中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

**玉米强弱势粒间机械脱粒破碎率的差异**

赵波，吴雅薇，李小龙，陈祥，邓长春，朱骁雍，袁继超，孔凡磊

引用本文:
赵波, 吴雅薇, 李小龙, 等. 玉米强弱势粒间机械脱粒破碎率的差异[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 843–851.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200111

---

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

收获时期对四川春玉米机械粒收质量的影响

Effects of harvesting date on mechanical grain–harvesting quality of spring maize in Sichuan Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 50–56 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190544

四川省夏玉米机械粒收适宜品种筛选与影响因素分析

Variety screening of mechanical grain harvest and analysis of influencing factors of summer maize in Sichuan Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 835–842 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200036

臭氧胁迫对稻米淀粉热力学特征值影响及其强弱势粒间差异

Impact of ozone stress on thermodynamic characteristic values of rice starch and the differences between superior and inferior grains

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1812–1822 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190329

品种和播期对华北春玉米产量及水分利用效率的影响

Effects of sowing date and cultivar on grain yield and water use efficiency of spring maize in the North China Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 837–846 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170786

黄淮海夏玉米籽粒机收适宜光温指标研究

Suitable sunshine and temperature for mechanical grain harvesting of summer maize in the Huang–Huai–Hai Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(8): 1149–1158 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180072

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 6 月 第 28 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2020, 28(6): 843−851

**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200111**

赵波, 吴雅薇, 李小龙, 陈祥, 邓长春, 朱骁雍, 袁继超, 孔凡磊. 玉米强弱势粒间机械脱粒破碎率的差异[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 843−851

ZHAO B, WU Y W, LI X L, CHEN X, DENG C C, ZHU X Y, YUAN J C, KONG F L. Differences in mechanical threshing broken rate between superior and inferior maize grains[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 843−851

# 玉米强弱势粒间机械脱粒破碎率的差异*

赵 波[1], 吴雅薇[1], 李小龙[1], 陈 祥[1], 邓长春[2], 朱骁雍[2], 袁继超[1], 孔凡磊[1**]

(1. 四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 成都 611130;
2. 四川省中江县农业农村局 中江 618100)

**摘 要:** 为明确机械脱粒时玉米强弱势粒间破碎率的差异及其影响因素, 选用 2 个玉米品种, 将玉米分强弱势粒分别机械脱粒, 比较分析 3 次机械脱粒日期(8 月 9 日、8 月 16 日、8 月 23 日)强弱势粒的含水率、百粒重、力学强度、淀粉粒形态和破碎率。结果表明, 参试品种‘仲玉 3 号’在 8 月 9 日、8 月 16 日和 8 月 23 日脱粒弱势粒的破碎率均高于强势粒, ‘先玉 1171’在 8 月 16 日和 8 月 23 日脱粒弱势粒的破碎率也均高于强势粒; 不同机械脱粒日期强势粒的含水率和百粒重显著高于弱势粒, 同时较弱势粒具有明显的力学强度优势。籽粒顶面压碎强度和胚部压碎强度与破碎率呈极显著和显著负相关($r$=−0.46**, $r$=−0.34*), 可更好地反映籽粒耐破碎能力; 强势粒的角质胚乳淀粉粒大于弱势粒, 强势粒的粉质胚乳淀粉粒主要呈多面体, 弱势粒主要呈球体。强弱势粒含水率差异难以反映其耐破碎能力, 粒重和力学强度差异是造成强弱势粒破碎率差异的重要原因。

**关键词:** 玉米; 机械脱粒; 强势粒; 弱势粒; 力学强度; 破碎率

**中图分类号:** S372 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

# Differences in mechanical threshing broken rate between superior and inferior maize grains*

ZHAO Bo[1], WU Yawei[1], LI Xiaolong[1], CHEN Xiang[1], DENG Changchun[2], ZHU Xiaoyong[2], YUAN Jichao[1], KONG Fanlei[1**]

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of Zhongjiang County, Zhongjiang 618100, China)

**Abstract:** High grain broken rate is the main limiting factor encountered when mechanically harvesting maize grains. Owing to different filling degrees, the structures of superior and inferior maize grains are different. Therefore, the objectives of this study were: 1) to explore the difference in mechanical threshing broken rate between superior and inferior grains and factors that influence this; 2) to select a mechanical strength evaluation index with a high correlation with grain broken rate. Two maize varieties (‘Zhongyu 3’ and ‘Xianyu 1171’) were selected, and superior and inferior grains were mechanically threshed separately. Moisture content, 100-grain weight, mechanical strength, starch grain shape, and grain broken rate were compared and analyzed for the

* 国家重点研发计划项目(2018YFD0301206, 2017YFD0301704, 2016YFD0300307)和四川省玉米创新团队建设项目(SCCXTD-2020-02)资助

** 通信作者: 孔凡磊, 主要研究方向为农作制度与玉米高产高效栽培技术。E-mail: kflstar@163.com
赵波, 主要研究方向为玉米机械化籽粒直收技术。E-mail: sicauzb4633@163.com

收稿日期: 2020-02-20 接受日期: 2020-04-13

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFD0301206, 2017YFD0301704, 2016YFD0300307) and Sichuan Innovation Team Program of Maize (SCCXTD-2020-02).

** Corresponding author, E-mail: kflstar@163.com

Received Feb. 20, 2020; accepted Apr. 13, 2020

superior and inferior grains over three mechanical threshing dates (August 9, August 16, August 23). The results showed that the broken rate of inferior grians of 'Zhongyu 3' was higher than that of superior grains threshed on August 9, August 16, and August 23; and that the broken rate of 'Xianyu 1171' inferior grains was higher than that of superior grains on threshing dates August 16 and August 23. The moisture content and 100-grain weight of superior grains were significantly higher than those of inferior grains across different mechanical threshing dates. At the same time, the superior grains had an obvious mechanical strength advantage over the inferior grains. The results also showed that there were significant negative correlations between broken rate and facade crushing strength ($r = -0.46^{**}$), broken rate and germ crushing strength ($r = -0.34^{*}$), which could be used to better reflect the breaking resistance of grains. The horny endosperm starch granules of superior grains were larger than those of inferior grains, and the floury endosperm starch granules were mainly polyhedral in the superior grains but were mainly spheroid in inferior grains. The difference in moisture content between superior and inferior grains could not reliably reflect breaking resistance. Differences in grain weight and mechanical strength were the main factors behind differences in broken rate between superior and inferior grains. The present study highlighted the importance of the differences between superior and inferior grains in maize mechanical harvesting as well as the relationship between grain mechanical strength and breaking resistance.

