

延迟收获对长江中游春玉米农艺性状及机收质量的影响

刘志辉¹ 展茗^{1*} 梁如玉¹ 王燕¹ 刘永忠¹ 黄益勤² 杨仁能¹ 尚春辉¹

(1. 华中农业大学 植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 武汉 430070;

2. 湖北省农科院 粮食作物研究所, 武汉 430070)

摘要 为探明长江中游玉米籽粒机械直收适宜品种与配套农艺措施, 2018—2019年选用不同玉米品种, 测定不同机收时间下玉米关键农艺性状、产量及机收质量指标。结果表明, 收获时间对春玉米机收产量与机收质量均有显著影响。延迟1周收获后籽粒容重显著增加, 机收产量显著提高, 2年平均提高9.72%; 而延迟2周收获则有降低机收产量的趋势。2年收获时杂质率总体 $\leq 3\%$, 而机收籽粒破碎率与损失率均 $> 5\%$, 是该区域春玉米籽粒机收面临的主要问题。籽粒厚度、籽粒含水率和百粒重是影响机收籽粒破碎率的关键性状, 三者与机收籽粒破碎率均呈显著的倒二次曲线关系; 玉米的倒伏率、穗位高和重心高度是影响机收损失率的关键性状, 倒伏率与机收损失率呈显著正相关, 而穗位高和重心高度与机收损失率均呈显著的二次曲线关系。延迟收获能显著降低籽粒含水量, 从而降低籽粒破碎率, 但继续延迟收获有增加倒伏的风险。综上, 长江中游春玉米成熟后适时延迟7~10 d收获, 可有效降低籽粒含水量与机收籽粒破碎率, 提高玉米籽粒机收产量。

关键词 长江中游; 春玉米; 机械粒收; 收获时间; 破碎率; 农艺性状

中图分类号 S513; S225

文章编号 1007-4333(2021)11-0010-13

文献标志码 A

Effect of delayed harvest on the agronomic traits and mechanical harvest quality of spring maize in the middle reaches of the Yangtze River

LIU Zhihui¹, ZHAN Ming^{1*}, LIANG Ruyu¹, WANG Yan¹, LIU Yongzhong¹,
HUANG Yiqin², YANG Renneng¹, SHANG Chunhui¹

(1. College of Plant Science and Technology/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Food Crop Science, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430070, China)

Abstract To explore the suitable varieties and supporting agronomic measures of maize mechanical harvesting in the middle reaches of the Yangtze River, different maize varieties were selected and harvested at different times after grain maturity in 2018 and 2019 to analyze the changes in yield and quality of mechanical harvest. The key agronomic traits were further identified influencing the broken rate and loss rate in mechanical harvest. The results showed that the harvest time had significant effects on mechanical harvest yield and quality in spring maize. The delayed harvest by a week significantly increased the grain test weight, thus increased the mechanical harvest yield by 9.72% averaged across varieties and two years. However, delayed harvest by 2 weeks would reduce the yield of mechanical harvest. In the two experimental years, the impurity rate was less than 3%, while the broken rate and loss rate of mechanical harvest were all higher than 5%, which were the major problem in maize mechanical harvest in this region. Grain thickness, grain moisture and 100-grain weight were the key traits affecting the grain broken rate in mechanical harvest.

收稿日期: 2020-12-31

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300308)

第一作者: 刘志辉, 硕士研究生, E-mail: 1766686187@qq.com

通讯作者: 展茗, 副教授, 主要从事玉米高产高效栽培与农田生态研究, E-mail: zhanming@mail.hzau.edu.cn

which showed a significant negatively quadratic curve relationship with the grain broken rate. The lodging rate, ear height and barycenter height were the key traits affecting the loss rate. The lodging rate is positively linearly correlated with the mechanical harvest loss, while the ear height and the barycenter height had a significant quadratic curve relationship with the loss rate. In conclusion, the delayed harvest by one week significantly decreases the grain moisture and thus reduces the grain broken rate. However, continuing to delay the harvest has the risk in increasing lodging rate. It is suggested that spring maize in the middle reaches of Yangtze river could be mechanically harvested 7–10 d after maturity, which could effectively reduce the grain moisture and the grain broken rate, thus increase the mechanical yield.

Keywords the middle reaches of the Yangtze River; spring maize; mechanical grain harvest; harvest time; broken rate; agronomic traits

玉米机械化收获是玉米生产的重要环节,也是实现玉米全程机械化的难点所在。与欧美发达国家相比,我国玉米机械化收获技术生产应用起步较晚^[1-2],但近几年发展较快,截止 2018 年,我国玉米机收率超过 70%,但低于小麦和水稻的机械化收获水平^[3]。目前我国玉米机械化收获主要以机收穗为主,直接机收籽粒比例尚少,且普遍存在玉米机收籽粒破碎率高和损失率高等问题^[4]。因此,提高玉米籽粒机收质量是实现我国玉米高效机械化籽粒直收亟待解决的问题。已有研究表明玉米籽粒机械化收获质量受品种^[5]、配套农艺措施^[6]和收获机械^[7]等多种因素的影响。机收籽粒破碎率高是我国玉米机械化籽粒直收存在的主要质量问题^[8]。近期研究表明,我国玉米籽粒机械收获破碎率均值为 8.56%^[4],黄淮海地区机收籽粒破碎率为 10.19%^[9],远高于国标“玉米收获机械技术条件”(GBT-21961—2008)^[10]中机收籽粒破碎率标准($\leq 5.00\%$)。籽粒含水量与破碎率之间呈极显著正相关,是造成玉米籽粒破碎率高的主要因素^[11]。收获时玉米籽粒含水量是品种、气象条件和栽培措施共同作用下籽粒脱水快慢的结果^[12-13]。少数研究表明籽粒脱水速率与穗粗、轴粗、粒长和百粒重呈极显著负相关^[14],影响玉米籽粒脱水的内在生理机制有待深入研究与鉴别。损失率是制约籽粒机收质量的又一重要因素,我国玉米机械粒收总损失率平均为 4.76%^[4],黄淮海地区 22.50% 的春玉米机收总损失率高于现行国家标准($\leq 5.00\%$)^[15],对玉米机收产量造成较大影响。研究表明,田间倒伏是造成玉米机收损失率高的另一主要原因^[15]。收获时收获机割台高度、收获速度对损失率也有较大的影响^[16]。降低机收损失率的适宜植株性状及配套农艺措施仍有待深入探明。相较于北方玉米主产区,南方地区玉米籽粒机收起步晚,相关研究较少。最近研究表明西南地区夏玉米机械

粒收籽粒破碎率平均为 5.63%^[17],同样存在破碎率高的问题。长江中游地区由于畜牧业和玉米深加工工业发展,对玉米需求迅速增加,21 世纪以来玉米种植面积迅速扩大,但单产水平低于我国玉米主产区单产^[18],玉米高产高效机械化生产是长江中游玉米生产发展的必然趋势。但因生态条件多样,该区春玉米生育后期多降雨天气^[19],现有品种籽粒脱水速率慢,籽粒机收难度较大,严重制约了该区玉米籽粒机收技术的推广。而针对该区从品种改良和配套农艺措施优化等方面提高玉米机收质量的研究鲜有报道。本研究通过比较不同品种和收获时间的玉米机收质量性状,分析影响机收质量的关键农艺性状,旨在探明玉米成熟后适宜的机收时间,以期为长江中游玉米宜机收品种选育及配套农艺措施提供参考。

