DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.93026

西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状及影响因素分析

赵 波¹ 李小龙¹ 周茂林² 宋 碧³ 雷 恩⁴ 李 钟⁵ 吴雅薇¹
袁继超¹ 孔凡磊^{1,*}

¹四川农业大学农学院 / 作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川成都 611130; ²重庆市农业科学院玉米研究所, 重庆 401329;
³贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; ⁴红河学院, 云南红河 661106; ⁵南充市农业科学院, 四川南充 637000

摘 要: 籽粒破碎率高是西南玉米机械粒收技术发展和应用的主要限制因素。明确当前西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状, 研究其主要影响因素, 对推动西南玉米机械粒收的发展具有重要意义。利用 2017—2018 年在西南区开展的多点多品种系列粒收试验获得的 788 组籽粒破碎率样本数据, 分析了西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状, 并于 2018 年采用同一机型、同一操作人员开展多品种、大跨度多收期试验, 调查不同收获时期籽粒破碎率、含水率、力学强度变化, 分析籽粒含水率、力学强度与破碎率的关系。结果表明, 当前西南玉米机械粒收籽粒破碎率范围为 0.54%~42.72%, 平均值为 8.34%。随机机械粒收时期推迟, 籽粒含水率下降, 籽粒力学强度增加, 破碎率先降低后逐渐升高。破碎率(y)与籽粒含水率(x)间的关系符合 $y = 0.0329x^2 - 1.3328x + 15.529$ ($R^2 = 0.5467^{**}$)方程, 在籽粒含水率为 20.26%时破碎率最低, 破碎率 $\leq 5\%$ 的籽粒含水率范围为 10.76%~29.76%; 破碎率(y)与籽粒立面($x_{\text{立面}}$)和侧面($x_{\text{侧面}}$)压碎强度的关系符合 $y = 0.0006x_{\text{立面}}^2 - 0.2692x_{\text{立面}} + 32.7030$ ($R^2 = 0.3138^{**}$)和 $y = 0.0021x_{\text{侧面}}^2 - 0.6092x_{\text{侧面}} + 46.979$ ($R^2 = 0.3790^{**}$)方程, 当籽粒立面和侧面压碎强度为 224.33 N 和 145.05 N 时破碎率最低。籽粒压碎强度与含水率呈极显著负相关。随收获时期推迟, 籽粒含水率下降导致其力学强度的改变是影响破碎率变化的主要原因, 通过选育和选用后期立秆能力强、籽粒脱水快的品种, 当籽粒含水率降至 28%以下进行机械粒收是降低西南玉米机械粒收籽粒破碎率的重要举措。

关键词: 西南玉米; 机械粒收; 破碎率; 含水率; 力学强度

Current status and influencing factors of broken rate in mechanical grain harvesting of maize in Southwest China

ZHAO Bo¹, LI Xiao-Long¹, ZHOU Mao-Lin², SONG Bi³, LEI En⁴, LI Zhong⁵, WU Ya-Wei¹, YUAN Ji-Chao¹, and KONG Fan-Lei^{1,*}

¹College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, Sichuan, China; ²Corn Research Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; ³College of Agronomy, Guizhou Agricultural University, Guiyang 550025, Guizhou, China; ⁴Honghe University, Honghe 661106, Yunnan, China; ⁵Nanchong Academy of Agricultural Sciences, Nanchong 637000, Sichuan, China

Abstract: Maize mechanical grain harvesting is the development direction of maize production in Southwest China. High grain broken rate is the main limiting factor for the development and application of this technology. It is of great significance to clarify the current status of broken rate of mechanical grain harvesting in Southwest China, to study the main influencing factors, so as to promote the development of mechanical grain harvesting in Southwest China. Using 788 sets of sample data of grain broken rate obtained from a series of multi-point and multi-variety grain harvesting experiments conducted in Southwest China from 2017 to 2018, the present situation of mechanical grain broken rate in Southwest China was analyzed. In 2018, the same machine and operator were used to carry out multi-variety, long-span and multi-harvest experiments to investigate the changes of grain broken

本研究由国家重点研发计划项目(2016YFD0300307, 2017YFD0301704)资助。

This study was supported by the State Key Research and Development Program of China (2016YFD0300307, 2017YFD0301704).

* 通信作者(Corresponding author): 孔凡磊, E-mail: kflstar@163.com, Tel: 028-86290870

第一作者联系方式: E-mail: sicausz4633@163.com

Received (收稿日期): 2019-04-18; Accepted (接受日期): 2019-08-09; Published online (网络出版日期): 2019-09-01.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20190910.1109.006.html>

rate, grain moisture content and grain mechanical strength in different harvest periods, and to analyze the relationship among grain moisture content, grain mechanical strength and broken rate. The broken rate of mechanically harvested grains was 0.54%–42.72% with the average of 8.34% in Southwest China. With the delayed mechanical grain harvesting, the moisture content of grains decreased, the crushing strength of grains increased, and the broken rate of grains decreased first and then increased. The relationship between broken rate (y) and grain moisture content (x) was in accordance with the equation $y = 0.0329x^2 - 1.3328x + 15.529$ ($R^2 = 0.5467^{**}$). The broken rate was the lowest when the moisture content of grains was 20.26%. The range of moisture content of the grains with a broken rate less than 5% was 10.76%–29.76%. The relationship between broken rate (y) and crushing strength of grain facade (x_{facade}) and side (x_{side}) was in accordance with the equations of $y = 0.0006x_{\text{facade}}^2 - 0.2692x_{\text{facade}} + 32.7030$ ($R^2 = 0.3138^{**}$) and $y = 0.0021x_{\text{side}}^2 - 0.6092x_{\text{side}} + 46.979$ ($R^2 = 0.3790^{**}$), respectively. When the crushing strength of grain facade and side was 224.33 N and 145.05 N, the broken rate was the lowest. With delaying harvest time, the change of mechanical strength caused by the decrease of grain moisture content may be the main reason affecting the change of broken rate. Breeding and selecting varieties with strong standing pole ability and quick dehydration, making the moisture content of grain below 28%, is an important measure to reduce the broken rate of mechanical grain harvesting in Southwest China.