**Keywords:** Maize; Mechanical threshing; Superior grains; Inferior grains; Mechanical strength; Broken rate

中国作为全球玉米(*Zea mays*)主要产区之一，由于机械化粒收面积<5%，生产成本一直高于欧美国家[1-2]。目前随着玉米机械粒收技术的不断推广应用，提高机械粒收质量变得尤为重要。籽粒破碎是玉米收获、运输和加工过程中的一个重要问题。收获时籽粒破碎率偏高是当前中国玉米机械粒收技术发展的"瓶颈"性问题[3-5]。关于玉米机械粒收籽粒破碎的研究较多，得出籽粒破碎与品种、收获机械、籽粒含水率、种植密度和籽粒力学强度等因素关系密切[3,6-13]。机械粒收时低的籽粒破碎率总是与较低的籽粒含水率和较高的籽粒力学强度紧密联系[13-16]。在玉米耐破碎研究上发现，玉米籽粒形状、内部结构、籽粒硬度和内在成分(尤其是醇溶蛋白)对籽粒破碎有影响[17-19]。Leford 等[20]研究表明，抗破碎的籽粒趋于细小致密，抗剪切强度较高。Martin 等[21]研究表明，机械破碎主要受籽粒形状、粒径和结构特征的影响，其次为籽粒硬度。Wang 等[22]研究表明，玉米籽粒角质胚乳较粉质胚乳具有显著的力学强度优势，角质胚乳比例高的玉米品种更耐破碎。Hou 等[23]研究表明籽粒密度和皮下空腔体积是影响籽粒破碎率的两个重要因素，尤其是籽粒密度对玉米籽粒破碎起着至关重要的作用。玉米果穗的不同粒位由于库活性的差异[24-25]，或同化物供应差异[26-27]，或蔗糖-淀粉代谢途径中相关酶活性差异[28]等原因，造成了籽粒充实程度存在显著差异，形成了果穗中下部的强势粒和上部的弱势粒。以往关于玉米籽粒破碎与籽粒形状、结构、硬度等的关系研究主要采用不同玉米品种间比较，同一品种强弱势粒间也具有这种天然差异，然而缺乏玉米强弱势粒机械脱粒破碎的差异及其影响因素的相关报道。为此，本研究通过选用 2 个玉米品种，将玉米分强弱势粒分别机械脱粒，多时期调查强弱势粒的含水率、百粒重、力学强度、淀粉粒形态和破碎率，探讨强弱势粒机械脱粒破碎差异及其影响因素，并筛选出与籽粒破碎相关性较高的力学强度评价指标，研究结果将对玉米机械粒收技术的推广和适宜品种的选育提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点和材料

试验于 2019 年在四川省德阳市中江县合兴乡新建村(31°03′N, 104°68′E)进行。土壤类型为紫色壤土，0~20 cm 土层的化学性质为：有机质 11.13 g·kg$^{-1}$，全氮 1.23 g·kg$^{-1}$，速效磷 12.84 g·kg$^{-1}$，速效钾 131.91 g·kg$^{-1}$。从四川玉米区有较大种植推广面积的品种中选取具有典型代表性且机械粒收质量较优的品种'仲玉 3 号'(ZY3)和'先玉 1171'(XY1171)为试验材料，分别由南充市农业科学院和铁岭先锋种子研究有限公司提供。两品种生育期相近，'仲玉 3 号'和'先玉 1171'籽粒类型分别为半马齿型和半硬粒型。

### 1.2 试验设计

选取地势平整，肥力相对一致的地块进行大田试验，试验采用带状种植，每带 3 行(行距 60 cm，带间距为 1.2 m，每一品种种植 2 带，带长 100 m)，种植密度 60 000 株·hm$^{-2}$。肥料用量为纯氮 180.0 kg·hm$^{-2}$、$P_2O_5$ 45.0 kg·hm$^{-2}$ 和 $K_2O$ 67.5 kg·hm$^{-2}$，氮肥于播种时施入 60%，大口期施入 40%，磷钾肥全部基施。3 月 27 日播种，其他田间管理同当地实际生产，以实现高产。在玉米吐丝期选择吐丝时间和大小一致的果穗挂牌，以备取样，每品种共挂牌 1 800 穗。在玉米生理成熟后于 8 月 9 日、8 月 16 日、8 月 23 日从

田间人工摘穗(选取长势一致的挂牌无穗粒腐病果穗), 每品种500穗, 去除苞叶, 按图1的标准人为将果穗扳断, 分强弱势粒分别进行机械脱粒, 调查强弱势粒的含水率、百粒重、力学强度和破碎率。为更好地为机械粒收技术提供理论依据, 本研究采用西南玉米生产区常用的久保田 4LZY-1.8B 玉米籽粒收获机, 配套家家乐 4YG-4A 玉米收割台进行机械脱粒。

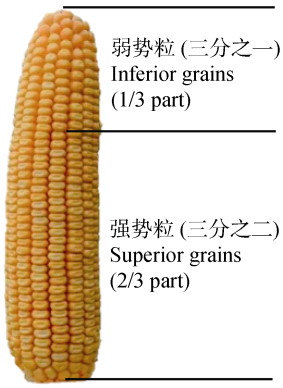


**图 1**　玉米强弱势粒的划分
Fig. 1　Division of superior and inferior grains of maize

### 1.3　测定项目与方法

#### 1.3.1　含水率和百粒重

每次机械脱粒前, 将玉米果穗按照图 1 的标准人为进行强、弱势粒划分后, 分别选取 15 个具有典型代表性的强、弱势粒果穗, 重复 3 次, 人工脱粒, 以 100 粒为单位称量籽粒的鲜重(6 次重复), 然后 80 ℃烘干至恒重, 称籽粒干重, 计算籽粒含水率。

