

# 机械收获方式及籽粒含水率对玉米收获质量的影响

方会敏, 牛萌萌, 史 嵩, 刘 虎, 周 进\*

(山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

**摘 要:** 该文选用 13 个玉米品种为研究对象, 通过田间试验系统研究了常规玉米栽培模式下延缓收获期间玉米含水率的变化规律, 分析了果穗收获和籽粒收获 2 种收获方式对玉米收获损失率、籽粒破碎率和含杂率的影响, 初步研究了不同机械收获方式及籽粒含水率对不同品种玉米收获质量的影响, 建立了含水率与籽粒含杂率之间的数学函数。结果表明, 延缓收获期间不同品种玉米的含水率均有显著的降低 ( $P<0.05$ ), 但其变化率存在差异。同期进行的果穗收获和籽粒收获 2 种收获方式的收获总损失率之间没有显著差异 ( $P>0.05$ ), 机械收获方式仅显著影响落粒率 ( $P<0.05$ )。延缓收获使落粒率和落穗率都显著下降 ( $P<0.05$ )。采用果穗收获方式时, 籽粒含水率与各损失率之间不存在显著相关性; 而籽粒收获时, 籽粒含水率与落粒率、总损失率、破碎率和含杂率之间存在显著相关性。延缓进行籽粒收获后, 籽粒含杂率均值为 1.32%, 总损失率均值为 1.74%, 均低于国标要求; 而平均籽粒破碎率达 13.23%, 高于国标要求。含杂率与籽粒含水率之间满足线性关系, 根据二者之间关系预测可知, 籽粒含水率低于 32.40% 的收获就可以保证含杂率满足国标要求。该研究可为玉米籽粒收获技术的研究与推广提供数据支撑和科学依据。

**关键词:** 农业机械; 收获; 含水率; 总损失率; 破碎率; 含杂率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.002

中图分类号: S-3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0011-08

方会敏, 牛萌萌, 史 嵩, 刘 虎, 周 进. 机械收获方式及籽粒含水率对玉米收获质量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 11—18. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.002 <http://www.tcsae.org>

Fang Huimin, Niu Mengmeng, Shi Song, Liu Hu, Zhou Jin. Effect of harvesting methods and grain moisture content on maize harvesting quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 11—18. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.002 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

在中国的粮食生产中, 玉米种植面积和产量均位居第 1 位。2017 年, 全国玉米种植面积 4 239.90 万  $\text{hm}^2$ , 总产量 25 907.07 万  $\text{t}^{[1]}$ , 分别占粮食种植面积和总产量的 35.93% 和 39.16%。玉米在全国范围内的广泛种植, 在促进粮食增产、农民增收, 保障国家粮食安全方面发挥了巨大作用。但同时, 在供给侧结构性改革背景下, 玉米种植面积在调减, 这决定了玉米生产更需要依赖生产效率的提高。农业农村部的统计数据显示, 2016 年, 中国玉米耕种收综合机械化率为 83.08%。其中机耕率为 94.81%, 机播率为 83.85%, 而机收率仅 66.68%, 存在较大的提升空间。此外, 玉米籽粒收获技术可减少用工环节, 节本增效, 提高生产效率, 是玉米机收未来的发展趋势和方向。当前中国籽粒收获率仅占玉米种植总面积的 5%~6%, 果穗收获仍是玉米主要的收获方式<sup>[2]</sup>。籽粒收获质量低是影响玉米籽粒收获技术推广应用的主要因素, 其中籽粒高破碎率是重要制约因素之一。

