

基于不同玉米生态区主推品种探讨 宜粒收关键种质构建方向

付修义,张华生,赵久然,陈传永,陈琛,吴珊珊,张雪原,张春原,王元东

(北京市农林科学院玉米研究所,北京 100097)

摘要: 选育宜机械粒收玉米新品种是节约劳动成本、提高经济效益的重要途径。根据生产中不同生态区对宜机械粒收玉米品种改良需求,分析影响玉米机械粒收的主要特性指标,确立宜粒收玉米育种目标。本文基于不同生态区光热条件、主推品种、广泛应用种质及杂种优势模式,探讨适宜不同玉米生态区的宜机械粒收关键种质的构建方向以及杂优模式利用与品种选育策略。同时对宜机械粒收种质特性改良与机收品种选育进行实践,为我国宜机械粒收玉米种源创新与新品种选育提供参考。

关键词: 玉米;宜机械粒收;种质;新品种选育

中图分类号: S513.032

文献标识码: A

Discussion of Key Germplasm Construction Suitable for Mechanical Harvesting Based on the Main Varieties in Different Maize Ecoregions

FU Xiu-yi, ZHANG Hua-sheng, ZHAO Jiu-ran, CHEN Chuan-yong, CHEN Chen, WU Shan-shan, ZHANG Xue-yuan, ZHANG Chun-yuan, WANG Yuan-dong

(Maize Research Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Breeding new varieties of maize suitable for mechanical grain harvesting is a crucial approach to decrease the cost and enhance economic performance. Considering the actual requirements for mechanical-harvested maize in production to analysis of the main characteristics that affect mechanical harvesting and then establishing the mechanical-harvested breeding goals. Under the climatic conditions, mainly spreading varieties, germplasm and patterns of heterosis in different ecoregions, discussing the construction of the key germplasm suitable for mechanical harvesting and, meanwhile, setting the strategies that the utilization of the heterosis patterns and new varieties breeding. Moreover, the practices of improving the mechanically-harvested germplasms and breeding new varieties would provide very useful information in the processes of realizing maize grain mechanical harvesting.

Key words: Maize; Mechanical harvesting; Germplasm; New varieties breeding

玉米用途广泛,发展迅速,是重要的饲料作物,也是重要的能源作物和工业原料。近年来,随着玉米种质资源基础、育种方法与技术和生产水平的提高,玉米的播种面积和产量也节节攀升。2021年我

国玉米播种面积达到 $43.32 \times 10^6 \text{ hm}^2$,产量为 $27.25 \times 10^7 \text{ t}$,均位于三大主粮作物之首。随着大规模的土地集中和从事农业生产人员的减少和老龄化,必然要求玉米产业发展由传统人工操作模式向全程机械化模式转变,其中机械化收获是重要组成部分。

回顾我国玉米育种历程,受传统的生产方式所限,我国早期玉米品种更加偏向稀植、大穗和晚熟,由此造成早期种质表现出茎秆粗壮、株型平展、生育期偏晚且脱水速度慢等问题。机械化设备不断应用到农业生产当中,特别是玉米机械化收获的需求对我国品种发展方向和种质资源转型提出了新的要求^[1]。宜机械粒收玉米品种的选育是从生物源头提升品种自身适宜机械化收获的特性,从而降低对机

录用日期: 2023-03-14

基金项目: 北京市农林科学院青年科研基金(QNJJ202102)、北京市农林科学院杰出科学家培育专项(JKZX202202)、河南省农业良种联合攻关项目(20220102)、财政部和农业农村部“国家现代农业产业技术体系”(CARS-02-11)

作者简介: 付修义,山东德州人,助理研究员,博士,主要从事玉米种质资源创新、利用与新品种选育。

E-mail: fuxiuyicau@163.com

王元东为本文通信作者。E-mail: wyuandong@126.com

械化设备的要求和生产成本,提高玉米的经济效益。宜机械粒收玉米的推广应用在提高农业生产效益的同时,可以提高种粮积极性,是确保粮食安全生产的主要措施之一。如何在坚持高产、优质、多抗、广适等传统育种目标的基础上,构建玉米宜机械粒收关键种质,选育出适宜机械化生产要求的品种是种源创新的基础,也是提升玉米品种宜机械粒收特性的重要课题。本文以不同玉米生态区的自然气候条件、影响机械粒收的特性指标以及不同玉米生态区的主推品种为背景,分析探讨适宜不同生态区的关键种质构建方向以及杂优模式利用与品种选育策略并进行实践,为育种家构建适宜不同生态区的宜机械粒收种质提供可鉴经验。