Keywords: southwest maize; mechanical grain harvesting; broken rate; moisture content; mechanical strength

西南是我国三大玉米主产区之一, 玉米机械化收获率却不足 2%, 且主要为机械穗收^[1-2]。玉米机械粒收是未来我国玉米机械收获的发展趋势^[3-4], 同时也是西南玉米生产实现跨越式发展的必由之路。机械粒收籽粒破碎率高是该技术发展和应用的主要限制因素, 因此研究当前玉米机械粒收籽粒破碎率及影响因素, 对促进机械粒收技术的发展和本区玉米机械粒收水平的提升具有重要意义。玉米籽粒破碎率、杂质率、损失率为机械粒收质量的主要评价指标^[5-6]。李少昆团队^[3,5]通过 6 年试验对 1698、2450 组样本分析表明, 北方玉米区籽粒破碎率平均达到 8.63%、8.56%, 高于 GBT-21962-2008^[6] 5% 的要求, 玉米籽粒破碎率高是我国玉米机械粒收技术发展的“瓶颈”性问题^[7-9]。收获时籽粒含水率高是造成破碎率高的主要原因^[10-16], 破碎率与籽粒含水率间符合线性和二次多项式关系^[11,14-15,17]。李璐璐等^[17]研究表明, 籽粒含水率相近的不同玉米品种在机械粒收时机收质量差异较大, 尤其是破碎率。生产上硬粒型、马齿型、半马齿型玉米籽粒力学特性存在较大差异, 且籽粒力学特性对机械脱粒性能影响较大, 其中破碎率主要受玉米籽粒压碎特性的影响, 两者呈负相关^[18-20]。同时收获机型号、运行速度、操作人员等因素也对粒收质量有一定影响^[3,21]。前人对玉米机械粒收籽粒破碎率的研究报道集中于北方地区, 主要统计分析不同区域多品种大样本量数据, 且侧重于籽粒含水率和品种对破碎率的影响, 鲜见不同时期收获籽粒破碎率、含水率和力学强度动态变化特征及其相互间关系的系统研究。同时西南玉米机械化收获尚处于起步阶段, 机械化收获技术特别是机械粒收技术研究尚属空白。本研究分析了西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状, 于 2018 年采用同

一机型、同一操作人员, 开展了多品种、大跨度多收期试验, 探讨了不同收获时期籽粒破碎率的动态变化及其与籽粒含水率、力学强度等因素的关系, 以期机械粒收技术和西南玉米机械粒收的发展提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 机械粒收试验 2017—2018 年在西南区的四川中江(31°N, 104°E)、四川南充(30°N, 106°E)、贵州安顺(26°N, 105°E)、云南红河(23°N, 102°E)、重庆潼南(30°18'N, 105°83'E)开展了玉米适宜机械粒收品种筛选及相关粒收技术的研究, 在玉米成熟期进行了机械粒收试验, 统一标准调查了 62 个西南玉米主体品种机械粒收籽粒破碎率情况, 共获得 788 组籽粒破碎率样本数据, 以明确西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状。试验品种信息见表 1 (除北方引进品种外, 其余品种均为西南各区主推品种, 生育期差异较小)。

1.1.2 不同收获时期试验 2018 年在四川中江(31°N, 104°E)试验基地, 采用大区带状种植, 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 75 m), 种植密度为 60,000 株 hm^{-2} , 田间管理同当地实际生产。供试品种春玉米 4 个(4 个品种的生育期基本一致), 4 月 8 日播种; 夏玉米 15 个, 5 月 17 日播种(表 2)。设置春玉米 6 个收获时期, 即 7 月 31 日、8 月 7 日、8 月 13 日、8 月 19 日、8 月 25 日、8 月 31 日, 夏玉米分别于 9 月 8 日、9 月 16 日粒收, 收获机型同为久保田 4LZY-1.8B, 配套家家乐 4YG-4A 玉米收割台。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 籽粒含水率 每次收获前, 在规定的收获区域内随机取长势一致的 15 个果穗, 分为 3 个重复, 人工脱粒, 称鲜重, 85℃ 烘干至恒重, 称干重, 计算籽粒含水率。

$$\text{籽粒含水率}(\%) = \frac{\text{鲜重} - \text{干重}}{\text{鲜重}} \times 100$$

1.2.2 籽粒压碎强度 从测定籽粒含水率的样品(经充分混匀)中随机选取完整籽粒 90 粒, 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), 采用截面为 1 cm² 的圆形探测头测定并记录玉米籽粒立面和侧面(图 1)被测头恰好压碎时仪器所显示的最大值。对每一品种籽粒立面和侧面压碎强度分别测定 45 粒, 每 15 粒为一个重复, 共 3 次重复。

图 1 籽粒力学强度受力示意图

Fig. 1 Grains mechanical strength stress diagram

1.2.3 籽粒破碎率 每次分品种收获后, 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(分为 3 个重复), 参照“玉米收获机械 试验方法”(GBT-21961-2008^[22]), 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, 分别称出破碎籽粒质量(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)。

$$Z_s(\%) = \frac{W_s}{W_i} \times 100$$

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 处理数据, SPSS Statistics 17.0 软件进行统计分析, Origin 9.0 软件建立破碎率与籽粒含水率、力学强度和籽粒力学强度与含水率间的回归方程, 并作图。

2 结果与分析

2.1 西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状

由图 2 可知, 在 2 年、5 个试验点、62 个品种共计 788 组样本中, 籽粒破碎率范围为 0.54%~42.72%, 变异系数为 79.42%, 平均值为 8.34%, 高于国家“玉米收获机械 技术条件”(GBT-21962-2008) 5% 的要求; 所有样本中破碎率 5% 的占比为

