开花天数 Days from emergence to flowering (d)	开花至 成熟天数 Days from flowering to maturity (d)	生育期 Growth stage (d)
DH661	05-26	7	62	64	133
	06-05	7	54	63	124
	06-17	5	53	61	119
ZD958	05-26	7	61	62	130
	06-05	6	54	61	121
	06-17	4	53	57	114

2.3 种植方式对夏玉米叶面积指数(LAI)的影响

LAI 的大小直接影响到玉米对光能的截获,尤其开花期的群体最大 LAI 是花后光合生产的重要物质基础. 由图 1 可见,两个品种不同处理的 LAI 均表现为随生育期的推进逐渐增大,在开花期达到最大值,随后下降;开花前直播处理的 LAI 显著高于套种,但乳熟期后下降速度明显快于套种. DH661 和 ZD958 直播的 LAI 开花期高达 5.45 和 6.23,但灌浆后期下降较套种快,成熟期已降至 2.34 和 0.57,主要是由于灌浆后期温度降低,导致直播叶片衰老加快,光合有效面积减小,这是造成直播的千粒重较套种低的原因之一.

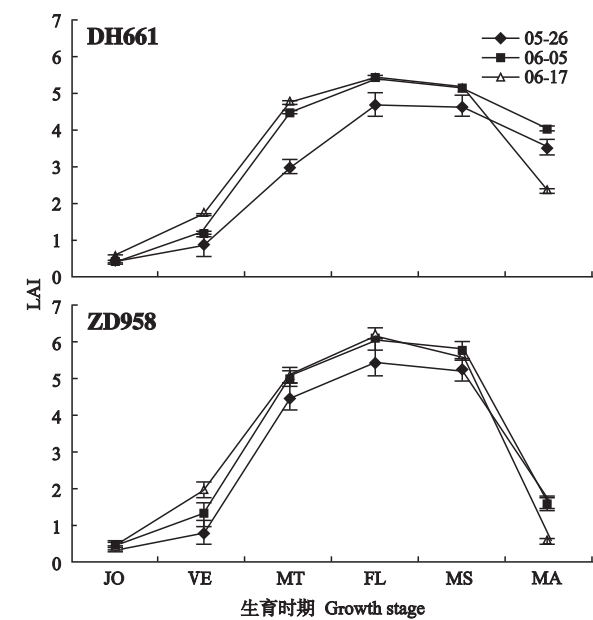


图 1 不同种植方式下夏玉米叶面积指数的变化
Fig.1 Changes of leaf area index of summer maize under different cropping patterns.
JO: 拔节期 Jointing; VE: 小口期 Ventage; MT: 大口期 Male tetrads; FL: 开花期 Flowering; MS: 乳熟期 Milking stage; MA: 成熟期 Maturity. 下同 The same below.

2.4 种植方式对夏玉米穗位叶光合速率(P_n)的影响

叶片具有较高的光合速率是作物获得高产的一个重要保障. 由图 2 可以看出,两个品种不同播期花后穗位叶净光合速率(P_n)均表现出随生育进程逐渐降低的趋势. 开花期至花后 30 d,直播与套种的 P_n 下降缓慢,且直播具有较高的 P_n ;花后 30 d 至收获期, P_n 降低较快,后期尤为明显,直播的 P_n 下降幅度比套种大,这与叶面积指数后期的变化趋势基本一致. ZD958 收获前由于玉米锈病大面积爆发,导致玉米植株在收获前穗位叶已干枯. 综合来看,选用叶片后期衰老缓慢,维持较高净光合速率的玉米品种是实现夏玉米高产的一个重要途径.

