

# 玉米机械粒收破碎率研究进展

王克如, 李少昆

(中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 机械粒收是玉米收获技术发展的方向, 是玉米实现全程机械化、转变生产方式的关键。当前, 籽粒收获过程中破碎率高的问题不仅降低玉米等级和销售价格, 而且导致收获产量下降, 并增大烘干成本、增加安全贮藏的难度, 是推广机械粒收技术面临的重要问题。玉米不同基因型间籽粒破碎率存在显著差异, 抗破碎特性是可遗传的性状, 可通过育种培育抗破碎率的品种; 不同收获机械和作业参数对籽粒破碎率有显著影响, 选择轴流式收获机, 并根据玉米生长、成熟和籽粒含水率状况及时检查与调试收获机参数是保证低破碎率的有效措施; 生态环境因素对破碎率也有显著的影响, 籽粒形成、自然干燥和收获期的光照、温度、湿度等因素均会影响到籽粒硬度、容重、含水率和质地等与籽粒破碎相关的特性; 种植密度、水肥管理、收获时期等栽培管理措施对籽粒破碎率也会产生明显的影响。因此, 针对不同区域生态环境条件, 应选择适宜生育期内能与当地光温资源匹配的品种以及确定品种适宜的种植区域。合理种植密度、优化氮肥管理和适量灌溉有利于降低破碎率, 而选择在最佳收获期收获是降低籽粒破碎率的最有效措施。

**关键词:** 玉米; 机械收获; 籽粒; 破碎率; 影响因素; 籽粒含水率

## Progresses in Research on Grain Broken Rate by Mechanical Grain Harvesting

WANG KeRu, LI ShaoKun

(*Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081*)

**Abstract:** Mechanical grain harvesting is the developing direction of maize harvesting technology. It is the key technology to realize entire mechanization of maize production and change the mode of production. At present, the high kernel broken rate of maize harvesting not only lowers the grade of corn but also reduce corn sales price. Moreover, it leads to the decline of maize yield and increases the cost of grain artificial drying, and increases the difficulty of safe storage of maize. Therefore, high broken rate is the major problem that we are facing to popularize grain mechanical harvesting techniques. Kernel broken rates of different genotypes of maize differ significantly. As the resistance to kernel broken is a heritable trait, the anti-breaking maize varieties can be bred. Because of the significant influence that harvest machines and operational parameters have on kernel broken rates, it is also an effective measure to ensure low broken rate by choosing rotary (axial-flow) combines and adjusting its parameters according to the plants growth condition, maturity and moisture content of maize kernel. In addition, ecological environment also has significant influences on broken rates of grain. The factors of sunshine times, atmospheric temperature, relative humidity, and so on in the process of grain filling, natural drying, and harvesting period will affect the characters associated with kernel broken such as grain hardness, test weight and kernel moisture content. Hence, according to ecological conditions in different regions, it is necessary to choose maize varieties which can match the local light and temperature conditions in the suitable growth period of maize, and to determine the suitable planting area for those maize varieties. Cultivation managing measures such as planting density, management of irrigation

收稿日期: 2017-02-07; 接受日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金 (31371575)、中国农业科学院农业科技创新工程、国家玉米产业技术体系项目 (CARS-02-25)

联系方式: 王克如, Tel: 010-82108595; E-mail: wkeru01@163.com. 通信作者李少昆, Tel: 010-82108891; E-mail: lishaokun@caas.cn

and fertilizers, harvesting time have obvious influences on kernel broken rates. Reasonable planting density, optimized nitrogen fertilizers management and moderate irrigation make for the reduction of broken kernels, and the most effective measure to reduce the kernel broken rate is harvesting at optimum harvest period.

**Key words:** maize; mechanical harvesting; grain broken rate; effect factors; grain moisture content

玉米是中国第一大粮食作物, 2015 年种植面积超过 3800 万公顷, 总产超过 2.18 亿吨。随着社会经济的快速发展和城镇化的快速推进, 农业劳动力已无法满足传统玉米生产方式的需求, 全程机械化是玉米生产发展的必然之路。当前, 玉米生产全程机械化的瓶颈在机械收获, 而机械粒收是玉米机械收获技术发展的方向<sup>[1]</sup>。作者团队自 2010 年起开展玉米籽粒收获技术的研究与推广, 至 2016 年共获得 2 450 组田间机械籽粒收获测试样本, 结果显示籽粒破碎率平均达到 8.56%, 变幅为 0.13%—51.82%, 远高于国外 $\leq 5\%$  的标准<sup>[2]</sup>。破碎率高不仅降低玉米等级和销售价格, 导致收获产量下降, 也增大烘干成本、增加安全贮藏的难度。这些调研表明籽粒破碎率已经成为中国玉米机械粒收技术推广的重要限制因素。为进一步提高中国玉米籽粒收获机械化程度, 降低收获成本, 提高机械粒收的比较效益, 明确籽粒破损率的研究方向, 本文对国内外有关籽粒收获破碎率方面的研究进展进行了综述。

## 1 籽粒破碎率的定义

籽粒破碎是由于机械损伤籽粒后产生的结果。STEELE 等<sup>[3]</sup>给籽粒机械损伤 (mechanical damage) 定义为机械收获的籽粒出现任何破裂 (rupture) 或种皮破损均为机械损伤。同时他还强调机械损伤与官方定义的 BS (breakage susceptibility, 即 BS) 标准有所不同。美国一般采用破碎敏感度 BS 表示籽粒受机械损伤及产生破碎的程度。1983 年美国谷物化学家协会对玉米籽粒 BS 的定义是在机械搬运过程中, 籽粒遭受到冲击力产生损伤或破裂的可能性 (the potential for kernel fragmentation or breakage of a load or batch of corn subjected to impact force when transported mechanically)。测定方法一般采用特定仪器 (如 Wisconsin breakage tester 和 Stein breakage tester) 模拟籽粒脱粒时遭受的冲击力, 通过对一定量籽粒样品施加外力、作用一定时间后, 将处理过的样品过 12/64 英寸 (4.76 mm) 圆孔筛, 根据过筛后的物品重量占样品总重的百分比来表征 BS<sup>[4]</sup>。WELLER 等<sup>[5]</sup>对玉米籽粒在外力作用下的应力损伤值和两种籽