35.79%, 5%~8% 占比为 27.28%, 高于我国“粮食烘干收储企业三级粮标准”(GBT-1353-2009^[23]) 8% 的占比为 36.93%。其中四川中江 265 组样本籽粒破碎率范围为 0.54%~16.97%, 平均 5.59%, 5% 的占比为 54.34%, 5%~8% 的占比为 25.66%, 8% 的占比为 20.00%; 四川南充 26 组样本籽粒破碎率范围为 1.52%~15.23%, 平均 4.51%, 5% 的占比为 43.50%, 5%~8% 的占比为 25.20%, 8% 的占比为 31.30%; 重庆潼南 246 组样本籽粒破碎率范围为 0.54%~25.92%, 平均 7.89%, 5% 的占比为 43.50%, 5%~8% 的占比为 25.20%, 8% 的占比为 31.30%; 贵州安顺 140 组样本籽粒破碎率范围为 0.72%~36.52%, 平均 11.19%, 5% 的占比为 2.86%, 5%~8% 的占比为 40.00%, 8% 的占比为 57.14%; 云南红河 111 组样本籽粒破碎率范围为 2.92%~42.72%, 平均 13.48%, 5% 的占比为 4.50%, 5%~8% 的占比为 24.32%, 8% 的占比为 71.18%。

2.2 不同收获时期籽粒破碎率、含水率、力学强度变化

春玉米 6 次收获中, 随收获时间推迟, 籽粒破碎率表现出先降低后逐渐升高的趋势(图 3)。第 3 次收获的籽粒破碎率均值最低, 各时期所取测试样本中籽粒破碎率的变幅分别为 4.29%~15.05%、3.12%~13.91%、0.54%~3.08% (异常值为 5.76%)、2.12%~3.41% (异常值为 5.13%)、1.56%~4.74% 和 2.58%~5.11%, 第 3、第 4、第 5 次收获的测试样本中除异常值外全部符合破碎率 5% 的“玉米收获机械 技术条件”国家标准(GBT-21962—2008); 6 次收获参试品种测试样本破碎率的极差分别为 10.76%、10.79%、2.54%、1.29%、3.18% 和 2.53%, 在第 4 次收获的极差最小。夏玉米在 9 月 16 日收获的籽粒破碎率均值小于 9 月 8 日, 2 次收获籽粒破碎率范围分别为 3.00%~13.25% 和 3.03%~9.97%, 2 次收获参试品种破碎率 5% 的占比分别为 11.1% 和 38.9%。

随收获时间推迟, 春夏播玉米籽粒含水率均呈现逐渐降低的趋势, 且品种间的籽粒含水率存在明显的差异(图 3)。2018 年 7 月 31 日至 2018 年 8 月 31 日, 春玉米 4 个品种 6 次收获所取测试样本的籽粒含水率范围分别为 32.79%~36.10%、26.42%~32.78%、21.78%~29.50%、15.74%~20.09%、12.49%~17.44% 和 11.24%~13.72%, 测试样本籽粒含水率在 11.24%~36.10% 之间。夏玉米 15 个品种 2 次收获的籽粒含水率范围分别为 15.92%~30.33% 和 14.23%~27.25%。

表 1 机械粒收试验品种信息(2017–2018)

Table 1 Variety information of mechanical grain harvesting test (2017 and 2018)

地点 Location	品种 Cultivar	收获机型 Harvester type
四川中江 Zhongjiang, Sichuan	正红 505, 中单 808, 渝单 8 号, 荣玉 1510, 瑞玉 11, 渝单 30, 丹玉 336, 正红 6 号, 郑单 958, 粒收 1 号, 渝豪单 6 号, 仲玉 3 号, 成单 30, 正红 211, 正红 431, 先玉 1171, 延科 288, 国豪玉 7 号, 华试 919, 鑫玉 16, 奥玉 3111, 联创 808, 瑞玉 16, 华凯 2 号 Zhenghong 505, Zhongdan 808, Yudan 8, Rongyu 1510, Ruiyu 11, Yudan 30, Danyu 336, Zhenghong 6, Zhengdan 958, Lishou 1, Yuhaodan 6, Zhongyu 3, Chengdan 30, Zhenghong 211, Zhenghong 431, Xianyu 1171, Yanke 288, Guohaoyu 7, Huashi 919, Liyu 16, Aoyu 3111, Lianchuang 808, Ruiyu 16, Huakai 2	久保田 4LZY-1.8B Kubota 4LZY-1.8B
四川南充 Nanchong, Sichuan	仲玉 3 号, 正红 505, 众望玉 88, 郑单 958, 粒收 1 号, 先玉 1171, 正红 431, 渝单 8 号, 中玉 335, 正红 6 号, 渝单 30 Zhongyu 3, Zhenghong 505, Zhongwangyu 88, Zhengdan 958, Lishou 1, Xianyu 1171, Zhenghong 431, Yudan 8, Zhongyu 335, Zhenghong 6, Yudan 30	艾禾 4LZT-4.0ZB Aihe 4LZT-4.0ZB
重庆潼南 Tongnan, Chongqing	迪卡 M9, 粒收 1 号, 渝单 8 号, 先玉 1171, 正红 6 号, 正红 431, 荣玉 1510, 仲玉 3 号, 渝单 30, 成单 30, 正红 505, 渝豪单 6 号, 中单 808, 渝单 50, 必胜 118, 金穗 33, 贵单 8 号, 黔 1403, 帮豪 58, 新玉 503, 资玉 6 号, 郑单 958, 中玉 335, 中单 901 DikaM9, Lishou 1, Yudan 8, Xianyu 1171, Zhenghong 6, Zhenghong 431, Rongyu 1510, Zhongyu 3, Yudan 30, Chengdan 30, Zhonghong 505, Yuhaodan 6, Zhongdan 808, Yudan 50, Bisheng 118, Jinsui 33, Guidan 8, Qian 1403, Banghao 58, Xinyu 503, Ziyu 6, Zhengdan 958, Zhongyu 335, Zhongdan 901	沃德 4LZ-3.0E Wode 4LZ-3.0E
贵州安顺 Anshun, Guizhou	先玉 1171, 渝单 8 号, 正红 6 号, 筑黄 127/S02, 珍禾 99, 爱农 001, 正红 431, 金玉 932, 靖丰 18, 荣玉 1510, 仲玉 3 号, 靖单 15, 粒收 1 号, 金玉 306, 筑黄 99M/21, 黔单 16, 靖单 12, 靖玉 1 号, 郑单 958, 金玉 838, 新中玉 801, 靖单 14, 宣黄单 17, 金玉 579 Xianyu 1171, Yudan 8, Zhenghong 6, Zhuhuang 127/S02, Zhenhe 99, Ainong 001, Zhenghong 431, Jinyu 932, Jingfeng 18, Rongyu 1510, Zhongyu 3, Jingdan15, Lishou 1, Jinyu 306, Zhuhuang 99M/21, Qiandan 16, Jingdan 12, Jingyu 1, Zhengdan 958, Jinyu 838, Xinzhongyu 801, Jingdan 14, Xuanhuangdan 17, Jinyu 579	雷沃 4LZ-4G1 Lovol 4LZ-4G1
云南红河 Honghe, Yunnan	粒收 1 号, 郑单 958, 先玉 1171, 渝单 8 号, 正红 431, 中玉 335, 靖单 14, 靖单 15, 新中玉 801, 宣黄单 17, 宝玉 9 号, 佛单 7 号, 华兴单 88, 金粒 1 号, 金玉 99, 靖单 12, 靖丰 18, 五谷 3861, 先玉 696, 雅玉 69, 正大 619 Lishou 1, Zhengdan 958, Xianyu 1171, Yudan 8, Zhenghong 431, Zhongyu 335, Jingdan 14, Jingdan 15, Xinzhongyu 801, Xuanhuangdan 17, Baoyu 9, Fodan 7, Huaxingdan 88, Jinli 1, Jinyu 99, Jingdan 12, Jingfeng 18, Wugu 3861, Xianyu 696, Yayu 69, Zhengda 619	久保田 4LZY-1.8B Kubota 4LZY-1.8B

