

玉米干物质生产分配、转运特征与杂种优势分析

张玉红¹, 许海涛², 杨飞³, 史大坤¹, 李习军¹, 高展¹,
冯晓曦², 许波², 郭海斌², 张军刚²

(1. 新乡市农业科学院, 河南 新乡 453000; 2. 驻马店市农业科学院/河南省玉米产业技术体系驻马店综合试验站, 河南 驻马店 463000;
3. 夏邑县农业农村局, 河南 夏邑 476400)

摘要: 2023年通过春、夏播研究玉米干物质生产、分配、转运特征, 对干物质、子粒重杂种优势进行分析。结果表明, 通过 Logistic 方程可拟合春、夏播玉米干物质累积过程。玉米自交系最大累积速率春播驻 85、ZM335 低于驻 136、ZM027, 夏播驻 85、ZM335 高于驻 136、ZM027。玉米杂交种干物质分配吐丝期表现为茎>叶>鞘>苞叶>雄穗>穗轴>花丝>穗柄。春、夏播玉米杂交种驻玉 927、驻玉 902 叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶干物质转运量、干物质转运率和干物质转运对子粒贡献率均为负值。春播玉米自交系 ZM3358、ZM027 叶、鞘有干物质转运; 夏播玉米自交系 ZM3358 叶、鞘、茎秆有干物质转运。玉米杂交种干物质重 F_1 杂种优势指数、相对杂种优势、中亲杂种优势、超亲杂种优势春播显著高于夏播, 驻玉 927、驻玉 902 春、夏播干物质重、子粒重表现为正向杂种优势。

关键词: 玉米; 干物质生产分配; 干物质转运; 杂种优势

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Analysis of Dry Matter Production, Distribution, Transport Characteristics, and Heterosis in Maize

ZHANG Yu-hong¹, XU Hai-tao², YANG Fei³, SHI Da-kun¹, LI Xi-jun¹, GAO Zhan¹,
FENG Xiao-xi², XU Bo², GUO Hai-bin², ZHANG Jun-gang²

(1. Xinxiang Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453000; 2. Zhumadian Academy of Agricultural Sciences / Zhumadian Comprehensive Experimental Station of Henan Maize Industrial Technology System, Zhumadian 463000;
3. Xiayi County Agriculture and Rural Bureau, Xiayi 476400, China)

Abstract: In 2023, maize dry matter production, distribution, transport characteristics, and the heterosis of dry matter and grain weight were studied through spring and summer sowing. The results showed that the accumulation process of dry matter in spring and summer maize could be fitted using the logistic equation. The maximum accumulation rates of Zhu 85 and ZM3358 in spring sowing were lower than Zhu136 and ZM027, while Zhu 85 and ZM3358 in summer sowing were higher than Zhu136 and ZM027. The distribution of dry matter in hybrid maize varieties sowing in spring and summer showed an overall pattern of stem>leaf>sheath>husk>tassel>cob>silk>ear stem during the silking stage. The leaf, sheath, stem, cob, ear stem, husk of dry matter transport amounts, transport rate, and contribution rate of dry matter transport to grains in spring and summer sowing of Zhuyu927 and Zhuyu 902 were all negative. In spring sowing, ZM3358 and ZM027, only the leaves and sheaths had dry matter transport; in summer sowing, ZM3358, only the leaves, sheaths, and stems had dry matter transport. The dry matter weight F_1 heterosis index, relative heterosis, mid-parent heterosis, and over-parent heterosis of maize hybrids were significantly higher in spring sowing than in summer sowing, the grain weight of spring and summer sowing in Zhuyu927 and Zhuyu902 showed positive heterosis.

Key words: Maize; Dry matter production and distribution; Dry matter transport; Heterosis

录用日期: 2024-01-23

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(232102110187)、河南省玉米产业技术体系驻马店综合试验站项目(HARS-23-02-Z6)

作者简介: 张玉红(1981-), 女, 河南新乡人, 助理研究员, 在读硕士, 主要从事作物遗传育种。E-mail: zyhy111@163.com

许海涛为本文共同第一作者。E-mail: xuht0101@126.com

杨飞为本文通信作者。E-mail: 2473193458@qq.com

黄淮海区是我国玉米五大种植区域之一,光照充沛,雨热同季,也是玉米-小麦一年两熟主要轮作区,玉米产量约占全国产量的30%^[1]。干物质累积是子粒产量形成所需的重要物质基础,玉米通过提高干物质累积量且尽可能把其分配至子粒内而获得高产^[2]。子粒产量形成过程也是干物质累积过程,其累积量在一定程度上和子粒产量呈正相关关系^[3]。玉米生长发育过程中不同器官干物质累积、分配和转运特性决定了子粒产量的高低,提高干物质向子粒内转运量是增产的关键途径^[4]。

大量研究表明,玉米干物质累积、分配受品种、密度、肥料、种植模式、管理方式以及光热水生态气候环境条件等诸多因素的影响^[5]。Maddonni等^[6]研究表明,花前与花后的干物质运移量对子粒产量产生共同影响。国内学者^[7]研究发现,高产栽培玉米子粒产量形成的重要来源主要是生长发育后期同化产物的累积。前人^[8]研究指出,不同营养器官光合物质运移对玉米子粒贡献率的高低和品种相关,干物质运移同时受本地光热水生态环境的影响。胡昌浩等^[9]报道,玉米不同营养器官的干物质运移量对子粒贡献率大小表现茎秆>苞叶>穗轴>叶片>叶鞘>穗柄。也有研究表明^[10],各器官成熟期干物质分配比重依次为茎秆、叶片、穗轴、叶鞘、苞叶,不同器官干物质运移量显著受种植密度的影响,茎秆与叶鞘干物质输出不稳定,在适宜种植密度条件下叶片才有干物质运移。戴明宏等^[11]研究认为,苞叶与叶片干物质运移量对玉米子粒贡献率高于穗轴与茎鞘。玉米杂交育种能够提升遗传力,通过杂种优势能够对玉米种质资源进行遗传改良及创新,显著增加玉米产量及改善品质^[12]。杂种优势在玉米上的应用为大幅提升我国玉米产量发挥了关键性作用,是玉米产量提高的重要途径^[13],中亲优势值通常为35%~

40%^[14]。大量研究对单交种玉米产量的杂种优势进行定量化分析。Duvick等^[15]报道指明,在正常条件下产量的绝对杂种优势无变化,在密植条件下稍有增加,但相对杂种优势未提高。Tollenaar等^[16]研究证实,加拿大玉米品种产量的中亲优势值约达167%。国内文献^[17]研究表明,2000年代我国玉米品种产量的中亲优势值约为69%。

目前,关于玉米干物质累积、分配、运移以及对产量提高的贡献研究较多,侧重于品种的成熟期,而对其动态变化过程研究较少,特别是其亲本的变化过程及差异性未见相关报道。本文以2个玉米杂交种及其双亲作为试验材料,分析春、夏播玉米杂交种和亲本自交系干物质生产、分配、转运特征,并对干物质、子粒重杂种优势进行分析,为玉米品种高产高效、遗传改良和亲本自交系种质资源的育种应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于河南南部现代农业试验示范基地服务中心(驻马店,东经114°2'31",北纬33°0'36",海拔高度89.8 m),2023年春季、夏季进行试验。该区雨量丰富,光、热资源充足,属半湿润大陆型季风性气候。试验土壤类型为砂姜黑土,地下水资源充沛,灌溉排水设施完备,地势平坦,肥力均匀。用温度记录仪Elitech RC-4HC实测试验田间最高与最低气温,用双翻斗-6S型(0.1 mm分辨率)测定降雨量。春、夏播玉米生育期间最高气温、最低气温与降雨量见图1。2023年5月6日至8月28日春播期间有效积温1 852.0 °C·d,气温最高19~36 °C,最低10~29 °C,总降雨量671.6 mm;2023年6月13日至9月28日夏播期间有效积温1 765.5 °C·d,气温最高19~36 °C,