针对该问题, 国内外众多学者从玉米籽粒的力学特

性<sup>[3-6]</sup>、籽粒与脱粒元件的作用规律<sup>[7-10]</sup>等角度对玉米籽粒的破碎机理和影响籽粒收获质量的因素进行了研究。研究表明, 玉米机收效果与品种特性、生理成熟后的脱水速率、收获时籽粒含水率等关系密切<sup>[11-14]</sup>, 籽粒含水率显著影响籽粒破碎率、收获损失率及含杂率等<sup>[15-19]</sup>。曲宏杰等<sup>[20]</sup>对不同含水率下玉米的脱粒性能进行研究, 指出了玉米籽粒含水率为 18.30% 时破碎率最低。Plett<sup>[21]</sup>对不同品种玉米的破损研究表明, 含水率在 16.70%~22.10% 时破损率最低。Chowdhury 等<sup>[22]</sup>则指出籽粒含水率 23% 时机械损伤率最低。李璐璐等<sup>[12]</sup>指出籽粒含水率低于 26.92% 时, 籽粒破碎率能够小于 8%。柴宗文等<sup>[11]</sup>利用拟合的方程预测, 当籽粒含水率为 19% 左右时能够满足国标中破碎率的要求。而对于适宜玉米籽粒收获的含水率, 有学者建议 27% 以内<sup>[23]</sup>、有的则建议控制在 22%~24%<sup>[24]</sup>之间, 还有玉米专家指出玉米含水率在 22%~23% 时, 籽粒收获效果最好。但有研究团队对 2010—2016 年间的 2 450 组田间籽粒收获样本数据分析后指出籽粒破碎率平均为 8.56%, 远高于国家标准<sup>[25]</sup>。

然而, 近年来已有研究多侧重于特定地区适宜机收品种筛选<sup>[26-29]</sup>, 鲜有同时采用果穗收获和籽粒收获方式并进行不同机械化收获方式下收获质量影响因素的研究。本文研究了机械化收获方式(果穗收获和籽粒收获)、籽粒含水率和延缓收获对收获质量的影响, 同时分析了籽粒含水率在 2 种机械收获方式下对夏玉米收获质量的影响, 以期对玉米机械收获技术的提升和籽粒收获技术

收稿日期: 2018-07-18 修订日期: 2018-08-20

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2017YFD0301005); 山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE021)

作者简介: 方会敏, 博士, 工程师。主要从事农业机械化研究。

Email: hddl@126.com

\*通信作者: 周 进, 研究员, 主要从事农作物收获及其装备的研究。

Email: 13969128744@163.com

的推广提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与材料

试验于 2017 年 10 月在山东省农业机械科学研究院院外试验基地山东省济南市章丘区枣园镇进行。该地区处于 36°25'~37°09'N、117°10'~117°35'E，属暖温带半湿润大陆性季风气候区，年均日照时数 2 647.60 h，年平均气温 12.8 ℃，年均降水量 600.80 mm，无霜期约 192 d。

土壤地力中等，土壤有机质 11.86 g/kg，碱解氮 65.10 mg/kg，速效磷 22.33 mg/kg，速效钾 144.14 mg/kg，pH 值 8.17，土壤湿密度 1.43 g/cm<sup>3</sup>，0~5 cm、5~10 cm 土层内土壤平均含水率分别为 16.42%和 16.30%，土壤紧实度为 1.81 MPa。

试验材料包括郑单 958、先玉 335、登海 605、登海 618、农华 101、伟科 702、浚单 29、鲁单 818、鲁单 9066、鑫研 218、鲁单 9088、鲁单 9151、鲁单 2016 共 13 个品种，不同品种玉米秸秆和果穗的基本参数见表 1。

表 1 不同品种玉米秸秆和果穗参数

Table 1 Parameters of straw and ear for different maize varieties

品种 Varieties	秸秆直径 Diameter of straw/mm	秸秆自然高度 Height of straw/m	最低结穗高度 Height of lowest ear/cm	果穗大端直径 Diameter of bigger ear/mm	果穗长度 Length of ear/mm	产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	千粒质量 1000-grain weight/g
郑单 958 ZD958	24.04	2.29	83.80	56.50	180.50	12 082.35	329.58
先玉 335 XYu335	23.10	2.73	77.90	49.70	181.00	10 427.55	312.67
登海 605 DH605	24.20	2.52	83.10	50.70	227.50	11 054.25	391.94
登海 618 DH618	22.04	2.29	56.20	49.40	180.20	11 684.25	340.81
农华 101 NY101	22.98	2.59	75.20	51.60	181.10	10 382.40	351.75
伟科 702 WK702	22.15	2.35	80.20	56.00	216.70	11 749.20	370.27
浚单 29 JD29	22.44	2.27	90.80	54.70	188.70	11 669.55	337.74
鲁单 818 LD818	21.89	2.29	69.80	53.30	209.90	11 002.65	400.55
鲁单 9066 LD9066	25.82	2.62	95.10	48.80	190.50	10 104.30	341.58
鑫研 218 XY218	24.51	2.53	78.60	52.70	184.00	10 041.00	366.18
鲁单 9088 LD9088	24.47	2.49	69.30	51.00	200.20	10 277.85	399.28
鲁单 9151 LD9151	21.58	2.74	85.60	48.80	176.30	10 525.80	330.79
鲁单 2016 LD2016	24.07	2.25	57.10	51.80	174.90	10 722.60	344.36

