

春、夏播玉米子粒构型动态发育差异性研究

连少英¹, 孙淑芝², 许海涛³, 王素奇³, 李 春³, 许 波³, 张军刚³, 郭海斌³

(1. 商丘市农林科学院, 河南 商丘 476000; 2. 商丘市乡村产业发展中心, 河南 商丘 476000; 3. 驻马店市农业科学院, 河南 驻马店 463000)

摘 要: 以驻玉 216、驻玉 902、中科玉 505、裕丰 303、郑单 958 为试验材料, 研究春、夏播玉米子粒构型性状的动态发育特征, 为玉米子粒构型育种提供理论依据。结果表明, 粒长春播裕丰 303 第 12~19 天呈波浪式增长, 夏播中科玉 505 第 12~26 天迅速增加。粒宽春播郑单 958、裕丰 303 随授粉后日数的增加平稳变宽, 夏播中科玉 505 授粉后第 12~19 天急剧变宽。粒厚春播驻玉 216、驻玉 902 第 12~33 天急速提高, 夏播郑单 958 第 12~33 天快速增加。玉米子粒百粒体积春播呈抛物线形动态发育, 夏播呈直线式变化趋势。春、夏播子粒百粒质量呈抛物线形动态发育变化。长宽比春播第 12~19 天驻玉 216、驻玉 902 比值大于 1:1, 夏播第 40~47 天中科玉 505、郑单 958 显著提高。子粒密度春播第 40~47 天驻玉 216、中科玉 505 急剧增加, 夏播第 12~19 天裕丰 303、郑单 958 缓慢下降。

关键词: 玉米; 春、夏播; 子粒构型; 长宽比; 子粒密度

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Dynamic Development Differences of Grain Configuration in Spring-Sown and Summer-Sown Maize

LIAN Shao-ying¹, SUN Shu-zhi², XU Hai-tao³, WANG Su-qi³, LI Chun³, XU Bo³,

ZHANG Jun-gang³, GUO Hai-bin³

(1. Shangqiu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shangqiu 476000;

2. Shangqiu Rural Industry Development Center, Shangqiu 476000;

3. Zhumadian Academy of Agricultural Sciences, Zhumadian 463000, China)

Abstract: This study investigated the dynamic development of grain configuration traits in spring- and summer-sown maize using varieties Zhuyu216(ZY216), Zhuyu902(ZY902), Zhongkeyu(ZKY505), Yufeng303(YF303), and Zhengdan958(ZD958), aiming to provide a theoretical basis for maize grain configuration breeding. The results showed that the grain length of spring-sown YF303 increased in fluctuation from days 12 to 19, while the grain length of summer-sown ZKY505 increased rapidly from days 12 to 26. The grain width of spring-sown ZD958 and YF303 steadily widened with the increase of pollination days, while the grain width of summer-sown ZKY505 sharply widened from days 12 to 19. The grain thickness of spring-sown ZY216 and ZY902 increased rapidly from days 12 to 33, while the grain thickness of summer-sown ZD958 increased rapidly from days 12 to 33. The 100-grain volume of spring-sown maize varieties exhibited a parabolic dynamic development, while the 100-grain volume of summer-sown maize varieties showed a linear trend of change. The 100-grain weight of spring and summer maize varieties showed a parabolic dynamic development trend. The length-width ratio for spring-sown ZY216 and ZY902 were greater than 1:1 from days 12 to 19, while the length-width ratio for summer-sown ZKY505 and ZD958 were significantly increased from days 40 to 47. The grain density of spring-sown ZY216 and ZKY505 increased sharply from days 40 to 47, while the grain density of summer-sown YF303 and ZD958 decreased slowly from days 12 to 19.

Key words: Maize; Spring-sown and summer-sown; Grain configuration; Length-width ratio; Grain density

录用日期: 2024-11-14

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(242102111168)

作者简介: 连少英(1985-), 女, 河南开封人, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物育种与栽培技术研究。E-mail: liansy123333@163.com

许海涛为并列第一作者。Tel: 15839671015 E-mail: xuht0101@126.com

孙淑芝为本文通信作者。E-mail: rsk8336@163.com

玉米(*Zea mays* L.)是国内重要的粮食作物之一,对我国粮食增产的贡献已达55%^[1]。高产始终是最重要的玉米育种目标,子粒产量作为最复杂、最主要的数量性状^[2],其形成是由互相关联多基因调控的生化生理最终代谢过程,也是一个连续生物学过程^[3]。玉米子粒是其产量构成的重要基础,子粒构型显著影响玉米的产量。在玉米品种选育过程中,子粒构型指标已成为近年来育种者的重点关注目标,子粒构型、颜色、硬度对品种选择的方向起着决定性作用^[4-6]。玉米子粒作为繁殖器官,其力学特征、结构质地、粒型、大小等是评价子粒完整性、饱满度和均匀度的主要参数,除与子粒产量显著相关外,还显著影响玉米的播种与加工质量,是玉米重要的品质评价参数^[7]。在研究子粒构型中,玉米子粒构型性状可分为形态性状和大小性状,子粒构型大小用粒长、粒宽、粒厚、百粒质量、子粒体积等来评价,长宽比、长厚比、厚宽比用于衡量子粒的形态指标^[8]。子粒重量的高低取决于子粒构型,是子粒重量的一个直接决定性参数^[9]。

关于子粒构型与产量的相关研究在玉米中已有一些报道,并相继取得了一定有益进展,诸多学者对子粒构型与产量相关性研究从表型水平进行大量探讨^[10]。银学波等研究表明,玉米子粒粒宽与粒长呈现极显著正相关,粒厚与粒长呈现极显著负相关,粒厚与粒宽呈现负相关性,粒长、粒宽作为子粒体积的决定性因素,与子粒体积均呈现极显著正相关性,粒厚与子粒体积未达显著相关关系。徐运林等^[11]对甜玉米子粒的粒厚、粒宽、粒长与百粒重相关性分析发现,粒厚、粒宽、粒长与百粒重呈现极显著正相关关系,粒厚与粒长呈现极显著负相关关系。前人研究报道^[12]玉米子粒重随授粉后日数的延长而增加,不同部位果穗子粒鲜重与干重呈现“S”形变化生育过程,授粉后12 d内缓慢增加,12~32 d急剧提高,而32 d后增加变缓。也有文献研究^[13]指出,甜玉米的子粒体积、粒厚、粒长、粒宽授粉后持续增加,粒长达最大增长速率的时间要早于子粒体积、粒厚、粒宽,粒厚吐丝后18 d达到峰值,子粒干重与鲜重的增长呈Logistic动态生长曲线,增长速率拐点分别出现于吐丝后14~15 d和17~18 d。前人利用源自共同亲本的11个RIL群体,在不同环境下研究了粒厚、粒长、粒宽、百粒重与子粒产量的遗传关系,表明粒长与子粒产量、百粒重表现极显著表型相关关系和遗传相关关系,粒厚、粒宽与百粒重及子粒产量表现显著正相关性^[14]。