2.5 种植方式对夏玉米干物质积累与作物生长率(CGR)的影响

由表 3 可以看出,套种与直播开花前干物质积累量和 CGR 显著低于开花后,开花后干物质积累量均占总生物量的 65% 以上,可见开花后干物质积累是籽粒产量的主要物质来源. 套种与直播开花前和开花后的干物质积累量和 CGR 差异明显,均表现为直播大于套种. 开花前,DH661 和 ZD958 直播的干物质积累量分别比套种 1、套种 2 高 37.4%、10.7% 和 18.7%、13.4%,直播的 CGR 分别比套种 1、套种 2 高 62.9%、14.0% 和 43.8%、21.9%. 开花后,DH661 和 ZD958 直播的干物质积累量分别比套种 1、套种 2 高 15.1%、13.3% 和 3.5%、3.0%,直播的

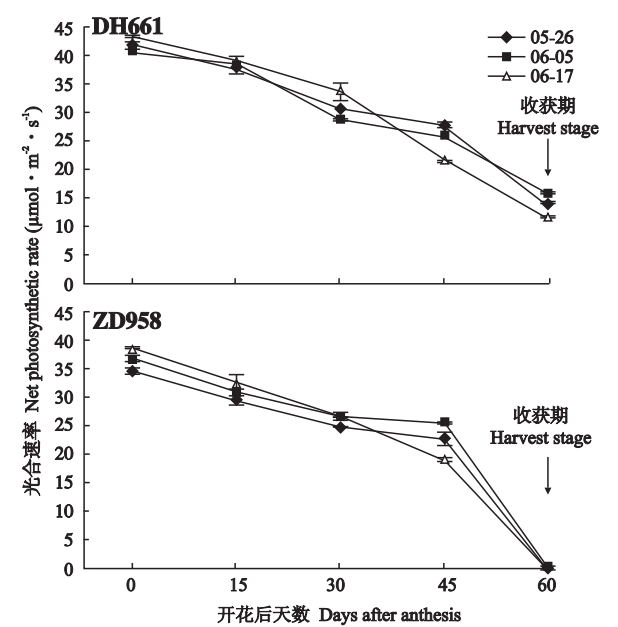


图 2 不同种植方式下夏玉米开花后单叶光合速率的变化
Fig.2 Changes of net photosynthetic rate of summer maize after anthesis under different cropping patterns.

表 3 不同种植方式下夏玉米干物质积累和作物生长率的变化

Tab. 3 Changes of dry matter accumulation and crop growth rate (CGR) of summer maize under different cropping patterns

品种 Cultivar	播 期 Sowing date	开花前 Before flowering		开花后 After flowering	
		干物质 Dry matter (kg · m ⁻²)	CGR (g · m ⁻² · d ⁻¹)	干物质 Dry matter (kg · m ⁻²)	CGR (g · m ⁻² · d ⁻¹)
DH661	05-26	4821. 9c	7. 0c	12427. 9c	19. 1c
	06-05	5986. 1b	10. 0b	12624. 3b	19. 7b
	06-17	6627. 2a	11. 4a	14308. 7a	23. 1a
ZD958	05-26	6047. 2b	8. 9c	12516. 8b	19. 9c
	06-05	6326. 7b	10. 5b	12569. 2b	20. 3b
	06-17	7175. 3a	12. 8a	12950. 5a	21. 9a

CGR 分别比套种 1、套种 2 高 20.9%、17.3% 和 10.0%、7.9%。可见直播处理具有较高的干物质积累量和作物生长率。

2.6 种植方式对夏玉米籽粒灌浆特性的影响

由表 4 可知,用 Richards 模型可以较好地模拟籽粒灌浆过程,决定系数 R 在 0.997 ~ 0.999,两个品种的活跃灌浆时间 (P) 有明显差异,DH661 均在 47 ~ 49 d,而 ZD958 均在 34 ~ 39 d。直播处理达最大灌浆速率的天数 (T_{\max}) 较套种早,起始势 (R_0) 较高;但活跃灌浆期 (P) 和灌浆速率最大时的生长量 (W_{\max}) 均低于套种;最大灌浆速率 (G_{\max}) 以套种 2 最大,直播次之,套种 1 最小;但直播的籽粒灌浆积累量一直高于套种(图 3)。可见,虽然直播处理灌浆活跃期短、灌浆速率最大时的生长量低、灌浆速率慢,从而导致其千粒重较套种低,但直播较高的公顷穗数弥补了其千粒重降低的劣势,使其具有较大的积累量,有利于获得较高的籽粒产量。