#### 1.3.2　力学强度

选取 15 个具有典型代表性的强、弱势粒果穗, 然后根据粒重、大小和形状相近原则, 在每个果穗相同位置选取完整籽粒(强势粒选择中部籽粒), 然后用石家庄艾沃士科技有限公司生产的玉米茎秆强度测定仪(型号: AWOS-SL0, 500 N 量程), 采用圆形探测头(截面为 1 $cm^2$)和剪切刀测定并记录玉米籽粒顶面、侧面、胚部和腹面(图 2)被测头恰好压碎时和剪切裂开时仪器所显示的最大值(由于腹面有两个面, 为保证数据的准确性, 本研究中测定的是无胚的一面, 同时在测定腹面强度时, 选取的是平整性一致的籽粒)。对每一品种强、弱势粒各面压碎强度和剪切强度分别测定 45 粒, 每 15 粒为 1 个重复(所有力学测定采用同一台仪器和同一人员操作), 平行测定 3 次。

#### 1.3.3　破碎率

每次机械脱粒后, 将机仓内全部籽粒抽空并装袋。将装袋籽粒充分混匀后随机取 2 kg, 取 3 次, 参照“玉米收获机械 试验方法”(GBT-21961—2008[29]), 人工去除非籽粒部分, 再拣出机器损伤、有明显裂纹及破皮的籽粒, 分别称取破碎籽粒质量($W_s$)及样品籽粒总质量($W_i$), 按以下公式计算籽粒破碎率($Z_s$)。

$$Z_s(\%)=W_s/W_i\times100 \quad (1)$$

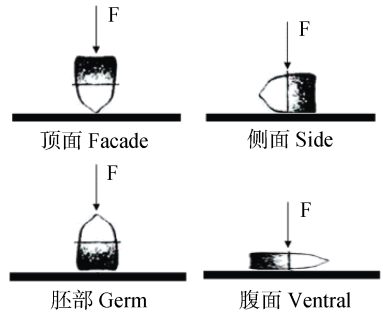


**图 2**　玉米籽粒力学强度受力(F)示意图
Fig. 2　Grains mechanical strength stress (F) diagram

#### 1.3.4　淀粉粒形态

选取代表性果穗, 将籽粒分强势粒和弱势粒后, 立即用 4%戊二醛前固定, 用 pH 6.8 的磷酸缓冲液漂洗, 再用 1%锇酸进行后固定, 然后分别用体积分数 30%、50%、70%、80%、90%的乙醇脱水, 再用 100%的乙醇脱水 3 次, 进行临界点干燥, 然后切片致使籽粒断裂(保证玉米籽粒成自然断裂状态), 采用英国 Quorum 离子溅射仪给样品喷金, 最后采用美国 Thermo Scientific™ Apreo S 型扫描电镜观察照相。

### 1.4　数据处理

采用 Excel 2013 对数据进行处理, SPSS Statistics17.0 软件进行统计分析, 差异显著性检验采用 Duncan 的 SSR 检验法, $P<0.05$ 被认为显著。采用 Origin 9.0 软件作图。

## 2　结果与分析

### 2.1　玉米强弱势粒机械脱粒破碎率变化

由图 3 可知, 随着机械脱粒日期的推迟, ‘仲玉 3 号’的强弱势粒机械脱粒破碎率均逐渐降低; ‘先玉 1171’的强势粒破碎率逐渐降低, 弱势粒破碎率逐渐增加。8 月 9 日、8 月 16 日和 8 月 23 日 3 个日期机械脱粒‘仲玉 3 号’的强势粒破碎率均小于弱势粒, 其绝对差值分别为 0.65%、0.35%、2.50%, 其中 8 月 23 日脱粒强弱势粒破碎率差异达显著水平($P<0.05$); 8 月 9 日脱粒‘先玉 1171’的强势粒破碎率显著大于弱势粒, 绝对差值为 5.27%, 8 月 16 日和 8 月 23 日脱粒强势粒破碎率均小于弱势粒, 绝对差值分别为 0.11%和 2.05%, 8 月 23 日脱粒强弱势粒破碎率差异达显著水平($P<0.05$)。

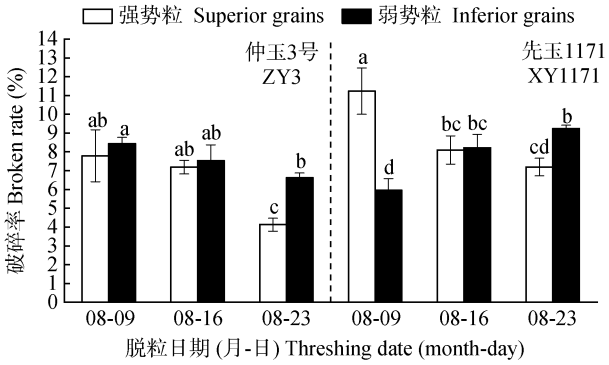


**图 3 不同机械脱粒日期不同玉米品种强弱势粒的破碎率**

Fig. 3 Broken rates of superior and inferior grains of different maize varieties mechanically threshed at different dates

图中不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters show significant differences at $P < 0.05$ level.