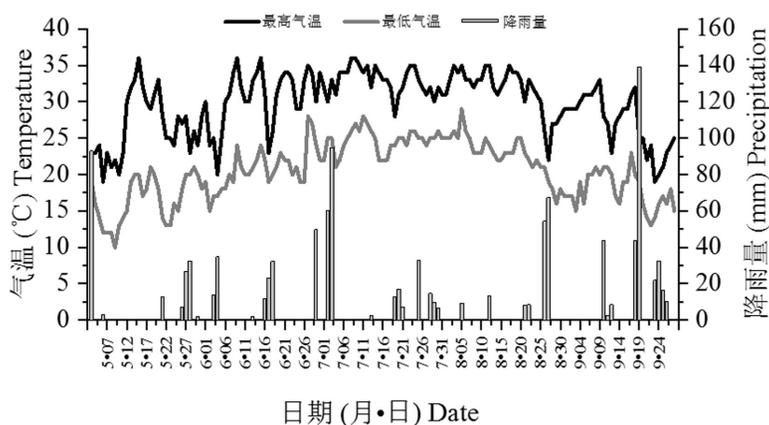


图1 春、夏播玉米生育期间最高气温、最低气温与降雨量

Fig.1 Temperature and precipitation during the growth and development period of spring and summer sowing maize

最低 14 ~ 29 °C, 总降雨量 856.5 mm。有效积温春播比夏播高 86.5 °C·d, 总降雨量下降 184.9 mm。

1.2 供试材料

以 2 个玉米杂交种驻玉 927、驻玉 902 和 4 个亲本自交系驻 136、ZM3358、驻 85、ZM027 为试验材料, 其中, 驻 85、驻 136、ZM027 属于 Reid 类群; ZM3358 属于 Lancaster 类群; 驻玉 927(驻 136 × ZM3358) 属于 Reid × Lancaster 类; 驻玉 902(驻 85 × ZM027) 属于 Reid × Reid 类, 均由驻马店市农业科学院玉米研究所培育。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计, 3 次重复, 6 行区, 行长 6 m, 行距 60 cm, 试验小区面积 21.6 m², 18 个试验小区, 试验重复间走道 1 m, 四周设 4 行玉米保护行。旋耕前试验地施园林牌复合肥(湖北富来地金润肥业公司生产), 其 N、P₂O₅、K₂O 养分含量分别为 28%、6%、6%, 养分总含量 ≥ 40%, 复合肥用量 1 125 kg/hm², 一次性底施。2023 年 5 月 4 日春季播种施耕, 5 月 6 日采用人工开沟点种, 每穴 2 粒, 播深 3 ~ 4 cm, 出苗 5 月 14 至 15 日, 成熟 8 月 22 至 25 日; 2023 年 6 月 13 日夏季开沟人工点播, 每穴 2 粒, 播深 3 ~ 4 cm, 出苗 6 月 19 至 20 日, 成熟 9 月 20 至 27 日。春播、夏播小区留苗密度 7.5 × 10⁴ 株/hm², 试验管理水平与当地玉米大田生产相同。

1.4 测定项目与方法

干物质累积: 各小区分别于 5 叶期开始取样, 选择植株健壮、生长基本一致、没有病虫害、具有一定代表性的植株, 从茎基部连续截取植株 5 株, 挂牌标记取样日期, 每隔 10 d 取样 1 次, DHG-9243BS-III 型电热鼓风恒温干燥箱中 105 °C 条件下杀青 0.5 h, 于 80 °C 环境下烘干至恒重, 测定单株干物质重。

利用 Logistic 方程拟合干物质累积, 参数计算如下:

$$Y = \frac{a}{1 + be^{-kx}}$$

其中, Y 是单株干物质累积量; a 是最大理论干物质累积潜力; x 是生育相对日数; e 是自然常数; b 是阻滞系数; k 是干物质相对增长率。

方程经一阶与二阶导数推导出干物质累积参数。干物质累积高峰开始日期 $T_1 = \frac{\ln b - 1.317}{k}$, 干物质累积高峰结束日期 $T_2 = \frac{\ln b + 1.317}{k}$, 干物质累积完成日期 $T_3 = \frac{\ln b + 4.595}{k}$, 快速干物质累积期 $T_{2-1} = T_2 - T_1 = \frac{\ln b + 2.634}{k}$, 干物质累积速率 $V = \frac{W}{x}$,

W 为干物质累积量, 最大灌浆速率 $V_{\max} = \frac{ak}{4}$ 。

各小区于小喇叭口期、吐丝期、吐丝后 20 d、吐丝后 40 d, 选择植株健壮、生长基本一致、没有病虫害、具有一定代表性的植株, 从茎基部连续截取植株 5 株, 样株分别按照叶、鞘、茎秆、雄穗、苞叶、穗轴、穗柄、花丝、子粒分类, DHG-9243BS-III 型电热鼓风恒温干燥箱中 105 °C 条件下杀青 0.5 h, 于 80 °C 环境下烘干至恒重, 分别测定各器官干物质重。

各小区在吐丝期、成熟期测定不同器官的干物质累积, 不同器官干物质转运量、转运率、对子粒贡献率、花后同化物输入子粒量、花后同化物累积对子粒贡献率, 参照张磊等^[18]方法进行计算。

器官干物质转运量 = 器官吐丝期干物质累积量 - 器官成熟期干物质累积量;

器官干物质转运率 = 器官干物质转运量 / 器官吐丝期干物质累积量 × 100%;

器官干物质转运对子粒贡献率 = 器官干物质转运量 / 子粒产量 × 100%。

杂种优势参照卫晓轶等^[19]计算 F₁ 杂种优势指数、相对杂种优势、中亲杂种优势、超亲优势。

$$F_1 \text{ 杂种优势指数} = F_1 / MP \times 100\%;$$

$$\text{相对杂种优势} = (F_1 - MP) / F_1 \times 100\%;$$

$$\text{中亲优势} = (F_1 - MP) / MP \times 100\%;$$

$$\text{超亲优势} = (F_1 - HP) / HP \times 100\%。$$

式中, F_1 为杂交种性状平均值; MP 为双亲性状平均值; HP 为双亲性状高亲值。

1.5 数据处理与分析

采用 IBM SPSS Statistics 19 对试验数据进行统计和方差分析, 采用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 春、夏播玉米杂交种干物质累积动态拟合

由表 1 可知, 春、夏播玉米杂交种干物质累积速率存有显著差异。通过 Logistic 方程可以模拟春、夏播玉米杂交种干物质累积过程, 决定系数为 0.984 9 ~ 0.996 8, 可较好呈现干物质累积的进程, 春、夏播拟合方程存在一定差异。春播驻玉 927 比驻玉 902 干物质累积推迟 0.72 d 进入高峰期, 高峰期结束比驻玉 902 延长 0.72 d, 整体上干物质快速累积期驻玉 927 比驻玉 902 延长 0.72 d; 干物质平均累积速率、最大累积速率驻玉 927 比驻玉 902 分别增加了 9.02%、9.26%。夏播驻玉 927 比驻玉 902 干物质累积推迟 3.10 d 进入高峰期, 高峰期结束比驻玉 902 延长 5.82 d, 整体干物质快速累积期驻玉 927 比