粒破碎仪 (wisconsin breakage tester, WBT 和 stein breakage tester, SBT) 测定的 BS 值研究表明, 应力损伤值和 WBT、SBT 测试的 BS 值之间的相关  $R$  值分别为 0.72 和 0.47 (192 个样本); WBT 和 SBT 两者之间测试结果相关系数是 0.64。SBT 测试值相关性较低与其受收获时籽粒水分含量影响较大有关。可见玉米籽粒抗破碎性可用其在受到外力冲击作用时产生的破碎程度即籽粒破碎敏感度 (BS) 来表示。

## 2 籽粒破碎率高曾是国外玉米机械收获技术发展的重要制约因素

玉米机械粒收技术于 20 世纪 50 年代在北美率先开始应用<sup>[6]</sup>。美国在推广机械脱粒技术初期, 因脱粒时籽粒含水率较为合适, 一般在 20% 以下, 机械损伤问题并不突出。随着机械收获方式及相配套的烘干存储方式转变和高含水率籽粒脱粒、高温干燥、高速处理设备的应用, 收获玉米的籽粒含水率范围扩大, 20%—35% 的玉米也能收获, 收获高含水率玉米时, 籽粒机械损伤过大、玉米籽粒破碎率增加等问题日益凸显出来<sup>[7-8]</sup>。DUTTA<sup>[4]</sup>认为, 籽粒含水率超过 20% 时收获机械损伤率急剧增加, 美国玉米由机械穗收向粒收方式转变过程中存在籽粒含水率过高收获导致机械损伤大的问题。尤其在美国北部, 籽粒破碎问题更受关注, 因为这些地区收获时籽粒含水率通常达到 25% 以上, 收获后要快速干燥至安全含水率, 而快速干燥意味着使用高温干燥, 高温干燥使籽粒破碎敏感度 (breakage susceptibility, BS) 进一步增大。WAELTI 等<sup>[8]</sup>观测到, 在相同籽粒含水率条件下存放, 机械脱粒玉米因存在机械损伤 (29% 的机械损伤率), 其霉变速度比手工脱粒玉米快 2—3 倍, 而且带有破碎玉米的烘干费用是无破碎玉米的 6—7 倍。HILL 等<sup>[9]</sup>调查发现, 将等级为 2 级标准的玉米从美国中西部运输至港口, 破碎率超过了 4 级玉米的标准。因籽粒破碎严重, 美国玉米在出口贸易时曾经等级下降, 农民遭受巨大损失。这些质量问题严重威胁到美国玉米在国际市场的地位<sup>[7,10]</sup>。为此, 美国及相关玉米生产技术先

进国家围绕玉米籽粒破碎问题开展了大量研究,并逐步使这一问题得到了解决。

### 3 影响籽粒破碎率的主要因素

造成玉米籽粒破碎率高的原因很多,主要包括品种、机械、栽培措施和生态气候因素等。

#### 3.1 品种因素

SEHGAL 等<sup>[1]</sup>研究玉米脱粒机制时发现,籽粒与穗轴联结较紧密的品种在脱粒时籽粒破碎较高,品种与籽粒含水率均显著影响脱粒时机械损伤程度。李川等<sup>[12]</sup>、易克传等<sup>[13]</sup>研究结果也显示品种及籽粒含水率显著影响籽粒破碎率。WAELTI<sup>[7]</sup>发现,在相同含水率条件下机械收获,杂交种 PioneerX 的破碎率显著高于 Pioneer 3418;不同品种籽粒破碎对滚筒转速变化的响应存在差异,在籽粒含水率为 22% 时, PioneerX 比 Pioneer3418 反应更敏感,分析这一差异可能与两品种籽粒内部结构不同有关。此后大量研究证实,不同基因型间玉米籽粒破碎敏感度(BS)不同,根据 BS 值可将玉米品种的破碎表现划分为感、抗和中间型等不同类型,籽粒的感或抗破碎性有较高的遗传力<sup>[14-16]</sup>。JOHNSON 等<sup>[17]</sup>对 80 个自交系和来自于这些自交系组配的 40 个杂交种研究发现,自交系和杂交种间籽粒抗破碎性存在显著差异,对这些材料抗破碎性的遗传力估计为 77%—87%;基因型和环境的互作效应显著,其中基因型的贡献在 25%—58%;抗破碎材料通常籽粒较小且胚乳坚硬。

DUARTE 等<sup>[18]</sup>对巴西 10 个品种在 4 种氮肥处理(0—180 kg N·hm<sup>-2</sup>)下的测试结果表明,籽粒硬度和 BS 受基因型和氮肥用量影响,其中基因型影响更大。VYN 等<sup>[19]</sup>在加拿大的安大略省研究了 5 个杂交种在 2 种密度(5.5 株/m<sup>2</sup> 和 7 株/m<sup>2</sup>)、不同籽粒含水率(30% 和 24%)下收获及在不同温度(20, 40, 80, 100℃)下干燥后籽粒的破碎率,结果表明不同品种 BS 有差异,一些可遗传的品种籽粒性状与破碎率有关,如籽粒大小(小粒比大粒品种更抗破碎)、籽粒形态(圆形籽粒破碎率较高,而扁平籽粒较低)、粒重(粒重与 BS 呈负相关关系,粒重越大,BS 越小)、籽粒体积密度(密度越大的籽粒破碎率越低)。KNIEP 等<sup>[20]</sup>选用 2 个 Opaque-2 玉米品种和 2 个普通品种测试表明,Opaque-2 品种籽粒密度较正常品种低 5%,其破碎率是普通品种的 2.4 倍,认为这种差异与两类品种籽粒成份及结构不同有关。PLETT<sup>[21]</sup>对加拿大 6 个玉米品种研究表明,品种间籽粒破碎率存在差异,籽粒