1 材料与与方法

1.1 试验点

试验于 2018 和 2019 年在湖北省荆门市屈家岭管理区(30°53' N, 112°46' E)进行。地处江汉平原北界,属于亚热带季风性气候,是湖北省典型两熟制区。全年日均温 10℃ 以上的天数约为 230~240 d,且雨热同期,年均降水量约为 1 100~1 300 mm。试验期间玉米生长期间主要气象条件,见表 1,2018 和 2019 年 4—8 月平均气温均为 25.2℃,累计降雨量分别为 544.4 与 564.8 mm,平均相对湿度分别为 75.6% 与 74.8%。但 2 年的降水与气温分布差异较大,2018 年 6 月降水偏少,但 7 月降水较多;而 2019 年 6 月降水较多,7—8 月降水量较少,气温较高,8 月出现严重干旱。试验点土壤类型为潮土,土壤有机质含量为 15.93 g/kg,全氮含量为 0.67 g/kg,全磷含量为 0.53 g/kg,速效磷含量 17.09 mg/kg,速效钾含量为 64.46 mg/kg。

表1 2018和2019年4—8月旬日均温、累计降雨量和相对湿度的变化

Table 1 Daily mean temperature, accumulated rainfall and relative humidity over ten-days from April to August in 2018 and 2019

月份 Month	时段 Period	日均温/℃ Average daily temperature		累计降水量/mm Accumulated rainfall		RH/%	
		2018	2019	2018	2019	2018	2019
4 Apr	上旬 Eearly	17.3	18.1	36.6	35.9	65.5	73.4
	中旬 Mid	18.0	19.1	40.1	7.4	74.5	71.4
	下旬 Late	19.8	18.0	37.2	74.3	79.5	85.4
5 May	上旬 Eearly	21.0	20.3	30.4	1.1	75.0	66.3
	中旬 Mid	25.3	22.0	59.5	49.1	77.5	82.1
	下旬 Late	22.1	22.6	30.3	81.2	77.0	74.5
6 Jun	上旬 Eearly	24.2	27.7	0.7	58.3	74.8	72.4
	中旬 Mid	27.0	25.5	17.1	82.0	69.6	81.5
	下旬 Late	27.4	26.3	103.8	36.9	80.9	81.2
7 Jul	上旬 Eearly	26.9	27.9	101.3	49.0	86.9	77.2
	中旬 Mid	29.8	27.8	10.8	11.0	80.1	81.0
	下旬 Late July	30.1	31.5	20.1	55.0	77.1	76.6
8 Aug	上旬 Eearly	29.5	31.0	45.2	7.4	80.8	72.1
	中旬 Mid	29.4	30.9	6.1	6.0	70.8	70.0
	下旬 Late	29.3	29.4	5.2	10.2	64.5	65.3

1.2 试验设计

采用收获时间与品种两因素裂区试验,收获时间为主区,品种为裂区。2018年选用5个玉米品种,包括在湖北省平原区春玉米品种区试中表现好且通过审定的品种‘登海618’(‘DH618’)与‘中农大7737’(‘ZND7737’);在黄淮海平原玉米机收组区域试验中表现较好的‘迪卡517’(‘DK517’)与‘粒收1号’(‘LS1’),选用当地种植面积较大的‘蠡玉88’(‘LY88’)为对照。2019年选用8个品种,除2018年的‘登海618’(‘DH618’)和‘迪卡517’(‘DK517’)外,还包括湖北省审定品种及品种区域试验中表现较好的‘浚单509’(‘XD509’)和‘登海1786’(‘DH1786’),从黄淮海平原玉米种植区域表现好且通过审定的‘豫单9953’(‘YD9953’)、‘迪卡653’(‘DK653’)和‘京农科728’(‘JNK728’)等,仍以‘蠡玉88’为对照。每个品种设置生理成熟期(T_1)、生理成熟后1周(T_2)和生理成熟后2周(T_3)

等3个机械化收获时间,实际收获时间根据各个品种的生理成熟时间确定。每个处理小区机收8行玉米,行长为40 m,3次重复。

1.3 田间管理

春玉米播种前进行旋耕整地。2018年4月3日播种,2019年3月26日播种,均使用精量播种机单粒播种,苗期不间苗。种植行距为60 cm,株距为18.5 cm,密度为9万株/hm²。结合播前整地,施用玉米专用配方肥(N:P₂O₅:K₂O质量比为24:7:7)600 kg/hm²和复合肥(N:P₂O₅:K₂O质量比为15:15:15)375 kg/hm²作底肥。玉米大喇叭口期,追施尿素225 kg/hm²和氯化钾37.5 kg/hm²。播种后喷封闭型除草剂。大喇叭口期喷施化控剂乙烯利进行化控。在各品种生理成熟后按试验设计的收获时间进行机械化籽粒直收,收获机为雷沃谷神GE60(潍柴雷沃重工股份有限公司),收获机行距为60 cm。其他田间管理同当地大田玉米生产。

1.4 测定指标及方法

收获前每小区选 3 点,每点选取 15 株代表性植株调查株高、穗位高和茎粗;调查 10 m 双行总株数、倒伏株数和茎腐病株数,计算玉米收获密度和不同收获期玉米植株的倒伏率和茎腐病发病率;选取 10 株代表性植株,测量玉米重心高度;用便携式茎秆强度仪测定茎秆拉折力,连续测定 20 株;连续取 20 株玉米果穗,测定穗长和穗粗;果穗脱粒后取中部籽粒用 LDS-1G 电脑水分测定仪(上海农奥仪器有限公司)测定籽粒含水量和容重;取 100 粒种子用于测定百粒重,3 次重复;取 30 粒籽粒,用游标卡尺测量籽粒长、宽和厚,计算理论体积;取 30 粒籽粒,用谷物硬度计测定籽粒破碎力。玉米机收后测量机收小区长和宽,计算机收面积,称量机收籽粒重量;每个小区取 3 份机收籽粒,测定籽粒含水量,按 14% 籽粒含水量折算机收产量。同时,参照李璐璐等^[5]的方法测定机收籽粒破碎率、含杂率与损失率。

1.5 数据处理及统计分析方法

利用 Statistix 8.0 进行方差分析与显著性检验(LSD 法);调用 R 语言中 Relaimpo 软件包,利用 LMG 方法^[20]进行机收籽粒破碎率和田间损失率关键影响因素相对重要性分析;利用 SPASS 16.0 进行回归曲线拟合与显著性检验;利用 Excel 2010 进行作图。