驻玉 902 延长 7.17 d;干物质平均累积速率、最大累积速率驻玉 927 比驻玉 902 分别增加 13.33%、3.71%。

表 1 春、夏播玉米杂交种干物质 Logistic 拟合方程及参数

Table 1 Logistic fitting equation and parameters for dry matter of spring and summer sowing maize hybrids

播季 Sowing season	杂交种 Hybrid	拟合方程 Fitting equation	决定系数(R^2) Coefficient of determination	显著性(α) Significance	T_1	T_2	T_{2-1}	V_1	V_2	V_s	V_m
春播	驻玉 927	$Y = \frac{476.08}{1 + 57.52e^{-0.0634x}}$	0.996 8	0.05	43.14	84.69	105.46	2.33	4.43	4.71	7.55
	驻玉 902	$Y = \frac{436.21}{1 + 54.96e^{-0.0638x}}$	0.989 0	0.05	42.42	83.97	104.74	2.17	4.10	4.32	6.91
夏播	驻玉 927	$Y = \frac{355.85}{1 + 67.40e^{-0.0816x}}$	0.986 6	0.05	35.46	67.74	83.88	2.12	4.14	3.91	7.26
	驻玉 902	$Y = \frac{314.26}{1 + 66.72e^{-0.0891x}}$	0.984 9	0.05	32.36	61.92	76.71	2.25	4.38	3.45	7.00

2.2 春、夏播玉米亲本自交系干物质累积动态拟合

由表 2 可知,春、夏播玉米亲本自交系干物质累积速度存在显著差异。Logistic 方程可模拟春、夏播玉米亲本自交系干物质累积过程,春播决定系数为 0.950 5~0.991 8,夏播决定系数为 0.950 5~0.998 8,春夏播间拟合方程存在差异。春播驻 136 最早进入干物质累积高峰期,ZM027 最晚进入干物质累积高峰期,ZM3358、驻 85、ZM027 比驻 136 进入干物质累积高峰期分别延迟 3.99、4.40、8.27 d,驻 85 干物质累积高峰期结束最迟,比驻 136、ZM3358、ZM027 分别

延长 21.19、3.63、12.77 d,干物质累积高峰期持续期表现出 ZM027>驻 136>ZM3358>驻 85。ZM3358、ZM027 干物质平均累积速率相近,大于驻 136 而低于驻 85,驻 85、ZM3358 干物质最大累积速率显著低于驻 136、ZM027。夏播驻 85 最早进入干物质累积高峰期,驻 136 最晚进入干物质累积高峰期,驻 136、ZM3358、ZM027 比驻 85 进入干物质累积高峰期分别延迟 12.22、0.75、8.35 d;ZM027 干物质累积高峰期结束最迟,比驻 136、ZM3358、驻 85 分别延长 8.04、29.96、37.92 d,干物质累积高峰期持续期表现为驻 85>

表 2 春、夏播玉米亲本自交系干物质 Logistic 拟合方程及参数

Table 2 Logistic fitting equation and parameters for dry matter of spring and summer sowing maize parental inbred line

播季 Sowing season	亲本 Parental	拟合方程 Fitting equation	决定系数(R^2) Coefficient of determination	显著性(α) Significance	T_1	T_2	T_{2-1}	V_1	V_2	V_s	V_m
春播	驻 136	$Y = \frac{178.09}{1 + 145.62e^{-0.1020x}}$	0.950 5	0.05	35.92	61.75	74.66	1.33	2.27	1.76	4.54
	ZM3358	$Y = \frac{191.32}{1 + 53.58e^{-0.0668x}}$	0.967 6	0.05	39.88	79.31	99.03	1.29	1.90	1.89	3.20
	驻 85	$Y = \frac{194.28}{1 + 45.09e^{-0.0618x}}$	0.982 8	0.05	40.32	82.94	104.25	1.29	1.85	1.92	3.00
	ZM027	$Y = \frac{187.03}{1 + 329.56e^{-0.1014x}}$	0.991 8	0.05	44.19	70.17	83.15	1.13	2.10	1.85	4.74
夏播	驻 136	$Y = \frac{159.62}{1 + 69.96e^{-0.0962x}}$	0.977 2	0.05	39.88	79.31	99.03	2.65	1.95	1.75	2.67
	ZM3358	$Y = \frac{160.60}{1 + 49.37e^{-0.0909x}}$	0.998 8	0.05	28.41	57.39	71.87	1.51	2.21	1.76	3.65
	驻 85	$Y = \frac{126.02}{1 + 106.08e^{-0.1210x}}$	0.985 1	0.05	27.66	49.43	60.32	1.22	2.01	1.38	3.81
	ZM027	$Y = \frac{186.92}{1 + 23.67e^{-0.0513x}}$	0.950 5	0.05	36.01	87.35	113.03	1.39	1.69	2.05	2.40

ZM3358>ZM027>驻 136。驻 136、ZM3358 干物质平均累积速率相近,大于驻 85 而低于 ZM027,驻 85、ZM3358 干物质最大累积速率显著高于驻 136、ZM027。

2.3 春、夏播玉米杂交种干物质分配动态变化

由图 2 可知,玉米杂交种不同器官的干物质积累表明,小喇叭口期春、夏播整体表现为叶>茎>鞘;吐丝期叶、鞘干物质分配比重下降,茎干物质分配比重上升,基本表现为茎>叶>鞘>苞叶>雄穗>穗轴>花丝>穗柄;灌浆期开始干物质积累主要分配于子粒,叶、鞘、茎、苞叶、花丝、穗柄干物质积累分配比重呈下降趋势,子粒、穗轴分配比重有所提高;成熟期子粒分配比重进一步提升,春、夏播干物质分配比重表现为子粒>茎>叶>穗轴>鞘>苞叶>穗柄>雄穗>花丝。春播小喇叭口期干物质着重分配于叶,干物质积累主要用于供应营养生长,驻玉 927、驻玉 902 叶干物质积累分配比重分别为 66.27%、68.94%,驻玉 927 茎干物质分配比重大于鞘,驻玉 902 茎分配比重小于鞘。春播吐丝期干物质侧重分配于茎、叶、鞘,其次是苞叶、雄穗,驻玉 927 叶、鞘、苞叶干物质积累大

于驻玉 902,茎干物质积累低于驻玉 902。春播灌浆期干物质主要分配于子粒,干物质主要供应生殖生长,叶、茎、鞘分配比重下降,穗轴分配比重稍有提高,驻玉 927、驻玉 902 干物质向子粒分配比重分别为 36.08%、41.55%。春播成熟期干物质进一步增加向子粒的分配比重,驻玉 927、驻玉 902 干物质向子粒分配比重分别为 38.52%、44.56%。