含水率在 15.1%—22.1% 间破碎率最低;破碎率与播种至吐丝期的天数、籽粒含水率呈极显著正相关,与容重呈极显著负相关,认为品种间破碎率的差异主要是籽粒含水率和容重不同所致。VYN 等<sup>[22]</sup>选用 1959 至 1988 年在加拿大 Ontario 中部种植面积较大的 6 个杂交种代表不同年代品种,研究表明新品种籽粒的容重、籽粒密度、粒重均高于老品种,氮含量也高于老品种,但不同年代品种间破碎率并无显著差异。TSAI<sup>[23]</sup>研究认为晚熟品种 BS 更低,早、晚熟玉米籽粒灌浆期最大的差异在于醇溶蛋白含量和氮的同化过程不同,晚熟品种醇溶蛋白含量高与其籽粒破碎率低有关。BAUER 等<sup>[24]</sup>发现早熟品种随着播期推迟其籽粒 BS 增大,而晚熟品种推迟播期 BS 并未增大,认为晚熟品种 BS 低主要是由品种内在特性决定的。

DORSEYREDDING 等<sup>[25]</sup>认为玉米籽粒的破碎与籽粒胚乳特性有关。籽粒硬度是玉米胚乳内在特性的反映,它与籽粒 BS 不同,尽管两者有一定相关性。在机械收获时,籽粒常产生应力损伤,即内部损伤,受内伤的籽粒从外观看并没有破碎,因此不同品种胚乳的硬度不同,其产生的应力损伤也不同。他们还发现,籽粒的应力损失降低了籽粒硬度,结果导致更高的 BS。VYN 等<sup>[19]</sup>发现高的籽粒破碎率与高的胚乳应力损伤有关,圆形籽粒具有较高的胚乳应力损伤,收获时破碎率更高。WELLER 等<sup>[5]</sup>对 4 个玉米品种籽粒应力损伤和破碎敏感度的测试表明,不同品种间籽粒的应力损伤与 BS 有显著差异。BS 随着籽粒含水率的增加而增加,相同品种在籽粒不同水分含量下收获,其应力损伤无显著差异,但 BS 差异显著。GUNASEKARAN 等<sup>[26]</sup>研究了 2 个玉米品种应力损伤与籽粒 BS 之间的关系,并对不同品种籽粒的应力损伤(籽粒上有细的裂纹)进行了分类,包括 1 条裂纹、2 条裂纹、多条裂纹和无裂纹 4 类,结果发现,两品种样品中有裂纹的籽粒比例较相似,但具有不同裂纹条数的籽粒比例有显著差异,多条裂纹籽粒比例高的品种具有高的 BS。

除了胚乳特性外,一些学者还提出玉米穗轴特性对籽粒机械损伤有显著影响<sup>[8,11]</sup>。SEGHEL 等<sup>[11]</sup>发现果穗穗轴硬的品种在脱粒时,因穗轴容易断成几段,机械脱粒中因破碎的穗轴对籽粒的撞击造成籽粒破碎率增大,认为可以通过对亲本自交系穗轴特性的研究来预测后代机械收获的性能。WAELTI 等<sup>[8]</sup>发现随着籽粒含水率下降,籽粒形状变小,表明籽粒在脱水过程中发生皱缩;随着籽粒含水率下降,籽粒的强度和

应力增强；籽粒的脱粒力（即籽粒脱离穗轴的力）不依赖于籽粒含水率和籽粒其他特性；随着籽粒含水率的下降，籽粒脱粒时的损伤率下降；果穗在田间脱粒和带回实验室脱粒，籽粒的损伤率无显著差异，并认为影响籽粒脱粒损伤的主要因素是籽粒的脱粒力、籽粒强度、籽粒变形能力（加压前籽粒厚度与加压后籽粒厚度之差）、穗轴硬度，低的籽粒破损率总是与低的脱粒力、高的籽粒强度、低的籽粒变形能力和低的穗轴硬度相联系。SRIATAVE 等<sup>[27]</sup>、杨玉芬等<sup>[28]</sup>研究发现脱粒时籽粒受冲击的部位及冲击力大小是造成损伤的主要因素。脱粒过程中籽粒纵向破裂多于横向破裂，表明籽粒抗纵向冲击的能力较弱。通过沿纵向施加剪应力（shear stress）时发现籽粒很少能传递这种力，证明是其抗纵向冲击力弱的主要原因。因此，认为籽粒沿纵向单位面积吸收的能量与抗破碎密切相关，纵向剪应力参数可作为籽粒抗冲击破碎可信度较高的参数，可用于品种评价。

### 3.2 机械因素

玉米机械粒收是指通过收获机械在田间一次性完成收拢玉米植株、摘穗、剥去果穗上的苞叶、脱粒、分离并清选，然后把干净的籽粒送入收割机谷物仓的过程，与机械收穗作业最大的不同在于脱粒和籽粒清选环节<sup>[6]</sup>。谷物脱粒根据其原理不同可以分为冲击脱粒、擦搓脱粒、梳刷脱粒、碾压脱粒和振动脱粒。联合收获机上主要采用的是冲击、擦搓和梳刷 3 种脱粒方式，但不同类型收获机采用的脱粒方式不同，脱粒时产生的破碎也不同。目前发展的轴流式收获机是以擦搓式脱粒为主，机械损伤率较低，而传统收获机多以切流加冲击式脱粒为主，相对于轴流式有更高的破碎率<sup>[6,29-31]</sup>。

玉米联合收获机脱粒装置普遍采用的是滚筒加凹板组合成的脱粒结构。滚筒上焊接或安装有板（钉）齿或纹杆，板（钉）齿和纹杆有不同形状和大小，不同类型的联合收获机的脱粒元件以及在滚筒上的数量及其排列方式不同。一般来说，脱粒元件在滚筒上呈螺旋式分布，便于玉米果穗转动时沿轴向运动，并能降低破碎率。玉米脱粒是在滚筒转动下带动果穗运动，果穗在滚筒和凹板间与滚筒上的脱粒元件相互作用以及果穗与果穗相互作用下，对果穗产生打击、挤压、搓擦力使籽粒脱下。因此，滚筒类型、滚筒转速、滚筒与凹板间隙、滚筒上的脱粒元件等均会影响脱粒时的籽粒破碎率<sup>[32]</sup>。滚筒与凹板的前后间隙大小对果穗产生的挤压和搓擦力不同，对籽粒破碎率会有一定影