已有大量研究探讨了玉米子粒构型与子粒产量

的相关关系,在玉米育种子粒产量提高过程中,子粒构型也是品种选育中重要的选择指标^[15]。前人关于玉米子粒构型多集中于收获时子粒形状、大小与产量的相关研究,对子粒构型的形成过程与建成规律罕见有关报道,且受当地生态环境等诸多非生物胁迫因素的影响,玉米子粒构型会产生较大变化,显著影响玉米子粒产量,致使结论存在一定局限性,特别是子粒构型的变化导致子粒产量的变化方面鲜有研究。玉米子粒是产量重要构成基础,本文通过春、夏播种植对玉米子粒构型动态发育与差异性研究,探索子粒构型在产量形成过程中的贡献大小,寻找导致子粒产量产生差异性的子粒构型,研究产量与子粒构型的关系,精确了解春、夏播玉米子粒构型动态变化的差异性,在品种选育中可利用与产量显著相关的子粒构型指标为高产育种提供理论支撑和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2023年5-9月进行春、夏播两季试验,地处驻马店驿城区(33°0'36" N, 114°2'31" E, 海拔为89.8 m)现代农业试验示范服务基地中心。试验区光热资源丰富,雨量时空分布不匀但较为充足,属季风性半湿润大陆型气候。试验土壤质地是砂姜黑土类型,耕层厚度20 cm左右,有机质含量为11.3 g/kg,碱解氮含量为89.7 mg/kg,速效钾含量为81.4 mg/kg,速效磷含量为81.4 mg/kg, pH值为6.3^[16]。试验地表面平坦,肥力较为均匀,旱能浇涝能排。试验田间利用双翻斗6S型集雨器测定降雨量,用Elitech RC-4HC温度记录仪测定田间每日最高与最低气温。春、夏播玉米生长发育期内最高和最低气温、平均气温、降雨量详见图1。2023年5月6日至8月28日春播玉米生长发育期内最低气温10~29℃,最高气温19~36℃,有效积温1 852.0℃·d,总降雨量671.6 mm;2023年6月13日至9月28日夏播玉米生长发育期内最低气温14~29℃,最高气温19~36℃,有效积温1 765.5℃·d,总降雨量184.9 mm。春播比夏播生育期内总降雨量降低了184.9 mm,有效积温增加了86.5℃·d。

1.2 供试材料

以驻玉216(ZY216)、驻玉902(ZY902)、中科玉505(ZKY505)、裕丰303(YF303)、郑单958(ZD958)玉米品种为试验材料,驻玉216、驻玉902是由驻马店市农业科学院玉米研究所选育提供,中科玉505、裕丰303是由北京联创种业有限公司、河南隆平联创农业科

技术有限公司选育提供,郑单958是由河南省农业科学院选育提供。裕丰303、郑单958为河南省推广面积较大品种,目前是国家黄淮海区域玉米南片品种区域试验对照品种。

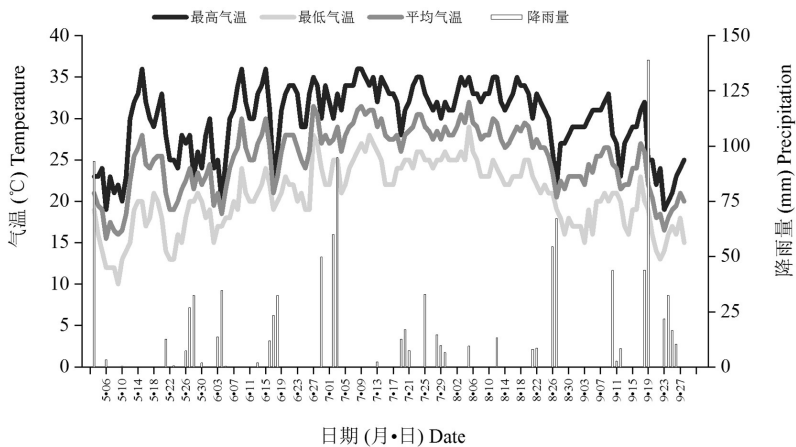


图1 春、夏播玉米生育期内最高气温、最低气温、平均气温与降雨量

Fig.1 Maximum temperature, minimum temperature, average temperature, and precipitation during the growth and development period of spring-sown and summer-sown maize

1.3 试验设计

采用区组随机试验设计,种植3次重复,重复间过道为1 m,小区面积21.6 m²,行长6 m,行距60 cm,6行区,共有15个试验小区,周围设置4行保护行玉米。试验地旋耕前施复合肥1 125 kg/hm²,由湖北富来地金润肥业有限公司生产,N、P₂O₅、K₂O养分含量分别为28%、6%、6%,总养分含量≥40%。2023年5月4日春播施肥旋耕,5月6日人工开沟点播,每穴点种2~3粒,播种深度3~4 cm,出苗期5月14~16日,成熟期8月23~27日。2023年6月13日夏播人工开沟点播,每穴点种2~3粒,播种深度3~4 cm,出苗期6月19~20日,成熟期9月23~28日。春、夏播小区留苗密度均为7.5万株/hm²,与本地大田玉米生产管理水平相同。

1.4 指标测定与方法

各试验小区玉米吐丝前利用白色羊皮纸袋套牢果穗,每小区套袋60株以备用,同小区所有备用植株待果穗花丝完全抽出后,于9:00~10:00时晴好天气采取本植株雄穗花粉,去纸袋后对花丝饱和式授粉,授粉时要确保花粉量充足、花粉活性较高,授粉后挂吊牌标明授粉日期。授粉后12 d开始果穗取样,之后每隔7 d取果穗1次,每次选取5穗,果穗完全剥离苞叶后置入DHG-9243BS-Ⅲ型恒温鼓风电热干燥箱(上海新苗牌)105℃环境下先杀青30 min,80℃条件下再烘干到恒重,果穗脱粒混合后室内测定子粒构型指标,求其平均值。用游标卡尺(分度值0.02 mm)测定子粒粒长、粒宽、粒厚,天平(分度值0.01 g)测定百粒质量,采用排水法测定百粒体积,子