2.7 不同种植方式下夏玉米光温资源分布及利用

由表 5 可以看出,在全生育期内,由于套种与直

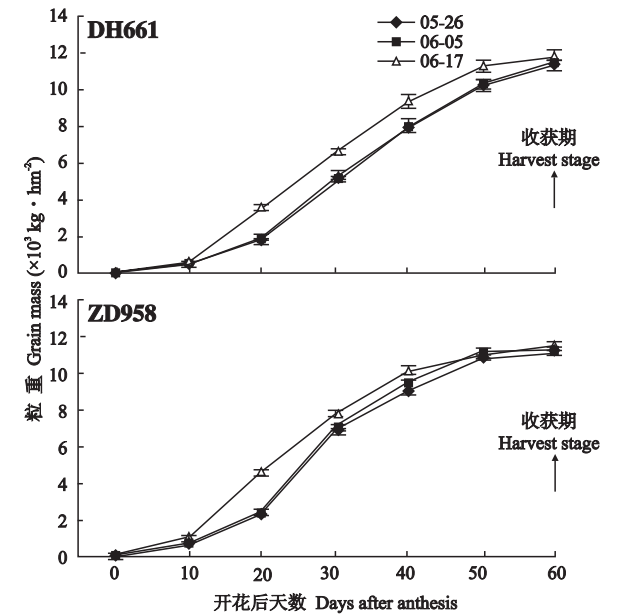


图 3 不同种植方式下夏玉米籽粒灌浆动态
Fig. 3 Dynamics of grain filling of summer maize under different cropping patterns.

播全生育期天数相差 5 ~ 14 d,因此直播处理的总积温和总辐射量明显低于套种,套种 1 的总积温和总辐射量分别为 3200 °C · d 和 2300 MJ · m⁻²,套种 2 的总积温和总辐射量分别为 3000 °C · d 和 2100 MJ · m⁻²,而直播的总积温和总辐射量分别为 2850 °C · d 和 1900 MJ · m⁻²,即直播总积温和总辐射量分别比套种 1、套种 2 少 10.9%、17.4% 和 5.0%、10.5%。开花前,直播的日均辐射均低于套种,而日均温高于套种;开花后,直播的日均温和日均辐射均低于套种。

由表 6 可以看出,开花前的光能利用率 (RUE) 均低于开花后,直播的 RUE 在开花前、开花后和全生育期均显著高于套种 1 和套种 2。开花前,DH661 直播的 RUE 分别比套种 1 和套种 2 提高 71% 和

表 4 不同种植方式下夏玉米籽粒灌浆速率特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of grain filling rate of summer maize under different cropping patterns

品种 Cultivar	播 期 Sowing date	参 数 Parameter									
		R	A	B	C	D	T_{\max} (d)	W_{\max} (g · 100 kernels ⁻¹)	G_{\max} (g · 100 kernels ⁻¹ · d ⁻¹)	R_0	P (d)
DH661	05-26	0.997	38.35	51.78	0.12	1.00	32.04	19.17	1.18	0.12	48.70
	06-05	0.999	38.30	55.24	0.12	1.00	33.60	19.15	1.19	0.12	48.23
	06-17	0.998	37.78	34.39	0.13	1.00	28.14	18.89	1.19	0.13	47.73
ZD958	05-26	0.998	34.23	72.59	0.16	1.00	27.70	17.12	1.32	0.16	38.78
	06-05	0.999	34.24	88.09	0.16	1.00	27.46	17.12	1.40	0.16	36.81
	06-17	0.999	31.81	78.98	0.17	1.00	25.17	15.90	1.38	0.17	34.56

A: 终极生长量 Ultimate growth mass; B: 初级参数 Primary parameter; C: 生长速率参数 Growth rate parameter; D: 形状参数 Appearance parameter; T_{\max} : 达最大灌浆速率时的天数 Days achieving the maximal grain-filling rate; W_{\max} : 灌浆速率最大时的生长量 Growth mass achieving the maximal grain-filling rate; G_{\max} : 最大灌浆速率 Maximal grain-filling rate; R_0 : 起始势 Starting potential; P : 灌浆活跃期 Active grain-filling period.

