

# 玉米脱粒破碎率关键影响因子及其最优预测模型研究

姜春雨<sup>1</sup>, 李银昌<sup>1</sup>, 杨锦忠<sup>1</sup>, 朱如华<sup>1</sup>, 丁山<sup>1</sup>, 宋朝玉<sup>2</sup>, 王圣健<sup>2</sup>

(1. 青岛农业大学农学院/山东省旱作农业技术重点实验室, 青岛 266109; 2. 青岛市农业科学院, 青岛 266071)

**摘要:** 子粒破碎率高是当前中国玉米机械收获子粒的重要限制因素, 解析破碎率变化原因, 建立其简便预测模型是需要解决的重要问题。本文采集 7 个玉米品种在 3 个种植密度下组合的果穗, 在不同子粒含水率梯度条件下开展单穗脱粒试验。种植密度在 6 万 ~ 9 万株/hm<sup>2</sup> 范围内对子粒破碎率没有影响, 品种、子粒的含水率、抗侧压碎力和穿刺强度等的影响均达到统计显著水平。品种对破碎率变化的偏贡献率为 12.7%, 且品种的偏贡献率 < 子粒含水率的偏贡献率 < 抗侧压碎力的偏贡献率 < 穿刺强度的偏贡献率, 种植密度的偏贡献率接近于零。破碎率的最优预测因子是穿刺强度, 预测模型: 破碎率 =  $10.25 \times 0.990^{\text{穿刺强度}}$ , 满足破碎率不高于 5% 约束的穿刺强度值不得低于 60 MPa。研究成果可为玉米破碎率预测、宜机收玉米新品种培育与鉴定、脱粒机具设计与制造提供数据支撑和技术参考。

**关键词:** 玉米; 子粒破碎率; 子粒机械收获; 子粒含水率; 子粒力学特性

中图分类号: S513.091

文献标识码: A

## Factors Influencing the Broken Rates of Kernels under Mechanical Shelling and the Optimum Predicting Model to Estimate Broken Rates in Maize

JIANG Chun-yu<sup>1</sup>, LI Yin-chang<sup>1</sup>, YANG Jin-zhong<sup>1</sup>, ZHU Ru-hua<sup>1</sup>, DING Shan<sup>1</sup>,  
SONG Zhao-yu<sup>2</sup>, WANG Sheng-jian<sup>2</sup>

(1. Agronomy College, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109;

2. Qingdao Academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** High broken rates of machine-harvested kernels are one of the most important limiting factors for maize product quality in China. This paper aimed at evaluating biophysical factors influencing the broken rates of kernels under mechanical shelling and building single factor models for the prediction of broken rates. Ears with an assign set of different moisture levels, from 7 maize cultivars grown at 3 plant densities, were subject to shelling tests using the same machine. Plant densities from 60 000 to 90 000 plant/ha didn't influence broken rates, but maize cultivar, kernel moisture, kernel side crushing forces, and kernel puncture strength did at statistically significant levels. In respect of effect sizes of different factors for broken rates, the total contribution of maize cultivars was smaller than that of kernel moisture to variations in kernel broken rates. Kernel moisture contributed less than both of side crushing forces and puncture strength, and side crushing forces did less than puncture strength. The contribution of plant densities to broken rate variation was close to zero. Kernel puncture strength was the optimum predictor to estimate broken rates, their relation reads as: broken rate =  $10.25 \times 0.990^{(\text{puncture strength})}$ . Value 60 MPa of puncture strength is a lower limit to reach a broken rate of no more than 5%. To sum up, kernel strength affected kernel broken rate more than cultivar did, and plant density didn't. The study provides useful information and an approach for broken rate estimation, screening of new maize cultivars suitable to mechanical kernel harvesting, shelling machine design, and manufacture.