2 结果与分析

2.1 收获时间对春玉米机收产量的影响

由表 2 可知,2 年的收获时间与品种均对春玉米机收产量有显著影响($P < 0.01$)。2018 年,机收产量随着收获时间的延迟呈现先上升后下降的趋势,成熟后 1 周(T_2)机收产量显著高于生理成熟期(T_1)与延迟 2 周收获(T_3)的产量。而 2019 年,延迟收获也显著提高了机收产量, T_2 与 T_3 机收产量均显著高于 T_1 机收产量,但 T_2 与 T_3 机收产量差异不显著。总体而言, T_2 处理可以显著提高玉米机收产量,2 年平均提高 9.72%。2018 年,收获时间与品种的互作效应显著($P < 0.01$),主要是‘粒收 1 号’随收获期的延迟机收产量显著下降;而 2019 年收获时间与品种间的互作效应不显著。

2.2 不同品种和收获时间对春玉米机收质量的影响

由表 3 可知,收获时间与品种对玉米机收籽粒

破碎率有显著影响。2 年试验中,随收获期延迟,籽粒破碎率均有显著降低趋势($P < 0.05$)。2018 和 2019 年,各品种 T_1 的籽粒破碎率平均值均 $> 10%$;而 T_2 与 T_3 的籽粒破碎率分别下降到 8.5% 和 5.6% 左右。2 年的试验中机收玉米籽粒破碎率品种间差异显著,2018 年,各个品种破碎率变化范围为 4.45%~18.94%,2019 年为 3.94%~16.64%。从 3 个共性品种看,与 2018 年相比,‘登海 618’和‘蠡玉 88’延迟 2 周收获籽粒破碎率均 $\leq 5%$,而‘迪卡 517’籽粒破碎率仍 $\geq 5%$ 。

由表 3 可知,2018 年机收损失率随收获期的推迟显著增加($P < 0.05$), T_3 的损失率平均高达 21.2%,而 2019 年机收损失率受收获时间影响不显著。机收损失率品种间变化较大,2018 年在 1.6%~43.5%,‘蠡玉 88’和‘中农大 7737’损失率显著高于其他 3 个品种;而 2019 年‘迪卡 517’、‘豫单 9953’和‘迪卡 653’机收损失率总体上显著高于其他品种。2018 年收获时间与品种的交互作用显著,主要是‘迪卡 517’在 T_1 的损失率偏高,而其他品种随推迟收获导致损失率升高;2019 年收获时间与品种间的交互作用不显著。

2018 和 2019 年,各收获时期机收含杂率均 $\leq 3%$,符合现有行业标准中机收含杂率的要求,见表 3。但总体看,收获期延迟能有效降低机收含杂率;机收含杂率品种间差异显著,‘中农大 7737’、‘粒收 1 号’和‘豫单 9953’机收杂质率相对较低。

2.3 影响春玉米机收破碎率的关键因素

由表 4 可知,各指标对籽粒破碎率的贡献率由大到小为:籽粒厚 $>$ 籽粒含水率 $>$ 百粒重 $>$ 穗粗 $>$ 籽粒体积 $>$ 穗长 $>$ 籽粒宽 $>$ 容重 $>$ 籽粒长 $>$ 籽粒压缩破碎力,其中籽粒厚、籽粒含水率和百粒重对机收籽粒破碎率变异的解释累计达 59.8%。籽粒厚、籽粒含水率和百粒重均与籽粒破碎率呈显著的二次曲线关系,见图 1。籽粒破碎率随籽粒厚度、粒重的增加呈先降低后上升的趋势,随着籽粒含水率的增加而增加。根据回归模型,当籽粒厚度介于 3.5~4.5 mm,收获时籽粒含水率下降至 23.0% 以下,籽粒百粒重介于 28.0~31.0 g 时,机收籽粒破碎率可 $\leq 8%$ 。

2.4 影响春玉米机收损失率的关键因素

由表 5 可知,对籽粒损失率影响较大的因素有植株倒伏率、穗位高和重心高度,三者对机收损失率的变异累计贡献为 74.7%。进一步回归分析表明

倒伏率与损失率间呈显著的正相关(图 2(a)),倒伏率越低损失率越小,当倒伏率 $\leq 2.0\%$ 时,机收损失率可降低到 6.0%以下。而穗位高、重心高度均与机收损失率呈显著的二次曲线关系(图 2(b)和

(c)),随着穗位高和重心高度的增加机收损失率呈先下降后上升的趋势;根据回归方程估计,当玉米穗位高介于 82.0~102.0 cm,重心高度介于 76.0~114.0 cm 时,机收损失率可下降到 5%以下。

表 2 不同收获时间下春玉米机收产量

Table 2 Mechanical harvest yield of spring maize at different harvest time

t/hm²

年份 Year	品种 Varieties	收获期 Harvest time			均值 Average
		T ₁	T ₂	T ₃	
2018	DH618	9.27±0.76 A(a)	9.60±0.78 A(b)	8.98±0.73 B(b)	9.28 b
	DK517	8.46±0.23 B(bc)	10.97±0.29 A(a)	11.24±0.30 A(a)	10.22 a
	ZND7737	7.80±0.20 A(c)	7.12±0.18 B(c)	7.72±0.19 AB(c)	7.55 c
	LS1	8.99±0.27 A(ab)	7.35±0.22 B(c)	6.11±0.18 C(d)	7.48 c
	LY88	5.86±0.20 AB(d)	6.35±0.21 A(d)	5.57±0.19 B(d)	5.93 d
	平均值 Average	8.08 B	8.28 A	7.92 C	
	品种 V	159.70**			
收获期 T	409.10**				
V×T	22.0**				
2019	DH786	6.62±0.51 B(bc)	6.60±0.66 B(bc)	7.37±0.76 A(b)	6.87 ef
	JNK728	6.04±0.48 B(cd)	8.17±0.96 A(ab)	7.60±0.76 A(ab)	7.28 e
	DH618	8.41±0.79 A(a)	8.60±0.81 A(a)	9.22±0.87 A(a)	8.74 ab
	DK517	6.07±0.47 B(cd)	8.06±0.65A(abc)	8.32±0.78 A(ab)	7.48 cde
	YD9953	6.52±0.67 B(bc)	8.86±0.80 A(a)	8.23±0.74 A(ab)	7.87 bcd
	XD509	7.67±0.71 B(ab)	8.59±0.77 A(a)	8.85±0.82 A(ab)	8.37 abc
	DK653	5.03±0.84 B(d)	6.30±0.72 AB(c)	7.05±0.70 A(b)	6.13 f
	LY88	8.93±0.95 A(a)	9.65±0.89 A(a)	8.74±0.83 A(a)	9.10 a
	平均值 Average	6.91 B	8.10 A	8.17 A	
	品种 V	9.49**			
收获期 T	170.70**				
V×T	1.01 ^{ns}				

注: T₁, 生理成熟期收获; T₂, 生理成熟后 1 周收获; T₃, 生理成熟后 2 周收获。同列不同小写字母表示品种间差异显著($P < 0.05$); 同行不同大写字母表示不同收获期差异显著($P < 0.05$)。* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著差异, ns 表示无显著差异。下同。

Note: T₁, harvest at maize maturity; T₂, harvest delayed by one week after maize maturity; T₃ harvest delayed by two weeks after maize maturity. Different lowercase letters within same column indicate significantly different among different varieties ($P < 0.05$). Different capital letters within each row mean significantly different among different harvesting time ($P < 0.05$). * and ** represent significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively, ns represents no significantly difference. The same below.