表 5 夏玉米不同生育阶段光温分布特点
Tab.5 Solar and heat distribution characters of summer maize at different growth periods

品种 Cultivar	播 期 Sowing date	开花前 Before flowering				开花后 After flowering			
		积 温 Accumulative temperature (℃ · d)	日均温 Daily mean temperature (℃)	辐射总量 Total solar radiation (MJ · m ⁻²)	日均辐射 Daily solar radiation (MJ · m ⁻² · d ⁻¹)	积 温 Accumulative temperature (℃ · d)	日均温 Daily mean temperature (℃)	辐射总量 Total solar radiation (MJ · m ⁻²)	日均辐射 Daily solar radiation (MJ · m ⁻² · d ⁻¹)
DH661	05-26	1700	24.64	1227	17.78	1480	22.76	1069	16.45
	06-05	1519	25.32	1066	17.76	1451	22.67	1044	16.31
	06-17	1524	26.27	982	16.93	1306	21.06	973	15.69
ZD958	05-26	1673	24.60	1202	17.67	1459	23.16	1060	16.82
	06-05	1519	25.32	1059	17.65	1421	22.92	1024	16.52
	06-17	1471	26.60	954	17.04	1276	21.63	934	15.83

表 6 不同种植方式对夏玉米不同生育期光能利用效率 (RUE) 的影响
Tab.6 Effects of different cropping patterns on solar resource utilization efficiency of summer maize at different growth periods

品 种 Cultivar	播 期 Sowing date	开花前 Before flowering	开花后 After flowering	全生育期 Whole growth period		
				籽粒 Grain	茎 叶 Stem and leaf	总计 Total
DH661	05-26	0.69c	2.03c	0.86c	0.45c	1.31c
	06-05	0.98b	2.12b	0.95b	0.60b	1.55b
	06-17	1.18a	2.57a	1.05a	0.82a	1.87a
ZD958	05-26	0.88c	2.07c	0.85c	0.57c	1.41c
	06-05	1.05b	2.15b	0.95b	0.64b	1.59b
	06-17	1.32a	2.43a	1.06a	0.81a	1.87a

50%, ZD958 直播的 RUE 分别比套种 1 和套种 2 提高 50% 和 25%。开花后, DH661 直播的 RUE 分别比套种 1 和套种 2 提高 26.6% 和 21.2%, ZD958 直播的 RUE 分别比套种 1 和套种 2 提高 17.4% 和 13.0%。全生育期, DH661 直播籽粒的 RUE 分别比套种 1 和套种 2 提高 22.1% 和 10.5%, 茎叶的 RUE 分别提高 82.2% 和 36.7%, 总 RUE 分别提高 42.7% 和 20.6%; ZD958 直播籽粒的 RUE 分别比套种 1 和套种 2 提高 24.7% 和 11.6%, 茎叶的 RUE 分别提高 42.1% 和 26.5%, 总 RUE 分别提高 32.6% 和 17.6%。表明夏玉米直播比套种具有更高的光能利用率。

3 讨 论

近年来随着 CO₂ 浓度增加及全球气候变暖, 黄淮海夏玉米区传统套播夏玉米已经不适应气候的变化。传统套种模式中玉米苗期受光不足, 形态建成缓慢, 同时灌浆初期正处于降水季节, 阴雨寡照天气会限制植株光合生产能力, 最终降低夏玉米产量。郑洪建等^[25]研究表明, 山东夏玉米大田生产中过早套种会使夏玉米灌浆阶段光照不足, 从而导致产量下降。贾士芳等^[17]认为, 抽雄开花期弱光胁迫使玉米受精结实数降低, 导致产量大幅度降低。本研究表明, 直