**Key words:** Maize; Kernel broken rate; Mechanical kernel harvesting; Kernel moisture; Kernel mechanical trait

录用日期: 2019-05-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300306)

作者简介: 姜春雨, 主要从事玉米生理研究。E-mail: 1275800357@qq.com

杨锦忠为本文通讯作者。E-mail: jzyang@qau.edu.cn

玉米是我国第一大粮食作物,在保障我国粮食安全中具有重要战略地位。随着农村城镇化进程加快,大量农业劳动力向城市转移,同时劳动力成本也不断上涨,玉米生产的高产高效受到严重挑战。加快玉米田间机械收获子粒技术研发与推广,转变生产方式,实现玉米生产全程机械化,是应对挑战的一条必经之路。中国玉米田间脱粒破碎率高,已经成为机械收获子粒的重要限制因素<sup>[1]</sup>。明确脱粒破碎率的变化规律,探索其简便预测模型,对于加快推广和普及玉米子粒机收具有重要意义。

子粒破碎不仅发生于脱粒环节,还发生于干燥、贮藏、运输和其他加工环节,中外学者就此开展了较多研究。破碎率同时受到玉米自身和脱粒机具的影响。许多文献从玉米角度开展了研究,其中,最多的是关于子粒含水率对玉米子粒破碎的影响<sup>[2-6]</sup>。Dutta研究子粒含水率和玉米品种等因子对子粒易碎性(breakage susceptibility)的影响<sup>[7]</sup>。Waelti等分析子粒含水率、脱粒力、子粒强度、子粒破碎前后的厚度、穗轴含水率和强度、果穗破碎前后的粗度、子粒横截面积、子粒应力和应变、果穗应变、穗与轴直径比,穗长和穗粗等16个因子对脱粒破碎率的影响<sup>[8]</sup>。联合收获机脱粒机构的滚筒类型、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破碎率<sup>[9]</sup>。李心平等探索了玉米果穗喂入形式与子粒破碎率的关系<sup>[10]</sup>。

子粒破碎是一种物理现象,是子粒遭受外力大于其抵抗能力的结果,这方面的试验研究相对薄弱,有必要深入探索破碎率与子粒力学性状的关系。本文采集7个玉米品种在3个种植密度下组合的果穗,在不同子粒含水率梯度条件下进行脱粒试验,分析子粒力学特性对脱粒破碎率的作用及品种和子粒含水率对子粒力学特性的作用,预测脱粒破碎率的最优力学性状,为玉米破碎率预测、宜机收玉米新品种培育与鉴定、脱粒机具设计与制造提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 田间试验与试材培育

田间试验共种植7个玉米品种,分别为郑单958、迪卡517、新单68、创玉107、利单618、粒收1号、丰垦139,各设置6.0万、7.5万、9.0万株/hm<sup>2</sup>共3个种植密度。试验于2017年在青岛农业大学胶州基地进行,试验地土壤类型为砂姜黑土。麦收后采用人工点播方式播种,6月20日播种,其他管理措施同当地大田生产。在玉米生理成熟后采集代表性果穗备用。

### 1.2 室内测定

果穗含水率共设置6个梯度,分别为13%、18%、24%、26%、28%、30%,采用水浸果穗法,通过连续称重监测脱水动态控制至目标含水率,获得不同含水率的子粒。每个梯度3次重复。采用同一个轴流式单穗脱粒机脱粒,统计子粒破碎率,烘干法测定子粒含水率。

从每个果穗中选择完整无损的、具有典型形状的14颗子粒,其中7颗测定穿刺强度,另7颗测定抗侧压碎力,均使用YYD-1B测力仪进行测试。穿刺针为平头,面积为1 mm<sup>2</sup>。子粒有胚一面朝下平放,针头垂直刺向子粒中央,缓慢匀速穿透子粒表皮,记录压力峰值,除以面积得到压强值,即穿刺强度。压力头为平头圆柱,底面积为75 mm<sup>2</sup>。子粒侧向立放,压头垂直缓慢匀速下压,直至子粒破碎,记录压力峰值,即抗压碎力。

### 1.3 数据处理与分析

采用通用线性模型进行协方差分析。在构建数据模型时,未将含水率、抗侧压碎力和穿刺强度纳入同一模型。破碎率的总变异=品种引起的变异+种植密度引起的变异+子粒含水率引起的变异+误差,以综合分析品种、种植密度、子粒含水率对破碎率的作用。分析子粒力学特性等因子对破碎率的作用时也采用类似的数据模型。

数据的预备分析表明,对子粒的破碎率、侧压碎率和穿刺强度进行对数转换,改善其误差同质性、正态性,并且提高模型拟合的精确度。

各种因子的作用即效应大小(Effect size),用因子的贡献率表示,通过方差分析结果进行计算<sup>[11-12]</sup>。因子的总贡献率(Squared omega  $\omega^2$ )为:

$$\omega^2 = \frac{df_{effect} \times (MS_{effect} - MS_{error})}{SS_{total} + MS_{error}} \quad (1)$$