1 宜机械粒收玉米品种选育的必要性

欧美等发达国家在20世纪五六十年代就开展了玉米子粒脱水相关研究并应用于种质改良,于70年代中后期实现了玉米子粒收获的机械化。这一点从早期美国先锋、美国孟山都和德国KWS等公司引入我国的品种中表现尤为明显,外引种质在子粒脱水速率、耐密性、成熟后站秆性、高产、早熟等方面均较国内本土种质表现出一定的优势。20世纪90年代,我国初步尝试玉米的机械化收获,但是受玉米品种、设备和规模的限制,推广较慢^[1]。目前,我国玉米收获方式存在人工收获、机械穗收和机械粒收3种方式,其中机械穗收主要集中在黄淮海、京津冀和东北地区;机械粒收主要分布在新疆维吾尔自治区、黑龙江第三积温带至第五积温带和内蒙古自治区东北部玉米产区^[2]。自2017年国家玉米机收品种审定标准出台以来,截至目前已审定包括迪卡517、京农科728、泽玉8911等在内的78个机收品种。但现有品种在实现全程机械化粒收方面仍较为薄弱,构建用于选育宜机械粒收品种的关键种质,是扩充宜机械粒收品种数量与质量的有力保证,势在必行。

2 宜机械粒收玉米品种主要特性指标及育种目标

宜机械粒收玉米品种的重要特性指标是品种选育的依据与方向。为满足适宜机械化收获的特性,宜机械粒收玉米品种特性主要反映在收获时子粒含水量低、抗倒伏能力强、耐密植以及抗病性强等。

2.1 收获时子粒含水量低

收获时子粒含水量低是宜机械粒收玉米品种的核心指标。国家玉米机收品种审定标准规定,针对不同玉米生产区,适收期子粒含水量应在23%~

30%。子粒含水量直接影响子粒破损率、破碎率及后期贮存特性等,其主要受生育期和子粒脱水速率的影响。

子粒脱水速率是影响收获时子粒含水量的重要因素,子粒的脱水分为生理成熟前脱水和生理成熟后脱水。生理成熟前的脱水是生理发育性脱水,与子粒灌浆并行,受品种本身特征特性影响较大,包括成熟度、子粒种皮厚度、成分、粒型、穗轴粗细、苞叶长短、层数、厚度、松散度和穗位等,即生理成熟前脱水与基因型相关。研究表明,子粒脱水速率性状广义遗传力可达50%,狭义遗传力也在30%以上,且两者比值较大,由此说明,控制脱水速率相关基因作用方式以加性作用为主,存在部分显性作用^[4],适宜早代选择且后代选择有效。生理成熟后是自然物理性脱水,多受环境因素影响较大,如温度、湿度、日辐射以及风速等^[5,6],也受成熟后苞叶松散程度、果穗是否倒挂、子粒种皮厚度、种植密度等影响。

早熟性是影响收获时子粒含水量的另一个重要因素,玉米品种熟期适当提早,可以延长玉米站秆脱水时间,从而降低收获时子粒含水量。在东北和西北春玉米区,玉米成熟后期气温降低,11月份后基本没有水分损失,晚熟生育期长的品种收获前基本没有脱水的时间。早熟品种由于子粒生理成熟期早,光热资源相对丰富,脱水速度更快。在黄淮海北部夏玉米区域,两熟制条件下热量资源相对不足,品种早熟性对子粒脱水更为重要。