表 2 不同收获时期试验品种信息(四川中江, 2018)

Table 2 Variety information in different harvest dates (Zhongjiang, Sichuan, 2018)

类型 Type	品种个数 Number of varieties	品种 Cultivar	收获次数 Number of harvests
春玉米 Spring maize	4	正红 6 号, 仲玉 3 号, 先玉 1171, 成单 30 Zhenghong 6, Zhongyu 3, Xianyu 1171, Chengdan 30	6
夏玉米 Summer maize	15	正红 431, 奥玉 3111, 先玉 1171, 正红 505, 粒收 1 号, 正红 6 号, 中玉 335, 延科 288, 联创 808, 丹玉 336, 仲玉 3 号, 渝单 8 号, 渝单 30, 荣玉 1510, 郑单 958 Zhenghong 431, Aoyu 3111, Xianyu 1171, Zhenghong 505, Lishou 1, Zhenghong 6, Zhongyu 335, Yanke 288, Lianchuang 808, Danyu 336, Zhongyu 3, Yudan 8, Yudan 30, Rongyu 1510, Zhengdan 958	2

图 2 西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状(2017-2018)

Fig. 2 Current status of broken rate of mechanical grain harvesting of maize in southwest (2017 and 2018)

春玉米 6 次收获中, 随收获时间推迟, 玉米籽粒的立面和侧面压碎强度均逐渐增加, 但是在最后一个时期表现出有降低的趋势(图 3)。玉米籽粒立面压碎强度在各时期均大于侧面压碎强度。籽粒立面压碎强度在 7 月 31 日至 8 月 25 日间差异达到显著水平, 8 月 25 日至 8 月 31 日差异不显著; 籽粒侧面压碎强度在 7 月 31 日至 8 月 7 日差异不显著, 8 月 7 日至 8 月 13 日差异达到显著水平, 之后各时期间差异不显著。

2.3 籽粒破碎率、含水率及力学强度间关系分析

破碎率随籽粒含水率的下降先降低再逐渐升高(图 4), 两者间符合二次多项式关系, 可用方程 $y = 0.0329x^2 - 1.3328x + 15.529$ ($R^2 = 0.5467^{**}$, $n = 72$) 拟合。根据拟合方程预测, 当籽粒含水率为 20.26% 时破碎率最低, 为 2.03%, 按照机械粒收破碎率 5% 的国家标准以及 8% 的粮食储存三级标准, 在当前参试品种和相应配套的收获条件下, 籽粒含水率应该控制在 10.76%~29.76% 和 6.79%~33.73%。从图中可以看出在籽粒含水率大于 32% 时, 部分样本的破碎率仍低于 5%。

破碎率随籽粒力学强度的增加先降低再逐渐升

高(图 4), 破碎率(y)与立面($x_{\text{立面}}$)和侧面($x_{\text{侧面}}$)的压碎强度均符合二次多项式关系, 拟合方程分别为 $y = 0.0006x_{\text{立面}}^2 - 0.2692x_{\text{立面}} + 32.703$ ($R^2 = 0.3138^{**}$, $n = 72$) 和 $y = 0.0021x_{\text{侧面}}^2 - 0.6092x_{\text{侧面}} + 46.97$ ($R^2 = 0.3790^{**}$, $n = 72$)。根据拟合方程预测, 当籽粒立面和侧面压碎强度为 224.33 N 和 145.05 N 时破碎率最低, 为 2.51% 和 2.78%, 按照机械粒收籽粒破碎率 5% 的国家标准以及 8% 的粮食储存三级标准, 在当前参试品种和相应配套的收获条件下, 籽粒立面压碎强度应控制在 159.88~288.78 N 和 128.66~320.01 N, 侧面压碎强度应控制在 112.60~177.50 N 和 95.23~194.86 N。

籽粒力学强度随籽粒含水率的下降逐渐增加(图 4)。其中籽粒立面($y_{\text{立面}}$)和侧面($y_{\text{侧面}}$)压碎强度与籽粒含水率(x)呈极显著负相关, 回归方程分别为 $y_{\text{立面}} = -4.1606x + 283.06$ ($R^2 = 0.6034^{**}$, $n = 72$) 和 $y_{\text{侧面}} = -1.8552x + 168.4$ ($R^2 = 0.5840^{**}$, $n = 72$)。籽粒含水率每降低 1 个百分点, 立面和侧面压碎强度分别增加 4.16 N 和 1.86 N, 当籽粒含水率在 18%~28% 范围时, 籽粒立面压碎强度为 166.56~208.17 N, 侧面压碎强度为 116.45~135.01 N。