粒100粒先置入装有水的量筒中,读取放置子粒前后水面刻度差值,即百粒体积(mL)^[17]。

1.5 数据统计与分析

用软件Excel 2003对数据进行基本处理,软件SPSS 19进行方差分析与显著性检验,软件Origin 2021进行作图。

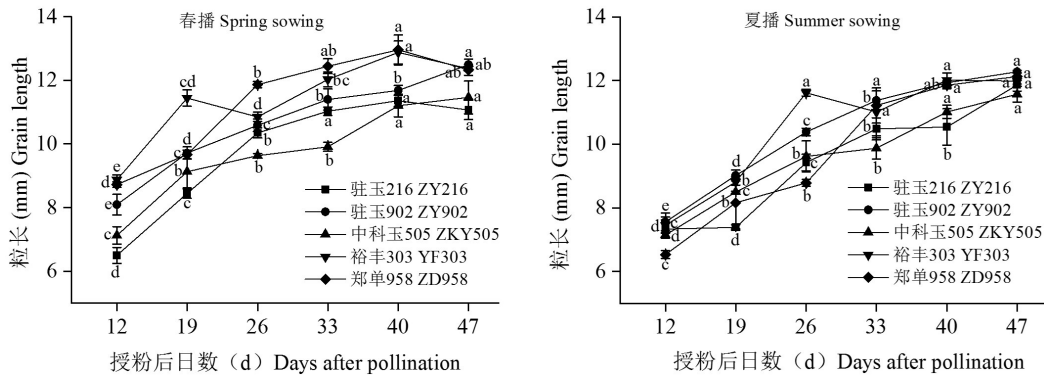
2 结果与分析

2.1 春、夏播玉米子粒粒长动态发育

由图2可知,春、夏播玉米子粒粒长发育基本呈现持续伸长动态变化趋势,春、夏播之间粒长的变化幅度存在一定差异。春播玉米子粒粒长,裕丰303授粉后第12~19天快速变长后呈波浪式增长,第19~26天下降后又迅速增加至第40天,第40~47天略有降低;郑单958、驻玉216子粒伸长呈抛物线形变化,子粒粒长授粉后第12~26天急剧伸长,之后增幅变缓,缓慢增加到第40天后稍有下降;驻玉902子粒粒长基本呈直线式增加,授粉后第12~33天迅速变长,第33~40天增幅变缓,第40~47天粒长增幅又提高;中科玉505子粒粒长授粉后第12~19天急速增加,第19~33天增幅变小伸长缓慢,差异未达显著水平,第33~40天又迅速增加,第40天后粒长略有增加。夏播玉米子粒粒长,驻玉216呈典型锯齿形变化,授粉后第12~19天粒长略有下降后迅速伸长至第33天,第33~40天平稳变化无显著伸长,第40天后粒长又急剧增加;裕丰303、郑单958子粒粒长授粉后第12~26天快速伸长,裕丰303增长幅度显著高于郑单958,第26~33天裕丰303快

速下降、郑单958持续伸长,第33~47天裕丰303、郑单958粒长逐步增加,增幅一致但差异未达显著水平;驻玉902、中科玉505子粒粒长基本呈持续增长变化趋势,驻玉902粒长授粉后第12~33天持续

变长后增幅变缓,中科玉505粒长授粉后第12~26天急剧增加,第26~33天增幅变小,第33天后又迅速增长。



注:同一折线不同小写字母表示差异达5%显著水平。下图同。

Note: Different lowercase letters on the same line indicate a significant difference in the 5% level. The same below.

图2 春、夏播玉米子粒粒长动态发育

Fig.2 Dynamic development of grain length in spring-sown and summer-sown maize grains

2.2 春、夏播玉米子粒粒宽动态发育

由图3可知,春、夏播玉米子粒粒宽发育整体呈现逐步变宽的动态变化趋势,春、夏播之间粒宽的变化幅度存有一定差异。春播玉米子粒粒宽,驻玉902授粉后第12~40天粒宽呈现平行直线式变化,增幅变化较小,第40~47天略有降低,粒宽变化差异不显著;郑单958、裕丰303粒宽随授粉后日数的增加呈平稳变宽的动态变化趋势,郑单958授粉后第40~47天稍有下降,裕丰303粒宽变化显著低于郑单958;驻玉216粒宽动态发育呈抛物线形增宽,但变化过程呈锯齿状,授粉后第12~19天粒宽急剧增

加,第19~26天又降低,之后又快速提高至第33天,第33~47天粒宽又平缓下降。夏播玉米子粒粒宽动态发育整体上呈抛物线形增长,子粒粒宽郑单958授粉后第12~26天迅速持续变宽,第26~33天急剧增加后又快速降低,第40~47天稍有升高;驻玉902、裕丰303粒宽授粉后第12~40天缓慢增宽,之后略有下降,驻玉902粒宽变化高于裕丰303;驻玉216粒宽授粉后第12~33天逐渐增加,第33天后增幅显著下降,第33~47天变化极小,差异不显著;中科玉505粒宽第12~19天迅速变宽,第19~33天缓慢增加后,又平稳下降。