响，因此，即使是同一型号的收割机，因不同机器其间隙设置不同，也会造成籽粒破碎率的不同。MAHMOUD 等<sup>[33]</sup>研究发现对于大麦收获，纹杆滚筒破碎率大，而钉齿滚筒破碎率小；BRANDINI<sup>[34]</sup>在实验室测试发现，脱粒玉米时，纹杆滚筒的破碎率比橡胶面的角杆滚筒破碎率低；BRASS<sup>[35]</sup>也得到相似结果。CHOWDHURY 等<sup>[36]</sup>通过室内玉米脱粒实验发现，当滚筒上的钉齿数由 6 个增加至 12 个时，籽粒破碎率显著增加。ARNOLD<sup>[37]</sup>研究了纹杆滚筒转速、滚筒直径、纹杆间距、凹板间隙喂入量、喂入方向对脱粒效率和破碎率的影响，结果表明，降低滚筒转速是消除或减轻机械损伤最有效的途径，但降低滚筒转速的同时也降低了脱粒的工作效率。吴多峰等<sup>[38]</sup>研究发现靠挤搓力脱粒的板齿式滚筒较靠打击力脱粒的钉齿式滚筒的籽粒破碎率更低。余罗谦<sup>[39]</sup>利用有限元分析法分析板齿式玉米脱粒机的脱粒效果，得出当板齿螺旋角在 35—40 度时脱粒性能最优。李心平等<sup>[40]</sup>依据鸡喙和手搓方式研制出仿生脱粒装置进行玉米脱粒时有更低的破碎率。WAELTI<sup>[8]</sup>的研究表明，造成籽粒机械损伤的主要原因是滚筒转速、其次是滚筒与凹板间隙，滚筒上板齿的类型、数量及排列方式均对其有影响。FOX 等<sup>[41]</sup>利用高速拍照系统观测玉米机械脱粒过程，发现脱粒时果穗要遭受 7—9 次冲击才能将籽粒从穗轴上脱下来，同时还发现，被脱下的籽粒并非立即就能通过凹板的栅格，脱粒过程中有相当一部分被脱下的籽粒随着滚筒转动并遭受脱粒元件、果穗、穗轴的多次打击与磨擦，使籽粒破碎率进一步提高。滚筒转速显著影响籽粒破碎，对于籽粒含水率为 28% 的玉米果穗，当滚筒转速为每分钟 300 转时，籽粒损伤率是 15%；当提高到 700 转时，损伤率高达 28%。AYRES 等<sup>[42]</sup>调查了美国 Iowa 州玉米的田间收获，发现联合收获机收获的玉米籽粒损伤率在 16.4%—79.4%，而且主要是脱粒时通过凹板造成的损伤，损伤范围在 12%—60%。

KOEHLER<sup>[43]</sup>研究了两款脱粒机脱粒造成的损伤部位，发现 14.3% 的籽粒损伤是顶部损伤，29.8% 损伤是胚乳损伤，13.4% 是其他部位和种皮损伤；BRASS<sup>[44]</sup>研究发现机械损伤籽粒中 56% 的损伤粒是胚乳和种皮损伤，44% 的损伤是籽粒顶端破损。李心平等<sup>[45]</sup>研究了含水率为 15.6% 时东单 1 号玉米籽粒不同部位破碎的最大承载力后发现，籽粒腹面最抗破碎（其承载的最大破碎力为 399.3 N），其次是籽粒侧面（227.3 N），而籽粒顶部最易破碎（174 N）；CHOWDHURY 等<sup>[46]</sup>

研究认为籽粒破碎随着滚筒转速增加而增加,而且胚和种皮损伤是籽粒从穗轴上脱下但未能及时通过凹板又被栅格条和滚筒等冲击造成的损伤,这部分损伤占总损伤的 50%以上,即如果改进脱粒装置,使脱下的籽粒及时通过凹板可降低脱粒损伤至少 50%。CHOWDHURY 将玉米籽粒收获中产生的机械损伤分为严重损伤型(籽粒 1/3 缺失)、顶部损伤型、胚损伤型和种皮损伤型,以及细小颗粒和粉末。他们发现各类损伤均随着滚筒转速的提高而增大,其中严重损伤型增大幅度最明显;在各类损伤中,种皮损伤最多,其次是顶部损伤,再次是胚损伤,第四是严重损伤,第五是细小颗粒和粉末(12/64 inch 筛)。不同籽粒含水率(16%—28%)脱粒的结果表明,当籽粒含水率在 16%时,机械损伤最高,特别是顶部损伤;随着籽粒含水率增大,顶部损伤变小,但种皮损伤增大;胚损伤在籽粒含水率在 22%—23%时最低。籽粒含水率过低时容易脱粒,但滚筒正常转速使脱下的籽粒不能及时通过凹板的栅条导致被二次或更多次冲击出现更多的机械损伤。因此,低含水率(低于 20%)玉米收获时应适当降低滚筒转速,而籽粒含水率在 22%—23%时收获最为适宜<sup>[47]</sup>。

JOHNSON 等<sup>[48]</sup>对机械脱粒原理的研究认为,籽粒从穗轴上脱落是果穗受外部压力产生不同变形引起的,脱粒压力的产生是籽粒间相互传递负载的压力而不是由果穗变形诱导的;横向载荷使果穗横截面被剖开;轴向载荷使果穗沿轴向断裂成更小的断片。果穗的破坏和变化分析表明,籽粒的脱粒主要是由于外力作用下籽粒与穗轴连接的花梗组织(pedicle tissue)产生弯曲变形导致籽粒侧面产生接触力。籽粒顶端产生磨擦力的结果是果穗拉伸应力,这种力对脱粒的作用似乎相对较低;脱粒的机制是冲击载荷作用的结果,因为在动态载荷作用下产生较高的变形应力(deflections and stresses)。试验结果还表明,随着籽粒脱下数量的增加,继续脱下籽粒时所需的能量是下降的,因为在更高的冲击力作用下,更多籽粒处于脱下与未脱之间的临界状态。籽粒被脱下所需的能量随着籽粒含水率的增加而增加,因为高含水率的果穗轴在破裂前需吸收更多的能量。施加压力的模式(横向或轴向)并未对脱粒所需能量产生显著的影响;籽粒的破碎随着籽粒含水率和施加压力模式的变化而增大,在轴向方向施加压力和在高含水率下的破碎率更高。SRIASTAVA 等<sup>[49]</sup>研究认为籽粒损伤主要发生在玉米收获脱粒过程和烘干过程,脱粒时籽粒受冲击的