2.2 抗倒伏倒折

玉米品种前期倒伏倒折,对玉米产量影响是显而易见的,大量倒伏倒折将导致严重减产,甚至是绝产。与普通玉米品种相比,宜机械粒收玉米品种对适收期站秆性要求更高,后期倒伏、倒折会严重影响作业效率,增加作业成本,同时大幅增加落穗和落粒的比率,造成收获损失。研究表明,倒伏每增加1%,落穗损失增加0.15%^[7]。

2.3 耐密植

早期追求单株大穗产量的育种理念,使得我国耐密种质缺乏且基础水平偏低。随着育种理念的转变以及国外种质的引入,选育适用于机械化收获的耐密型品种,依靠群体产量实现增产是目前的发展方向。经过近年来不断地发展,稀植品种多分布于沿海和山区,中密度(57 000~67 500株/hm²)品种种植面积不断扩大。因此,这就要求在育种过程中采取高密度育种对种质的耐密性进行筛选,一般耐密型种质具有茎秆坚细、抗倒伏、株型紧凑、抗逆性强、不空秆或空秆率低、果穗不秃尖或秃尖较小等特

点。未来在土地规模化种植的宜机械粒收品种必然是耐密植品种,才能实现高产高效。耐密品种耐逆性强,一般边行优势较弱,容易集约化管理。增加种植密度可以弥补熟期大幅提前带来的单株产量损失,实现宜机械粒收玉米品种高产稳产,因此耐密性是宜粒收玉米品种的另一重要指标。

2.4 抗病

相比于普通玉米,宜机械粒收玉米除需具备对一般病虫害的抗性外,更需具备对可能导致植株后期倒伏的病虫害抗性。抗玉米茎腐病和玉米螟的要求,最终是为了防止适收期的玉米发生倒伏,提高机械作业效率和降低产量损失。因此在构建选育宜机械粒收品种的关键种质时,更加注重引入抗玉米茎腐病和玉米螟的抗原种质。此外,还应加强穗腐病的抗性,穗腐病直接影响玉米品质,在玉米收获后期阴雨天气较多的生态区要求更高。

宜机械粒收玉米品种除上述重要特性指标外,在高产、优质、广适和易制种方面与普通玉米一样也是育种重要目标。因此宜机械粒收品种选育在种质资源创制、选择技术和组合鉴定筛选方面有更高的要求,实施难度增大,需要投入更多精力。

3 宜机械粒收玉米关键种质构建与杂优模式利用策略

我国宜机械粒收品种选育起步晚,种质基础缺乏。目前生产上大面积推广应用的品种,收获时子粒水分含量高,通常在30%~40%^[8]。因此创制宜机械粒收玉米关键种质和杂优模式、选育宜机械粒收新品种是突破玉米全程机械化生产的关键。为快速缩小与国外机械粒收品种的差距,迫切需要高质量构建宜机械粒收关键种质。种质构建需要坚持3个原则:一是高起点,即直接改良利用国外先进机械粒收种质,充分发挥外源种质优良脱水特性和丰产性,同时融合国内适应性强的本土种质;二是注重发掘现有本土化黄旅种群种质资源潜力,加强机收特性改良;三是根据不同生态区特点,结合当地主推品种,构建适宜各自区域的机械粒收关键种质,确定相应的杂优模式。

3.1 春播中早熟至极早熟区

该区域积温2 100~2 500℃·d,主要分布在我国黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古等地。推广的品种主要有德美亚1号、德美亚3号、利合228、先玉1219、A6518、C1563、益农玉7号、益农玉14号、东农257、东农264、金博士813、中玉990、金庆707、和育187和龙单83等,国外品种优势强,推广面积较大。分

析上述主推品种遗传基础,其主要种质有欧硬群、早熟Iodent群、早熟瑞德群BSSS、早熟兰卡群、本土化种质K10等;其主要杂优模式有早熟Iodent群/欧硬、早熟瑞德群BSSS/早熟兰卡群、早熟瑞德群BSSS/早熟Iodent群、早熟Iodent群/早熟兰卡群、K10/早熟兰卡群、K10/国外杂交种选系。