图 3 不同收获时期玉米籽粒破碎率、含水率、力学强度变化(2018)

Fig. 3 Changes of maize grain broken rate, moisture content and mechanical strength in different harvest dates (2018)

箱型图中的箱体部分代表 50% (25%~75%) 样本的分布区域, 为四分位区间(IQR)。箱体内实线为中位线, “◆”为异常值点, “+”为均值。图中不同小写字母表示不同时期在 0.05 水平下差异显著。

The box part in the box diagram represents the distribution area of 50% (25%~75%) samples, which is a quadrant interval (IQR). The solid line in the box body is the median line, “◆” is the abnormal point, “+” is the average. Different lowercase letters above boxes show significant differences at the 0.05 probability level in different periods.

2.4 不同品种间的机械粒收破碎率差异

从表 3 可以看出, 第 1、第 2、第 3 组不同籽粒类型的品种在籽粒含水率相近时, 籽粒立面和侧面压碎强度在品种间差异不显著, 采用相同收获机收获, 品种间的破碎率差异却达极显著或显著水平; 第 4、第 5 组别中不同品种间籽粒含水率差异达极显著水平, 但籽粒立面和侧面压碎强度差异不显著, 且籽粒破碎率差异也不显著; 第 6 组别中在同一地点、收获机和机手操作下收获, 同一品种在籽粒含水率相近, 籽粒力学强度差异不显著的条件下, 其春播和夏播的籽粒破碎率差异达显著水平。以上说明机械粒收籽粒破碎率不仅受籽粒含水率、力学强度的影响, 可能还与品种类型、胚乳结构、播期等有关。

3 讨论

3.1 西南玉米机械粒收籽粒破碎率偏高应适时晚收

籽粒破碎率作为评价玉米机械粒收质量的主要指标, GBT-21962-2008 “玉米收获机械 技术条件”中规定机收籽粒破碎率 5%, GBT-1353-2009 “粮食烘干收储企业三级粮标准”中规定籽粒破碎率 8%^[5-6,24]。本研究结果显示, 当前西南玉米机械粒收籽粒破碎率范围为 0.54%~42.72%, 平均值为 8.34%, 与李少昆等^[3,5]在北方的研究结果相近, 高于国家“玉米收获机械 技术条件”(GBT-21962-2008) 5%的要求范围; 788 组测试样本中破碎率 5%的占比为 64.21%。随收获时期推迟, 机械粒收质量发生显

表 3 不同品种间的机械粒收破碎率差异(四川中江, 2018)
Table 3 Differences in broken rate of mechanical grain collection among different varieties (Zhongjiang, Sichuan, 2018)

分组编号 Group number	收获时间 Harvest time (month /day)	品种 Cultivar	籽粒类型 Grain type	收获机型 Harvester type	含水率 Moisture content (%)	籽粒力学强度 Grain mechanical strength (N)		破碎率 Broken rate (%)
						立面 Facade	侧面 Side	
1	7/31	先玉 1171	硬粒型	久保田 4	34.15 a	140.01 a	106.32 a	5.87 B
		Xianyu 1171	Flint corn	LZY-1.8B				
		成单 30	半马齿型	Kubota 4	34.83 a	146.85 a	103.66 a	13.88 A
		Chengdan 30	Semident corn	LZY-1.8B				
2	9/8	中玉 335	半马齿型	久保田 4	26.53 a	207.13 a	143.35 a	7.11 B
		Zhongyu 335	Semident corn	LZY-1.8B				
		渝单 30	马齿型	Kubota 4	26.49 a	181.40 a	130.16 a	4.26 B
		Yudan 30	Dent corn	LZY-1.8B				
		荣玉 1510	半马齿型		26.48 a	188.12 a	132.90 a	13.25 A
		Rongyu 1510	Semident corn					
3	9/16	荣玉 1510	半马齿型	久保田 4	23.86 a	182.44 a	102.14 a	8.21 a
		Rongyu 1510	Semident corn	LZY-1.8B				
		郑单 958	半马齿型	Kubota 4	23.84 a	186.14 a	114.58 a	4.13 c
		Zhengdan 958	Semident corn	LZY-1.8B				
		渝单 8 号	半马齿型		23.75 a	214.72 a	130.29 a	6.53 b
		Yudan 8	Semident corn					
4	9/8	粒收 1 号	马齿型	久保田 4	22.22 B	208.33 a	114.22 b	6.25 a
		Lishou 1	Dent corn	LZY-1.8B				
		渝单 8 号	半马齿型	Kubota 4	28.30 A	206.91 a	128.21 a	6.85 a
		Yudan 8	Semident corn	LZY-1.8B				
5	9/8	正红 431	马齿型	久保田 4	30.33 A	172.69 a	104.79 a	11.60 a
		Zhenghong 431	Dent corn	LZY-1.8B				
		先玉 1171	硬粒型	Kubota 4	25.77 B	171.03a	104.41 a	12.63 a
		Xianyu 1171	Flint corn	LZY-1.8B				
		渝单 30	马齿型		23.78 a	189.04 a	122.94 a	3.78 c
		Yudan 30	Dent corn					
6	8/13	正红 6 号	马齿型	久保田 4	23.03 a	190.92 a	146.94 a	2.62 b
		Zhenghong 6	Dent corn	LZY-1.8B				
	9/8	正红 6 号	马齿型	Kubota 4	22.63 a	195.50 a	125.13 a	5.93 a
		Zhenghong 6	Dent corn	LZY-1.8B				

表中数据后不同小写字母表示 0.05 水平下显著, 不同大写字母表示 0.01 水平下显著。
Data followed by different lower-case letters are significantly different at the 0.05 probability level, and these by different upper-case letters are significantly different at the 0.01 probability level.