## 2.2 玉米强弱势粒含水率变化

‘仲玉 3 号’和‘先玉 1171’品种 3 个机械脱粒日期均表现为玉米强势粒含水率大于弱势粒，且随着日期推迟强弱势粒的含水率均逐渐降低(图 4)。3 个日期‘仲玉 3 号’的强(弱)势粒含水率分别为 32.80%(28.93%)、21.78%(17.98%)、18.74%(14.80%)，差异均达显著水平($P<0.05$)；3 个日期‘先玉 1171’的强(弱)势粒含水率分别为 30.64%(30.44%)、21.10%(19.64%)、18.50%(14.40%),在 8 月 16 日和 8 月 23 日强弱势粒含水率差异达显著水平($P<0.05$)。

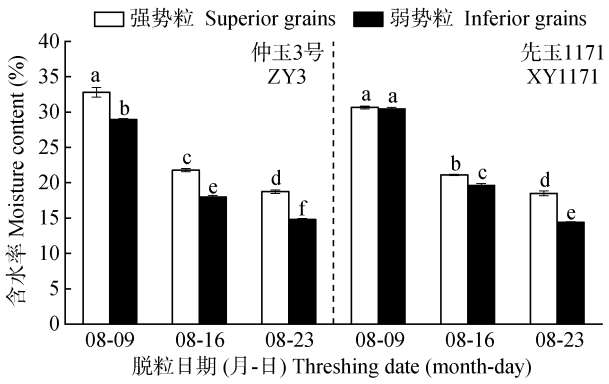


**图 4 不同机械脱粒日期不同玉米品种强弱势粒的含水率**

Fig. 4 Moisture contents of superior and inferior grains of different maize varieties mechanically threshed at different dates

图中不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters show significant differences at $P < 0.05$ level.

## 2.3 玉米强弱势粒百粒重变化

由图 5 可知，‘仲玉 3 号’和‘先玉 1171’品种 3 个机械脱粒日期均表现为玉米强势粒百粒重大于弱势粒，且差异达显著水平($P<0.05$)。‘仲玉 3 号’强弱势粒平均百粒重分别为 35.86 g 和 26.60 g，差值为 9.26 g；‘先玉 1171’强弱势粒平均百粒重分别为 35.16 g 和 25.53 g，差值为 9.63 g。

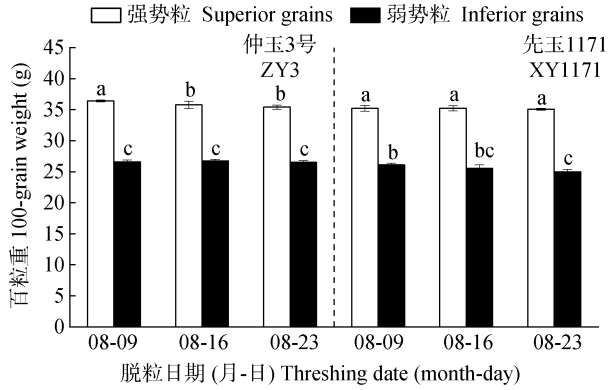


**图 5 不同机械脱粒日期不同玉米品种强弱势粒的百粒重**

Fig. 5 Hundred-grain weight of superior and inferior grains of different maize varieties mechanically threshed at different dates

图中不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters show significant differences at $P < 0.05$ level.

## 2.4 玉米强弱势粒力学强度变化

随着日期推迟强弱势粒各面压碎强度和剪切强度均呈逐渐增加的变化趋势(图 6)。两品种强弱势粒压碎强度在 3 个日期均表现为：腹面>顶面>侧面>胚部，且强势粒各面压碎强度大于弱势粒。‘仲玉 3 号’强势粒腹面、顶面、侧面和胚部压碎强度较弱势粒分别平均提高 16.53%、−1.67%、5.04%、4.80%；强弱势粒腹面压碎强度的差异在 3 个日期均达显著水平($P<0.05$)，顶面和侧面压碎强度强弱势粒间差异在 3 个日期均不显著。‘先玉 1171’强势粒腹面、顶面、侧面和胚部压碎强度较弱势粒分别平均提高 20.08%、13.17%、15.71%、21.31%，其中侧面和胚部压碎强度强弱势粒间的差异在 3 个日期均达显著水平($P<0.05$)。

两品种强弱势粒剪切强度在 3 个日期均表现出腹面最大，胚部最小，顶面和侧面在不同日期规律不明显，但两者间差异较小；强势粒腹面、顶面和侧面剪切强度均大于弱势粒。‘仲玉 3 号’强势粒腹面、顶面、侧面和胚部剪切强度较弱势粒分别平均提高 12.62%、3.58%、3.09%、−8.79%，强弱势粒腹面剪切强度的差异在 3 个日期均达显著($P<0.05$)，侧面剪切强度的差异在 3 个日期均不显著；‘先玉 1171’强势粒腹面、顶面、侧面和胚部剪切强度较弱势粒分别平均提高 32.31%、16.91%、25.19%、1.52%，腹面和侧面剪切强度强弱势粒间的差异在 3 个日期均达显著($P<0.05$)，而胚部剪切强度的差异在 3 个日期均不显著。