表 3 收获时间与品种对春玉米机收质量的影响

Table 3 Influences of harvest time and varieties on the mechanical harvest quality of spring maize

年份 Year	品种 Varieties	籽粒破碎率 Grain broken rate			损失率 Loss rate			含杂率 Impurity rate			均值 Average		
		T ₁	T ₂	T ₃	均值 Average	T ₁	T ₂	T ₃	均值 Average	T ₁		T ₂	T ₃
2018	DH618	15.89 A(a)	9.35 B(a)	7.85 B(a)	11.03 a	3.81 B(bc)	8.15 A(c)	5.68 A(d)	5.88±c	0.89 A(a)	0.26 B(a)	0.22 B(a)	0.45 a
	DK517	18.94 A(a)	6.33 B(bc)	5.60 B(b)	10.29 a	6.26 A(b)	2.20 B(d)	3.61 AB(e)	4.02±c	0.91 A(a)	0.06 C(a)	0.25 B(a)	0.40 a
	ZGD7737	6.94 A(c)	7.63 A(ab)	4.97 B(b)	6.51 c	12.10 C(ab)	20.53 B(b)	37.59 A(b)	23.40±b	0.18 A(b)	0.18 B(a)	0.10 C(a)	0.15 b
	LS1	5.36 A(c)	6.71 A(bc)	4.45 B(b)	5.51 c	1.58 B(c)	2.52 B(d)	15.46 A(c)	6.52±c	0.24 A(b)	0.19 B(a)	0.04 C(a)	0.16 b
	LY88	10.52 A(b)	5.56 C(c)	7.35 B(a)	7.81b	26.50 B(a)	29.08 B(a)	43.47 A(a)	33.01±a	0.39 A(b)	0.36 A(a)	0.14 C(a)	0.30 ab
	平均值 Average	11.53 A	7.12 B	6.04 B	10.05 B	12.50 B	21.16 A		0.52 A	0.21 B	0.15 B		
	品种 V	31.44**			35.87**					5.59**			
	收获期 T	60.61**			7.33*					17.68*			
	V×T	19.34**			2.69*					4.15**			
2019	DH1786	6.36 A(d)	7.74 A(b)	3.30 B(de)	5.80 d	3.11 A(b)	1.51 B(c)	3.98 AB(ab)	2.87 c	1.47 A(abc)	1.38 A(a)	0.50 B(a)	1.12 a
	JNK728	11.39 A(bc)	13.71 A(a)	6.32 B(b)	10.48 ab	2.70 AB(b)	1.74 B(c)	4.69 A(ab)	3.05 c	1.36 A(abc)	0.75 B(ab)	0.03 C(c)	0.71 ab
	DK618	18.28 A(a)	10.45 B(ab)	3.94 C(ced)	10.89 ab	4.19 A(b)	4.59 A(b)	5.77 A(ab)	4.85 bc	2.01 A(ab)	0.26 B(b)	0.08 C(bc)	0.78 ab
	DK517	18.26 A(a)	11.17 B(ab)	6.58 C(b)	12.00 a	5.05 B(ab)	13.06 A(a)	10.65 A(a)	9.59 a	1.89 A(ab)	0.54 B(ab)	0.02 C(c)	0.82 ab
	YD9953	14.80(ab)	9.81 B(ab)	9.45 B(a)	11.35 a	6.52 A(ab)	6.41 A(b)	9.31 A(a)	7.41 ab	0.92 A(bc)	0.43 B(ab)	0.06 C(bc)	0.47 b
	XD509	9.51 A(ced)	7.23 A(b)	2.33 B(e)	6.36 d	7.21 A(ab)	5.36 A(b)	5.35 A(ab)	5.97 bc	2.32 A(a)	0.81 B(ab)	0.12 C(b)	1.08 a
	DK653	9.79 (bcd)	8.29 A(b)	4.92 B(c)	7.67 cd	9.49 A(a)	3.25 B(bc)	7.46 A(ab)	6.73 ab	1.18 A(bc)	0.68 B(ab)	0.13 C(b)	0.66 ab
	LY88	12.64 A(bc)	9.78 B(ab)	4.42 C(ced)	8.95 bc	3.66 A(b)	6.40 A(b)	2.35 A(b)	4.14 bc	0.70 A(c)	0.59 AB(ab)	0.10 B(bc)	0.47 b
	平均值 Average	12.63 A	9.77B	5.16 C	5.24 A	5.29 A	6.20 A		1.48 A	0.68 B	0.13 C		
	品种 V	10.52**			3.63**					2.29*			
	收获期 T	126.00**			0.49 ^{ns}					92.15**			
	V×T	3.41**			1.21 ^{ns}					1.73 ^{ns}			

表4 基于LMG法的春玉米各生物学性状对机收籽粒破碎率的影响

Table 4 Relative importance of different biological traits to grain broken rate based on LMG method %

性状 Trait	平均值 Average	置信区间 Confidence intervals
籽粒厚 Grain thickness	24.42	32.27~10.41
籽粒含水率 Grain moisture	22.76	32.87~10.99
百粒重 100-grain weight	12.60	20.31~6.36
穗粗 Ear diameter	8.60	19.60~1.95
籽粒体积 Grain volume	7.55	13.50~4.45
穗长 Ear length	6.00	19.02~1.39
籽粒宽 Grain width	5.54	11.59~2.84
容重 Grain test weight	4.63	15.47~2.02
籽粒长 Grain length	4.26	10.60~2.67
籽粒破碎力 Crushing force of grain	3.64	10.16~1.42