夏播小喇叭口期驻玉 927 叶干物质积累大于驻玉 902,驻玉 927 茎干物质积累大于鞘,驻玉 902 茎干物质积累小于鞘。夏播吐丝期驻玉 927 叶、茎、苞叶和穗柄干物质积累大于驻玉 902,鞘、雄穗、穗轴干物质小于驻玉 902,驻玉 927、驻玉 902 茎干物质分配比重最大,其次是叶、鞘、苞叶、穗轴。夏播灌浆期干物质主要分配于子粒,干物质积累侧重供给生殖生长,叶、茎、鞘分配比重下降,穗轴分配比重略有增加,驻玉 927、驻玉 902 干物质向子粒分配比重分别为 41.07%、40.75%。夏播成熟期干物质向子粒的分配比重进一步提高,驻玉 927、驻玉 902 干物质向子粒分配比重分别为 51.65%、50.79%。

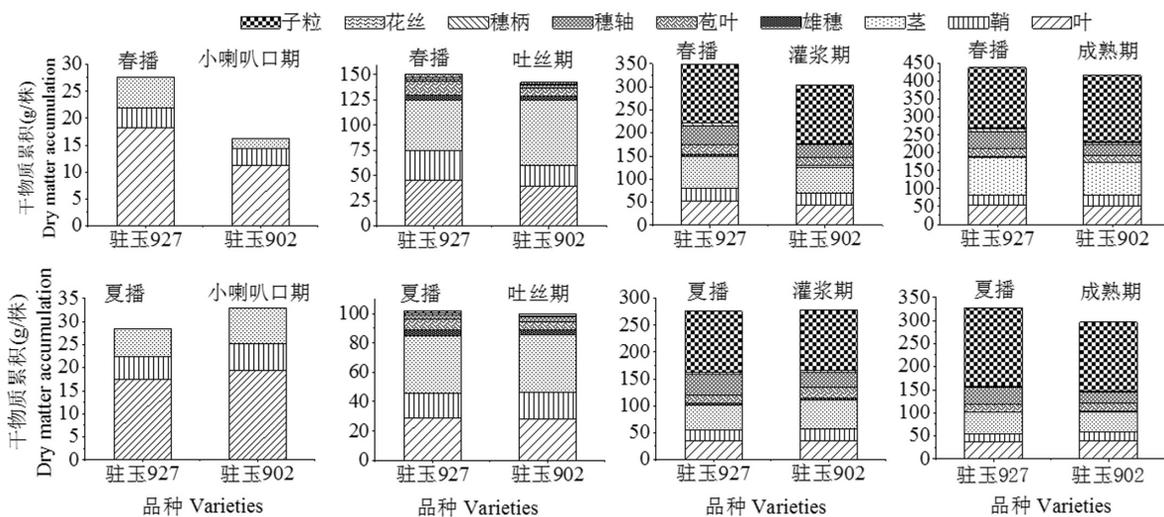


图 2 春、夏播玉米杂交种干物质分配动态变化

Fig.2 Dynamic changes of dry matter distribution of spring and summer sowing maize hybrids

2.4 春、夏播玉米亲本自交系干物质分配动态变化

由图 3 可知,玉米亲本自交系不同器官的干物质积累表明,小喇叭口期春、夏播整体表现为叶>鞘>茎;吐丝期叶、鞘干物质分配比重下降,茎干物质分配比重上升,基本表现为茎>叶>鞘、苞叶>穗轴>穗柄、雄穗>花丝;灌浆期始干物质积累向子粒分配,叶、鞘、茎、苞叶、花丝、穗柄干物质积累分配比重呈下降趋势,子粒、穗轴分配比重有所提高;成熟期子粒分配比重进一步提升,春、夏播干物质分配比

重基本表现为子粒>茎>叶>穗轴>鞘>苞叶>穗柄>雄穗>花丝。春播小喇叭口期干物质侧重分配于叶,驻 136、驻 85 叶干物质积累远大于 ZM027,低于 ZM3358,驻 136、ZM3358 茎干物质积累大于驻 85、ZM027。春播吐丝期干物质侧重分配于茎、叶、鞘、苞叶,ZM027 茎干物质积累最高,驻 136、ZM3358 茎干物质积累大于驻 85,叶干物质积累 ZM3358、ZM027 大于驻 136、驻 85,ZM027 鞘干物质积累最多,驻 85 苞叶干物质积累大于其他自交系,驻 136 穗

轴干物质累积最大。春播灌浆期干物质开始向子粒分配,自交系间子粒分配比重存在一定差异,干物质主要供应生殖生长,叶、茎、鞘分配比重下降,穗轴分配比重稍有提高,ZM027茎干物质累积最多,大于驻136、驻85,ZM3358最低;叶干物质ZM3358最多;苞叶干物质累积ZM3358、驻85远大于ZM027,驻136最低;穗轴干物质累积驻136最大;穗柄干物质累积ZM3358、ZM027大于驻136、驻85。春播成熟期干物质进一步增加向子粒内的分配比重,叶干物质累积ZM3358远大于驻136、ZM027,小于驻85;茎干物质累积ZM027最高,ZM3358最低;鞘干物质累积驻136最低;苞叶和穗轴干物质累积驻85最多;穗柄干物质累积ZM027最高,驻136最低。

夏播小喇叭口期干物质侧重分配于叶,干物质累积主要用于植株的营养生长。叶干物质累积驻136远大于驻85、ZM027,但低于ZM3358;茎干物质累积驻136、ZM3358大于驻85、ZM027。夏播吐丝期干物质侧重分配于茎、叶、鞘,ZM3358茎干物质累积最

高,驻136、ZM3358茎干物质累积大于驻85;叶干物质累积ZM3358、ZM027大于驻136、驻85;ZM3358鞘干物质累积最多,苞叶和穗轴干物质累积驻85大于其他自交系,而ZM027最低。夏播灌浆期干物质开始向子粒内分配,自交系间子粒分配比重存有差异,干物质累积主要供应生殖生长,叶、茎、鞘分配比重下降,穗轴分配比重稍有提高,ZM3358茎干物质累积最多,大于驻136、ZM027,驻85最低;叶干物质驻136最多;苞叶干物质累积ZM3358、驻85远大于ZM027,驻136最低;穗轴干物质累积驻136最大;穗柄干物质累积驻136、ZM3358、驻85大于ZM027。春播成熟期干物质进一步增加向子粒内的分配比重,叶干物质累积ZM027远大于驻136、驻85,小于ZM3358;茎干物质累积ZM027最高,而驻85最低;鞘干物质累积驻136最低;苞叶干物质累积ZM3358最多,驻136最少;穗轴干物质累积驻136、ZM3358高于驻85、ZM027;穗柄干物质累积ZM3358、ZM027高于驻136、驻85。