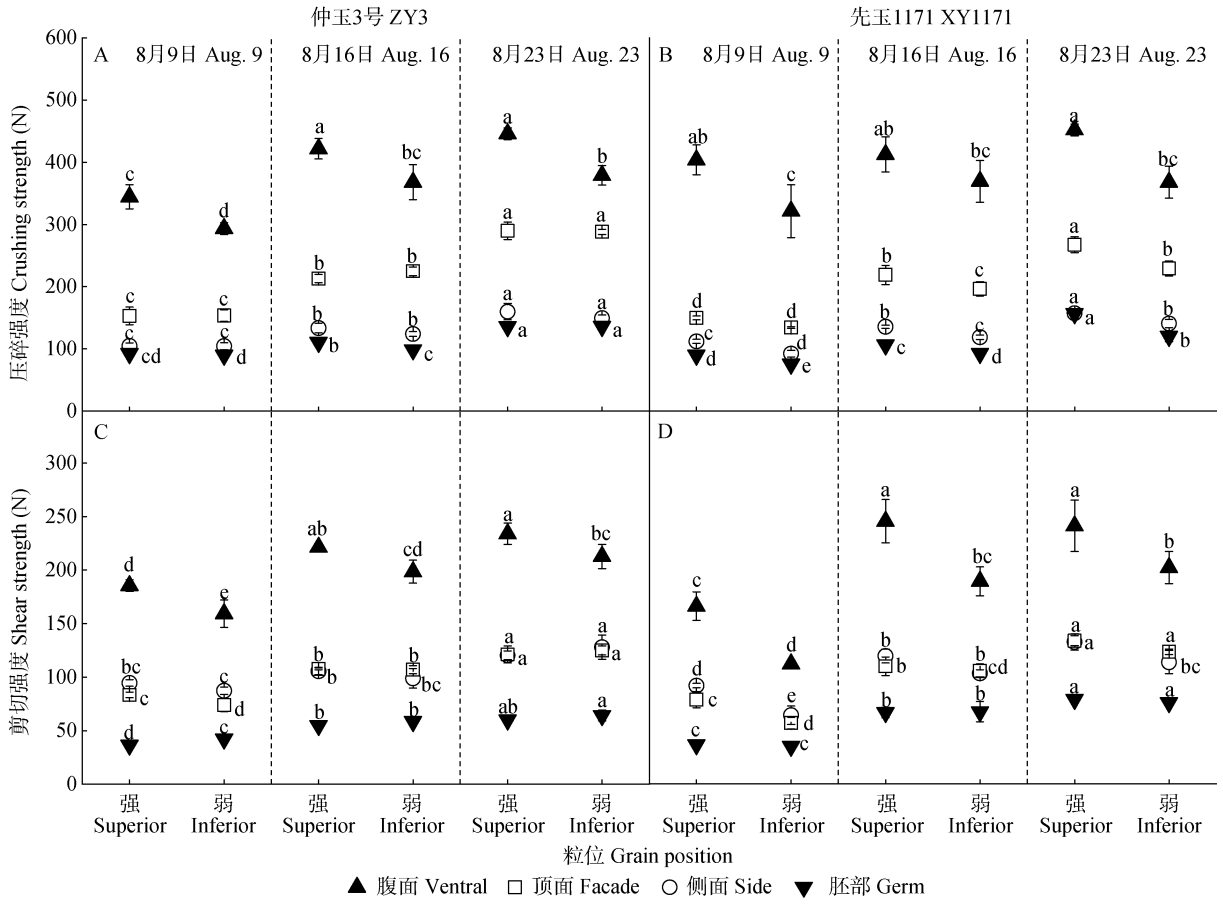


**图 6　不同机械脱粒日期不同玉米品种强弱势粒的力学强度**

Fig. 6　Mechanical strength indexes of superior and inferior grains of different maize varieties mechanically threshed at different dates

图中不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著；图中的方差分析仅限于同一品种同一指标不同日期的强弱势粒。Different lowercase letters show significant differences at $P < 0.05$ level. The analysis of variance in the figure is only limited to the superior and inferior grains of the same variety with the same index and different dates.

### 2.5　玉米强弱势粒机械脱粒破碎率与力学强度指标间的相关分析

玉米籽粒各力学强度指标均与破碎率呈负相关(图 7)，籽粒各面压碎强度与破碎率的相关系数均大于籽粒剪切强度，其中顶面压碎强度和胚部压碎强度与破碎率的负相关分别达极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)水平，表明通过测定籽粒顶面和胚部压碎强度可以更好地反映籽粒耐破碎能力。

### 2.6　玉米强弱势粒淀粉粒形态

用扫描电镜观察 2 个品种强弱势粒的淀粉粒形态，颗粒呈多面体和球体(图 8)。从图中可以看出，强弱势粒淀粉粒在大小和形态间存在明显差异。角质胚乳(A，B，E 和 F)的淀粉粒主要是多面体形状，但强势粒角质胚乳(A 和 E)的淀粉粒比弱势粒(B 和 F)大；粉质胚乳(C，D，G 和 H)的淀粉粒存在多面体和球体两种形式，但强势粒粉质胚乳(C 和 G)的淀粉粒以多面体所占比例较多，弱势粒(D 和 H)以球体所占比例较多，同时强势粒粉质胚乳的淀粉粒较弱势粒排列更为紧密。这些特性可以解释试验中所观察到的玉米强弱势粒百粒重差异[30]

## 3　讨论

### 3.1　粒重和力学强度差异是造成强弱势粒破碎率差异的重要因素

籽粒破碎率作为评价玉米机械粒收质量的主要指标[31]，其值偏高是当前中国玉米机械粒收技术发展的“瓶颈”性问题。收获时低的籽粒含水率能显著降低籽粒破碎[14,32-34]。本研究中，随着日期推迟，籽粒含水率下降，‘仲玉 3 号’的强弱势粒和‘先玉 1171’的强势粒破碎率均逐渐降低，说明籽粒含水率对籽粒耐破碎性有显著影响。Vyn 等[17]研究表明，圆形籽粒破碎率较扁平籽粒高，粒重越大，破碎敏感度(BS)越小，小粒比大粒品种更抗破碎。玉米籽粒的力学特性与机械脱粒性能关系密切，高的籽粒强度往往伴随着低的籽粒破碎[13,21,35-36]。本研究表明，在不同日期弱势粒的含水率、百粒重和力学强度均低于

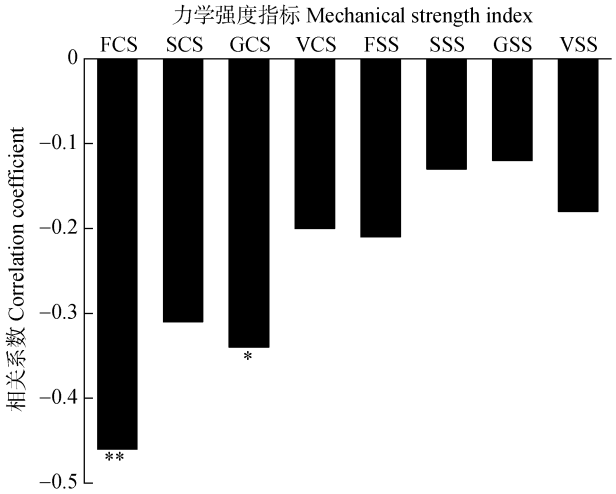


**图 7 玉米籽粒各力学强度指标与破碎率的相关系数**

Fig. 7 Correlation coefficient of maize grain mechanical strength index and broken rate

FCS: 顶面压碎强度; SCS: 侧面压碎强度; GCS: 胚部压碎强度; VCS: 腹面压碎强度; FSS: 顶面剪切强度; SSS: 侧面剪切强度; GSS: 胚部剪切强度; VSS: 腹面剪切强度。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。FCS: facade crushing strength; SCS: side crushing strength; GCS: germ crushing strength; VCS: ventral crushing strength; FSS: facade shear strength; SSS: side shear strength; GSS: germ shear strength; VSS: ventral shear strength. * and ** stand significant correlations at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ probability level, respectively.