### 1.2 试验设计

在黄淮海地区小麦-玉米轮作种植制度条件下，根据试验地玉米种植特点采取免耕播种配套适宜的田间管理措施。2017 年 6 月 10 日采用农哈哈 2BYSF-3 玉米免耕播种机播种，同时施用中农瑞丰源缓释肥，N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 配比为 28-5-9。2017 年 10 月 18 日采用国丰全液压玉米联合收获机 4YZP-4X 和国丰籽粒收获机 4YL-3 分别进行穗收和籽粒收试验，此为正常收获；10 月 24 日采用国丰籽粒收获机 4YL-3 进行籽粒收试验，此为延缓收获。采用果穗收获时，分别测定收获总损失率、落穗率和落粒率；采用籽粒收获时，分别测定收获总损失率、落穗率、落粒率、破碎率和含杂率。收获机整机的主要结构特征（如割台型式、脱粒清选方式等）和收获过程结构参数及工作参数见表 2，现场作业图见图 1。

表 2 果穗收获机和籽粒收获机主要参数

Table 2 Main parameters of maize harvester and maize grain harvester

参数 Parameters	数值 Values	
	4YZP-4X	4YL-3
结构型式 Type of structure	自走式	自走式
工作行数 Working lines	4	3
适用行距 Row space/mm	550~650	530~630
工作幅宽 Working width/mm	2 400	1 800
最大卸果穗（粮）高度 Maximum height of ear (grain) loading/mm	1 800	2 100
最小离地间隙 Minimum distance from ground/mm	320	260
燃油消耗 Fuel consumption/(kg·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	30	≤45
割台型式 Type of header	辊式	板式
脱粒清选方式 Type of threshing and cleaning	横轴流式	横轴流式
作业速度 Working velocity/(km·h <sup>-1</sup> )	4.5	4.5
秸秆切碎机构型式 Type of straw cutting	甩刀式	甩刀式

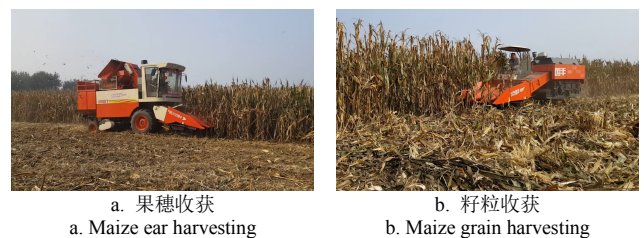


图 1 玉米收获现场作业图

Fig.1 Harvesting test in maize site

所有试验重复 3 次，试验数据采用 SPSS Statistics 23 进行分析。

### 1.3 试验测定内容及方法

所有秸秆与果穗的基本参数，如株高、秸秆自然高度、果穗长度等，参照《农业机械试验条件测定方法的一般规定》（GB/T 5262-2008）<sup>[30]</sup>进行。

#### 1.3.1 籽粒含水率

在测定区内，从接粮口接取果穗或籽粒（其中果穗需进行人工剥粒），每次约取样籽粒 50 g。捞出破皮、有明显损伤的籽粒，将样品装入铝盒称质量后置于 105 ℃ 的恒温箱中进行干燥。4 h 后取出铝盒放入密封的干燥器内冷却至室温，称其质量。按以上方法再次进行干燥，每隔 30 min 取出冷却称质量一次，直至干燥前后 2 次质量差不超过 0.005 g。按式（1）计算含水率。