著变化, 特别是破碎率^[17]。本研究采用固定品种, 同一地块、操作人员、收获机械, 多收获时期的方法, 在一定程度上减少了品种、收获机械、人员操作差异等因素对试验结果造成的影响。结果显示, 在本试验条件下, 推迟收获时期, 籽粒含水率下降, 籽粒破碎率显著降低, 但超过一定时期籽粒破碎率却逐渐增加; 籽粒破碎率与含水率间关系符合 $y = 0.0329x^2 - 1.3328x + 15.529$ ($R^2 = 0.5467^{**}$) 方程, 籽粒含水率为 20.26% 时破碎率最低, 籽粒含水率在 10.76%~29.76% 范围内, 破碎率可 < 5%, 试验中测试样本籽粒含水率在 11.24%~36.10% 之间, 基本覆

盖西南玉米籽粒收获含水率范围。由于西南是多熟制地区, 茬口衔接比较紧, 而且秋季多雨, 加之现有品种以高秆大穗晚熟品种为主, 后期立秆能力较弱, 收获过迟倒伏严重, 故在籽粒含水率降到 28% 以下即可考虑机械粒收, 不必像北方一样降至 25%^[5,25]。综上所述, 当前西南玉米机械粒收籽粒破碎率偏高, 选育早熟、后期立秆能力强、籽粒脱水快的品种并适时晚收是西南玉米机械粒收发展的有效措施。

3.2 玉米籽粒含水率变化导致籽粒力学强度变化是破碎率变化的主要原因

影响玉米机械粒收籽粒破碎率的因素有品种、

机械、栽培措施、生态气候^[26-31]。玉米收获时籽粒含水率是影响机械粒收质量的关键因素,收获时籽粒含水率高是破碎率偏高的主要原因^[3,10-11,16-17,32]。

破碎率与籽粒含水率间符合线性和二次多项式关系^[11,14,17]。但机械粒收籽粒含水率变化引起破碎率改变的机理不明。高连兴等^[33]研究认为,籽粒含水率对玉米脱粒的影响主要体现在籽粒破损强度和脱粒作用力两个方面。张永丽等^[34]在玉米籽粒剪切破碎试验研究中发现,含水率不同时,剪切破碎载荷也不同,含水率越高,需要的外力就越小。在玉米机械脱粒作业中,玉米籽粒主要承受挤压(挤搓)、冲击(打击)作用,其中籽粒力学特性对机械脱粒性能影响较大,破碎率主要受玉米籽粒压碎特性的影响,与籽粒最小破碎力呈负相关^[19,35-37]。本研究表明,破碎率与籽粒立面和侧面压碎强度的关系密切,符合二次函数关系,回归方程分别为 $y = 0.0006x_{\text{立面}}^2 - 0.2692x_{\text{立面}} + 32.703$ ($R^2 = 0.3138^{**}$)、 $y = 0.0021x_{\text{侧面}}^2 - 0.6092x_{\text{侧面}} + 46.979$ ($R^2 = 0.3790^{**}$)。当籽粒立面和侧面压碎强度为 224.33 N 和 145.05 N 时破碎率最低。进一步分析发现,籽粒力学强度随着籽粒含水率的下降而逐渐增加,两者间呈负相关线性关系,拟合的方程 F 检验达到极显著水平。表明玉米籽粒

含水率变化导致籽粒力学强度变化是破碎率变化的主要原因。

3.3 加强玉米籽粒力学特性的研究助力我国玉米机械粒收的发展

前人研究表明,不同玉米品种在籽粒含水率相近时收获质量差异较大,尤其是破碎率^[17]。本研究及前人研究^[3]均发现籽粒含水率 32% 及 30% 时,部分样本的破碎率仍低于 5% (图 4),表明籽粒含水率不是影响破碎率的唯一因素。本研究发现,破碎率与籽粒立面和侧面压碎强度关系密切,呈二次函数关系。破碎率是玉米与刚性部件相互作用的结果,籽粒的生物力学特性与脱粒性能的关系更为密切^[18,36,38],探明玉米籽粒的力学特性对粒收机械的改良是十分必要的。本研究也发现,在相同籽粒含水率和籽粒立面与侧面压碎强度下,不同品种的破碎率也不尽相同,这可能是不同品种在机械脱粒时的破碎敏感性差异造成的^[17]。同一品种在相近籽粒含水率下春播和夏播的破碎率存在显著差异,这可能与春夏播玉米籽粒特性不同有关。生产上应用的硬粒型、马齿型、半马齿型玉米籽粒力学特性存在较大差异,同一类型不同品种的胚乳结构及其力

图4 籽粒破碎率、含水率及力学强度间的关系(中江春玉米, 2018)

Fig. 4 Relation among grain broken rate, moisture content and mechanical strength (Zhongjiang spring maize, 2018)

学特性也可能存在较大差异。因此,今后应加大对玉米籽粒类型及其物理力学特性的研究,为我国玉米机械粒收技术的发展及宜机收品种的选育提供理论依据。

4 结论

当前西南玉米机械粒收籽粒破碎率偏高,破碎率范围为0.54%~42.72%,平均值为8.34%。随收获时期推迟,籽粒含水率下降,籽粒力学强度增加,破碎率先降低后逐渐升高。破碎率与籽粒含水率的关系符合 $y = 0.0329x^2 - 1.3328x + 15.529$ 方程,破碎率与籽粒立面和侧面压碎强度的关系符合 $y = 0.0006x_{\text{立面}}^2 - 0.2692x_{\text{立面}} + 32.703$ 、 $y = 0.0021x_{\text{侧面}}^2 - 0.6092x_{\text{侧面}} + 46.979$ 方程,籽粒压碎强度与籽粒含水率的关系符合 $y_{\text{立面}} = -4.1606x + 283.06$ 、 $y_{\text{侧面}} = -1.8552x + 168.4$ 方程。在本试验条件下,籽粒含水率在10.76%~29.76%范围内或籽粒立面和侧面压碎强度在159.88~288.78 N和112.60~177.50 N范围内适宜机械粒收,籽粒含水率在20%左右或籽粒立面和侧面压碎强度在220 N和145 N左右时收获效果最佳。通过选育和选用后期立秆能力强、籽粒脱水快的品种,在籽粒含水率降至28%以下收获可显著降低当前西南玉米机械粒收籽粒破碎率。