该区域应充分利用丰富的先进外源种质,继续提升原有主要杂优群,继续在早熟耐密抗倒和品质上持续改良,优化原有杂种优势模式。创制新的杂种优势群和杂种优势模式,如创制融合早熟欧硬与早熟瑞德BSSS的新种质,新种质与早熟Iodent群组配,创制出新的杂优模式。利用早熟Iodent种质融合本土化种质K10等适应性强的早熟种质,创制新的本土化杂种优势模式。

3.2 春播中熟区

该区域积温2 500~2 700℃·d,主要分布在我国黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、新疆等地。推广的品种主要有先玉335以及与先玉335杂种优势模式类似的品种,如迪卡159、天育108、MC703、MC278、翔玉998、天农九、瑞普909等。分析上述主推品种遗传基础,其主要种质有BSSS、NSSS、Iodent,主要杂优模式为BSSS/NSSS、BSSS/Iodent。

该区域所处的纬度与美国玉米带、乌克兰玉米带纬度相同,是世界三大玉米带,因此主要杂种优势群和杂种优势模式基本一致。该区域应充分利用丰富的先进外源种质,继续提升原有主要杂优群,利用循环育种策略不断提升原有杂种优势群早熟性、子粒脱水速率、耐密和抗逆性,优化原有杂种优势模式。

3.3 春播中晚熟至晚熟区

该区域积温在2 700℃·d以上,主要分布在我国辽宁、吉林、内蒙古、河北、山西、陕西、宁夏、甘肃、新疆等地。主要推广品种有京科968、良玉99、东单1331、先玉1225、KWS2564等。分析上述主推品种遗传基础,其主要种质有X系、黄旅系、P群、BSSS、NSSS,主要杂优模式为X系/黄旅群、X群/P群、BSSS/NSSS。

由于该生态区的积温高,有的区域积温超过3 000℃·d,同时种植生态环境趋向恶劣,干旱涝渍时有发生,病虫害严重,因此该地区应十分注重种质的适应性。继续挖掘提升X系、黄旅种群种质和P种群质利用潜力,X系在保持丰产性基础上提高耐密抗倒能力,黄旅群和P种群质在抗病性基础上提高早熟性、抗倒、子粒脱水速度快等性状。利用循环育种策略继续改良BSSS和NSSS早熟性、子粒脱水速

率、耐密和抗逆性。

3.4 京津冀夏播早熟区

该区域包括北京、天津以及河北廊坊、唐山、秦皇岛、沧州、保定等部分区域。主要推广品种京农科 728、京农科 828、MC812、MC220、纪元 1 号等。分析上述主推品种遗传基础,其主要种质为 X 系和黄改系,主要杂优模式为 X 系/黄改群。该区域麦玉一年两熟制,光热资源矛盾突出,因此该地区应十分注重种质的早熟性,继续提升 X 系早熟性,提高黄改群种质的子粒脱水速率。

3.5 黄淮海北部夏播区

该区域泛指黄河以北夏玉米种植区域,是麦玉一年两熟制。主要推广品种有郑单 958、伟科 702、农大 372、登海 605、京农科 728 等。分析上述主推品种遗传基础,其主要种质有 X 系、黄改系、改良瑞德,主要杂优模式为 X 系/黄改群、X 系/改良瑞德、改良瑞德/黄改系。该区域麦玉一年两熟制,光热资源矛盾也很突出,因此应十分注重种质的早熟性,继续提升 X 系早熟性,提高黄改群种质脱水速率和成熟后期站秆能力等性状。改良瑞德种质在保持较好的抗倒性状同时,注重提升早熟、耐密和脱水速率快的特性。

3.6 黄淮海南部夏播区

该区域泛指黄河以南夏玉米种植区域。主要推广品种有郑单 958、伟科 702、农大 372、登海 605、裕丰 303、秋乐 368、迪卡 653 等。分析上述主推品种遗传基础,其主要种质有 X 系、黄改系、改良瑞德、BSSS、NSSS,主要杂优模式为 X 系/黄改群、X 系/改良瑞德、改良瑞德/黄改系、BSSS/NSSS。该区域麦玉一年两熟制,光热资源相对较好,但是该地区后期高温多雨,因此,应十分注重种质的成熟后期站秆能力和抗锈、抗茎腐、抗穗腐等抗性。继续提升黄改群种质脱水速率和成熟后期站秆能力等性状,改良瑞德种质在保持较好的抗倒性状同时,注重提升早熟、耐密和脱水速率快的特性。