强势粒，参试品种‘仲玉 3 号’在 3 个机械脱粒日期弱势粒的破碎率均高于强势粒，‘先玉 1171’在后 2 次机械脱粒日期弱势粒的破碎率也均高于强势粒。弱势粒的含水率低、粒形小，弱势粒的破碎率应较强势粒低，而本研究结果表明强势粒含水率高于弱势粒，然而除‘先玉 1171’第 1 次机械脱粒外，强势粒破碎率均低于弱势粒，说明含水率差异难以反映强弱势粒耐破碎能力的差异。试验中参试品种后 2 次机械脱粒的强弱势粒含水率在 14.38%~21.78%，是比较适宜的机械粒收含水率范围[16,37]。对强弱势粒百粒重、力学强度、破碎率的分析表明籽粒百粒重、力学强度越大破碎率越小，这与前人研究结果相符[13,17]。籽粒力学强度与破碎率存在负相关关系，对不同力学强度指标与破碎率的相关分析表明，籽粒顶面压碎强度和胚部压碎强度与破碎率呈极显著和显著负相关，可更好地反映籽粒耐破碎能力。可见，粒重和力学强度差异是造成强弱势粒破碎率差异的重要原因。

### 3.2 缩小强弱势粒充实度差异，提高果穗籽粒整齐度，有利于降低机械粒收破碎率

玉米果穗的不同粒位因库活性差异等原因，强弱势粒间的发育差异显著，弱势粒充实度不足。强弱势粒间往往表现出粒重、形态、体积、密度存在

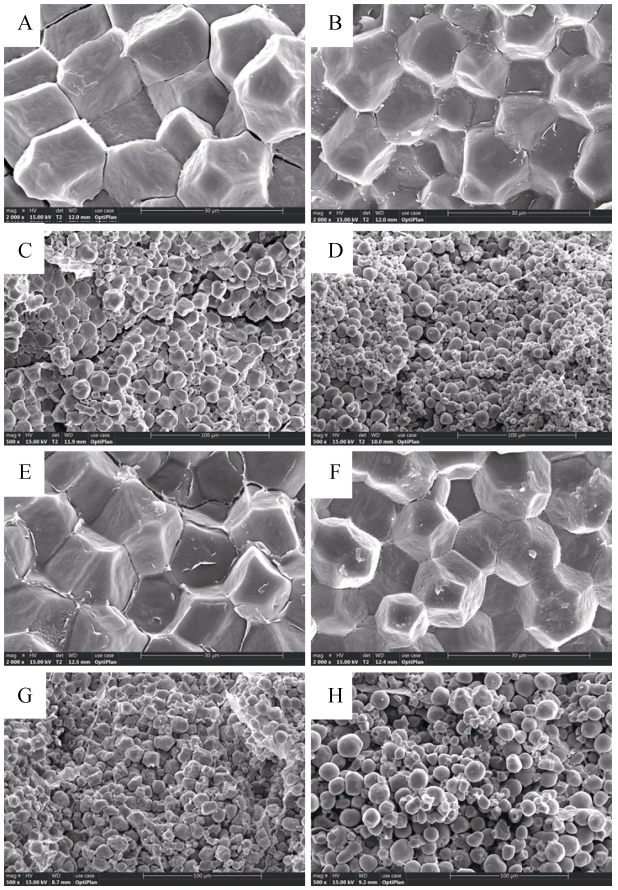


**图 8 ‘仲玉 3 号’和‘先玉 1171’强弱势粒淀粉粒镜检差异比较**

Fig. 8 Comparison of the microscopical examination differences between the superior and inferior grains of ‘Zhongyu 3’ and ‘Xianyu 1171’

A-D: 仲玉 3 号; E-H: 先玉 1171; A, C, E, G: 强势粒; B, D, F, H: 弱势粒; A, B, E, F: 角质胚乳(2 000×, 比例尺为 30 μm); C, D, G, H: 粉质胚乳(500×, 比例尺为 100 μm)。A-D: Zhongyu 3; E-H: Xianyu 1171; A, C, E and G: superior grains; B, D, F and H: inferior grains; A, B, E, F: horny endosperm (2 000×, scale bar = 30 μm); C, D, G, H: floury endosperm (500×, scale bar = 100 μm).

显著差异，强势粒密度较弱势粒大，同时强弱势粒内部淀粉粒体积分布也存在差异，强势粒的大淀粉粒明显较弱势粒多[30]。Kniep 等[38]研究表明，‘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。Hou等[23]利用X射线μCT扫描技术，得出籽粒密度和皮下空腔体积与籽粒破碎率分别呈显著负相关($-0.934^{**}$)和正相关($0.589^{*}$)。玉米籽粒力学性质很大程度上取决于胚乳的性质和角质胚乳与粉质胚乳的比例[39-40]，籽粒的空腔体主要存在于粉质胚乳中，粉质胚乳较大的品种籽粒空腔体较多，角质胚乳与粉质胚乳的比例越低，该品种密度越低，其破碎率也越高[23]。籽粒硬度与籽粒容重、粒重、密度、形状、粗细比、直链淀粉含量和醇溶蛋白含量等均有关[41-43]。强弱势粒的淀粉粒形状、