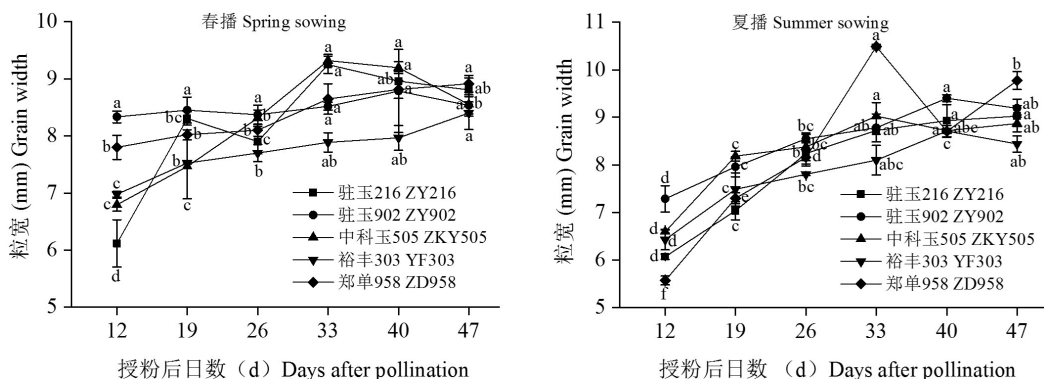


图3 春、夏播玉米子粒粒宽动态发育

Fig.3 Dynamic development of grain width in spring and summer-sown maize grains

2.3 春、夏播玉米子粒粒厚动态发育

由图4可知,春、夏播玉米子粒粒厚发育基本呈现抛物线形逐渐变厚的动态变化趋势,春、夏播之间

粒厚的变化幅度存在一定差异。春播玉米子粒粒厚,中科玉505授粉后第12~19天快速增厚,第19~26天稍有下降,之后缓慢增加;驻玉216、驻玉902

授粉后第12~33天粒厚急速提高,第33~40天均有所下降,驻玉216下降幅度显著高于驻玉902,第40天后又逐渐提升;裕丰303、郑单958授粉后第12~26天粒厚迅速增加,第26~40天裕丰303缓慢降低后又有所增加,郑单958平稳增厚第40天后又快速下降。夏播玉米子粒粒厚驻玉216授粉后第12~19天快速增厚,第19~40天缓慢增加后又有所

降低;驻玉902授粉后第12~19天迅速变厚,第19~40天平稳增加,第40~47天略有降低,第19~47天粒厚差异未达显著水平;中科玉505、郑单958粒厚变化趋势基本一致,授粉后第12~33天粒厚快速增加,第33~40天稍有下降后又有所增加;裕丰303授粉后第12~19天粒厚变化较小,第19~40天急剧增加,第40~47天又快速下降。

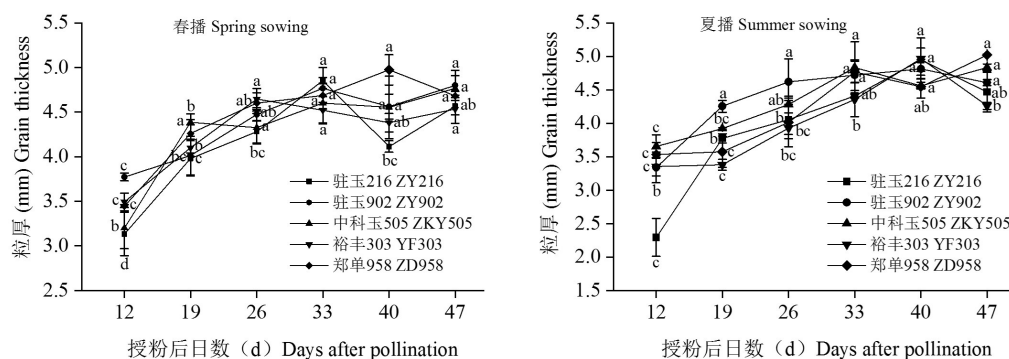


图4 春、夏播玉米子粒粒厚动态发育

Fig.4 Dynamic development of grain thickness in spring-sown and summer-sown maize grains

2.4 春、夏播玉米子粒百粒体积动态发育

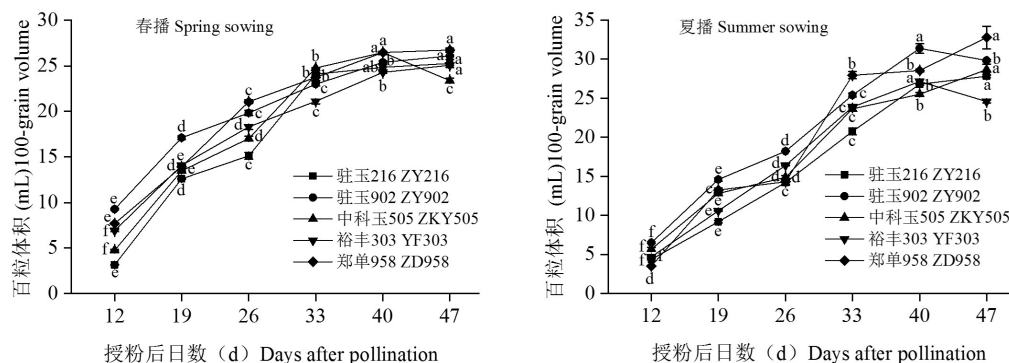


图5 春、夏播玉米子粒百粒体积动态发育

Fig.5 Dynamic development of 100-grain volume in spring-sown and summer-sown maize grains

由图5可知,春播玉米子粒百粒体积呈抛物线形动态发育,夏播玉米子粒百粒体积呈直线式变化趋势,春、夏播间玉米子粒百粒体积变化幅度存在差异。春播玉米子粒百粒体积驻玉216、驻玉902授粉后第12~19天急剧增加,驻玉216第19~26天增幅下降,第26~33天又迅速提高,之后变化较小,驻玉902第19~40天呈直线增加,但增幅有所下降,第40~47天稍有提高;裕丰303授粉后第12~19天快速提升,第19天后呈直线式增加至第40天,但增幅有所下降,第40~47天增加变缓;中科玉505授粉后第12~19天迅速增加,第19~26天增幅有所降低,之后又快速增加至第33天,第33~40天增幅显著下降,第40~47天又迅速减少;郑单958授粉后第

12~26天呈直线式急剧增加,第26~40天增幅变缓,第40天无显著变化。夏播玉米子粒百粒体积驻玉216授粉后第12~40天呈直线式急剧增加,第40~47天增幅显著下降,稍有提升;中科玉505、郑单958授粉后第12~40天呈波浪式增加,第12~19天、第26~33天增加较大,第40~47天又迅速提高;驻玉902授粉后第12~40天急剧增加,第40~47天又迅速下降;裕丰303授粉后第12~33天急速提高,第33~40天增幅变缓后又快速下降至第47天。