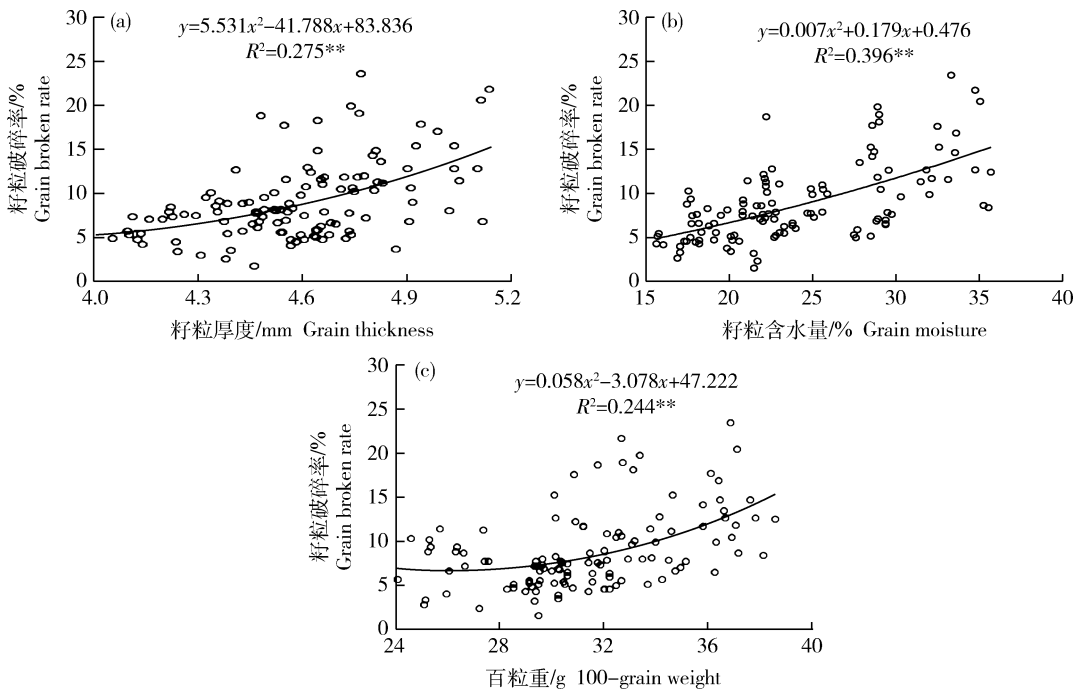


图1 春玉米籽粒厚度(a)、籽粒含水量(b)和百粒重(c)与机收籽粒破碎率之间的关系

Fig.1 Relationship between grain thickness (a), grain moisture (b), 100-grain weight (c) with grain broken rate

2.5 收获时间对春玉米籽粒含水量、容重与倒伏率的影响

由表6可知,随收获延迟玉米籽粒含水量下降较快,2018和2019年 T_1 收获时各品种籽粒含水量

分别为28.73%与32.09%; T_2 的籽粒含水率2年分别显著下降4.8%和4.5%; T_3 的籽粒含水率2年分别显著下降9.6%和4.4%。延迟收获有提高玉米籽粒容重的趋势。相较于 T_1 期收获,2018

和 2019 年, T_2 期收获籽粒容重分别显著提高 6.2% 和 3.7%; 继续延迟到 T_3 收获籽粒容重增重变缓, 2018 和 2019 年分别提高 3.5% 与 0.2%。2018 年玉米倒伏较重; 而 2019 年玉米倒伏较轻, 各品种各个时期收获时倒伏普遍在 6.00% 以下。

从 2018 年数据来看, 随收获的延迟, 有增加玉米倒伏的风险, 这是继续延迟后机收损失率增加, 机收产量下降的原因之一。因此, 从平衡机收产量、机收破碎率、机收损失率的角度看, 需要考虑适宜的延迟收获时间。

表 5 基于 LMG 法的春玉米各生物学性状对机收籽粒损失率的影响

Table 5 Relative importance of different biological traits to grain loss rate based on LMG method %

性状 Biological trait	平均值 Average	置信区间 Confidence interval
倒伏率 Lodging rate	44.98	57.36~21.84
重心高度 Ear height	14.11	24.40~5.29
穗位高 Height of barycenter	14.08	22.17~6.36
茎腐病率 Incidence of stalk rot	9.95	34.70~2.44
株高 Plant height	9.64	15.22~5.10
茎粗 Stem diameter	4.96	17.26~1.27
籽粒含水率 Grain moisture	1.83	8.60~0.36
茎秆拉折力 Pulling force of stem	0.45	4.14~0.31

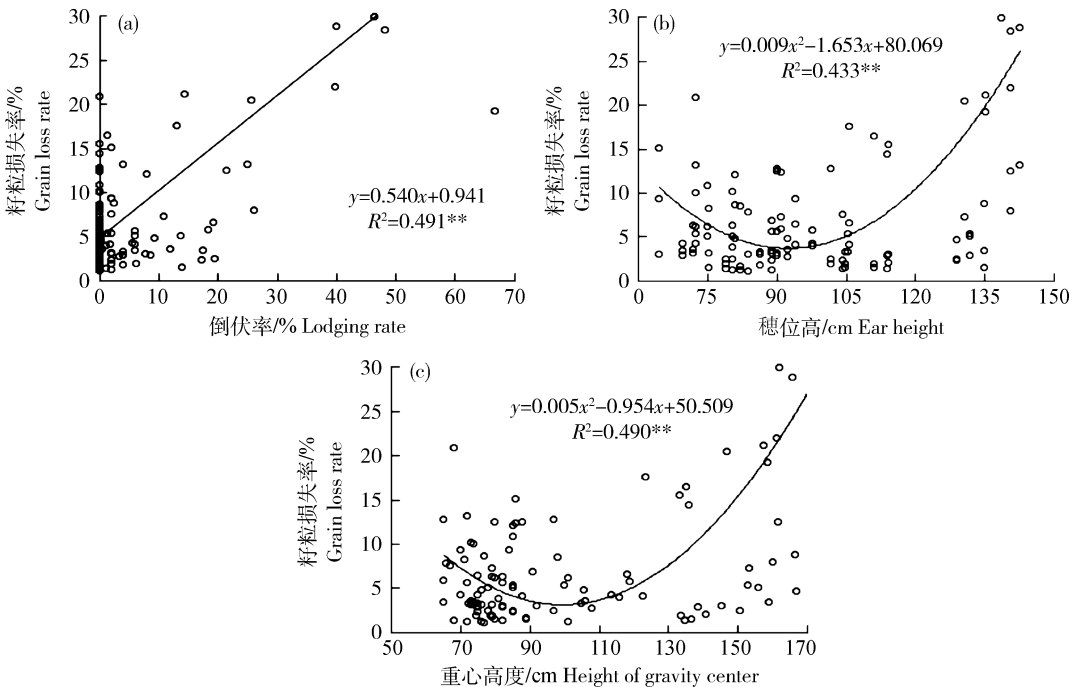


图 2 春玉米倒伏率(a)、穗位高(b)和重心高度(c)与机收籽粒损失率之间的关系

Fig. 2 Relationship between lodging rate (a), ear height (b), gravity center height (c) with grain loss rate in spring maize

表6 不同收获时间对春玉米籽粒含水量、容重与倒伏率的影响

Table 6 Changes in grain moisture, test weight and lodging rate under different mechanical harvest time of spring maize

收获时间 Harvest time	籽粒含水量/% Grain moisture		籽粒容重/(g/L) Grain test weight		倒伏率/% Lodging rate	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
	T ₁	28.73 a (27.6~29.43)	32.09 a (28.76~35.51)	687.30 c (671.50~722.50)	720.83 b (683.33~758.33)	8.18 b (0.39~21.22)
T ₂	23.96 b (22.77~25.13)	22.49 b (20.93~25.71)	730.20 b (689.50~758.50)	747.54 a (706.67~788.33)	23.10 a (6.02~44.90)	1.75 a (0.00~5.33)
T ₃	19.42 c (19.00~20.50)	18.09 c (15.70~21.56)	755.50 a (733.50~775.50)	749.08 a (734.33~792.33)	25.49 a (6.02~44.90)	2.17 a (0.00~5.33)

注:同一列不同小写字母表示不同收获期差异显著($P<0.05$);括号内数据为不同品种各指标的变化范围。

Note: Different lowercase letters in same column indicate significantly different among different harvesting time ($P<0.05$); The data in brackets are the ranges of each indicator among different varieties.