大小随氮肥梯度的变化可解释所观察到的籽粒密度和千粒重的提高, 从而使产量提高[30]。因此本研究中的强弱势粒淀粉粒形态特征也能有效阐述强弱势粒百粒重差异原因, 同时弱势粒的粉质胚乳多呈球体, 排列不够紧密, 可能造成空腔体积较大, 密度较低, 从而破碎率较高。因此, 弱势粒在灌浆阶段充实程度不够, 造成淀粉粒较小、排列疏松, 成分组织比例不佳, 密度和粒重低, 空腔体积较大, 从而导致力学强度(硬度)较小, 机械脱粒时破碎率较高; 而强势粒灌浆充实, 淀粉粒较大、排列紧密, 密度和粒重高, 具有较强的力学强度(硬度)和耐破碎能力, 机械脱粒时破碎率较低。综上可见, 玉米强弱势粒由于灌浆充实程度不同导致机械脱粒破碎率存在差异, 所以通过选择果穗籽粒整齐度高、灌浆充分的玉米品种以及科学合理的田间栽培措施(如: 抽雄后根系分区交替灌溉[44]、适当增加氮肥施用量[30,45]等)来优化弱势粒的灌浆, 提高弱势粒的充实程度, 提高力学强度, 可降低玉米机械粒收籽粒破碎率。在本研究中, 运用了电镜扫描技术, 但是缺乏单粒籽粒准确的数量化结果证据, 因此在今后的研究中, 可借助一些创新观测方法(例: CT扫描技术)得到强弱势粒内部结构的数量化证据, 以进一步系统性的阐述分析。

## 4　结论

玉米强弱势粒在机械脱粒时破碎率存在显著差异。这种差异主要是由于强弱势粒粒重和力学强度不同所造成, 而含水率的差异难以反映强弱势粒的耐破碎能力。强弱势粒内部淀粉粒的形态和排列方式存在差异。籽粒顶面压碎强度和胚部压碎强度与破碎率呈极显著和显著负相关($r$=–0.46**, $r$=–0.34*), 是较适宜的力学强度评价指标。

## 参考文献 References


[1] FAO. FAOSTAT: Agriculture database. FAO, Rome. 2019. http:/ /faostat.fao.org/

[2] 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, (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, (3): 265–272

[3] 王克如, 李少昆. 玉米机械粒收破碎率研究进展[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2018–2026
WANG K R, LI S K. Progresses in research on grain broken rate by mechanical grain harvesting[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2018–2026

[4] 张向前, 王瑞, 张瑞霞, 等. 内蒙古适宜籽粒机械化收获春玉米品种筛选[J]. 北方农业学报, 2018, 46(1): 25–29
ZHANG X Q, WANG R, ZHANG R X, et al. Screening varieties suitable for mechanical harvesting of spring maize kernel in Inner Mongolia[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(1): 25–29

[5] 薛军, 李璐璐, 张万旭, 等. 玉米穗轴机械强度及其对机械粒收籽粒破碎率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1868–1877
XUE J, LI L L, ZHANG W X, et al. Maize cob mechanical strength and its influence on kernel broken rate[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1868–1877

[6] 李少昆, 王克如, 裴志超, 等. 北京春玉米机械粒收质量影响因素研究及品种筛选[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 110–115
LI S K, WANG K R, PEI Z C, et al. Study on the influencing factors of maize mechanical grain harvest quality and cultivars selection in Beijing[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(6): 110–115

[7] 王克如, 李少昆, 王延波, 等. 辽宁中部适宜机械粒收玉米品种的筛选[J]. 作物杂志, 2018, (3): 97–102
WANG K R, LI S K, WANG Y B, et al. Screening maize varieties suitable for mechanical harvesting grain in the central Liaoning Province[J]. Crops, 2018, (3): 97–102

[8] SEHGAL S M, BROWN W L. Cob morphology and its relations to combine harvesting in maize[J]. Iowa Stage Journal of Science, 1965, 39(3): 251–268

[9] 李川, 乔江方, 谷利敏, 等. 影响玉米籽粒直接机械化收获质量的生物学性状分析[J]. 华北农学报, 2015, 30(6): 164–169
LI C, QIAO J F, GU L M, et al. Analysis of maize biological traits which affected corn kernel mechanically harvesting qualities[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(6): 164–169

[10] 易克传, 朱德文, 张新伟, 等. 含水率对玉米籽粒机械化直接收获的影响[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11): 78–80
YI K C, ZHU D W, ZHANG X W, et al. Effect of moisture content on corn grain harvesting mechanization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11): 78–80

[11] 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

[12] BAUER P J, CARTER P R. Effect of seeding date, plant density, moisture availability, and soil nitrogen fertility on maize kernel breakage susceptibility[J]. Crop Science, 1986, 26(6): 1220–1226

[13] 赵波, 李小龙, 周茂林, 等. 西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状及影响因素分析[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 74–83
ZHAO B, LI X L, ZHOU M L, et al. Current status and influencing factors of broken rate in mechanical grain harvesting of maize in Southwest China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(1): 74–83

[14] 李璐璐, 雷晓鹏, 谢瑞芝, 等. 夏玉米机械粒收质量影响因

素分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2044–2051
LI L L, LEI X P, XIE R Z, et al. Analysis of influential factors on mechanical grain harvest quality of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2044–2051

[15] 柴宗文, 王克如, 郭银巧, 等. 玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2036–2043
CHAI Z W, WANG K R, GUO Y Q, et al. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2036–2043

[16] 孔凡磊, 赵波, 吴雅薇, 等. 收获时期对四川春玉米机械粒收质量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 50–56
KONG F L, ZHAO B, WU Y W, et al. Effects of harvesting date on mechanical grain-harvesting quality of spring maize in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 50–56

[17] VYN T J, MOES J. Breakage susceptibility of corn kernels in relation to crop management under long growing season conditions[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(6): 915–920

[18] DUARTE A P, MASON SC, JACKSON DS, et al. Grain quality of Brazilian maize genotypes as influenced by nitrogen level[J]. Crop Science, 2005, 45(5): 1958–1964