$$WC_Z = \frac{W_{ZS} - W_{ZG}}{W_{ZS}} \times 100 \quad (1)$$

式中  $WC_Z$  为籽粒含水率，%； $W_{ZS}$  为籽粒干燥前质量，g； $W_{ZG}$  为籽粒干燥后质量，g。

### 1.3.2 落穗率

在测定区（长 10 m，宽为 1.8 m）内，收集漏摘和掉落的果穗及 5 cm 以上的果穗段，脱净后称质量，按式（2）计算果穗损失率。

$$S_U = \frac{W_U}{W_Z} \times 100 \quad (2)$$

式中  $S_U$  为果穗损失率，%； $W_U$  为漏摘和落地果穗的籽粒质量，g； $W_Z$  为籽粒总质量，g。

### 1.3.3 落粒率

在测定区内，收集所有掉落的籽粒（包括秸秆种夹带的籽粒）和小于 5 cm 长的碎果穗（脱净后称质量），按式（3）计算籽粒损失率。

$$S_L = \frac{W_L}{W_Z} \times 100 \quad (3)$$

式中  $S_L$  为籽粒损失率，%； $W_L$  为落地籽粒和小于 5 cm 长的碎果穗上的籽粒质量之和，g。

### 1.3.4 籽粒破碎率

在测定区内，从接粮口接取约 2000 g 的籽粒，捡出破皮、有明显损伤的籽粒，分别称出破碎籽粒质量和所取样品籽粒质量，按式（4）计算籽粒破碎率。

$$Z_S = \frac{W_S}{W_Z} \times 100 \quad (4)$$

式中  $Z_S$  为籽粒破碎率，%； $W_S$  为破碎籽粒的质量，g； $W_Z$  为所取样品籽粒质量，g。

### 1.3.5 籽粒含杂率

在测定区内，从接粮口接取约 2 000 g 的混合物，从中选出杂质质量，分别称出杂质质量和所取混合籽粒质量，按式（5）计算籽粒含杂率。

$$Z_Z = \frac{W_{ZZ}}{W_Z} \times 100 \quad (5)$$

式中  $Z_Z$  为籽粒含杂率，%； $W_{ZZ}$  为杂质质量，g。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米籽粒含水率变化

随着收获时间的延缓，各品种玉米籽粒含水率均具有显著的降低趋势，但变化率在不同品种间存在差异（见图 2）。9 月 21 日时，13 个玉米品种的籽粒含水率都在 30% 以上，平均含水率约为 35%，最高含水率达 38.78%（鲁单 9088）；含水率分布范围为 30.30%~38.78%，变异系数为 6.72%。正常收获时各品种玉米籽粒含水率显著下降，平均下降比例达 19.38%，其中下降比例最大的品种为 36.85%（登海 618）。籽粒平均含水率为 28.06%，品种间含水率分布范围为 23.54%~32.12%，变异系数为 10.44%。此时玉米籽粒含水率依然较高，籽粒含水率值小于 25% 的玉米品种仅有先玉 335、登海 618 和鲁单 9151。延缓收获时再次测量玉米籽粒含水率，发现 13 个玉米品种中有 9 个品种的籽粒含水率较正常收获期的含水率下降比例在 30% 以上，占试验品种的 69.23%；籽粒平均含水率为 22.52%，分布范围为 17.62%~27.94%，变异系数为 13.53%。此时仅有伟科 702 和浚单 29 的含水率

依然高于 25%。由此可见，排除降雨、旱涝等气候因素外，延长玉米收获时机可使籽粒含水率显著下降。籽粒在生理成熟期之后日渐脱水，此时人为延缓收获可达到玉米籽粒收获机对含水率的基本要求；这与现有学者的部分研究结论一致<sup>[11]</sup>。但是不同品种的籽粒含水率下降率不同，对于部分品种而言，过长的收获期延缓会造成籽粒过干。因此考虑籽粒收获时，延缓天数应与品种含水率变化特征结合。