播夏玉米的产量显著高于套种, 虽然其千粒重有所降低, 但公顷穗数显著增加。直播增产主要是由于苗期错开了粗缩病发生高峰与玉米感病生育期, 玉米植株粗缩病发病率降低, 空秆率随之降低。套种玉米生育期较直播长, 套种时间越早生育期越长, 这是由于套种玉米苗期受到小麦的遮光作用, 地表光照强度锐减, 而苗期是玉米叶片分化、生长的关键时期, 弱光势必影响玉米叶片的形态特征、生理生化特性及光合性能, 最终导致生长发育延迟, 使播种到开花期生长天数延长, 而套种时间越早影响越大。

叶面积是植物截获光能的物质载体, 而光合功能直接影响到玉米籽粒产量^[26]。黄振喜等^[27]认为, 高产玉米在密植条件下才能发挥增产潜力, 最终产量取决于叶片对光能的吸收利用与转化, 灌浆期间叶片的光合生理活性对籽粒产量形成尤为重要。本研究发现, 开花前直播夏玉米保持了较高的叶面积指数, 这为开花前较高的干物质积累提供了保障, 有利于后期玉米的生长发育。开花后是籽粒产量形成的关键时期, 也是植株生理功能渐衰期, 虽然直播夏玉米在灌浆后期表现出有效光合面积减小、叶片光合功能下降、衰老加快的劣势, 但灌浆前期较高的 LAI 和光合速率弥补了后期的不足, 最终保证了产量的提高。

作物经济产量的 60% ~ 100% 来自开花后到成熟期的光合代谢产物^[27], 而产量的形成过程是光合物质积累与分配的过程^[28]. 本试验结果表明, 与套种相比, 直播夏玉米在开花前和开花后均具有较大的干物质积累量和较快的干物质积累速率. 直播玉米苗期受光状况良好, 温度适宜, 生长发育较好, 为后期生长打下了基础, 但直播经济系数并不高, 登海 661 直播经济系数为 55.8%, 比套种低 6.0% ~ 9.7%; 郑单 958 直播经济系数为 56.6%, 比套种低 3.0% ~ 3.1%. 可能与直播生育后期降温较早有关, 温度降低影响了植株的生长, 降低了植株光合生理活性, 加快了植株衰老, 导致光合产物的积累向籽粒中转运量少. 但直播的总生物量高、经济系数较低反映出直播仍具有较大的增产潜力. 灌浆是玉米生长发育过程中极为重要的生育阶段, 灌浆时间的长短和灌浆速率决定了玉米灌浆时期的干物质积累量, 进而影响产量^[29-30]. 本试验结果表明, 直播处理达到最大灌浆速率的时间明显早于套种, 起始势较套种高; 但灌浆期、活跃灌浆期和灌浆速率最大时的生长量均低于套种, 这是造成直播千粒重低于套种的原因.

影响作物生产的主要因素除品种的遗传特性和种植方式外, 光温等生态条件也是关键因素. 有利的光温资源是获得高产的环境保障^[31-32], 而适宜的播期是玉米充分利用有利光热资源的条件保障^[19]. 本试验结果表明, 直播夏玉米全生育期天数明显短于套种, 其生育期内总积温和总辐射量分别比套种减少 150 ~ 350 °C · d 和 200 ~ 400 MJ · m⁻², 说明直播夏玉米对光温资源的占有率较套种低, 但光能利用率具有明显优势, 尤其直播籽粒光能利用率比套种提高 10.5% ~ 24.7%. 套种玉米由于苗期与小麦共生, 苗期植株受到遮光影响光照辐射截获量很少, 生育进程缓慢, 生育前期的光温资源难以充分利用; 同时套种较低的公顷穗数和干物质积累量, 造成了其较低的光能利用率.