[19] TSAI C Y, HUBER D M, GLOVER D V, et al. Relationship of N deposition to grain yield and N response of three maize hybrids[J]. Crop Science, 1984, 24(2): 277–281

[20] LEFORD D R, RUSSELL W A. Evaluation of physical grain quality in the BS17 and BSI (HS)CI synthetics of maize[J]. Crop Science, 1985, 25(3): 471–476

[21] MARTIN C R, CONVERSE H H, CZUCHAJOWSKA Z, et al. Breakage susceptibility and hardness of corn kernels of various sizes and shapes[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1987, 3(1): 104–113

[22] WANG B, WANG J. Mechanical properties of maize kernel horny endosperm, floury endosperm and germ[J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 863–877

[23] HOU J F, ZHANG Y, JIN X L, et al. Structural parameters for X-ray micro-computed tomography (μCT) and their relationship with the breakage rate of maize varieties[J]. Plant Methods, 2019, 15(1): 1–11

[24] KATO T. Effect of spikelet removal on the grain filling of akenohoshi, a rice cultivar with numerous spikelets in a panicle[J]. The Journal of Agricultural Science, 2004, 142(2): 177–181

[25] YANG J C, ZHANG J H, WANG Z Q, et al. Post-anthesis development of inferior and superior spikelets in rice in relation to abscisic acid and ethylene[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(1): 149–160

[26] YANG J C, ZHANG J H, WANG Z Q, et al. Activities of key enzymes in sucrose-to-starch conversion in wheat grains subjected to water deficit during grain filling[J]. Plant Physiology, 2004, 135(3): 1621–1629

[27] YANG J C, ZHANG J H, WANG Z Q, et al. Activities of enzymes involved in sucrose-to-starch metabolism in rice grains subjected to water stress during filling[J]. Field Crops Research, 2003, 81(1): 69–81

[28] 李木英, 石庆华, 胡志红, 等. 高温胁迫对不同早稻品种胚乳淀粉合成酶类活性的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1622–1629
LI M Y, SHI Q H, HU Z H, et al. Effects of high temperature stress on activity of amylosynthease in endosperm of early *Indica* rice varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1622–1629

[29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T21961–2008 玉米收获机械 试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; Standardization Administration of People's Republic of China. GB/T21961–2008 Test Methods for Maize Combine Harvester[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008

[30] ZHAO F C, JING L Q, WANG D C, et al. Grain and starch granule morphology in superior and inferior kernels of maize in response to nitrogen[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6343

[31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21962–2008 玉米收获机械 技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; Standardization Administration of People's Republic of China. GB/T 21962–2008 Technical Requirements for Maize Combine Harvester[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008

[32] 谢瑞芝, 雷晓鹏, 王克如, 等. 黄淮海夏玉米子粒机械收获研究初报[J]. , 作物杂志, 2014, (2): 76–79
XIE R Z, LEI X P, WANG K R, et al. Research on corn mechanically harvesting grain quality in Huanghuaihai Plain[J]. Crops, 2014, (2): 76–79

[33] WAELTI H, BUCHELE W F. Factors affecting corn kernel damage combine cylinders[J]. Transactions of the ASAE, 1969, 12(1): 55–59

[34] JOHNSON D Q, RUSSELL W A. Genetic variability and relationships of physical grain-quality traits in the BSSS population of maize[J]. Crop Science, 1982, 22(4): 805–809

[35] 袁月明, 栾玉振. 玉米籽粒力学性质的试验研究[J]. 吉林农业大学学报, 1996, 18(4): 75–78
YUAN Y M, LUAN Y Z. Experimental investigation of mechanical properties for corn kernels[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1996, 18(4): 75–78

[36] 张永丽, 高连兴, 刘红力, 等. 玉米籽粒剪切破碎的试验研究[J]. 农机化研究, 2007, (5): 136–138
ZHANG Y L, GAO L X, LIU H L, et al. Experimental study on corn kernel shear crash[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, (5): 136–138

[37] 李璐璐, 薛军, 谢瑞芝, 等. 夏玉米籽粒含水率对机械粒收质量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(12): 1747–1754
LI L L, XUE J, XIE R Z, et al. Effects of grain moisture content on mechanical grain harvesting quality of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1747–1754

[38] KNIEP K R, MASON S C. Kernel breakage and density of normal and Opaque-2 maize grain as influenced by irrigation and nitrogen[J]. Crop Science, 1989, 29(1): 158–163

[39] WANG B, WANG J. Mechanical properties of maize kernel horny endosperm, floury endosperm and germ[J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 863–877

[40] 董朋飞, 郭亚南, 王克如, 等. 玉米子粒耐破碎性及其评价与测试方法[J]. 玉米科学, 2016, 26(4): 79–84
DONG P F, GUO Y N, WANG K R, et al. Evaluation and determination of maize kernel breakage tolerance[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 26(4): 79–84

[41] FOX G, MANLEY M. Hardness methods for testing maize kernels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(13): 5647–5657

[42] DOMBRINK-KURTZMAN M A, KNUTSON C A. A study of maize endosperm hardness in relation to amylose content and susceptibility to damage[J]. Cereal Chemistry, 1997, 74(6): 776–780

[43] CERRUDO A, MARTINEZ D, IZQUIERDO N G, et al. Environment, management, and genetic contributions to maize kernel hardness and grain yield[J]. Crop Science, 2017, 57(5): 2788–2798

[44] 徐云姬, 钱希旸, 李银银, 等. 根系分区交替灌溉对玉米籽粒灌浆及相关生理特性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(2): 230–242
XU Y J, QIAN X Y, LI Y Y, et al. Effect of alternate irrigation in partitioned roots on the kernel-filling and its related physiological characteristics in maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(2): 230–242

[45] 魏亚萍. 氮肥对夏玉米籽粒库容建成和充实的影响机理[D]. 北京: 中国农业大学, 2004
WEI Y P. Effect of nitrogen on the kernel sink development in summer maize (*Zea mays* L.)[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004