部位、冲击力大小是影响籽粒损伤的主要因素,而冲击力持续时间对籽粒损伤的影响不明显;籽粒纵向抗冲击的能力比较弱,导致机械脱粒过程中纵向破裂的籽粒数多于横向破裂数,MOHAMED<sup>[50]</sup>的试验得出相同结论。因此,在设计脱粒装置时有必要考虑籽粒的这一特点,以减轻脱粒过程中对籽粒施加的纵向切力。

### 3.3 生态气象因素

大量研究表明,与籽粒破碎有关的籽粒硬度、容重、密度等特性均与玉米生长发育期间所处的生态环境因素密切相关。PLETT<sup>[21]</sup>在加拿大中南部的 Manitoba 对 6 个玉米品种 3 年中收获时籽粒机械损伤问题研究发现,破碎率与籽粒含水率呈极显著正相关,与容重呈极显著负相关。不同年际间因籽粒发育期光照、温度和湿度的不同,使得成熟期籽粒容重和含水率均有差异。破碎率最低时的籽粒含水率为 15.6%,最高时为 21.8%,在不同年份间有差异,表明籽粒形成发育和收获期间的环境对籽粒破碎率产生显著影响。BAUER 等<sup>[24]</sup>研究表明,雨养条件下玉米产量仅有灌溉条件的一半,但籽粒破碎率更低;不同年份间相同品种破碎率表现出的差异与不同年份籽粒发育阶段的气候条件有关;推迟播期,早熟品种 BS 增大与籽粒发育所处环境改变有关。

籽粒在田间干燥脱水阶段的温湿度变化,或干湿交替变化均会导致玉米籽粒产生应力损伤,为机收脱粒时的破碎提供内在条件。籽粒生理成熟至收获期间,晴天与雨天交替,即干湿交替次数越多、干湿差异强度越大,造成籽粒应力损伤程度也越大。机械收获时大气的温、湿度同样也影响籽粒的破碎率。BENSON<sup>[51]</sup>报道生理成熟前遭遇霜冻是造成籽粒变脆、BS 增大的重要原因,机械收获时破碎率高。VYN 等<sup>[19]</sup>研究发现田间籽粒脱水阶段干燥温度的增高会造成籽粒长度、宽度和厚度增加,导致粒重下降,进而影响收获时籽粒的破碎。

### 3.4 栽培措施

作物生产农艺因素对籽粒物理特性有重要影响,并进一步影响机收时籽粒的破碎率。GUNASEKARA 等<sup>[52]</sup>研究认为种植密度、播期影响籽粒形成期的光温条件,进而影响籽粒破碎敏感度;MOENTONO 等<sup>[15]</sup>发现种植密度和土壤氮素水平显著影响两个供试品种籽粒破碎敏感度;BAUER 等<sup>[24]</sup>研究了播期、种植密度、灌溉(水地)与非灌溉(旱地)、氮肥施用量、不同成熟品种等 5 个方面对玉米籽粒 BS 的影响,发现 BS 随播期后延而增大,每后延 10 d,增大 1.6%;

种植密度每增加 2.0 株/m<sup>2</sup>, BS 平均增大 1.5%—2.0%; 灌溉与非灌溉比较, 无灌溉的旱地处理产量 (483 g·m<sup>-2</sup>) 只有灌溉处理 (893 g·m<sup>-2</sup>) 的 55%, 但籽粒 BS 却显著低于灌溉处理; 籽粒 BS 随氮肥用量增加 (0—11g·m<sup>-2</sup>) 而下降。VYN 等<sup>[19]</sup>研究了 5 个玉米杂交种在 2 种密度 (5.5 株/m<sup>2</sup> 和 7 株/m<sup>2</sup>)、不同籽粒含水率 (30% 和 24%) 下收获和在不同温度 (20, 40, 80, 100℃) 下干燥后籽粒的破碎率, 结果表明, 增加种植密度, 籽粒 BS 略有增加; 收获时较低的籽粒含水率有利于降低 BS; BS 与籽粒干燥温度密切相关, 籽粒破碎率随干燥温度增加而增加。因此, 选择适宜品种、在较低籽粒含水率条件下收获以及在较低温度下干燥能够减少破碎。此外, 晚收破碎率低, 除了籽粒含水率低外, 粒重增加也是原因之一。

玉米籽粒角质胚乳比例高有利于降低 BS, 多施氮肥能提高籽粒中角质胚乳的比例<sup>[52-53]</sup>。DUARTE 等<sup>[18]</sup>研究发现, 增施氮肥, 籽粒产量增加, 籽粒氮含量增加, 籽粒硬度略有增加, 籽粒 BS 降低 1.9%—6.9%。KNIEP 等<sup>[20]</sup>研究表明, 增加氮肥用量所有参试品种的 BS 均下降, 而灌溉使籽粒 BS 增大。MOENTONO<sup>[15]</sup>研究认为, 高的种植密度会增大籽粒破碎率; 土壤肥力低、氮肥用量少、缺氮时籽粒破碎率增大; 而高的氮肥施用量会降低籽粒 BS, 破碎可能性降低。