4 宜机械粒收玉米种质选育策略

中国玉米机收的主要问题除了早熟、耐密和抗倒外,更重要的是种质脱水速率的局限。玉米子粒机收的安全含水率为 18%~23%,欧美等国家玉米收获期甚至降至 15%,正在朝机械粒收后即贮存的方向发展^[9-11]。我国玉米成熟期含水率普遍在 30%以上,较高的子粒含水量是限制机械粒收的关键因素。需要快速高效的创制出所需机收种质是选育优良机收品种的关键。常规育种方法多通过熟期的选

择来筛选成熟期子粒含水量较低的材料,但想快速实现对子粒脱水性能的改良较为困难。随着分子育种的发展,针对玉米子粒脱水速率这一性状开展了大量研究,定位了大量的玉米子粒脱水速率的相关 QTL,但一致性较差,且未见直接用于种质改良的报道。在控制子粒脱水速率性状相关主效基因未明确的情况下,还无法直接利用分子手段实现玉米种质子粒脱水性能改良的目的^[12-14]。技术手段是加强玉米种质脱水速率的另一重要途径,子粒脱水性能的遗传力高,后代选择有效,因此,在育种早代群体中筛选脱水速率性能较高的材料,可达到改良子粒脱水速率的目的。常规的水分含量测定方法中,烘干法具有破坏性,近红外测水精度低且无法对分离的单子粒水分含量进行测定。中国农业大学课题组开发了利用低场核磁共振对玉米单子粒水分含量的测定方法,可实现快速、准确、无损水分检测^[15-16]。利用该技术对早代育种群体的性状分离子粒含水量进行检测,分别向高含水和低含水两个方向进行选择,分别获得了具备高脱水速率和低脱水速率的种质,验证了该方法的可行性。水分双向选择技术同时结合单倍体育种技术,实现了玉米种质脱水性能快速定向的改良,为宜机械粒收品种的选育提供了有效手段。

5 种质机收特性改良与机收品种选育实践

5.1 新 X 系种质脱水速率提升组配效果

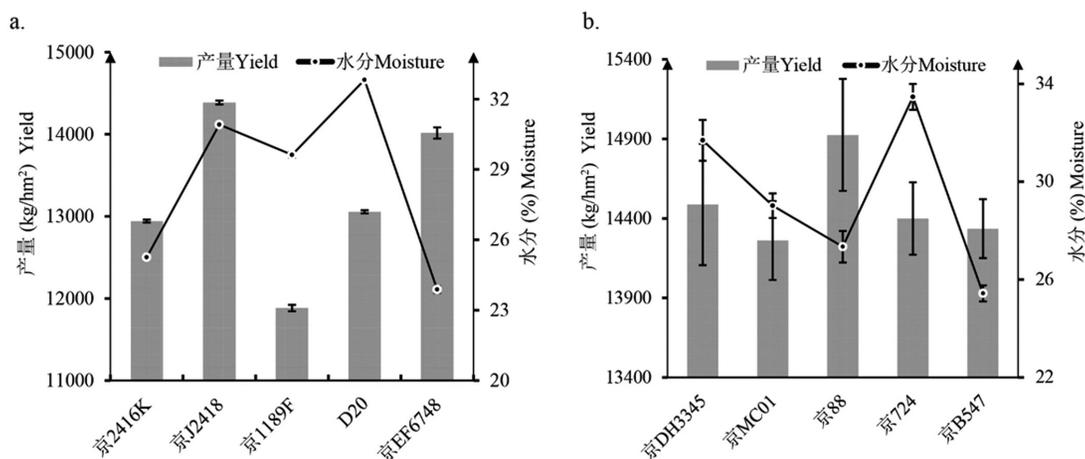
2019-2021 年,利用京 DH3345、京 MC01、京 88、京 724、京 B547 等第一代 X 群骨干自交系相互杂交,进行聚合改良,选育新的 X 系。以京 2416K、京 J2418、京 1189F、D20 和京 EF6748 为测验种,对聚合改良新 X 系进行测配。结果表明,新 X 系与黄瑞选系京 J2418 和孟山都选系京 EF6748 配合力突出,其中与孟山都选系京 EF6748 组配的组合产量高,子粒水分含量低(图 1);以京 88 为背景的聚合改良新 X 系产量最高,含水量较低,具有培育机收品种的利用潜力。