因子的偏贡献率(Partial squared omega  $\omega_p^2$ )为:

$$\omega_p^2 = \frac{df_{effect} \times (MS_{effect} - MS_{error})}{df_{effect} \times MS_{effect} + (N - df_{effect}) \times MS_{error}} \quad (2)$$

式中,df表示自由度,MS表示均方,effect表示效应项,error表示误差项,total表示总变异。

脱粒破碎率的单因子预测采用稳健回归分析法,以消除可能存在的异常观察值的干扰。候选的预测因子分别为子粒的含水率、抗侧压碎力和穿刺强度。

## 2 结果与分析

### 2.1 品种、种植密度和子粒含水率对破碎率的作用分析

子粒破碎率是反映玉米机械收获子粒质量的一个重要指标。从表1的F检验结果可以看出,品种和子粒含水率对破碎率的作用均达到统计显著水平,种植密度的作用则不显著( $P=0.392$ )。含水率的参数值大于零,其值为0.076,说明随着子粒水分的增加,破碎率随之增加。

总贡献率表示某因子的作用占总作用的比例,偏贡献率表示某因子的作用占总偏作用的比例。总

作用包括模型其他因子的作用,总偏作用则不包括模型其他因子的作用。二者从不同角度反映因子的作用大小,并且均是无量纲的纯数。表1表明,在校正子粒含水率的作用之后,品种对子粒破碎率的总贡献率达10%,不足含水率贡献率22.9%的一半,说明子粒含水率对破碎率的影响显著大于品种。偏贡献率的数值也呈现出类似趋势。

表1 子粒含水率等因子对脱粒破碎率作用的协方差分析与效应比较  
Table 1 Covariance analysis for effects on kernel broken rates of kernel moisture etc. factors

| 变异来源<br>Source of variation | 参数值<br>Estimate     | $P>F$    | 总贡献率<br>Total contribution, $\omega^2$ | 偏贡献率<br>Partial contribution, $\omega^2_p$ |
|-----------------------------|---------------------|----------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| 品 种                         | --                  | <0.000 1 | 0.100                                  | 0.127                                      |
| 密 度                         | $2.79\times10^{-5}$ | 0.392 0  | -0.001                                 | -0.001                                     |
| 子粒含水率                       | 0.076               | <0.000 1 | 0.229                                  | 0.250                                      |

2.2 品种、种植密度和子粒力学特性对破碎率的作用分析

2.2.1 品种、种植密度和子粒抗侧压碎力的作用

品种和子粒抗侧压碎力对破碎率的作用均达到统计显著水平(表2),种植密度的作用则不显著( $P=0.518$ )。抗侧压碎力的参数值小于零,其数值等于-1.209,意味着抗侧压碎力越大,则破碎率越小。在品种、种植密度和抗侧压碎力3个因子中,抗侧压碎力拥有最大的总贡献率,高达30.7%,相当于品种贡献率的3.4倍,说明抗侧压碎力对破碎率的影响占绝对优势地位。在校正种植密度和抗侧压碎力的作

用之后,品种对破碎率的总贡献率为8.8%。

2.2.2 品种、种植密度和子粒穿刺强度的作用

表3表明,品种和子粒穿刺强度对破碎率的作用达到统计显著水平,种植密度的作用不显著( $P=0.670$ )。穿刺强度的参数值小于零,其数值为-0.715,意味着穿刺强度越大,则破碎率越小。

在品种、种植密度和穿刺强度3个因子中,穿刺强度拥有最大的总贡献率,高达34.5%,相当于品种贡献率的4倍多,说明穿刺强度对破碎率的影响占绝对优势地位。在校正种植密度和穿刺强度的作用之后,品种对破碎率的总贡献率为8.3%(表3)。

表2 子粒抗侧压碎力等因子对脱粒破碎率作用的协方差分析与效应比较  
Table 2 Covariance analysis for effects on kernel broken rates of kernel side crushing force etc. factors

| 变异来源<br>Source of variation | 参数值<br>Estimate      | $Pr>F$   | 总贡献率<br>Total contribution, $\omega^2$ | 偏贡献率<br>Partial contribution, $\omega^2_p$ |
|-----------------------------|----------------------|----------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| 品 种                         | --                   | <0.000 1 | 0.088                                  | 0.127                                      |
| 密 度                         | $-1.98\times10^{-5}$ | 0.518 0  | -0.001                                 | -0.002                                     |
| 抗侧压碎力                       | -1.209               | <0.000 1 | 0.307                                  | 0.336                                      |