References

- [1] 钟耕臣, 安艳玲. 西南丘陵地区玉米机械化收获的现状与发展建议. 吉林农业, 2018, 16: 32–33.
Zhong G C, An Y L. Present situation and development suggestions of maize mechanized harvesting in southwest hilly areas. *Agric Jilin*, 2018, 16: 32–33 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李高科, 潘光堂. 西南玉米区种质利用现状及研究进展. 玉米科学, 2005, 13(2): 3–7.
Li G K, Pan G T. The utilization present situation and study advances of the germplasm in southwest maize zone. *J Maize Sci*, 2005, 13(2): 3–7 (in Chinese with English abstract).
- [3] 柴宗文, 王克如, 郭银巧, 谢瑞芝, 李璐璐, 明博, 侯鹏, 刘朝巍, 初振东, 张万旭, 张国强, 刘广周, 李少昆. 玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系. 中国农业科学, 2017, 50: 2036–2043.
Chai Z W, Wang K R, Guo Y Q, Xie R Z, Li L L, Ming B, Hou P, Liu Z W, Chu Z D, Zhang W X, Zhang G Q, Liu G Z, Li S K. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2036–2043 (in Chinese with English abstract).
- [4] 《玉米科学》编辑部. 加强机械粒收研究推动玉米生产方式转型. 玉米科学, 2018, 26(4): 62.
Editorial Department of *Journal of Maize Sciences*. Strengthen the research of mechanical grain harvesting and promote the transformation of maize production mode. *J Maize Sci*, 2018, 26(4): 62 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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. 石河子大学学报: 自然科学版, 2017, 35: 265–272.
Li S K. Factors affecting the quality of maize grain mechanical harvest and the development trend of grain harvest technology. *J Shihezi Univ (Nat Sci)*, 2017, 35: 265–272 (in Chinese with English abstract).
- [6] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会. 玉米收获机械: 技术条件. GB/T 21962-2008, 2008.
National Standard of People's Republic of China. Technical Requirements for Maize Combine Harvester. GB/T 21962-2008, 2008 (in Chinese).
- [7] 王克如, 李少昆. 玉米机械粒收破碎率研究进展. 中国农业科学, 2017, 50: 2018–2026.
Wang K R, Li S K. Progresses in research on grain broken rate by mechanical grain harvesting. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2018–2026 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张向前, 王瑞, 张瑞霞, 郭晓霞, 鉴军帅, 程玉臣, 吴慧, 孙峰成. 内蒙古适宜籽粒机械化收获春玉米品种筛选. 北方农业学报, 2018, 46(1): 25–29.
Zhang X Q, Wang R, Zhang R X, Guo X X, Jian J S, Cheng Y C, Wu H, Sun F C. Screening varieties suitable for mechanical harvesting of spring maize kernel in Inner Mongolia. *J Northern Agric*, 2018, 46(1): 25–29 (in Chinese with English abstract).
- [9] 薛军, 李璐璐, 张万旭, 王群, 谢瑞芝, 王克如, 明博, 侯鹏, 李少昆. 玉米穗轴机械强度及其对机械粒收籽粒破碎率的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 1868–1877.
Xue J, Li L L, Zhang W X, Wang Q, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Hou P, Li S K. Maize cob mechanical strength and its influence on kernel broken rate. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 1868–1877 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王克如, 李少昆. 玉米籽粒脱水速率影响因素分析. 中国农业科学, 2017, 50: 2027–2035.
Wang K R, Li S K. Analysis of influencing factors on kernel dehydration rate of maize hybrids. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2027–2035 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李璐璐, 雷晓鹏, 谢瑞芝, 王克如, 侯鹏, 张凤路, 李少昆. 夏玉米机械粒收质量影响因素分析. 中国农业科学, 2017, 50: 2044–2051.
Li L L, Lei X P, Xie R Z, Wang K R, Hou P, Zhang F L, Li S K. Analysis of influential factors on mechanical grain harvest quality of summer maize. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2044–2051 (in Chinese with English abstract).
- [12] Ruan L, Wang J, Chen Y, Wang S, Zhang W, Zuo X, Chen H. Dry matter accumulation, moisture content in maize kernel and their influences on mechanical harvesting. *Agric Sci Technol*, 2011, 12: 1857–1860.
- [13] 雷恩, 环建华, 王岳东, 杨永兵, 刘宝宏, 卢丙越, 刘艳红, 袁继超, 王璞. 云南玉米宜机械收获性能和机收质量研究与评价. 农机化研究, 2018, (4): 156–161.
Lei E, Huan J H, Wang Y D, Yang Y B, Liu B H, Lu B Y, Liu Y H, Yuan J C, Wang P. Research and evaluation of suitable for mechanized harvesting performance and mechanical harvesting quality for maize in the Yunnan area. *J Agric Mech Res*, 2018, (4): 156–161 (in Chinese with English abstract).
- [14] Filipenco A, Mandache V, Valsan G, Ivan F, Ciocazanu I. Inheritance of grain dry-down in corn (*Zea mays* L.). *Bull UASMV*