3 讨论

3.1 籽粒破碎率与损失率的影响因素

籽粒破碎率高影响玉米质量等级,是当前我国玉米机械化直收籽粒面临的最大问题^[21-22]。美国在20世纪中期开始进行玉米籽粒直收,也存在籽粒破碎率大的问题,机收破碎率高达29.00%^[23]。本研究发现长江中游春玉米生理成熟时机收籽粒破碎率为5.36%~18.94%,平均高达12.08%(表3),远高于我国现行国家标准机收籽粒破碎率标准($\leq 5.00%$)^[10]。近期有研究表明,黄淮海地区夏玉米机收籽粒破碎率均值为10.19%^[9];黄土高原旱作区平均为7.23%~7.75%^[24];东北春玉米平均为5.24%,最高为9.48%^[8];可见长江中游春玉米机收破碎率高于其他玉米产区。本研究发现,品种间的机收破碎率差异显著(表3)。多数研究表明收获时玉米籽粒含水量是影响籽粒破碎率的关键因素^[5-6, 11, 24-25],两者呈显著正相关关系^[26],籽粒含水率能够解释破碎率变化的45.2%^[27]。目前,国际上普遍认为,籽粒含水率在18.0%~23.0%时破碎率最低^[25, 28]。本研究也发现籽粒含水量与籽粒破碎率呈显著的二次曲线关系(图1(b)),这与Plett等^[26]研究较一致。此外,籽粒形状、结构成分和力学特性也会影响机收破碎率^[29-31]。本研究通过相对重要性分析,发现籽粒厚度、收获时籽粒含水率以及百粒重对破碎率影响较大(表4)。进一步回归分析表明,籽粒厚度与籽粒破碎率间呈二次曲线关系,当

籽粒厚度介于3.5~4.5 mm,机收破碎率较低(图1(a))。此外,本研究发现粒重与籽粒破碎率也呈显著的二次曲线关系(图1(c)),据模型估算低破碎收获时,品种百粒重在28.0~31.0 g较合适。可见影响籽粒破碎率的因素较多,除籽粒水分外,其他影响因素的研究较少,且有不一致的情况,还需结合各区域的生态条件和种植制度等进一步深入探明。

机械收获过程中田间损失率直接影响着玉米收获产量。柴宗文等^[26]调查发现黄淮海、西北及东北玉米产区机收粒玉米产量平均损失率4.12%。而本研究中,2年的籽粒机收损失率变化很大,2018年为1.58%~43.47%,2019年为1.51%~13.06%,平均超过5.00%(表3),高于其他玉米产区的平均水平^[26],这可能与当地的气候条件、品种适应性和栽培措施等有一定关系。但本试验发现品种与收获期对机收损失率均有显著影响(表3)。研究表明玉米生育后期倒伏是造成玉米机收损失的主要影响因素,倒伏率每增加1%,果穗损失增加0.15%,倒伏也会降低机收籽粒品质^[32]。因此品种的立秆特性、穗粒特性及种植密度等均会影响机收损失率^[33-37]。本试验通过相对重要性分析发现倒伏率是影响损失率的最重要的因素,对机收损失的贡献率可达46.46%(表5),在本试验条件下,当倒伏率 $\leq 1%$ 时,损失率才能控制在5%以下(图2(a))。已有研究表明,穗位高是影响玉米倒伏的关键因素^[33]。本研究也发现穗位高与重心高度对机收损失也有重要贡献(表5),且与机收损失率呈显著的二次曲线关

系(图 2(b)和(c)),当穗位高控制在 82.0~102.0 cm 时可有效降低机收损失率。这对于指导当地玉米品种的筛选和群体调控具有一定借鉴意义。樊廷录等^[24]发现田间产量损失与籽粒水分显著相关,当籽粒水分 $\leq 21.4\%$ 时,产量损失率最低。但本研究发现籽粒含水率对机收损失影响不显著(表 5)。樊廷录等^[24]也发现收获时的天气条件对黄土高原玉米机收损失也有影响,阴雨天气会导致损失率升高。本试验中,2018 年玉米生理成熟前后(7 月底—8 月上旬)降水明显多于 2019 年(表 1),这也可能是 2018 年损失率高于 2019 年的原因之一。

3.2 提高长江中游春玉米机收质量的可行途径

玉米生理成熟后延迟收获可以显著降低籽粒含水率,降低机收籽粒破碎率。美国在玉米籽粒机收初期通过延迟收获使籽粒含水率降至 20% 甚至更低,达到降低机收籽粒破碎率的效果^[38]。随着收获期推迟,籽粒含水率逐渐降低,籽粒破碎率和落粒率呈先降低后升高趋势^[39]。梁效贵等^[40]发现黄淮海地区夏玉米延迟收获能有效降低籽粒水分,延迟收获 10 d 籽粒含水量下降 4.6%,继续延迟 10 d 可继续下降 3.5%。本研究也发现了类似的规律,随收获期的延迟,所有品种的籽粒仍继续脱水,延迟 1 周,籽粒含水量平均下降了 7.2%,继续延迟 1 周,籽粒水分又下降 4.4%(表 6),由此可见,在长江中游春玉米延迟收获后籽粒含水量的下降速度要快于黄淮海地区夏玉米,这可能与本试验中春玉米机收时气温较高且降水偏少有关(表 1)。

已有研究表明玉米生理成熟后的籽粒脱水主要受气象等外部因素驱动^[3]。本研究同时发现随收获延迟,籽粒容重上升(表 6),有利于增加机收产量(表 2),同时硬度增大,也有利于降低籽粒破碎率^[31]。因此本试验发现生理成熟后延迟 1 周收获,籽粒破碎率平均下降 3.48%,延迟 2 周收获,可继续下降 2.84%(表 3)。但是,随着收获期推迟茎腐病与穗腐病发生率会升高^[41],引起玉米倒伏增加^[42],不仅造成收获障碍,增加收获成本,而且机收损失率升高,降低玉米机收产量。本研究发现,2018 年机收延迟 1 周收获,倒伏率明显升高(表 6),2019 年倒伏率低,延迟收获后变化不大。这可能是 2018 年延迟 1 周内(约 7 月底—8 月上旬)降水量偏多,比 2019 年的 RH 大(表 1)。由此可见,延迟收获有利于降低籽粒破碎率,但却存在机收损失率增加的风险。长江中游地处亚热带湿润气候区,春玉米收

获前后多处于高温高湿环境,延迟收获可能会加速玉米生理成熟后植株自然衰老过程^[42],加重茎腐病发生,机械强度降低增加倒伏风险,且该区春玉米以两熟制为主,与下茬作物之间的农闲期最多 20 d 左右。因此,在权衡降低机收破碎率、机收损失率与提高机收产量的基础上,选择合理的延迟收获时间,同时还要综合考虑当地生态条件与种植制度的要求。