### 3.5 籽粒含水率

JOHNSON 等<sup>[17]</sup>用收获的籽粒能通过 12/64inch 圆孔筛的部分代表籽粒破碎率, 发现脱粒时破碎率在籽粒含水率为 20% 时只有 0.5%, 随着籽粒含水率增加, 破碎率呈指数增加, 到籽粒含水率 35% 时, 破碎率已超过 3.5%; WAELTI 等<sup>[8]</sup>把外表有损伤的籽粒都算做破碎, 其结果与 JOHNSON 的相似, 只是破碎率值高很多, 在籽粒含水率为 35% 时, 破碎率高达 40%。HALL 等<sup>[54]</sup>研究认为, 籽粒含水率在 20%—23% 时收获破碎率最低; CHOWDHURY 等<sup>[46]</sup>报道籽粒含水率 23% 时机械损伤率最低。PLETT<sup>[21]</sup>对加拿大 6 个玉米品种研究表明, 籽粒破碎率与含水率呈显著相关, 破碎率最低时的籽粒含水率在 16.7%—22.1%。GUNASEKARAN<sup>[52]</sup>提出籽粒 BS 与含水率 (M) 的关系符合  $BS=171.3\exp(-0.29M)$ , 通过该公式可估测籽粒破碎率。易克传等<sup>[13]</sup>比较了郑单 958 和凤玉 906 的收获效果, 结果表明籽粒破碎率随含水率增加而增加, 当籽粒含水率低于 28% 时收获破碎率低于 3%, 但不同品种间有差异。当前中国玉米籽粒收获时含水率和破碎率普遍偏高, 本课题组对 1 698 个收获样本的现

场测试表明, 籽粒平均含水率为 26.83%, 破碎率为 8.63%, 玉米籽粒破碎率总体随含水率升高呈增大趋势, 两者呈极显著正相关 ( $r=0.587^{**}$ ), 符合二次多项式  $y_{\text{破碎率}}=0.0372x_2-1.483x+20.422$  ( $R^2=0.452^{**}$ ,  $n=1698$ )<sup>[2]</sup>。

BRASS<sup>[35]</sup>认为当籽粒含水率更高时, 籽粒破碎率随着滚筒转速增加而快速增加。WAELTI<sup>[3]</sup>研究了籽粒含水率在 20%—31% 范围内不同品种籽粒破碎率对滚筒转速变化的响应, 发现同一品种在不同籽粒含水率条件下收获, 其籽粒破碎对滚筒转速的响应不同; PioneerX 在籽粒含水率 22% 时反应最敏感, 即此时籽粒抗冲击能力变弱, 导致该水分条件下籽粒破碎率随滚筒转速提高而显著增大; 而 Pioneer3418 在含水率为 21% 时, 其籽粒破碎对滚筒转速变化的反应不敏感。即不同品种机械收获时破碎率最低的水分含量有所不同。

## 4 建议

综上所述, 破碎率高不仅降低玉米等级和销售价格, 而且导致收获产量下降, 并增大烘干成本、增加安全贮藏的难度, 是推广机械粒收技术、发展现代玉米生产必须解决的关键问题。国外有关玉米籽粒破碎率及其影响因素的研究主要集中于 20 世纪 60—90 年代, 与国外大面积推广机械粒收技术的时期基本一致。国内近年随着玉米机械收获技术的快速发展, 相关研究呈增加趋势, 但总体较为薄弱, 已成为制约机械粒收技术推广应用的重要因素。鉴于中国玉米种植区域广、品种类型多, 生态环境和栽培方式均不同于国外, 国外的研究结果难以直接应用, 但其研究思路、方法、测试技术等可供国内研究借鉴。

### 4.1 加大抗破裂、宜机收品种的筛选与选育

在机械粒收时玉米不同基因型间籽粒机械损伤程度存在显著差异, 表明可以通过育种手段选育抗破碎的品种, 为机械粒收大面积推广提供品种基础。现阶段可以通过对现有品种筛选, 找出破碎率低的品种, 作为机械粒收的过渡性品种; 进一步品种选育时应考虑籽粒脱粒和抗破碎这一特性, 特别是要重视抗纵向破裂的品种培育。

### 4.2 改进收获机械作业性能降低玉米籽粒破碎率

收获作业时应根据地块玉米生长情况及时调整。不同类型收割机, 因其滚筒转速、凹板间隙、振动筛孔大小和清选风机风力大小等机械参数不同在收获时会产生不同的籽粒破碎率。即使同一台玉米联合收割



机在收割作业时,滚筒转速、凹板间隙、振动筛孔大小和清选风机风力等机械参数也应根据每块地玉米的品种、长势状况、籽粒含水率等不同进行及时调整,在保证机械作业效率的前提下使籽粒破碎降至最低程度。

机械籽粒收获过程中滚筒转速是造成籽粒破碎最主要的机械原因。高的滚筒转速已超出籽粒脱下所需要的力,更多的力会通过滚筒及脱粒元件传递给籽粒导致更大的机械损伤。采用传统脱粒装置的联合收割机,降低滚筒转速可以降低籽粒破碎率,但脱粒不净率会增大,脱粒效率也会下降。为克服这一缺陷,目前联合收割机企业通常对脱粒装置做如下改进:加长滚筒长度,在降低滚筒转速时通过延长果穗在滚筒内的行程解决脱不净和效率低的问题;或在不增大滚筒转速前提下通过改变或增加滚筒上的钉齿或纹杆等脱粒元件来增大对果穗的打击和揉搓力;或采取两段式脱粒,第一段为低转速脱粒,脱下果穗上的大部分籽粒,以此降低破碎率;第二段为较高转速,脱下果穗上剩余籽粒。因此,不同类型的联合收割机,可能因采用的滚筒长度不同、滚筒转速不同,或脱粒元件不同,在同一地块收获时会表现出不同的破碎率。

此外,在机械收获中,喂入量的大小、喂入是否均匀以及果穗进入方式均会影响籽粒的破碎率。喂入量过大、喂入不均匀会增加破碎率,而果穗轴向进入滚筒其破碎率会比径向进入的低。一般每种收获机的喂入量在出厂时已标注,应按标注的喂入量操作,根据玉米田间长势或产量设置适合的收割速度来控制喂入量。收割过程中根据玉米长势或种植密度及时调整速度,在保证喂入量不超过额定值的前提下尽可能使其均匀。当前生产中不对行收获较为普遍,由于喂入量的不均匀,可能会影响收获质量。

#### 4.3 重视生态环境因素对玉米籽粒破碎的影响

针对不同区域生态环境条件,应注意选择在适宜生育期内能与当地光温条件匹配的品种以及确定品种适宜的种植区域。籽粒形成发育期间的高温、低温冻害和干旱等胁迫环境均会增大籽粒破碎的风险,因此,有必要进一步研究这些环境胁迫因子导致籽粒破碎的机制和各自作用的程度、阈值,为品种选育和筛选、种植区划以及采取针对性的栽培管理提供依据。

#### References

[1] 李少昆,王克如,谢瑞芝,侯鹏,明博,杨小霞,韩冬生,王玉华. 实施密植高产机械化生产实现玉米高产高效协同. 作物杂志, 2016(4): 1-6.