表3 子粒穿刺强度等因子对脱粒破碎率作用的协方差分析与效应比较  
Table 3 Covariance analysis for effects on kernel broken rates of kernel puncture strength etc. factors

| 变异来源<br>Source of variation | 参数值<br>Estimate      | $Pr>F$   | 总贡献率<br>Total contribution, $\omega^2$ | 偏贡献率<br>Partial contribution, $\omega^2_p$ |
|-----------------------------|----------------------|----------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| 品种                          | --                   | <0.000 1 | 0.083                                  | 0.128                                      |
| 密度                          | $-1.26\times10^{-5}$ | 0.670 0  | -0.001                                 | -0.002                                     |
| 穿刺强度                        | -0.715               | <0.000 1 | 0.345                                  | 0.378                                      |

## 2.3 子粒含水率对力学特性的作用分析

### 2.3.1 抗侧压碎力

通过稳健回归分析发现,子粒抗侧压碎力的对数值是含水率的线性减函数,抗侧压碎力随含水率增加呈指数式下降,含水率能够解释抗侧压碎力变

化的35.9%(图1)。

### 2.3.2 穿刺强度

通过稳健回归分析发现,子粒穿刺强度的对数值是含水率的线性减函数,穿刺强度随含水率增加呈指数式下降,含水率能够解释穿刺强度变化的68.6%(图2)。

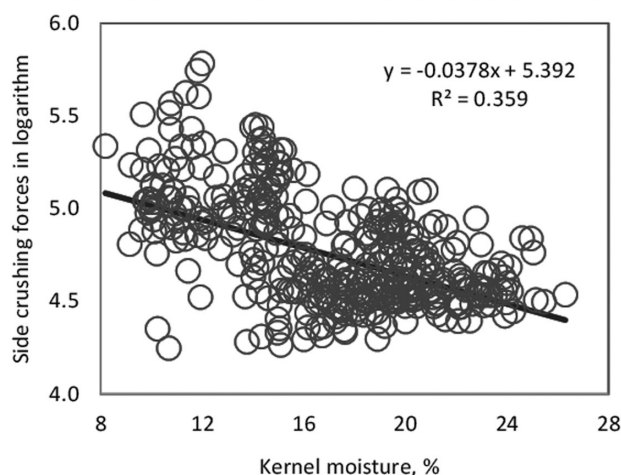


图1 子粒抗侧压碎力与含水率的指数式减函数

Fig.1 Kernel side crushing forces as an exponential decreasing function of kernel moisture

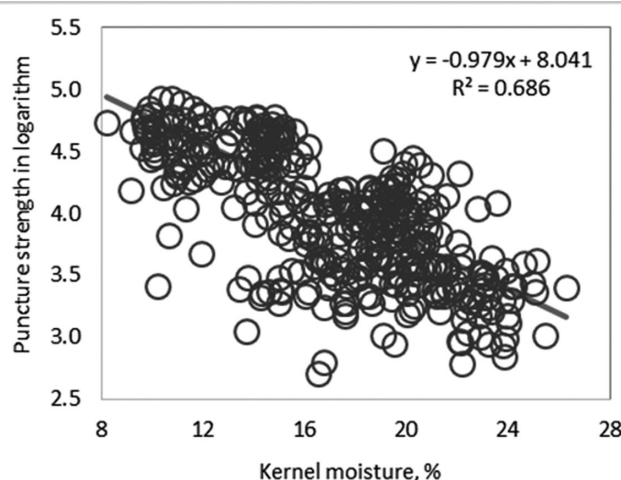


图2 子粒穿刺强度与含水率的指数式减函数

Fig.2 Kernel puncture strength as an exponential decreasing function of kernel moisture

综上所述,子粒的穿刺强度与含水率的相关性,高于抗侧压碎力与含水率的相关性,说明穿刺强度比抗侧压碎力更容易受到含水率的影响。

### 2.4 破碎率预测因子筛选

为解决实际工作中脱粒破碎率的简捷预测问题,分别将子粒的侧压碎率、穿刺强度和含水率作为预测因子,进行稳健回归分析(表4)。利用抗侧压碎力预测破碎率的局部最优模型是 $y=1.910x^{-1.26}$ ,可解释破碎率变化的36.9%;穿刺强度作为预测因子的