4 结 论

湖北省春玉米生理成熟时机收含杂率较低,而籽粒破碎率与损失较高,普遍达不到国家标准($\leq 5.00\%$)的要求,是湖北省春玉米机械直收籽粒面临的主要问题。春玉米品种的植株特性对机收破碎率与损失率均有显著影响。籽粒厚度、籽粒含水率和百粒重对籽粒破碎率影响较大;而倒伏率、穗位高和重心高度对损失率影响较大。适宜的籽粒厚度、收获时较低籽粒含水量、适宜的粒重、适宜的穗位高度和选用抗倒伏品种等均有利于提高春玉米机收质量。生理成熟后适当推迟收获时间可以显著降低籽粒水分和降低机收籽粒破碎率,但也有增加机收损失率、降低机收产量的风险,因此建议长江中游春玉米成熟后推迟 7~10 d 机收较合适。

参考文献 References

- [1] 耿爱军,杨建宁,张兆磊,张姬,李汝莘. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 251-257
Geng A J, Yang J N, Zhang Z L, Zhang J, Li R S. Discuss about the current situation and future of corn harvest machinery about domestic and abroad [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(4): 251-257 (in Chinese)
- [2] 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 [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9(3): 15-28
- [3] 崔涛,樊晨龙,张东兴,杨丽,李义博,赵慧慧. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 1-13
Cui T, Fan C L, Zhang D X, Yang L, Li Y B, Zhao H H. Research progress of maize mechanized harvesting technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 1-13 (in Chinese)
- [4] 李少昆. 我国玉米机械粒收质量影响因素及粒收技术的发展方向[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2017, 35(3): 265-272
Li S K. Factors affecting the quality of maize grain mechanical harvest and the development trend of grain harvest technology [J].

- Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2017, 35(3): 265-272 (in Chinese)
- [5] 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[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 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[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2044-2051 (in Chinese)
- [6] 郝引川, 张仁和, 张兴华, 薛吉全, 王克如, 李少昆. 陕西春玉米子粒含水率与机械粒收质量的关系分析[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 122-125
Hao Y C, Zhang R H, Zhang X H, Xue J Q, Wang K R, Li S K. Relationship of maize grain mechanical harvesting traits and grain moisture in Shaanxi Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(6): 122-125 (in Chinese)
- [7] 王克如, 李璐璐, 郭银巧, 范盼盼, 柴宗文, 侯鹏, 谢瑞芝, 李少昆. 不同机械作业对玉米子粒收获质量的影响[J]. 玉米科学, 2016(1): 114-116
Wang K R, Li L L, Guo Y Q, Fan P P, Chai Z W, Hou P, Xie R Z, Li S K. Effects of different mechanical operation on maize grain harvest quality[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016(1): 114-116 (in Chinese)
- [8] 庞晨, 张翼飞, 王玉凤, 张鹏飞, 张文超, 陈天宇, 吴琼, 尹雪巍, 王怀鹏, 杨丽, 武鹏, 杨克军. 寒地不同玉米品种影响机械收质量关键因素研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 138-145
Pang C, Zhang Y F, Wang Y F, Zhang P F, Zhang W C, Chen T Y, Wu Q, Yin X W, Wang H P, Yang L, Wu P, Yang K J. Study on the key factors influencing the grain quality of maize mechanical kernel harvest in different cold regions[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(2): 138-145 (in Chinese)
- [9] 李少昆, 王克如, 杨利华, 董志强, 杜树海, 魏建伟, 张万旭, 谢瑞芝, 侯鹏, 明博. 河北夏播区玉米机械粒收质量及影响因素研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 120-128
Li S K, Wang K R, Yang L H, Dong Z Q, Du S H, Wei J W, Zhang W X, Xie R Z, Hou P, Ming B. Study on the influencing factors of quality of kernels in maize mechanical kernel harvest as well as cultivar selection in Hebei Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(2): 120-128 (in Chinese)
- [10] 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
GB/T 21962—2008 Technical Requirements for Maize Combine Harvester[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese)
- [11] 张万旭, 王克如, 谢瑞芝, 侯鹏, 明博, 刘朝巍, 肖春花, 张国强, 陈江鲁, 杨京京, 柳枫贺, 李少昆. 玉米机械收获子粒破碎率与含水率关系的品种间差异[J]. 玉米科学, 2018, 26(4): 74-78
Zhang W X, Wang K R, Xie R Z, Hou P, Ming B, Liu Z W, Xiao C H, Zhang G Q, Chen J L, Yang J J, Liu F L, Li S K. Relationship between maize grain broken rate and moisture content as well as the differences among cultivars[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(4): 74-78 (in Chinese)
- [12] 王克如, 李少昆. 玉米籽粒脱水速率影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2027-2035
Wang K R, Li S K. Analysis of influencing factors on kernel dehydration rate of maize hybrids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2027-2035 (in Chinese)
- [13] 王利锋, 唐保军, 王振华, 李会勇. 不同类型玉米品种间子粒脱水速率相关分析[J]. 玉米科学, 2018, 26(2): 64-70
Wang L F, Tang B J, Wang Z H, Li H Y. Compare study on grain dehydration rate of different maize hybrids[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(2): 64-70 (in Chinese)
- [14] 赵宽厚, 苏治军, 高聚林, 于晓芳, 王志刚, 孙继颖, 胡树平, 屈佳伟, 包海柱. 玉米籽粒脱水速率与农艺性状相关分析[J]. 北方农业学报, 2018(4): 16-21
Zhao K H, Su Z J, Gao J L, Yu X F, Wang Z G, Sun J Y, Hu S P, Qu J W, Bao H Z. Related analysis on dehydration rate and agronomic traits of maize kernel[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2018(4): 16-21 (in Chinese)
- [15] 薛军, 李璐璐, 谢瑞芝, 王克如, 侯鹏, 明博, 张万旭, 张国强, 高尚, 白氏杰, 初振东, 李少昆. 倒伏对玉米机械粒收田间损失和收获效率的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(12): 1774-1781
Xue J, Li L L, Xie R Z, Wang K R, Hou P, Ming B, Zhang W X, Zhang G Q, Gao S, Bai S J, Chu Z D, Li S K. Effect of lodging on maize grain losing and harvest efficiency in mechanical grain harvest[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(12): 1774-1781 (in Chinese)
- [16] 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. 影响玉米机械粒收质量因素的分析[J]. 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[J]. *Crops*, 2013(4): 116-119 (in Chinese)
- [17] 孔凡磊, 赵波, 詹小旭, 李小龙, 陈祥, 刘沁林, 袁继超. 四川省夏玉米机械粒收适宜品种筛选与影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 835-842
Kong F L, Zhao B, Zhan X X, Li X L, Chen X, Liu Q L, Yuan J C. Variety screening of mechanical grain harvest and analysis of influencing factors of summer maize in Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6): 835-842 (in Chinese)
- [18] 展茗, 赵明, 刘永忠, 徐尚忠. 湖北省玉米产需矛盾及提升玉米生产科技水平对策[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(4): 802-806
Zhan M, Zhao M, Liu Y Z, Xu S Z. Enhance maize production technology, alleviate the contradiction between production and demands of maize in Hubei Province[J]. *Hubei*