2.5 春、夏播玉米子粒百粒质量动态发育

由图6可知,春、夏播玉米子粒百粒质量呈抛物线形动态发育变化趋势,春、夏播间变化幅度存在一

定差异。春播玉米子粒百粒质量驻玉216、中科玉505授粉后第12~26天快速增加,第26~33天急剧提高,驻玉216第33~47天增幅显著下降,略有提高,中科玉505第33~40天缓慢增加后又迅速下降;驻玉902授粉后第12~40天呈直线式快速增加后,又缓慢下降至第47天;裕丰303授粉后第12~40天迅速增加后平稳增加至第47天,第40~47天增幅显著下降;郑单958授粉后第12~26天急剧增加,第

26~40天稳步提高,第40~47天无显著变化。夏播玉米子粒百粒质量驻玉216、驻玉902授粉后第12~40天呈直线式急剧增加,第40~47天驻玉216增幅变缓稍有提高,驻玉902略有降低;郑单958、中科玉505授粉后第12~47天呈锯齿式增加,第12~19天、第26~33天增幅较大,第19~26天增幅最低;裕丰303授粉后第12~33天迅速增加,第33~40天增幅变缓逐步提高,第40~47天又迅速下降。

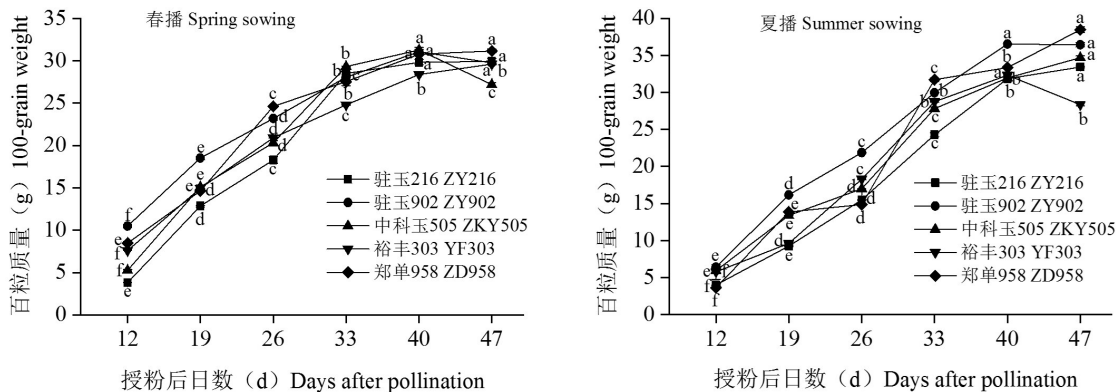


图6 春、夏播玉米子粒百粒质量动态发育

Fig.6 Dynamic development of 100-grain weight in spring-sown and summer-sown maize grains

2.6 春、夏播玉米子粒长宽比、子粒密度动态发育

由表1可知,玉米子粒长宽比值春播为1.00~

1.53,夏播为1.04~1.49。春播玉米子粒长宽比驻玉216、驻玉902授粉后第12~19天比值大于1:1

表1 春、夏播玉米子粒长宽比动态变化

Table 1 Dynamic changes of length-width ratio of spring-sown and summer-sown maize grains

授粉后日数(d) Days after pollination	春播 Spring-sown				
	驻玉216	驻玉902	中科玉505	裕丰303	郑单958
	Zhuyu 216	Zhuyu902	Zhongkeyu505	Yufeng303	Zhengdan 958
12	1.07 b	1.00 d	1.05 c	1.27 d	1.12 b
19	1.01 b	1.15 cd	1.25 b	1.32 de	1.21 b
26	1.21 a	1.26 bc	1.16 b	1.41 cd	1.47 a
33	1.19 a	1.34 ab	1.06 c	1.53 ab	1.44 a
40	1.27 a	1.35 ab	1.22 b	1.62 a	1.47 a
47	1.26 a	1.47 a	1.34 a	1.48 bc	1.39 a

授粉后日数(d) Days after pollination	夏播 Summer-sown				
	驻玉216	驻玉902	中科玉505	裕丰303	郑单958
	Zhuyu 216	Zhuyu902	Zhongkeyu505	Yufeng303	Zhengdan958
12	1.13 bc	1.04 c	1.08 c	1.17 b	1.17 b
19	1.05 c	1.13 bc	1.04 c	1.18 b	1.12 b
26	1.14 bc	1.21 ab	1.16 ab	1.49 a	1.08 b
33	1.20 ab	1.30 a	1.09 c	1.37 ab	1.07 b
40	1.18 b	1.27 a	1.27 a	1.38 ab	1.36 a
47	1.32 a	1.34 a	1.30 a	1.42 a	1.24 ab

注:同列数字不同小写字母表示差异达5%显著水平。下表同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate a significant difference in the 5% level. The same below.

但接近于1:1,粒长、粒宽增长速率差异较小,第19~40天粒长增长速率显著高于粒宽,比值有增大趋势,第47天驻玉216略有下降,驻玉902达到最高峰值;中科玉505、郑单958授粉后第12天子粒长宽比值接近于1:1,粒长、粒宽增长速率变化不大,中科玉505授粉后第19~40天呈波浪式变化,第40~47天粒长增长速率显著高于粒宽,长宽比值大幅增加,郑单958粒长增长速率逐步高于粒宽,长宽比值呈逐渐增加趋势,第40~47天略有下降;裕丰303授粉后第12~40天粒长增长速率显著高于粒长,长宽比值逐渐增加,第40~47天粒长增加速率有所下降,长宽比值变小。夏播玉米子粒长宽比驻玉216授粉后第12~26天比值大于1:1但接近于1:1,粒长、粒宽增长速率相近,第33~47天粒长增长速率逐渐大于粒宽,第47天长宽比值达最大值;驻玉902、裕丰303授粉后第12~19天粒长、粒宽增长速率相近,长宽比接近于1:1,第26~47天粒长增长速率逐步高于粒宽,长宽比呈逐渐增加的趋势,第47天达到高峰值;中科玉505、郑单958授粉后第12~33天粒长、粒宽增长速率差异不大,长宽比接近于1:1,第40~47天粒长增幅远大于粒宽,长宽比