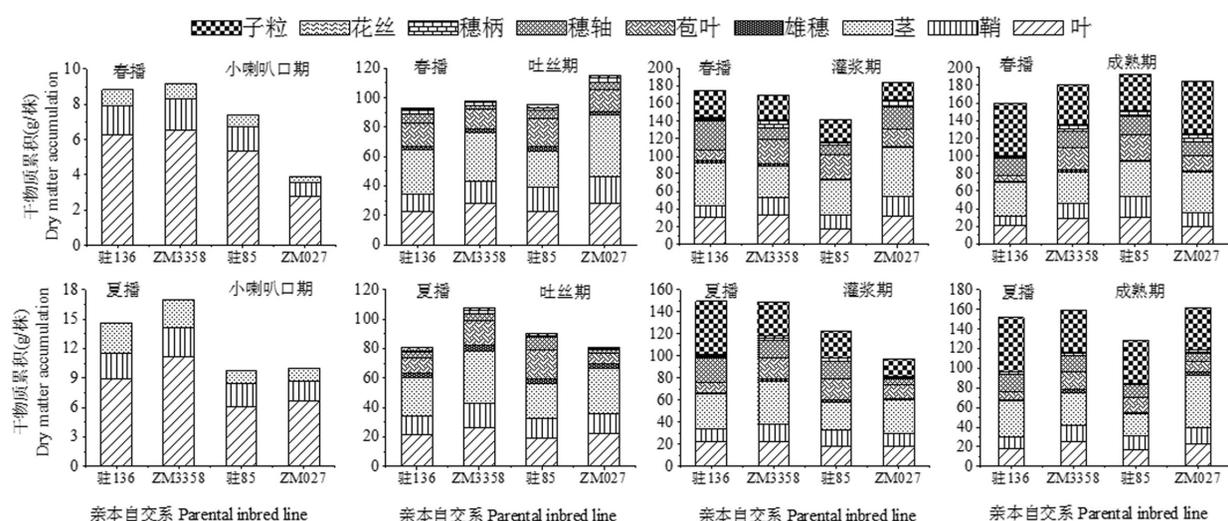


图3 春、夏播玉米亲本自交系干物质分配动态变化

Fig.3 Dynamic changes of dry matter distribution of spring and summer sowing maize parental inbred line

2.5 春、夏播玉米杂交种干物质转运及对子粒贡献率

由表3可知,春、夏播玉米杂交种驻玉927、驻玉902叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶干物质转运量、干物质转运率和干物质转运对子粒贡献率均为负值,表明春、夏播玉米杂交种叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶均没有干物质输出转运。叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶干物质累积吐丝期未达到最大值,光合产物部分仍供应于叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶的生长。驻玉927、驻玉902春播用于茎秆、穗轴生长的干物质累积大于叶、鞘、苞叶;夏播用于穗轴生

长的干物质累积显著高于叶、鞘、茎、穗柄、苞叶。

2.6 春、夏播玉米亲本自交系干物质转运及对子粒贡献率

由表4可知,玉米亲本自交系不同器官干物质转运存在显著差异,春、夏播间变化幅度不同。春播驻136干物质转运量表现为叶>苞叶>鞘>茎秆,穗轴和穗柄没有干物质输出转运,干物质转运对子粒贡献率叶、苞叶、鞘比茎秆分别提高了17.73百分点、7.82百分点、17.07百分点。春播ZM3358只有叶、鞘有干物质输出转运,叶干物质转运量、转运率、对子粒贡献率远大于鞘,茎秆、穗轴、穗柄、苞叶干物质转

表3 春、夏播玉米杂交种干物质转运及对子粒的贡献率

Table 3 Dry matter translocation and contribution rate to grain weight of spring and summer sowing maize hybrids

品种 Variety	器官 Organ	春播 Spring sowing			夏播 Summer sowing		
		干物质转运量 (g/株) Dry matter transport	干物质转运率(%) Rate of dry matter transport	干物质转运对子粒贡献率(%) Contribution rate of dry matter transport to grains	干物质转运量 (g/株) Dry matter transport	干物质转运率(%) Rate of dry matter transport	干物质转运对子粒贡献率(%) Contribution rate of dry matter transport to grains
驻玉 927	叶	-8.00 b	-17.54 a	-4.75 b	-7.98 d	-27.30 a	-4.96 c
	鞘	-0.28 a	-0.97 a	-0.17 a	-0.78 a	-4.78 a	-0.48 a
	茎秆	-54.70 d	-109.03 b	-32.47 d	-6.41 c	-16.20 a	-3.98 b
	穗轴	-44.05 c	-1866.53 d	-26.15 c	-32.54 f	-1200.74 d	-20.23 e
	穗柄	-8.20 b	-532.47 c	-4.87 b	-1.88 b	-174.07 b	-1.17 a
	苞叶	-7.00 b	-50.65 ab	-4.16 b	-9.33 e	-118.85 b	-5.80 d
驻玉 902	叶	-10.29 b	-25.83 a	-5.56 b	-11.01 c	-38.85 a	-7.31 c
	鞘	-10.15 b	-50.00 ab	-5.49 b	-1.28 a	-7.18 a	-0.85 a
	茎秆	-26.15 c	-40.52 a	-14.14 c	-4.32 b	-10.99 a	-2.87 b
	穗轴	-28.45 c	-1102.71 d	-15.39 d	-20.31 d	-672.52 c	-13.49 d
	穗柄	-3.99 a	-411.34 c	-2.16 a	-1.32 a	-197.01 b	-0.88 a
	苞叶	-10.81 b	-134.29 b	-5.85 b	-10.88 c	-196.39 b	-7.23 c

注:同一列同一杂交种不同营养器官数字后不同小写字母表示差异达5%显著水平。下表同。

Note: In the same column, different lowercase letters behind the numbers of different nutrient organs in the same hybrid indicate a significant difference of 5%. The same below.

表4 春、夏播玉米亲本自交系干物质转运及对子粒的贡献率

Table 4 Dry matter translocation and contribution rate to grain weight of spring and summer sowing maize parental inbred line

品种 Variety	器官 Organ	春播 Spring sowing			夏播 Summer sowing		
		干物质转运量 (g/株) Dry matter transport	干物质转运率(%) Rate of dry matter transport	干物质转运对子粒贡献率(%) Contribution rate of dry matter transport to grains	干物质转运量 (g/株) Dry matter transport	干物质转运率(%) Rate of dry matter transport	干物质转运对子粒贡献率(%) Contribution rate of dry matter transport to grains
驻 136	叶	12.10 a	35.92 b	20.43 a	3.60 a	16.57 a	6.51 a
	鞘	6.23 b	38.94 b	10.52 b	1.02 b	8.20 a	1.84 c
	茎秆	1.60 c	4.00 c	2.70 c	-11.25 d	-43.04 b	-20.34 e
	穗轴	-15.70 e	-387.65 e	-26.50 e	-14.26 e	-338.72 c	-25.79 f
	穗柄	-1.20 d	-146.34 d	-2.03 d	-0.53 c	-45.30 b	-0.96 d
	苞叶	11.71 a	62.65 a	19.77 a	1.90 b	19.37 a	3.44 b
ZM3358	叶	11.63 a	31.24 a	26.09 a	11.56 a	42.77 a	26.77 a
	鞘	2.98 b	12.99 ab	6.69 b	6.58 b	34.89 a	15.24 b
	茎秆	-7.05 c	-14.70 b	-15.82 d	3.84 c	10.16 b	8.89 c
	穗轴	-19.68 e	-620.82 e	-44.16 f	-10.70 f	-336.48 d	-24.77 f
	穗柄	-4.88 c	-238.05 d	-10.95 c	-0.79 d	-34.80 c	-1.83 d
	苞叶	-16.18 d	-123.32 c	-36.30 e	-2.84 e	-20.10 c	-6.58 e
驻 85	叶	-6.95 b	-30.40 a	-16.86 b	5.74 ab	30.07 a	12.85 b
	鞘	-8.10 bc	-51.04 b	-19.65 c	5.06 b	33.85 a	11.32 c
	茎秆	-14.99 d	-60.30 b	-36.37 e	6.41 a	26.23 a	14.35 a
	穗轴	-15.82 d	-275.13 d	-38.38 e	-6.89 d	-212.00 c	-15.42 e
	穗柄	-3.26 a	-168.04 c	-7.91 a	0.18 c	9.28 b	0.40 d
	苞叶	-9.79 c	-52.35 b	-23.75 d	5.11 b	33.68 a	11.44 c