- Agricultural Sciences*, 2010, 49(4): 802-806 (in Chinese)
- [19] 葛均筑, 徐莹, 袁国印, 李淑娅, 曹湊贵, 展茗, 赵明. 气象因素对玉米果穗建成影响[J]. 玉米科学. 2017, 25(2): 86-93
Ge J Z, Xu Y, Yuan G Y, Li S Y, Cao C G, Zhan M, Zhao M. Effects of dry matter accumulation and meteorological factors on maize ear establishments [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(2): 86-93 (in Chinese)
- [20] Groemping U. Relative importance for linear regression in R: The package relaimpo [J]. *Journal of Statistical Software*, 2006, 17(1): 1-27
- [21] 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: 2018-2026 (in Chinese)
- [22] 郝付平, 陈志. 国内外玉米收获机械研究现状及思考[J]. 农机化研究, 2007(10): 206-208
Hao F P, Chen Z. Actuality of domestic and foreign corn harvester [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(10): 206-208 (in Chinese)
- [23] Waelti H, Buchele W F. Factors Affecting Corn Kernel Damage in Combine Cylinders [J]. *Transactions of the ASAE*, 1969, 12(1): 55-59
- [24] 樊廷录, 王淑英, 续创业, 李尚中, 王甲玺, 王克如, 赵刚, 程万莉, 张建军, 王磊, 党冀. 黄土高原旱作玉米籽粒水分与机械粒收质量的关系 [J]. 作物学报, 2018, 44(9): 1411-1418
Fan T L, Wang S Y, Xu C Y, Li S Z, Wang J X, Wang K R, Zhao G, Cheng W L, Zhang J J, Wang L, Dang Y. Relationship between grain moisture and maize mechanical harvesting qualities in dry highland of Loess Plateau [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(9): 1411-1418 (in Chinese)
- [25] Plett S. Corn kernel breakage as a function of grain moisture at harvest in a prairie environment [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1994, 74(3): 543-544
- [26] 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 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 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 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2036-2043 (in Chinese)
- [27] 李少昆, 王克如, 初振东, 李贺, 张万旭, 王俊河, 杜树海, 刘洋, 谢瑞芝, 侯鹏, 明博. 黑龙江第 1~3 积温带玉米机械粒收现状及品种特性分析 [J]. 玉米科学, 2019, 27(1): 110-117
Li S K, Wang K R, Chu Z D, Li H, Zhang W X, Wang J H, Du S H, Liu Y, Xie R Z, Hou P, Ming B. Study on the current status of maize mechanical kernel harvest and the cultivar characteristics in the 1-3 accumulated temperature zones in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(1): 110-117 (in Chinese)
- [28] Chowdhury M H, Buchele W F. The nature of corn kernel damage inflicted in the shelling crescent of grain combines [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1978, 21(4): 610-614
- [29] 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 [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1987, 3(1): 104-113
- [30] 侯明涛, 张红梅, 王万章, 杨立权. 玉米籽粒物理机械特性及机械化收获适应性 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 354-357
Hou M T, Zhang H M, Wang W Z, Yang L Q. Physical and mechanical characteristics of maize grain and its adaptability to mechanized harvest [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(7): 354-357 (in Chinese)
- [31] 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 [J]. 农机化研究, 2017, 39(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]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(4): 192-196 (in Chinese)
- [32] 薛军, 王克如, 谢瑞芝, 勾玲, 张旺锋, 明博, 侯鹏, 李少昆. 玉米生长后期倒伏研究进展 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1845-1854
Xue J, Wang K R, Xie R Z, Gou L, Zhang W F, Ming B, Hou P, Li S K. Research progress of maize lodging during late stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10): 1845-1854 (in Chinese)
- [33] 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 [J]. 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 traits which affected corn kernel mechanically harvesting qualities [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(6): 164-169 (in Chinese)
- [34] 丰光, 景希强, 李妍妍, 王亮, 黄长玲. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析 [J]. 华北农学报, 2010, 25(S1): 72-74
Feng G, Jing X Q, Li Y Y, Wang L, Huang C L. Correlation and path analysis of lodging resistance with maize stem characters [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(S1): 72-74 (in Chinese)
- [35] 张芳魁, 霍仕平, 张健, 张兴端, 晏庆九, 向振凡, 余志江, 彭方明, 熊闻霞, 陈克富. 玉米茎秆性状与抗折断力的相关和通径分析 [J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 46-49
Zhang F K, Huo S P, Zhang J, Zhang X D, Yan Q J, Xiang Z F, Yu Z J, Peng F M, Xiong W X, Chen K F. Correlation and path analysis between stalk characters and power of stalk resisting breaking in maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(6): 46-49 (in Chinese)

- [36] 刘鑫, 谢瑞芝, 牛兴奎, 修文雯, 李少昆, 高世菊, 张凤路. 种植密度对东北地区不同年代玉米生产主推品种抗倒伏性能的影响[J]. 作物杂志, 2012(5): 126-130
Liu X, Xie R Z, Niu X K, Xiu W W, Li S K, Gao S J, Zhang F L. Effects of planting density on lodging resistance performance of maize varieties of different eras in North-East China[J]. *Crops*, 2012(5): 126-130 (in Chinese)
- [37] 勾玲, 黄建军, 张宾, 李涛, 孙锐, 赵明. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1688-1695
Gou L, Huang J J, Zhang B, Li T, Sun R, Zhao M. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1688-1695 (in Chinese)
- [38] Cloninger F D, Horrocks R D, Zuber M S. Effects of harvest date, plant density, and hybrid on corn grain quality[J]. *Agronomy Journal*, 1975, 67(5): 693-695
- [39] 张向前, 鉴军帅, 路战远, 郭晓霞, 王瑞, 吴慧. 玉米品种籽粒机收质量和指标相关性影响的研究[J]. 中国农机化学报, 2018(2): 1-6
Zhang X Q, Jian J S, Lu Z Y, Guo X X, Wang R, Wu H. Effect of grain harvesting on the correlation between grain yield and quality of maize varieties[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018(2): 1-6 (in Chinese)
- [40] 梁效贵, 赵雪, 吴巩, 陈先敏, 高震, 申思, 林珊, 周顺利. 推迟收获对华北夏玉米籽粒脱水和力学特性的影响及其品种差异[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 7-15
Liang X G, Zhao X, Wu G, Chen X M, Gao Z, Shen S, Lin S, Zhou S L. Grain dehydration and mechanical characteristics of different summer maize hybrids and their responses to delayed harvest in the north China plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(5): 7-15 (in Chinese)
- [41] da Costa R V, Queiroz V A V, Cota L V, da Silva D D, Lanza F E, de Almeida R E M, Pereira A A, Alves R R, Campos L J M. Delaying harvest for naturally drying maize grain increases the risk of kernel rot and fumonisin contamination[J]. *Tropical Plant Pathology*, 2018, 43(5): 452-459
- [42] 薛军, 王群, 李璐璐, 张万旭, 谢瑞芝, 王克如, 明博, 侯鹏, 李少昆. 玉米生理成熟后倒伏变化及其影响因素[J]. 作物学报, 2018, 44(12): 1782-1792
Xue J, Wang Q, Li L L, Zhang W X, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Hou P, Li S K. Changes of maize lodging after physiological maturity and its influencing factors [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(12): 1782-1792 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