- LI S K, WANG K R, XIE R Z, HOU P, MING B, YANG X X, HAN D S, WANG Y H. Implementing higher population and full mechanization technologies to achieve high yield and high efficiency in maize production. *Crops*, 2016(4): 1-6. (in Chinese)
- [2] 李少昆,王克如,谢瑞芝,李璐璐,明博,侯鹏,初振东,张万旭,刘朝巍. 玉米子粒机械收获破碎率研究. 作物杂志, 2017(2): 76-80. LI S K, WANG K R, XIE R Z, LI L L, MING B, HOU P, CHU Z D, ZHANG W X, LIU C W. Grain breakage rate of maize by mechanical harvesting in China. *Crops*, 2017(2): 76-80. (in Chinese)
- [3] STEELE J L, SAUL R A, HUKILL W V. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. *American Society of Agricultural Engineers*, 1967, 12(5): 685-689.
- [4] DUTTA P K. Effects of grain moisture, drying methods, and variety on breakage susceptibility of shelled corns as measured by the Wisconsin Breakage Tester[D]. Ames: Iowa State University, 1986.
- [5] WELLER C L, PAULSEN M R, STEINBERG M P. Stress cracking and breakage susceptibility as affected by moisture content at harvest for four yellow dent corn hybrids. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(3): 863-869.
- [6] YANG L, CUI T, QU Z, LI K H, YIN X W, HAN D D, YAN B X, ZHAO D Y, ZHANG D X. Development and application of mechanized maize harvesters. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2016, 9(3): 15-28.
- [7] WAELTI H. Physical properties and morphological characteristics of maize and their influence on threshing injury of kernels[D]. Ames: Iowa State University, 1967.
- [8] WAELTI H, BUCHELE W F. Factors affecting corn kernel damage combine cylinders. *Transactions of the ASAE*, 1969: 55-59.
- [9] HILL L D, HURBURGH C R, PAULSEN M R. *Illinois-Iowa Moisture Meter Recalibrations for Corn*. Urbana: University of Illinois, 1981.
- [10] PAULSEN M R, NAVE W R. Corn damage from conventional and rotary combines. *Bmc Gastroenterology*, 1980, 23(5): 1110-1116.
- [11] SEHGAL S M, BROWN W L. Cob morphology and its relations to combine harvesting in maize. *Iowa Stage Journal of Science*, 1965, 39(3): 251-268.
- [12] 李川,乔江方,谷利敏,夏来坤,朱卫红,黄璐,刘京宝. 影响玉米籽粒直接机械化收获质量的生物学性状分析. 华北农学报, 2015, 30(6): 164-169. LI C, QIAO J F, GU L M, XIA L K, ZHU W H, HUANG L, LIU J B. Analysis of maize biological kernel mechanically traits which affect corn harvesting qualities. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2015, 30(6):

- 164-169. (in Chinese)
- [13] 易克传, 朱德文, 张新伟, 姚智华, 刘正. 含水率对玉米籽粒机械化直接收获的影响. *中国农机化学报*, 2016, 37(11): 87-89.  
YI K C, ZHU D W, ZHANG X W, YAO Z H, LIU Z. Effect of moisture content on corn grain harvesting mechanization. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(11): 87-89. (in Chinese)
- [14] MENSAH J K, HERUM F L, BLAISDELL J L, STEVENS K K. Effect of drying condition on impact shear resistance of selected corn varieties. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24(6): 1568-1572.
- [15] MOENTONO M D, DARRAH L L, ZUBER M S, KRAUSE G F. Effects of selection for stalk strength on response to plant density and level of nitrogen application in maize. *Hawaii International Conference on System Sciences*, 1984, 1(2): 3265.
- [16] PAULSEN M R, HILL L D, WHITE D G, SPAGUE G F. Breakage susceptibility of corn-belt genotypes. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26(6): 1830-1836, 1841.
- [17] JOHNSON D Q, RUSSELL W A. Genetic variability and relationships of physical grain-quality traits in the BSSS population of maize. *Crop Science*, 1982, 22(4): 805-809.
- [18] DUARTE A P, MASON S C, JACKSON D S, KIEHL J DE C. Grain quality of Brazilian maize genotypes as influenced by nitrogen level. *Crop Science*, 2005, 45(5): 1958-1964.
- [19] VYN T J, MOES J. Breakage susceptibility of corn kernels in relation to crop management under long growing season conditions. *Agronomy Journal*, 1988, 80(6): 915-920.
- [20] KNIEP K R, MASON S C. Kernel breakage and density of normal and Opaque-2 maize grain as influenced by irrigation and nitrogen. *Crop Science*, 1988, 29(1): 158-163.
- [21] PLETT S. Corn kernel breakage as a function of grain moisture at harvest in a prairie environment. *Canada Journal Plant Science*, 1994, 74(3): 543-544.
- [22] VYN T J, TOLLENAAR M. Changes in chemical and physical quality parameters of maize grain during three decades of yield improvement. *Field Crop Research*, 1998, 59(2): 135-140.
- [23] TSAI C Y, HUBER D M, GLOVER D V, WARREN H L. Relationships of N deposition on grain yield and N response of maize hybrids. *Crop Science*, 1984, 24(2): 277-281.
- [24] BAUER P J, CARTER P R. Effect of seeding date plant density, moisture availability and soil nitrogen fertility on maize kernel breakage susceptibility. *Crop Science*, 1986, 26(6): 1220-1226.
- [25] DORSEYREDDING C, HURBURCH C, JOHNSON L A, FOX S R. Adjustment of maize quality data for moisture content. *Cereal Chemistry*, 1990, 67(3): 292-295.
- [26] GUNASEKARAN S, MUTHUKUMARAPPAN K. Breakage susceptibility of corn of different stress crack categories. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36(5): 1445-1446.
- [27] SRIASTAVA A K, HERUM F L, STEVENS K K. Impact parameters related to physical damage to corn kernel. *Transactions of the ASAE*, 1976, 19(6): 1147-1151.
- [28] 杨玉芬, 张永丽, 张本华, 佟玲, 高连兴. 典型玉米种子籽粒的静压破损试验. *农机化研究*, 2008(7): 149-151.  
YANG Y F, ZHANG Y L, ZHANG B H, TONG L, GAO L X. Experimental study on static pressing typical corn seed kernel. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(7): 149-151. (in Chinese)
- [29] BINGEN T R. Trends in the process technology of grain crop harvesting. *Agritechnica*, 2007, 62: 388-389.
- [30] 何晓鹏, 刘春和, 师建芳, 王广万. 挤搓式玉米脱粒机的研制. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 105-109.  
HE X P, LIU C H, SHI J F, WANG G W. Research and design on corn sheller by extruding and rubbing method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(2): 105-109. (in Chinese)
- [31] 李心平, 高春燕, 刘赢, 马福丽, 郭志军, 高连兴. 玉米果穗喂入形式与籽粒破碎率的关系研究. *农机化研究*, 2013(12): 137-140.  
LI X P, GAO C Y, LIU Y, MA F L, GUO Z J, GAO L X. Study on relationship of feeding form of corn ear and breaking damage rate of corn kernels. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013(12): 137-140. (in Chinese)
- [32] 李清龙. 打击式玉米脱粒机脱粒过程试验研究及仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
LI Q L. Research on the experiment and simulation analysis of the threshing process of the collision style corn thresher[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [33] MAHMOUD A R. Distribution of damage in maize combine cylinder and relationship between physic-rheological properties of shelled grain and damage [D]. Ames: Iowa State University, 1972.
- [34] BRANDINI A. Corn kernel forces during impact shelling[D]. Ames: Iowa State University, 1969.
- [35] BRASS R W. Development of a low damage corn shelling cylinder [D]. Ames: Iowa State University, 1970.
- [36] CHOWDHURY M H. Effect of the operating parameters of the rubber roller sheller [D]. Ames: Iowa State University, 1973.
- [37] ARNOLD R E. Experiments with rasp bar threshing drums. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1964, 9(2): 99-131.