续表4 Continued 4

品种 Variety	器官 Organ	春播 Spring sowing			夏播 Summer sowing		
		干物质转运量 (g/株)	干物质转运率 (%)	干物质转运对 子粒贡献率(%)	干物质转运量 (g/株)	干物质转运率 (%)	干物质转运对 子粒贡献率(%)
		Dry matter transport	Rate of dry matter transport	Contribution rate of dry matter transport to grains	Dry matter transport	Rate of dry matter transport	Contribution rate of dry matter transport to grains
ZM027	叶	7.79 a	27.79 a	13.03 a	3.60 a	16.35 a	6.86 a
	鞘	3.28 b	18.22 b	5.48 b	0.60 b	4.40 a	1.14 b
	茎秆	-4.83 d	-11.46 c	-8.08 d	-18.26 e	-58.47 b	-34.82 f
	穗轴	-12.22 e	-273.38 e	-20.43 e	-7.74 d	-450.00 c	-14.76 e
	穗柄	-5.30 d	-175.50 d	-8.86 d	-2.48 b	-527.66 c	-4.73 c
	苞叶	-0.96 c	-6.27 c	-1.61 c	-3.88 c	-52.57 b	-7.40 d

运量、干物质转运率、干物质转运对子粒贡献率均为负值,均没有干物质输出转运。茎秆、穗轴、穗柄、苞叶干物质累积吐丝期未达到最大值,光合产物部分仍供应于茎秆、穗轴、穗柄、苞叶的生长。春播驻85叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶均没有干物质输出转运,干物质转运量、干物质转运率、干物质转运对子粒贡献率均为负值,干物质累积吐丝期未达到最大值,部分光合产物供应叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶的生长。春播ZM027只有叶、鞘产生干物质输出转运,表明干物质输出转运对子粒产量贡献关键来源于叶、鞘,而茎秆、穗轴、穗柄、苞叶对子粒贡献率均为负值,子粒产量主要来源吐丝后其光合同化产物,并非器官组织的干物质输出转运。夏播驻136干物质转运量表现为叶>鞘>苞叶,茎秆、穗轴和穗柄没有干物质输出转运,干物质转运对子粒贡献率叶、苞叶比鞘分别提高了4.67百分点、1.60百分点。夏播ZM3358只有叶、鞘、茎秆有干物质输出转运,叶、鞘干物质转运量、转运率、对子粒贡献率远大于茎秆,穗轴、穗柄、苞叶干物质转运量、干物质转运率、干物质转运对子粒贡献率均为负值,均没有干物质输出

转运。穗轴、穗柄、苞叶干物质累积吐丝期未达到最大值,光合产物部分仍供应于穗轴、穗柄、苞叶的生长。夏播驻85干物质转运与春播存在较大差异,只有穗轴没有干物质输出转运,叶、鞘、茎秆、苞叶干物质转运量、转运率和对子粒贡献率差异不大,穗柄干物质转运最低。夏播ZM027与春播变化趋势基本一致,变化幅度有一定差异,只有叶、鞘产生干物质输出转运,干物质输出转运对子粒产量贡献关键来源于叶、鞘,茎秆、穗轴、穗柄、苞叶对子粒贡献率均为负值,子粒产量主要来源吐丝后其光合同化产物,并非器官组织的干物质输出转运。

2.7 春、夏播玉米杂交种干物质和子粒产量杂种优势特征

由表5可知,春播玉米杂交种间F₁杂种优势指数、相对杂种优势、中亲杂种优势、超亲杂种优势差异春播达显著水平;夏播玉米杂交种间的杂种优势差异不显著。干物质重F₁杂种优势指数、相对杂种优势、中亲杂种优势、超亲杂种优势驻玉927比驻玉902春播分别提高了35.42百分点、6.59百分点、37.19百分点、26.47百分点;夏播分别提高9.51

表5 春、夏播玉米杂交种干物质和子粒产量杂种优势特征

Table 5 Heterosis characteristics of dry matter and grain yield of spring and summer sowing maize hybrids

%

播季 Sowing season	品种 Variety	干物质重 Dry matter weight				子粒重 Grain weight			
		F ₁ 杂种优势 指数	相对优势 Relative heterosis	中亲优势 Mid-parent heterosis	超亲优势 Over-parent heterosis	F ₁ 杂种优势 指数	相对优势 Relative heterosis	中亲优势 Mid-parent heterosis	超亲优势 Over-parent heterosis
		F ₁ heterosis index	heterosis	heterosis	heterosis	F ₁ heterosis index	heterosis	heterosis	heterosis
春播	驻玉927	255.15 a	61.08 a	156.92 a	141.97 a	324.50 a	69.18 a	224.50 b	184.35 b
	驻玉902	219.73 b	54.49 b	119.73 b	115.50 b	266.11 b	72.69 a	266.11 a	209.23 a
夏播	驻玉927	210.16 b	52.42 b	110.16 b	105.01 b	326.62 a	69.38 a	226.62 b	190.89 b
	驻玉902	200.65 b	50.16 b	100.65 b	77.61 c	309.97 a	67.74 a	209.97 b	187.03 b

百分点、2.26百分点、9.51百分点、27.40百分点,春播杂种优势显著高于夏播。子粒重驻玉927比驻玉902春播 F_1 杂种优势指数提高58.39个百分点,相对杂种优势、中亲杂种优势、超亲杂种优势分别降低3.51百分点、41.61百分点、24.88百分点;夏播 F_1 杂种优势指数、相对杂种优势、中亲杂种优势、超亲杂种优势分别降低了16.65百分点、1.64百分点、16.65百分点、3.86百分点。驻玉927、驻玉902春夏播干物质重、子粒重均表现为正向杂种优势,表明玉米育种过程应充分利用干物质累积、子粒产量的杂种优势,尽量挖掘性状的正向杂种优势以组配高产杂交种。

3 结论与讨论

玉米光合产物是干物质累积的最高形式^[20],其较高累积量是玉米产量形成的重要基础,生长发育期内干物质累积水平的高低对子粒最终产量产生决定性影响。已有研究发现,高产型玉米品种生长发育后期具有较高干物质累积优势^[21]。本研究表明,通过Logistic方程可以模拟春、夏播玉米杂交种干物质累积过程,决定系数为0.984 9~0.996 8,可较好地呈现干物质累积的进程^[22]。

前人通过栽培措施对玉米自交系产量形成与干物质累积的关系已做较多研究。常晓等^[23]研究认为,氮效率不同的玉米自交系干物质累积量与产量随施氮量增加呈先上升后下降的趋势,在施氮量过多或亏缺条件下,因生长发育需求玉米植株前期累积干物质将向子粒内转移,干物质运转量对子粒的贡献率低于30%。也有文献^[24]表明,渍涝环境下玉米自交系干物质遮荫后下降显著,不同类型自交系间存在一定差异,强耐阴自交系的干物质下降幅度较小,弱耐阴自交系干物质下降幅度显著。本研究表明,Logistic方程可模拟春、夏播玉米亲本自交系干物质累积过程,干物质累积量、干物质累积速率差异显著,在玉米杂交种选育中可充分利用自交系干物质累积优势,选育高产型玉米品种。