局部最优模型是 $y=10.25 \times 0.990^x$ ,解释能力为39.9%;通过含水率预测破碎率的局部最优模型是 $y=1.153 \times 1.081^x$ ,解释能力为30.8%。综合以上分析可知,全局最优模型就是穿刺强度的局部最优模型(图3)。

按照国家标准 GB/T 21962-2008,要求机械收粒的子粒破碎率不高于5%。根据全局最优模型 $y=10.25 \times 0.990^x$ ,当 $y$ 即破碎率等于5%时,有 $x$ 即穿刺强度等于59.8 MPa。当子粒穿刺强度不低于约60 MPa时,可达到破碎率不高于5%的脱粒要求。



表4 脱粒破碎率的单因子预测模型评价与筛选

Table 4 Screening of optimum models predicting kernel broken rates using single predictors

| 预测因子 <i>x</i><br>Predictor <i>x</i> | 模 型<br>Model           | 决定系数<br><i>R</i> <sup>2</sup> | 局部最优<br>Local optimum | 5%破碎率的 <i>x</i><br><i>x</i> critical values |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| 抗侧压碎力                               | $y=1\,910x^{-1.26}$    | 0.369                         | 最优                    | 111 N                                       |
| 抗侧压碎力                               | $y=13.96\times0.991^x$ | 0.336                         | 否                     | 115 N                                       |
| 抗侧压碎力                               | $y=6.40-0.018x$        | 0.214                         | 否                     | 76 N                                        |
| 穿刺强度                                | $y=129.6x^{-0.816}$    | 0.396                         | 否                     | 53.9 MPa                                    |
| 穿刺强度                                | $y=10.25\times0.990^x$ | 0.399                         | 最优                    | 59.8 MPa                                    |
| 穿刺强度                                | $y=6.15-0.031x$        | 0.247                         | 否                     | 37.2 MPa                                    |
| 含水率                                 | $y=0.172x^{1.165}$     | 0.289                         | 否                     | 18%                                         |
| 含水率                                 | $y=1.153\times1.081^x$ | 0.308                         | 最优                    | 19%                                         |
| 含水率                                 | $y=-0.237+0.255x$      | 0.213                         | 否                     | 21%                                         |

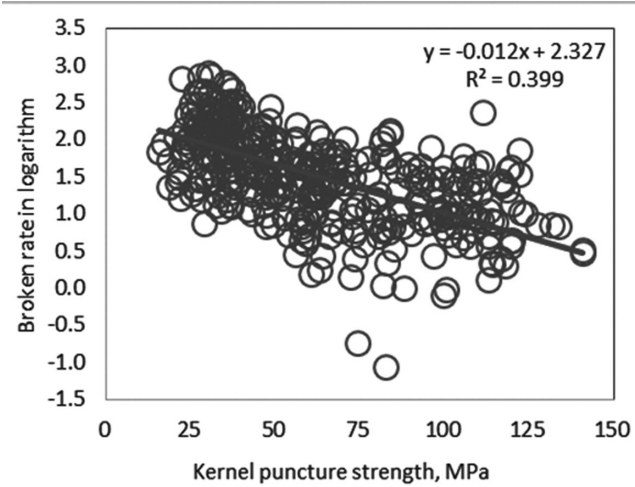


图3 脱粒破碎率是穿刺强度的指数式减函数

Fig.3 Kernel broken rates as an exponential decreasing function of puncture strength

3 结论与讨论

3.1 子粒含水率对破碎率的作用

有许多文献研究了子粒含水率对破碎率的作用,子粒含水率越高则破碎率越大。要实现破碎率低于3%的目标,含水率应控制在28%以下。PLETT对采用6个玉米品种进行研究,发现破碎率与含水率呈显著正相关。本研究采用7个玉米品种试验发现,破碎率随含水率增加而增加。

3.2 品种、种植密度、子粒含水率或者力学特性对破碎率的相对贡献

研究发现品种、子粒含水率或者力学特性对破碎率的作用都是显著的。事实上,这种显著性,无论其概率值多么小,仅仅具有统计意义,即只是表明某因子作用的存在,无法提供作用大小的信息,不能反映因子作用的实质重要性<sup>[13]</sup>。所以,根据统计检验的显著性无法直接比较不同因子的重要性,尤其是