- [38] 吴多峰, 许峰, 袁长胜. 板齿式与钉齿式玉米脱粒机的性能比较. 农机化研究, 2006(10): 78-80.  
WU D F, XU F, YUAN C S. Performances comparison between plank-tooth corn shellers and nail-tooth corn shellers. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006(10): 78-80. (in Chinese)
- [39] 余罗谦. 玉米脱粒机板齿螺旋角与脱粒特性的影响研究. 农机化研究, 2013(3): 62-64.  
YU L Q. Research on the effect of the relationship between corn thresher's spiral angle and threshing characteristic. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013(3): 62-64. (in Chinese)
- [40] 李心平, 马义东, 金鑫, 高连兴. 玉米种子仿生脱粒机设计与试验. 农业机械学报, 2015, 46(7): 97-101.  
LI X P, MA Y D, JIN X, GAO L X. Design and test of corn seed bionic thresher. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 97-101. (in Chinese)
- [41] FOX R E. Development of a compression type corn threshing cylinder[D]. Ames: Iowa State University, 1969.
- [42] AYRES G, BABCOCK C. Field losses and corn kernel damage from Iowa combines//*American Society of Agricultural Engineers Grain Damage Symposium*. Agricultural Engineering Department, Ohio State University, Columbus, Ohio, 1972.
- [43] KOEHLER B. Pericarp injuries in seed corn. *Illinois Agricultural Experiment Station Bulletin*, 1957, 617: 70-72.
- [44] BRASS R W. Development of a low damage corn shelling cylinder[D]. Ames: Iowa State University, 1970.
- [45] 李心平, 李玉柱, 高吭, 邱兆美, 马福丽, 高连兴. 种子玉米籽粒仿生脱粒机理分析. 农业机械学报, 2011, 42(2): 99-103.  
LI X P, LI Y Z, GAO K, QIU Z M, MA F L, GAO L X. Bionic threshing process analysis of seed corn kernel. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 99-103. (in Chinese)
- [46] CHOWDHURY M H, BUCHELE W F. The nature of corn kernel damage inflicted in the shelling crescent of grain combines. *Transactions of the ASABE*, 1978, 21(4): 610-614.
- [47] CHOWDHURY M H. Development of a colorimetric technique for measuring mechanical damaged of grain[D]. Ames: Iowa State University, 1978.
- [48] JOHNSON W H, JAIN M L, HAMDY M Y, GRAHAM F P. Characteristics and analysis of corn ear failure. *Transactions of the ASABE*, 1969, 12(6): 845-848.
- [49] SRIASTAVA A K, HERUM F L, STEVENS K K. Impact parameters related to physical damage to corn kernel. *Transactions of the ASABE*, 1976, 19(6): 1147-1151.
- [50] MOHAMED A F, ABDEI MAKSOU D. Mechanical properties of corn kernels. *Misr Journal Agricultural Engineering*, 2009, 26(4): 1901-1922.
- [51] BENSON G O. Corn replant decisions: A review. *Journal of Production*, 1990, 3(2): 180-184..
- [52] GUNASEKARAN S, PAULSEN M R. Breakage susceptibility of corn as a function of drying rates. *Transactions of the ASABE*, 1985, 28(6): 2071-2076.
- [53] MADDONNI GA, OTEFUI M E. Intra-specific competition in maize: contribution of extreme plant hierarchies to grain yield, grain yield components and kernel composition. *Field Crops Research*, 2006, 97(2): 155-166.
- [54] HALL G E, JOHNSON W H. Corn kernel crackage induced by mechanical shelling. *Transactions of the ASABE*, 1970, 13(1): 51-55.

(责任编辑 杨鑫浩)