大量研究表明,玉米干物质累积和分配是器官分化和产量形成的重要前提,干物质累积在不同器官内的分配常受氮肥使用、种植密度、耕作方式和管理措施等诸多因素影响。胡向尚等^[25]研究认为,吐丝期高氮效类型玉米干物质分配比重依次为茎、叶、穗;成熟期叶、茎营养器官分配比重显著下降,干物质主要分配给子粒用于灌浆,穗粒分配比重显著提升。本研究表明,玉米杂交种不同器官的干物质积累表明,小喇叭口期春、夏播整体表现为叶>茎>鞘,

吐丝期叶、鞘干物质分配比重下降,茎干物质分配比重上升,基本表现为茎>叶>鞘>苞叶>雄穗>穗轴>花丝>穗柄;灌浆期始干物质累积主要分配于子粒,叶、鞘、茎、苞叶、花丝、穗柄干物质累积分配比重呈下降趋势,子粒、穗轴分配比重有所提高;成熟期子粒分配比重进一步提升,春、夏播干物质分配比重表现为子粒>茎>叶>穗轴>鞘>苞叶>穗柄>雄穗>花丝。玉米不同类型品种各器官干物质分配比重存在显著差异,玉米生产实践中选择生殖器官特别是子粒干物质分配比重较高的品种,是确保高产稳产、玉米生产高质量发展的重要前提。

本研究表明,玉米亲本自交系不同器官小喇叭口期春、夏播整体表现为叶>鞘>茎,吐丝期叶、鞘干物质分配比重下降,茎干物质分配比重上升,基本表现为茎>叶>鞘、苞叶>穗轴>穗柄、雄穗>花丝;灌浆期开始干物质累积向子粒分配,叶、鞘、茎、苞叶、花丝、穗柄干物质累积分配比重呈下降趋势,子粒、穗轴分配比重有所提高;成熟期子粒分配比重进一步提升,春、夏播干物质分配比重基本表现为子粒>茎>叶>穗轴>鞘>苞叶>穗柄>雄穗>花丝,各器官不同生育时期不同自交系间存在显著差异。

干物质转移对玉米产量的贡献显著受品种的影响,且与本地光照、热量、水分等生态环境条件密切相关。阎翠萍等^[26]报道,干物质运移量占子粒总量比值不宜超过20%,否则叶片产生早衰对生育后期光合物质生产将形成重要影响。本研究表明,春、夏播玉米杂交种驻玉927、驻玉902叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶干物质转运量、干物质转运率和干物质转运对子粒贡献率均为负值,春、夏播玉米杂交种叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶均没有干物质输出转运。驻玉927、驻玉902子粒产量干物质形成主要来自花后光合产物的输入量,而非器官干物质的转运;驻玉927、驻玉902春播用于茎秆、穗轴生长的干物质累积大于叶、鞘、苞叶;夏播用于穗轴生长的干物质累积显著高于叶、鞘、茎、穗柄、苞叶。驻玉927春播花后光合产物输入子粒量及对子粒贡献率表现为鞘>苞叶>叶>穗柄>穗轴>茎秆,驻玉902夏播表现鞘、穗柄>茎秆>叶、苞叶>穗轴。

本研究表明,玉米亲本自交系不同器官干物质转运存在显著差异,春、夏播间变化幅度不同。春播驻136干物质转运量表现为叶>苞叶>鞘>茎秆,穗轴和穗柄没有干物质输出转运,叶、苞叶、鞘、茎秆花后干物质输出转运对子粒产量形成产生贡献。ZM3358只有叶、鞘有干物质输出转运;驻85叶、鞘、茎秆、穗轴、穗柄、苞叶均没有干物质输出转运;

ZM027只有叶、鞘产生干物质输出有转运。夏播驻136干物质转运量表现为叶>鞘>苞叶,茎秆、穗轴和穗柄没有干物质输出转运;ZM3358只有叶、鞘、茎秆有干物质输出转运;驻85干物质转运与春播存在较大差异,只有穗轴没有干物质输出转运;ZM027只有叶、鞘产生干物质输出转运,干物质输出转运对子粒产量贡献关键来源于叶、鞘,茎秆、穗轴、穗柄、苞叶对子粒贡献率均为负值,子粒产量主要来源于吐丝后其光合同化产物,并非器官组织的干物质输出转运。玉米亲本自交系选育过程中适宜的干物质运移率可提高生育后期干物质生产特性,也是培育丰产型玉米品种的生理基础。

杂种优势是作物遗传过程中的一种普遍现象,也是品种抗性、品质和产量改良关键途径^[27]。生物性状之间的遗传差异致使其杂种优势呈现的程度与方向也不尽一致^[28]。研究多环境条件下玉米300个杂交种的17个性状的杂种优势,许多杂交种呈现出中亲优势较高,杂种优势水平性状之间相关性较弱,表明杂种优势的遗传基础和性状相关。本研究表明,春播玉米杂交种间干物质重、子粒重 F_1 杂种优势指数、相对杂种优势、中亲杂种优势、超亲杂种优势差异春播达显著水平;夏播玉米杂交种间的杂种优势差异不显著。本研究表明,玉米杂交种干物质平均积累速率、最高积累速率、高峰持续期显著大于亲本自交系,玉米杂交种干物质累积向子粒内的分配比重显著高于亲本自交系,玉米干物质生产、分配杂种优势显著,干物质转运杂种优势不显著。因此,系统解析玉米干物质重、子粒重的遗传效应可为玉米杂种优势的遗传机理探索奠定重要基础。在玉米自交系培育过程中可优先加强在特定杂种优势组合后代内创制改良高配合力的种质资源,有利于选育高产玉米新品种。

参考文献:

- [1] 史大坤,魏锋,张玉红,等.种植密度对黄淮海区域部分玉米品种抗倒能力及产量的影响[J].江苏农业科学,2023,51(16):98-104.
SHI D K, WEI F, ZHANG Y H, et al. The effect of planting density on the lodging resistance and yield of some maize varieties in the Huanghuaihai region[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2023, 51(16): 98-104. (in Chinese)
- [2] 钱春荣,王荣焕,于洋,等.不同熟期玉米品种在不同生态区的干物质积累、转运与分配特征[J].玉米科学,2021,29(2):60-68.
QIAN C R, WANG R H, YU Y, et al. Characteristics of dry matter accumulation, transportation and distribution of maize varieties differing in maturities in different ecological zones[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(2): 60-68. (in Chinese)
- [3] 王玉,赵财,樊志龙,等.行距及密度影响玉米密植潜力的干物质累积和产量构成机制[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(5):652-661.
WANG Y, ZHAO C, FAN Z L, et al. Characteristics of dry matter accumulation and yield formation of dense planting maize in different row spacing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 652-661. (in Chinese)
- [4] 孙雪芳,丁在松,侯海鹏,等.不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化[J].作物学报,2013,39(7):1284-1292.
SUN X F, DING Z S, HOU H P, et al. Post-anthesis photosynthetic assimilation and the changes of carbon and nitrogen in different varieties of spring maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(7): 1284-1292. (in Chinese)
- [5] 王佳旭,王宏伟,姜文野,等.不同种植方式对玉米干物质积累、分配和产量的影响[J].玉米科学,2021,29(5):128-136.
WANG J X, WANG H W, JIANG W Y, et al. Effects of different planting patterns on dry matter accumulation, distribution and yield of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(5): 128-136. (in Chinese)
- [6] MADDONNI G A, OTEGUI M E, CIRILO A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation[J]. Field Crops Research, 2001, 71(3): 183-193.
- [7] 张玉芹,杨恒山,高聚林,等.超高产春玉米冠层结构及其生理特性[J].中国农业科学,2011,44(21):4367-4376.
ZHANG Y Q, YANG H S, GAO J L, et al. Study on canopy structure and physiological characteristics of super-high yield spring maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21): 4367-4376. (in Chinese)
- [8] 马国胜,薛吉全,路海东,等.陕单8806高产高效施肥技术模式研究[J].玉米科学,2006,14(4):134-137.
MA G S, XUE J Q, LU H D, et al. Study on high yield and benefit fertilization application technique of Shandan8806[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(4): 134-137. (in Chinese)
- [9] 胡昌浩,潘子龙.夏玉米同化产物积累与养分吸收分配规律的研究I干物质积累与可溶糖和氨基酸的化规律[J].中国农业科学,1982(1):56-64.
HU C H, PAN Z L. Study on the accumulation of assimilation products and nutrient absorption and distribution in summer maize I. the accumulation of dry matter and the transformation of soluble sugar and amino acid[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1982(1): 56-64. (in Chinese)
- [10] 王昌亮,吴西利,常建智,等.黄淮海不同类型玉米干物质积累、分配与转运特征[J].江苏农业科学,2023,51(7):103-109.
WANG C L, WU X L, CHANG J Z, et al. Characteristics of dry matter accumulation, distribution, and transport in different types of maize in the Yellow-Huai-Hai regions[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2023, 51(7): 103-109. (in Chinese)
- [11] 戴明宏,陶洪斌,王利纳,等.不同氮肥管理对春玉米干物质生产、分配及转运的影响[J].华北农学报,2008,23(1):154-157.
DAI M H, TAO H B, WANG L N, et al. Effects of different nitrogen managements on dry matter accumulation, partition and transportation of spring maize(*Zea mays* L.)[J]. Acta Agriculturae Boreali-Si-

- nica, 2008, 23(1): 154–157. (in Chinese)
- [12] 罗方, 杨恒山, 张玉芹, 等. 春玉米干物质积累及转运对种植模式和种植密度的响应[J]. 华北农学报, 2019, 34(2): 124–131. LUO F, YANG H S, ZHANG Y Q, et al. Response of dry matter accumulation and translocation to planting pattern and planting density in spring maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(2): 124–131. (in Chinese)
- [13] 魏锋, 史大坤, 卫晓轶, 等. 不同玉米杂交种产量和品质性状的杂种优势分析[J]. 山东农业科学, 2022, 54(12): 25–39. WEI F, SHI D K, WEI X Y, et al. Heterosis analysis of yield and quality characters of different maize hybrids[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(12): 25–39. (in Chinese)
- [14] LIPPMAN Z B, ZAMIR D. Heterosis: revisiting the magic[J]. TRENDS in Genetics, 2006, 23(2): 60–66.
- [15] DUVICK D N, CASSMAN K G. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States[J]. Crop Science, 1999, 39: 1622–1630.
- [16] TOLLENAAR M, AHMADZADEH A, LEE E A. Physiological basis of heterosis for grain yield in maize[J]. Crop Science, 2004, 44: 2086–2094.
- [17] 钱春荣, 于洋, 郝玉波, 等. 不同供氮水平下玉米生产力的杂种优势特征[J]. 玉米科学, 2022, 30(5): 108–115. QIAN C R, YU Y, HAO Y B, et al. Heterosis characteristics of maize productivity under different nitrogen supply levels[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(5): 108–115. (in Chinese)
- [18] 张磊, 孔丽丽, 侯云鹏, 等. 滴灌施氮对东北春玉米物质生产、转运及氮素利用效率的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(6): 68–73. ZHANG L, KONG L L, HOU Y P, et al. Effect of drip nitrogen fertilization on dry matter production, translocation and nitrogen utilization of spring maize in northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(6): 68–73. (in Chinese)
- [19] 卫晓轶, 史大坤, 魏锋, 等. 新单系列玉米品种抗倒相关性状的杂种优势分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(8): 67–73. WEI X Y, SHI D K, WEI F, et al. Heterosis analysis of lodging resistance related traits in Xindan series maize varieties[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2023, 51(8): 67–73. (in Chinese)
- [20] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 等. 玉米生产上3个主推品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性[J]. 作物学报, 2018, 44(3): 414–422. XU T J, LYU T F, ZHAO J R, et al. Photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and translocation, grain filling parameter of three main maize varieties in production[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(3): 414–422. (in Chinese)
- [21] 吴春胜. 超高产玉米灌浆速率与干物质积累特性研究[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 382–385, 400. WU C S. Studies on characteristics of grain filling and dry matter accumulation of super high-yield maize[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(4): 382–385, 400. (in Chinese)
- [22] 钟昌松, 吕巨智, 石达金, 等. 不同生态类型玉米品种生产潜力比较分析[J]. 西南农业学报, 2021, 34(6): 1146–1155. ZHONG C S, LYU J Z, SHI D J, et al. Comparative analysis on potential productivity of maize varieties with different eco-types[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(6): 1146–1155. (in Chinese)
- [23] 常晓, 王小博, 吴嫚, 等. 施氮对不同氮效率类型玉米自交系产量、干物质及氮素积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 221–227. CHANG X, WANG X B, WU M, et al. Effects of nitrogen fertilizer on the yield, dry matter and nitrogen accumulation of maize inbred lines with different nitrogen use efficiency types[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(2): 221–227. (in Chinese)
- [24] 王会强, 朱世蝶, 王会涛, 等. 遮荫胁迫对渍水条件下玉米自交系农艺性状及干物质积累的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 74–82. WANG H Q, ZHU S D, WANG H T, et al. Effects of shading stress on agronomic characters and dry matter accumulation of maize inbred lines under water logging[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(4): 74–82. (in Chinese)
- [25] 胡向尚, 许海涛, 郭海斌, 等. 氮肥对高氮效玉米品种干物质累积分配与子粒含水量的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(9): 83–88. HU X S, XU H T, GUO H B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation, distribution and grain water content of high nitrogen efficiency maize varieties[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(9): 83–88. (in Chinese)
- [26] 阎翠萍, 张虎, 王建军, 等. 沟谷地春玉米干物质积累、分配与转移规律的研究[J]. 玉米科学, 2002, 10(1): 67–71. YAN C P, ZHANG H, WANG J J, et al. Study on law of biomass accumulation, distribution and transference of spring corn in the gully region[J]. Journal of Maize Sciences, 2002, 10(1): 67–71. (in Chinese)
- [27] 刘孜, 贾春兰, 崔霞, 等. 玉米自交系维生素含量与F₁杂种优势关系研究[J]. 山东农业科学, 2023, 55(6): 25–31. LIU Z, JIA C L, CUI X, et al. Relationship between vitamin content and F₁ heterosis of maize inbred lines[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(6): 25–31. (in Chinese)
- [28] 钟源, 赵小强, 李文丽, 等. 不同播深环境下玉米耐深播性状杂种优势及遗传效应解析[J]. 核农学报, 2021, 35(3): 556–566. ZHONG Y, ZHAO X Q, LI W L, et al. Heterosis and genetic effect-analysis of deep-seeding traits in maize under different sowing environments[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(3): 556–566. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)