显著提高。

由表2可知,玉米子粒密度春播为1.02~1.49,夏播为1.05~1.22。春播玉米子粒密度驻玉216、中科玉505授粉后第12~19天缓慢下降,驻玉216第19~40天有增加趋势,第40~47天急剧增加,中科玉505第19~33天呈缓慢增加趋势,第40~47天迅速提高;驻玉902授粉后第12天子粒最低,第19~47天平稳增加,随子粒灌浆充实第47天达到最大峰值;裕丰303授粉后第12~19天无显著变化,第19~26天子粒灌浆急剧增加,子粒密度迅速变大,第26~47天变化未达显著水平;郑单958授粉后第12~33天子粒密度变化相近,差异不显著,第33~40天急剧增加,之后略有降低。夏播玉米子粒密度中科玉505授粉后第12~26天缓慢升高,第26~33天无显著变化,第33~47天又平稳降低;驻玉216授粉后第12~19天缓慢下降,第19~26天快速增加,第26~47天呈波浪式变化;驻玉902授粉后第12~19天逐渐降低后又平稳增加到第33天,第33~40天无较大变化,第40~47天稍有下降;裕丰303、郑单958授粉后第12~19天缓慢下降,第19~47天又有所增加,但增加幅度未达显著水平。

表2 春、夏播玉米子粒密度动态变化

Table 2 Dynamic changes of grain density of spring-sown and summer-sown maize g/cm³

授粉后日数(d) Days after pollination	春播 Spring-sown				
	驻玉216	驻玉902	中科玉505	裕丰303	郑单958
	Zhuyu 216	Zhuyu902	Zhongkeyu505	Yufeng303	Zhengdan 958
12	1.21 ab	1.04 c	1.08 c	1.17 b	1.17 b
19	1.05 c	1.13 bc	1.04 c	1.18 b	1.12 b
26	1.14 bc	1.21 ab	1.16 ab	1.49 a	1.08 b
33	1.20 ab	1.30 a	1.09 c	1.37 ab	1.07 b
40	1.18 b	1.27 a	1.27 a	1.38 ab	1.36 a
47	1.32 a	1.34 a	1.30 a	1.42 a	1.24 ab

授粉后日数(d) Days after pollination	夏播 Summer-sown				
	驻玉216	驻玉902	中科玉505	裕丰303	郑单958
	Zhuyu 216	Zhuyu902	Zhongkeyu505	Yufeng303	Zhengdan958
12	1.20 ab	1.13 c	1.11 b	1.10 b	1.10 b
19	1.02 c	1.09 d	1.12 b	1.06 c	1.05 c
26	1.21 a	1.17 b	1.19 a	1.14 a	1.17 a
33	1.18 b	1.22 a	1.19 a	1.18 a	1.16 a
40	1.20 ab	1.22 a	1.18 a	1.17 a	1.16 a
47	1.19 b	1.14 c	1.16 a	1.18 a	1.17 a

2.7 春、夏播玉米子粒构型 Spearson 相关性分析

子粒构型与粒长、粒宽、粒厚动态发育显著相关。本研究对春、夏播玉米子粒构型性状间进一步

Spearson 相关性分析,由表3可知,春、夏播玉米子粒构型动态发育性状之间互为显著正相关,粒长、粒宽、粒厚之间达极显著正相关($P<0.01$),与百粒体积、

百粒质量间也达极显著正相关($P<0.01$);子粒长宽比与粒长、粒厚呈极显著正相关($P<0.01$),与粒厚未达显著水平($P>0.05$);子粒密度与粒长、粒厚春播达显著水平($P<0.05$)、夏播达极显著水平($P<0.01$),与粒宽春播未达显著水平($P>0.05$);百粒体积、百粒质量与

子粒长宽比、子粒密度均呈极显著正相关($P<0.01$)。由此可见,玉米品种选育过程中可同步协调好子粒粒长、粒宽、粒厚的关系,同时兼顾百粒体积、百粒质量,可获得优良子粒构型的玉米品种。

表3 春、夏播玉米子粒构型Spearson相关性分析
Table 3 Spearson correlation analysis of grain configuration characters in spring and summer-sown maize

播季	子粒构型	粒长	粒宽	粒厚	百粒体积	百粒质量	长宽比	子粒密度
Sowing season	Grain structure	Grain length	Grain width	Grain thickness	100-grain volume	100-grain weight	Length-width ratio	Grain density
春播	粒长	1.000						
	粒宽	0.599**	1.000					
	粒厚	0.837**	0.738**	1.000				
	百粒体积	0.886**	0.832**	0.897**	1.000			
	百粒质量	0.875**	0.825**	0.886**	0.997**	1.000		
	长宽比	0.854**	0.100	0.570**	0.560**	0.550**	1.000	
	子粒密度	0.369*	0.315	0.395*	0.514**	0.576**	0.240	1.000
夏播	粒长	1.000						
	粒宽	0.829**	1.000					
	粒厚	0.821**	0.863**	1.000				
	百粒体积	0.936**	0.896**	0.914**	1.000			
	百粒质量	0.934**	0.878**	0.919**	0.997**	1.000		
	长宽比	0.770**	0.285	0.415*	0.575**	0.591**	1.000	
	子粒密度	0.794**	0.689**	0.871**	0.827**	0.862**	0.574**	1.000

注:**表示在0.01水平上极显著相关;*表示在0.05水平上显著相关。
Note: ** indicates extremely significant correlation at the 0.01 level; * indicates significant correlation at the 0.05 level.

3 结论与讨论

玉米子粒形态学特征目前还没有充分依据证实与子粒产量存有必然联系,但生产上子粒构型特征常作为玉米高产品种的根据。子粒构型与子粒产量性状之间相互影响又错综复杂,研究者在选育玉米品种过程中把某一性状优势不可能通过无限放大即能获得理想育种目标,科学合理地协调性状之间的相互关系至关重要,最终达到最适宜的平衡。子粒构型动态发育是否良好直接决定了玉米子粒的发育,粒长、粒宽、粒厚等子粒构型指标也是玉米品种选育时重要的靶向目标。

国外学者较早报道了粒长与子粒产量呈显著正相关关系^[19]。龚佃明^[20]研究发现,子粒粒长作为子粒产量性状的主要构成因子,是受多个微小效应基因共同调控的复杂数量性状,同时克隆出正调控粒长的关键基因*ZmKL9*。本研究中春、夏播玉米子粒粒长发育基本呈现持续伸长动态变化趋势,春、夏播之间粒长的变化幅度存在一定差异。可见,同一玉米品种春、夏播间粒长动态发育存有差异,呈现出不

同生育特征,不同玉米品种同一播季也存在显著差异,存在的差异性必会成为未来玉米优良品种培育的关键。由此可见,同一品种由于生态区的差异表现出不同的生长特性,不同品种在同一生态区也表现显著差异,这些差异将会成为未来品种选育的关键。