在统计显著情形下的相对重要性。通过计算因子的效应大小反映因子作用的实质重要性,总贡献率和偏贡献率都能够反映效应大小的指标,偏贡献率还可以用来比较不同研究的结果。

本研究根据总贡献率数值大小比较,发现无论在哪一种分析模型框架下,玉米品种对破碎率的作用都小于子粒含水率,或者抗侧压碎力,或者穿刺强度,种植密度的作用都不存在(未达到统计显著水平)。本研究根据偏贡献率数值大小比较,还发现子粒含水率对破碎率的作用幅度小于抗侧压碎力的,抗侧压碎力的作用幅度又小于穿刺强度的。显然,子粒力学特性的作用都大于含水率的作用,这是因为子粒破碎是一种材料力学现象,力学特性能够反映其本质,含水率只是影响力学特性的一个因子,它只是反映了化学组成。本研究发现品种的偏贡献率约12.7%,这意味着通过育种手段,培育低脱粒破碎率的玉米品种,对于提高收获质量将起到一定作用。

### 3.3 子粒力学特性比含水率有更优的破碎率预测能力

子粒破碎率作为一项重要的玉米收获质量指标,在玉米新品种选育和脱粒机械设计与制造有重要应用价值。由于脱粒试验费工费成本高,所以,通过其他因子估算破碎率是一条可行的替代途径。PAULSEN 提出通过含水率估算破碎率的公式,破碎率 $=171.3 \times \text{EXP}(-0.29 \times \text{含水率})$ 。王克如等给出的估算公式,破碎率 $=0.0372 \times \text{含水率}^2 - 1.483 \times \text{含水率} + 20.42$ 。本研究发现,采用含水率估算破碎率的精度明显低于采用穿刺强度估算的精度,通过穿刺强度预测破碎率的公式,破碎率 $=10.25 \times 0.990^{\text{穿刺强度}}$ 。含水率变化引起玉米子粒内部生物大分子构型和相互作用发生改变,从而导致子粒穿刺强度等力学特性的改变,最终表现为脱粒破碎率的差异。也就是说,穿刺强度等力学特性因子是破碎率变化的直接原因,含水率只不过是间接原因。

由于子粒的含水率对穿刺强度有巨大影响,因此,从实用角度看,评价玉米新品种的穿刺强度时,务必控制子粒含水量。

#### 参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] 易克传,朱德文,张新伟,等.含水率对玉米子粒机械化直接收获的影响[J].中国农机化学报,2016,37(11):87-89.  
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): 87-89. (in Chinese)
- [3] 范国昌,王惠新,籍俊杰,等.影响玉米摘穗过程中子粒破碎和子粒损失率的因素分析[J].农业工程学报,2002(4):72-74.  
Fan G C, Wang H X, Ji J J, et al. Analysis of influence factor on seed damage rate and loss rate during picking corn-cob[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002(4): 72-74. (in Chinese)
- [4] Plett S. Corn kernel breakage as a function of grain moisture at harvest in a prairie environment[J]. Canada Journal Plant Science, 1994, 74(3): 543-544.
- [5] Paulsen M R. Corn breakage susceptibility as a function of moisture content[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1983: 83-3078.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Waelti H, Buchele W F. Factors affecting corn kernel damage in combine cylinders. Transactions of the ASAE, 1969: 55-59.
- [9] 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.
- [10] 李心平,高春燕,刘赢,等.玉米果穗喂入形式与子粒破碎率的关系研究[J].农机化研究,2013,35(12):137-140.  
Li X P, Gao C Y, Liu Y, et al. Study on relationship of feeding form of corn ear and breaking damage rate of corn kernels[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 137-140. (in Chinese)
- [11] Olejnik S, Algina J. Measures of effect size for comparative studies: applications, interpretations, and limitations[J]. Contemporary Education Psychology, 2000, 25, 241-286. doi:10.1006/ceps.2000.1040.
- [12] Daniel L. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science[J]. Front. Psychol., 2013, 26, 863. doi:10.3389/fpsyg.2013.00863.
- [13] 杨锦忠,宋希云.单一响应变量统计分析在烟草学研究中应用的若干问题[J].中国烟草学报,2014,20(4):108-114.  
Yang J Z, Song X Y. Guides to statistical techniques for single response variables in tobacco science research[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2014, 20(4): 108-114. (in Chinese)

(责任编辑:栾天宇)