5.2 宜机收黄欧群种质的创新构建

利用本土黄改群种质与早熟欧洲硬粒型种质杂交,控制欧洲硬粒型种质的导入比例,最终获得黄欧群种质。与传统的黄改群相比,黄欧群种质在宜机械粒收及相关农艺性状得到明显的改善。首先黄欧系茎秆、穗粗和轴粗变细、变硬,抗倒伏(折)能力增强,特别是在后期站秆性方面表现出明显的优势;其次,在宜机械粒收核心性状子粒含水率方面,黄欧系

相较于传统的黄改系,熟期明显提前,具有早熟性,收获期子粒含水率降低,完全符合宜机械粒收种质的

的要求,创新了宜机械粒收性状与本土适应性的聚合,为选育广适型宜机械粒收品种奠定了基础^[17]。



注:a为新X系种质与不同测验种测配,杂交种产量和子粒水分含量平均表现;b为不同X系种质背景测交种的产量和子粒水分含量平均表现。图中所示数据均为平均值±标准误。

Note: a, yield and kernel moisture content of the hybrid from the improved X lines and different testers; b, yield and kernel moisture content of the hybrid with different X lines background. Data are shown as mean±SE.

图1 新X系种质测配产量和子粒含水量表现

Fig.1 Yield and kernel moisture content of the hybrid from the improved X lines

5.3 机收品种京农科728选育与应用

京农科728是首批通过京津冀和黄淮海夏玉米区子粒机收国审品种。2015–2016年国家黄淮海夏玉米机收组区域试验,比对照郑单958增产9.9%;2016年生产试验,比对照增产8.5%。熟期比郑单958提早4~7d,收获时子粒含水量低6%~8%,比先玉335提早2~4d,子粒含水量降低2%~4%,产量增产3%。京农科728产量较高,熟期适宜,适收期子粒含水量低,达到了宜机械粒收玉米品种的要求^[18]。

实现玉米全程机械化收获,是提升玉米产业经济效益、实现粮食增产增收的重要途径,也是未来玉米育种的重要发展方向。宜机械粒收玉米品种的选育是从生物源头解决机收难题,从而降低对田间管理、机械设备和后期贮存等环节的作业难度。构建玉米宜机械粒收关键种质,是选育宜机械粒收玉米品种的有效途径,同时也是对我国种质资源的补充,从而做到真正从种源角度,解决玉米机械化收获的“卡脖子”难题。

参考文献:

- 王振华,鲁晓民,张新,等.我国玉米全程机械化育种目标浅析[J].河南农业科学,2011,40(11):1-3,21.
WANG Z H, LU X M, ZHANG X, et al. Analysis of maize breeding objective from full mechanization in China[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(11): 1-3, 21. (in Chinese)
- 李少昆,谢瑞芝,王克如,等.专题导读:加强子粒脱水与植株倒

伏特性研究,推动玉米机械粒收技术应用[J].作物学报,2018,44(12):1743-1746.