本试验结果表明, 与套种相比, 直播夏玉米收获穗数高, 灌浆启动早, 起始势高, 干物质积累速度快, 积累强度大, 可以实现较高的产量. 但直播品种生育后期下部叶片早衰、叶面积指数迅速下降, 光合速率降低, 灌浆活跃期短, 经济系数较小. 根据生产中直播的不足, 选用生育后期叶片衰老缓慢, 维持较高净光合速率的玉米品种或者通过集成方式与肥水管理等栽培措施来调控, 以保证植株生育后期生殖器官的生长发育, 促进光合物质向籽粒转运, 提高经济系

数, 以进一步挖掘直播的增产潜力. 在山东夏玉米主产区, 直播玉米能够避免与小麦共生带来的不利影响, 解决了麦套玉米苗期共生期间的各种矛盾, 生育后期光温资源利用效率较高, 为进一步提高夏玉米产量提供了保障.

参考文献

- [1] Mann CC. Crop scientists seek a new revolution. *Science*, 1999, **283**: 310-314
- [2] Huang J, Pray C, Rozell S. Enhancing the crops to feed the poor. *Nature*, 2002, **418**: 678-684
- [3] Xu S-C (徐世昌), Dai J-Y (戴俊英), Shen X-Y (沈秀瑛), et al. The effect of water stress on maize photosynthetic characters and yield. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1995, **21**(3): 356-363 (in Chinese)
- [4] Li C-H (李潮海), Liu K (刘奎), Zhou S-M (周苏玫), et al. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2002, **28**(2): 265-269 (in Chinese)
- [5] Dong S-T (董树亭), Gao R-Q (高荣岐), Hu C-H (胡昌浩), et al. Study of canopy photosynthesis property and high yield potential after anthesis in maize. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1997, **23**(3): 318-325 (in Chinese)
- [6] Li F-S (李伏生), Kang S-Z (康绍忠), Zhang F-C (张富仓). Effect of atmospheric CO₂ and temperature increment on crop physiology and ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(9): 1169-1173 (in Chinese)
- [7] Zhao M (赵明), Zheng P-Y (郑丕尧), Wang R-F (王瑞舫). Studies on the dynamic changes of the photosynthetic rate of the leaves duration the course of the growth and development of summer-sown corn (*Zea mays* L.). *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1992, **18**(5): 337-343 (in Chinese)
- [8] Xu Q-Z (徐庆章), Wang Q-C (王庆成), Niu Y-Z (牛玉贞), et al. Studies on relationship between plant type and canopy photosynthesis in maize. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1995, **21**(4): 492-496 (in Chinese)
- [9] Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军), Hu C-H (胡昌浩). Development of canopy apparent photosynthesis among maize varieties from different eras. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2000, **26**(2): 200-204 (in Chinese)
- [10] Wang K-J (王空军), Dong S-T (董树亭), Hu C-H (胡昌浩), et al. Improvement in photosynthesis characteristics among maize varieties in China from the 1950s to the 1990s. *Acta Photoecologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **25**(2): 247-251 (in Chinese)
- [11] Wang Q-C (王庆成), Liu K-C (刘开昌), Zhang X-Q (张秀清), et al. Canopy photosynthesis of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2001, **9**(4): 56-61 (in Chinese)