大量研究发现,子粒粒宽与其大小密切相关,是子粒粒型构成的重要因素,对子粒产量具有正向的重要贡献。也有学者研究认为,粒宽与子粒产量呈负相关关系,为增加玉米产量选择子粒构型相对较宽粒型对其性状遗传改良成为品种选育终极靶标^[21-22]。诸多研究证实,玉米子粒粒宽遗传力高,受环境因子影响相对较小,粒宽与穗粒重互为正相关。本研究中春、夏播玉米子粒粒宽发育整体呈现逐步变宽的动态变化趋势,春、夏播之间粒宽的变化幅度存有一定差异。通过春、夏播玉米子粒粒宽动态发育差异性研究,可为玉米粒型育种中粒宽决策选择提供一种研究途径,有助于表型构型中适宜粒宽的选育。

孟窃等^[23]通过Farm与Blink CPU对子粒粒厚进

行了全基因组关联分析和选择,挖掘出调控粒厚的显著 SNP(单核苷酸多态性位点),粒厚遗传力达 73.68%,与穗部性状之间呈显著相关关系。有文献研究指出,玉米子粒粒厚与粒长呈现极显著负相关性,与百粒重呈现极显著正相关关系,粒厚和粒长相关性未达显著水平。前人研究也表明,粒厚和子粒产量呈正相关性。周文伟等报道了甜玉米子粒粒厚动态发育,吐丝后第 8~13 天增长速率最高,第 15 天达到峰值。在玉米育种实际选择过程中,探明春、夏播玉米子粒粒厚的动态发育特征,充分挖掘粒厚对子粒产量的决定性作用,选育具有合理子粒构型的玉米品种。

为进一步发掘玉米子粒构型对产量的贡献潜力,学者对子粒构型已进行了较多研究,但作为最直观的子粒体积罕见报道。本研究表明,春播玉米子粒百粒体积呈抛物线形动态发育,夏播玉米子粒百粒体积呈直线式变化趋势,春、夏播间玉米子粒百粒体积变化幅度存在差异,吐丝后第 13~18 天子粒体积增长最快。也有文献研究发现,玉米子粒体积春播显著大于夏播,子粒体积和子粒破碎率呈现负二次方程曲线关系^[24],子粒建成速率直接决定了子粒体积的大小^[25]。

玉米子粒产量是极为复杂的一个数量性状,百粒质量是其关键的构成因素之一。百粒质量与粒厚、粒宽、粒长呈现极显著正相关性。有研究表明,子粒干重的动态增长吻合 Logistic 曲线方程,吐丝后第 14~15 天、第 17~18 天分别达到增长速率的两个拐点。本研究中春、夏播玉米子粒百粒质量呈抛物线形动态发育变化趋势,春、夏播间变化幅度存在一定差异^[26]。粒重作为构成产量重要性状之一,在确保一定面积玉米穗粒数与果穗数相对不显著降低的条件下,增加粒重可显著提高子粒产量,因此,子粒构型相对决定了粒重的高低,通过玉米子粒构型间接选择粒重比直接选择要具有更好的遗传进展。

长宽比值在形态学上常表征子粒形状指标,子粒密度较容重更可精确描述粒重的累积。目前,有关玉米子粒长宽比与子粒密度动态发育变化研究鲜有文献报道。本研究中玉米子粒长宽比值春播为 1.00~1.53,夏播为 1.04~1.49。子粒长宽比在水稻^[27]、大麦^[28]、大豆^[29]子粒构型育种实践中也获得应用。本研究中玉米子粒密度春播为 1.02~1.49,夏播为 1.05~1.22,玉米子粒构型育种实践中子粒密度更可精确评价粒重的动态累积过程。

本研究对春、夏播玉米子粒构型性状间进一步 Spearson 相关性分析发现,春、夏播玉米子粒构型动

态发育性状之间互为显著正相关,粒长、粒宽、粒厚之间达极显著正相关性($P<0.01$),与百粒体积、百粒质间也达极显著正相关性($P<0.01$);子粒长宽比与粒长、粒厚呈极显著正相关($P<0.01$);子粒密度与粒长、粒厚春播达显著水平($P<0.05$)、夏播达极显著水平($P<0.01$);百粒体积、百粒质量与子粒长宽比、子粒密度均呈极显著正相关($P<0.01$)。在玉米子粒构型品种选育中同步协调好粒长、粒宽、粒厚、长宽比的关系,同时兼顾子粒密度、百粒体积、百粒质量,能够选育适宜子粒构型的玉米品种。

春、夏播玉米子粒粒长发育基本呈现持续伸长,子粒粒宽发育整体呈现逐步变宽,子粒粒厚发育基本呈现抛物线形逐渐变厚。春播玉米子粒百粒体积呈抛物线形动态发育,夏播玉米子粒百粒体积呈直线式变化,百粒质量呈抛物线形动态发育变化。玉米子粒长宽比值春播为 1.00~1.53,夏播为 1.04~1.49;子粒密度春播为 1.02~1.49,夏播为 1.05~1.22。春、夏播玉米子粒构型性状间进一步 Spearson 相关性分析发现,玉米子粒构型动态发育性状之间互为显著正相关。

参考文献:

- [1] 景立权,赵福成,徐仁超,等.施氮水平对超高产夏玉米子粒及植株形态学特征的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):37-47.
JING L Q, ZHAO F C, XU R C, et al. Effects of nitrogen levels on the morphology characteristics of grain and plant of summer maize (*Zea mays* L.) under super-high yield conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 37-47. (in Chinese)
- [2] 王立伟.玉米粒长主效 QTL *qKL9* 的精细定位[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [3] 彭勃,王阳,李永祥,等.玉米子粒产量与产量构成因子的关系及条件 QTL 分析[J].作物学报,2010,36(10):1624-1633.
PENG B, WANG Y, LI Y X, et al. Correlation analysis and conditional QTL analysis of grain yield and yield components in maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1624-1633. (in Chinese)
- [4] 张磊,谢小清,唐怀君,等.玉米子粒构型与产量和抗旱性的关系分析[J].新疆农业科学,2021,58(10):1784-1790.
ZHANG L, XIE X Q, TANG H J, et al. Maize grain configuration characters: Relationship with yield and drought resistance[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(10): 1784-1790. (in Chinese)
- [5] 李永祥,王阳,石云素,等.玉米子粒构型与产量性状的关系及 QTL 作图[J].中国农业科学,2009,42(2):408-418.
LI Y X, WANG Y, SHI Y S, et al. Correlation analysis and QTL mapping for traits of kernel structure and yield components in maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 408-418. (in Chinese)
- [6] 朱春杰.玉米子粒性状与产量的相关性分析[J].种子世界,2016(6):31-33.
ZHU C J. Correlation analysis between maize grain traits and yield [J]. Seed World, 2016(6): 31-33. (in Chinese)