- LI S K, XIE R Z, WANG K R, et al. Editorial: Strengthening the research of grain dehydration and lodging characteristics to promote the application of maize mechanical grain harvest technology[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1743-1746. (in Chinese)
- 王成雨,舒志泽,程备久,等.中国玉米机械化收获发展现状及展望[J].安徽农业大学学报,2018,46(3):551-555.
WANG C Y, SHU Z Z, CHENG B J, et al. Advance and perspectives in maize mechanized harvesting in China[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 46(3): 551-555. (in Chinese)
- 杨村,邹庆道,田云,等.玉米子粒水分含量的遗传研究[J].杂粮作物,1998,18(2):11-14.
YANG C, ZOU Q D, TIAN Y, et al. The genetic study of maize kernel moisture content[J]. Horticulture & Seed, 1998, 18(2): 11-14. (in Chinese)
- ROBERT M, MANJIT K, ZHANG Y. Genotype by environment interaction for ear moisture loss rate in corn[J]. Crop Science, 1997, 37(3): 774-779.
- 姜艳喜,王振华,金益,等.玉米收获期子粒含水量相关性状的遗传及育种策略[J].玉米科学,2004,12(1):21-25.
JIANG Y X, WANG Z H, JIN Y, et al. Genetics on water content at harvesting and correlative traits and breeding strategy[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(1): 21-25. (in Chinese)
- 李少昆.我国玉米机械粒收质量影响因素及粒收技术的发展方向[J].石河子大学学报(自然科学版),2017,35(3):265-272.
LI S K. Factors affecting the quality of maize grain mechanical harvest and the development trend of grain harvest technology[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2017, 35(3): 265-272. (in Chinese)

- [8] 王克如,李少昆.玉米子粒脱水速率影响因素分析[J].中国农业科学,2017,50(11):2027-2035.
WANG K R, LI S K. Analysis of influencing factors on kernel dehydration rate of maize hybrids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (11): 2027-2035. (in Chinese)
- [9] MOFAZZAL H C, WESLEY F B. The nature of corn kernel damage inflicted in the shelling crescent of grain combines[J]. *International Journal for Engineering Modelling*, 1978, 21(4): 610-614.
- [10] HADI G, KASA S, RACZ F. Changes in the water content of maize varieties after physiological maturity[J]. *Acta Agronomica Hungarica*, 2009, 57(1): 41-46.
- [11] FUCHS C, KASTEN J, URBANEK M. Trends and potential of the market for combine harvesters in Germany[J]. *Machines*, 2015, 3 (4): 364-378.
- [12] CAPELLE V, REMOUÉ C, MOREAU L, et al. QTLs and candidate genes for desiccation and abscisic acid content in maize kernels[J]. *BMC Plant Biology*, 2010, 10(1): 1-22.
- [13] 刘显君,王振华,王霞,等.玉米子粒生理成熟后自然脱水速率QTL的初步定位[J].作物学报,2010,36(1):47-52.
LIU X J, WANG Z H, WANG X, et al. Primary mapping of QTL for dehydration rate of maize kernel after physiological maturing[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(1): 47-52. (in Chinese)
- [14] CUI Z, LUO J, QI C, et al. Genome-wide association study(GWAS) reveals the genetic architecture of four husk traits in maize[J]. *Bmc Genomics*, 2016, 17(1): 1-14.
- [15] 张 垚,陈 琛,陈 明,等.基于低场核磁共振技术的玉米单子粒含水率测定方法研究[J].玉米科学,2018,26(03):89-94.
ZHANG Y, CHEN C, CHEN M, et al. Single kernel moisture content evaluation based on low field nuclear magnetic resonance in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(3): 89-94. (in Chinese)
- [16] 陈 明,李金龙,李 伟,等.利用低场核磁共振进行活体玉米子粒水分动态测试与成像[J].农业工程学报,2020,36(23):285-292.
CHEN M, LI J L, LI W, et al. Dynamic testing and imaging of living maize kernel moisture using low-field nuclear magnetic resonance(LF-NMR)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(23): 285-292. (in Chinese)
- [17] 王元东,赵久然,张华生,等.“黄欧”系列玉米自交系宜机械粒收特征特性研究[J].植物遗传资源学报,2019,20(6):1554-1565.
WANG Y D, ZHAO J R, ZHANG H S, et al. Characteristics of the "Huanglv-European Lines" maize inbred lines for mechanical grain harvesting[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20 (6): 1554-1565. (in Chinese)
- [18] 段民孝,赵久然,李云伏,等.高产早熟耐密抗倒伏宜机收玉米新品种‘京农科728’的选育与配套技术研究[J].农学学报,2015,5(2):10-14.
DUAN M X, ZHAO J R, LI Y F, et al. Study on the breeding and supporting technology of new maize variety 'Jingnongke728'[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(2): 10-14. (in Chinese)

(责任编辑:栾天宇)