- [12] Peng B-H (彭保宏), Hu Y-M (胡玉梅), Zhao H (赵辉), *et al.* Eco-climate evaluation of wheat production and component factors in the south of Henan Province. *Meteorological and Environmental Sciences* (气象与环境科学), 2007, **30**(suppl.): 133-135 (in Chinese)
- [13] Zhang Y-S (张银锁), Yu Z-R (宇振荣), Driessen PM. Experimental study of assimilate production, portioning and translocation among plant organs in summer maize (*Zea mays* L.) under various environmental and management conditions. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2002, **28**(1): 104-109 (in Chinese)
- [14] Chai S-W (柴世伟), Liu W-Z (刘文兆), Li Y-Y (李秧秧). Effect of root cutting on leaf photosynthesis rate and water use efficiency of maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(12): 1716-1718 (in Chinese)
- [15] Zhang J-W (张吉旺), Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军). Effects of high field temperature on summer maize grain yield and quality. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(1): 52-56 (in Chinese)
- [16] Li C-H (李潮海), Zhao Y-L (赵亚丽), Yang G-H (杨国航), *et al.* Effects of shading on photosynthetic characteristics of different genotype maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(6): 1259-1264 (in Chinese)
- [17] Jia S-F (贾士芳), Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军), *et al.* Effects of weak light stress on grain yield and photosynthetic traits of maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(11): 2456-2461 (in Chinese)
- [18] Han Y-Q (韩永齐). Shandong encountered *Laodelphax striatellus* Fallen. *Shandong Pesticide News* (山东农药信息), 2008(7): 18-19 (in Chinese)
- [19] Ma G-S (马国胜), Xue J-Q (薛吉全), Lu H-D (路海东), *et al.* Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(6): 1247-1253 (in Chinese)
- [20] Zhu Q-S (朱庆森), Cao X-Z (曹显祖), Luo Y-Q (骆亦其). Growth analysis on the process of grain filling in rice. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1988, **14**(3): 182-193 (in Chinese)
- [21] Gu S-L (顾世梁), Zhu Q-S (朱庆森), Yang J-C (杨建昌), *et al.* Analysis on grain filling characteristics for different rice types. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2001, **27**(1): 7-14 (in Chinese)
- [22] Allen RG, Pereira LS, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration-guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998
- [23] Yan D-C (严定春), Zhu Y (朱艳), Cao W-X (曹卫星). A knowledge model for selection of suitable variety in rice production. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2004, **27**(4): 20-25 (in Chinese)
- [24] Dai M-H (戴明宏), Tao H-B (陶洪斌), Binder J, *et al.* Comparing grain production and utilization of solar, heat resources between spring maize and summer maize. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2008, **16**(4): 82-85, 90 (in Chinese)
- [25] Zheng H-J (郑洪建), Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军), *et al.* Studies on effect of ecological factors on maize kernel growth and corresponding regulative measures. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2001, **9**(1): 69-73 (in Chinese)
- [26] Khan MNA, Murayama S, Ishimine Y, *et al.* Physio-morphological studies of F1 hybrids in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 1998, **1**: 231-239
- [27] Huang Z-X (黄振喜), Wang Y-J (王永军), Wang K-J (王空军), *et al.* Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg · ha⁻¹. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(9): 1898-1906 (in Chinese)
- [28] Du M-W (杜明伟), Luo H-H (罗宏海), Zhang Y-L (张亚黎), *et al.* Photosynthesis characteristics of super-high-yield hybrid cotton in Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(6): 1952-1962 (in Chinese)
- [29] Li S-C (李绍长), Bai P (白萍), Lü X (吕新), *et al.* Ecological and sowing data effects on maize grain filling. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2003, **29**(5): 775-778 (in Chinese)
- [30] Wu C-S (吴春胜). Studies on characteristic of grain filling and dry matter accumulation of super high-yield maize. *Journal of Jilin Agricultural University* (吉林农业大学学报), 2008, **30**(4): 382-385, 400 (in Chinese)
- [31] Li C-H (李潮海), Su X-H (苏新宏), Xie R-Z (谢瑞芝), *et al.* Study on relationship between grain yield summer corn and climatic ecological condition under super high-yield cultivation. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2001, **34**(3): 311-316 (in Chinese)
- [32] Zheng H-J (郑洪建), Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军), *et al.* Studies on effect of ecological factors on maize kernel growth and corresponding regulative measures. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2001, **9**(1): 69-73 (in Chinese)

作者简介 朱元刚,男,1983年生,硕士.主要从事玉米生理生态研究. E-mail: zhuyuangang2002@163.com

责任编辑 张凤丽