- [7] 银学波. 玉米子粒形态、结构质地及力学特性的粒位效应分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [8] LIU Y, WANG L W, SUN C L, et al. Genetic analysis and major QTL detection for maize kernel size and weight in multi-environments[J]. Theor Appl Genet, 2014, 127(5): 1019-1037
- [9] 刘颖. 玉米子粒粒型及产量相关性状的 QTL 定位和遗传分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [10] 王利润. 我国玉米生产现状及发展趋势[J]. 山西农经, 2015(3): 8-9.
WANG L R. Status quo and development trend of corn production in China[J]. Shanxi Agricultural Economics, 2015(3): 8-9. (in Chinese)
- [11] 徐运林, 房浩, 周柏宇, 等. 甜玉米种质资源种子性状全基因组关联分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 289-295.
XU Y L, FANG H, ZHOU B Y, et al. Genome wide association analysis of seed traits in sweet corn germplasm resources[J]. Jiangsu Agricultural Journal, 2021, 37(2): 289-295. (in Chinese)
- [12] 江亚丽, 张凤路. 夏玉米子粒发育动态研究[J]. 华北农学报, 2007(增刊): 57-60.
JIANG Y L, ZHANG F L. Study on development of summer maize kernel[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007(S): 57-60. (in Chinese)
- [13] 周文伟, 宋万友, 张子梅, 等. 甜玉米子粒灌浆特性的研究[J]. 杂粮作物, 2001(5): 27-28.
ZHOU W W, SONG W Y, ZHANG Z M, et al. Study on the filling characteristics of sweet corn grains[J]. Fain Fed Corps, 2001(5): 27-28. (in Chinese)
- [14] LI C H, LI Y X, SUN B C, et al. Quantitative trait loci mapping for yield components and kernel-related traits in multiple connected RIL populations in maize[J]. Euphytica, 2013, 193: 303-316.
- [15] PENG B, LI Y X, WANG Y, et al. QTL analysis for yield components and kernel-related traits in maize across multi-environments[J]. Theor Appl Genet, 2011, 122(7): 1305-1320.
- [16] 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)
- [17] 许海涛, 许波, 王友华, 等. 夏玉米生理特性及子粒性状对群体梯度渐增调控的响应[J]. 山东农业科学, 2021, 53(7): 39-45.
XU H T, XU B, WANG Y H, et al. Responses of physiological characteristics and grain traits of summer maize to population gradient incremental regulation[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(7): 39-45. (in Chinese)
- [18] AUSTIN D F, LEE M. Comparative mapping in $F_{2.3}$ and $F_{6.7}$ generations of quantitative trait loci for grain yield and yield components in maize[J]. Theor Appl Genet, 1996, 92(7): 817-826.
- [20] 龚佃明. 玉米粒长主效 QTL *KERNEL LENGTH9(KL9)* 的克隆及功能分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [21] 张美景, 刘瑞响, 孟庆长, 等. 玉米粒宽相关基因定位和功能解析研究进展[J/OL]. 分子植物育种, 2022: 1-11[2022-12-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221215.1625.008.html>.
- [22] 高嵩, 刘宏伟, 周旭东, 等. 玉米粒宽的全基因组关联分析及候选基因结构预测[J]. 分子植物育种, 2021, 19(12): 3861-3867.
GAO S, LIU H W, ZHOU X D, et al. Genome-wide association analysis of maize kernel width and prediction of candidate gene structure[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(12): 3861-3867. (in Chinese)
- [23] 孟窈, 林绍航, 曾雨康, 等. 玉米粒厚全基因组关联分析及全基因组选择研究[J]. 新疆农业大学学报, 2023, 46(5): 367-373.
MENG Y, LIN S H, ZENG Y K, et al. Genome-wide association study of kernel thickness in maize and the genome-wide selection[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2023, 46(5): 367-373. (in Chinese)
- [24] 梁如玉, 黄益勤, 展茗, 等. 长江中游春播与夏播玉米子粒脱水及机收质量差异分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(4): 897-907.
LIANG R Y, HUANG Y Q, ZHAN M, et al. Comparison of grain dehydration and mechanical harvest quality between spring-sown maize and summer-sown maize in the middle reaches of Yangtze River[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(4): 897-907. (in Chinese)
- [25] 郑有良, 赖仲铭, 杨克诚. 玉米子粒生长特性与子粒大小的关系及其遗传研究[J]. 四川农业大学学报, 1985, 3(2): 73-78.
ZHENG Y L, LAI Z M, YANG K C. Studies on relationship between kernel growth and size and their inheritances in corn[J]. Sichuan Agricultural University, 1985, 3(2): 73-78. (in Chinese)
- [26] 马红珍, 田媛, 吴寅, 等. 玉米果穗物质生产、分配与水分含量动态变化研究[J]. 玉米科学, 2025, 33(2): 38-49.
MA H Z, TIAN Y, WU Y, et al. Study on the dynamic changes of matter production, distribution and water content in ears of spring and summer-sown maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2025, 33(2): 38-49. (in Chinese)
- [27] 梁文化, 陈涛, 姚姝, 等. 基于高密度遗传图谱定位水稻子粒长宽比 QTL[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 47-52.
LIANG W H, CHEN T, YAO S, et al. QTL mapping for grain length-width ratio based on a high-density genetic map in rice[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(23): 47-52. (in Chinese)
- [28] 沈臻臻. 大麦(青稞)子粒性状全基因组关联分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [29] 牛远, 徐宇, 李广军, 等. 大豆子粒大小和粒形的驯化研究[J]. 大豆科学, 2011, 31(4): 522-528.
NIU Y, XU Y, LI G J, et al. Domestication of seed size and shape traits in soybean[J]. Soybean Science, 2011, 31(4): 522-528. (in Chinese)

(责任编辑: 朴红梅)