- Serie Agric*, 2013, 70: 223–226.
- [15] Johnson D Q, Russell W A. Genetic variability and relationships of physical grain-quality traits in the BSSS population of maize I. *Crop Sci*, 1982, 22(4): 805–809.
  - [16] Zhang L, Liang X G, Shen S, Yin H, Zhou L L, Gao Z, Lu X Y, Zhou S L. Increasing the abscisic acid level in maize grains induces precocious maturation by accelerating grain filling and dehydration. *Plant Growth Regul*, 2018, 86(1): 65–79.
  - [17] 李璐璐, 薛军, 谢瑞芝, 王克如, 明博, 侯鹏, 高尚, 李少昆. 夏玉米籽粒含水率对机械粒收质量的影响. *作物学报*, 2018, 44: 1747–1754.
Li L L, Xue J, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Hou P, Gao S, Li S K. Effects of grain moisture content on mechanical grain harvesting quality of summer maize. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1747–1754 (in Chinese with English abstract).
  - [18] 蔡超杰, 陈志, 韩增德, 刘贵明, 张宗玲, 郝俊发. 种子玉米生物力学特性与脱粒性能的关系研究. *农机化研究*, 2017, (4): 192–196.
Cai C J, Chen Z, Han Z D, Liu G M, Zhang Z L, Hao J F. Study on relationship of biomechanical characteristics of corn seed and threshing performance. *J Agric Mech Res*, 2017, (4): 192–196 (in Chinese with English abstract).
  - [19] 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. *Trans CSAM*, 2015, 46(7): 97–101 (in Chinese with English abstract).
  - [20] 玉米遗传育种学编写组. 玉米遗传育种学. 北京: 科学出版社, 1979
Writing Group of Maize Genetics and Breeding. *Maize Genetics and Breeding*. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese).
  - [21] 柳枫贺, 王克如, 李健, 王喜梅, 孙亚玲, 陈永生, 王玉华, 韩冬生, 李少昆. 影响玉米机械收粒质量因素的分析. *作物杂志*, 2013, (4): 116–119.
Liu F H, Wang K R, Li J, Wang X M, Sun Y L, Chen Y S, Wang Y H, Han D S, Li S K. Factors affecting corn mechanically harvesting grain quality. *Crops*, 2013, (4): 116–119 (in Chinese with English abstract).
  - [22] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准委员会. 玉米收获机械: 试验方法. GB/T 21961-2008, 2008.
People's Republic of China National Standard. Technical Requirements for Maize Combine Harvester. GB/T 21961-2008, 2008 (in Chinese).
  - [23] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准委员会. 玉米. GB1353-2009, 2009.
People's Republic of China National Standard. Maize. GB1353-2009, 2009 (in Chinese).
  - [24] Waelti H. Physical Properties and Morphological Characteristics of Maize and Their Influence on Threshing Injury of Kernels. PhD Dissertation of Iowa State University, Iowa, America, 1967.
  - [25] 李璐璐, 明博, 高尚, 谢瑞芝, 侯鹏, 王克如, 李少昆. 夏玉米籽粒脱水特性及与灌浆特性的关系. *中国农业科学*, 2018, 51: 1878–1889.
Li L L, Ming B, Gao S, Xie R Z, Hou P, Wang K R, Li S K. Study on grain dehydration characters of summer maize and its relationship with grain filling. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 1878–1889 (in Chinese with English abstract).
  - [26] Jennings M V. Genotypic Variability in Grain Quality of Corn *Zea mays* L. PhD Dissertation of Iowa State University, Iowa, America, 1974.
  - [27] Vyn T J, Moes J. Breakage susceptibility of corn kernels in relation to crop management under long growing season conditions. *Agron J*, 1988, 80: 915–920.
  - [28] Chowdhury M H, Buchele W F. Effects of the operating parameters of the rubber roller sheller. *Trans ASABE*, 1975, 18: 482–486.
  - [29] Gunasekaran S, Paulsen M R. Breakage susceptibility of corn as a function of drying rates. *Trans ASABE*, 1985, 28: 2071–2076.
  - [30] Bauer P J, Carter P R. Effect of seeding date, plant density, moisture availability, and soil nitrogen fertility on maize kernel breakage susceptibility. *Crop Sci*, 1986, 26: 1220–1226.
  - [31] Plett S. Corn kernel breakage as a function of grain moisture at harvest in a prairie environment. *Can J Plant Sci*, 1994, 74: 543–544.
  - [32] 郭北辰, 康浩冉, 王丽娥, 刘洪泉, 陈艳花, 白光红, 窦秉德. 黄淮区籽粒机收玉米标准及育种模式探讨. *农业科技通讯*, 2016, (1): 159–162.
Guo Q C, Kang H R, Wang L E, Liu H Q, Chen Y H, Bai G H, Dou B D. The standard of corn grain mechanical harvest and breeding mode in Huang-Huai region. *Bull Agric Sci Technol*, 2016, (1): 159–162 (in Chinese).
  - [33] 高连兴, 李飞, 张新伟, 张永丽, 刘新, 焦维鹏. 含水率对种子玉米脱粒性能的影响机理. *农业机械学报*, 2011, 42(12): 92–97.
Gao L X, Li F, Zhang X W, Zhang Y L, Liu X, Jiao W P. Mechanism of moisture content effect on corn seed threshing. *Trans CSAM*, 2011, 42(12): 92–97 (in Chinese with English abstract).
  - [34] 张永丽, 高连兴, 刘红力, 李心平. 玉米籽粒剪切破碎的试验研究. *农机化研究*, 2007, (5): 136–138.
Zhang Y L, Gao L X, Liu H L, Li X P. Experimental study on corn kernel shear crash. *J Agric Mech Res*, 2007, (5): 136–138 (in Chinese).
  - [35] Martin C R, Converse H H, Czuchajowska Z, Lai F S, Pomeranz Y. Breakage susceptibility and hardness of corn kernels of various sizes and shapes. *Appl Eng Agric*, 1987, 3(1): 104–113.
  - [36] 李心平. 种子玉米脱粒损伤机理及 5TYZ-1 型定向喂入式脱粒机研究. 沈阳农业大学博士学位论文, 辽宁沈阳, 2007.
Li X P. Study on Threshing Damage Mechanism of Seed Corn and Study on 5TYZ-1 Directional Feed Thresher. PhD Dissertation of Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning, China, 2007 (in Chinese with English abstract).
  - [37] 袁月明, 栾玉振. 玉米籽粒力学性质的试验研究. *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 Jinlin Agric Univ*, 1996, 18(4): 75–78 (in Chinese with English abstract).
  - [38] 李心平, 高连兴, 马福丽. 玉米种子脱粒特性的试验研究. *农机化研究*, 2007, (2): 156–158.
Li X P, Gao L X, Ma F L. Experimental research of seed corn on the threshing property. *J Agric Mech Res*, 2007, (2): 156–158 (in Chinese).