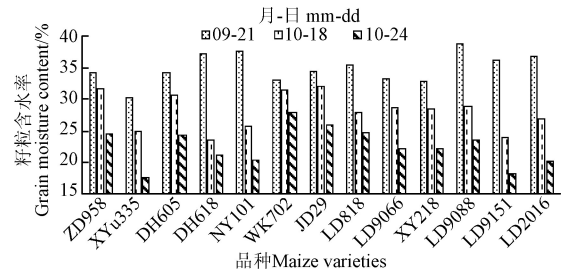


图 2 玉米籽粒含水率的变化

Fig.2 Grain moisture content varied with time

### 2.2 机械收获方式对收获损失的影响

进行果穗收获和籽粒收获的收获总损失率见图 3。其中采用果穗收获方式的平均损失率为 2.59%，采用籽粒收获方式的平均损失率为 3.28%。采用果穗收获方式时，92.31% 的玉米品种总损失率低于国家标准（5%）；采用籽粒收获时，84.62% 的玉米品种总损失率低于国家标准。因此，对多数玉米品种而言，收获方式不显著影响其收获总损失率（ $P>0.05$ ）。进一步分析同期进行的 2 种收获方式的收获损失差异，发现 13 个玉米品种中，仅 4 个品种（郑单 958、先玉 335、登海 618 和鑫研 218）采用籽粒收获方式的总损失率小于采用果穗收获方式的总损失率，其余品种都是采用果穗收获方式时的总损失率低。

对于同期进行的果穗收获和籽粒收获而言，登海 618 品种无论采用何种收获方式，其总损失率均高于国家标准，且主要是因为其落穗率高，其中采用果穗收获时的落穗率为 7.28%，采用籽粒收获方式时的落穗率达 4.13%，果穗收获时仅落穗率一项就已超过国家标准的总损失率数值。同样地，采用籽粒收获时鲁单 2016 品种的落穗率单项也达到 5.06%。登海 618 和鲁单 2016 的落穗率较高，主要是由于登海 618 和鲁单 2016 的最低结穗高度低（登海 618 和鲁单 2016 的最低结穗高度 56.20 和 57.10 cm；其余品种最低结穗高度位于 69.30~95.10 cm），造成果穗漏摘率高，导致 2 个品种的玉米落穗率高。

收获总损失率由落穗率与落粒率构成。对果穗收获方式而言，落穗率平均占总损失率的 75.28%，是损失的主要组成部分，所有参试品种中除鲁单 9151 的落穗率低于落粒率，其余各品种的落穗率均显著高于落粒率（ $P<0.05$ ）。而对于籽粒收获方式而言，落穗率平均占总损失率的 54.53%，品种的落穗率与落粒率间并没有显著差异（ $P>0.05$ ）。然而，方差分析结果进一步却表明，在同一时段进行收获时，收获方式对于落粒率的影响更为显著（ $P<0.05$ ），对落穗率的影响并不明显（ $P>0.05$ ）。

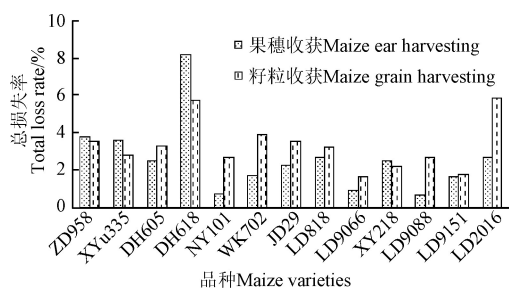


图3 果穗收获与籽粒收获的收获损失对比

Fig.3 Comparison of harvesting loss between maize harvesting and maize grain harvesting

进行籽粒正常收获和延缓收获的收获损失率见图4。其中采用正常时间和延缓籽粒收获的平均损失率为3.28%和1.74%；对应变异系数分别为39.37%和36.36%。采用正常时间进行籽粒收获时，84.62%的玉米品种总损失率低于国家标准（5%）；延缓进行籽粒收获时，13个玉米品种的总损失率均低于国家标准（5%）。因此就正常时间和延缓籽粒收获的总损失率而言，延缓收获使所有参试玉米品种的总损失率均显著降低（ $P<0.05$ ），平均降幅达43.66%。与正常时间籽粒收获方式时落穗率占总损失率比值（54.53%）相比，延缓收获后落穗率仅占37.16%。就落粒率来看，当延缓进行籽粒收获时，所有品种的落粒率均降低。方差分析进一步表明延缓收获不仅显著影响落粒率，也显著影响落穗率（ $P<0.05$ ）。

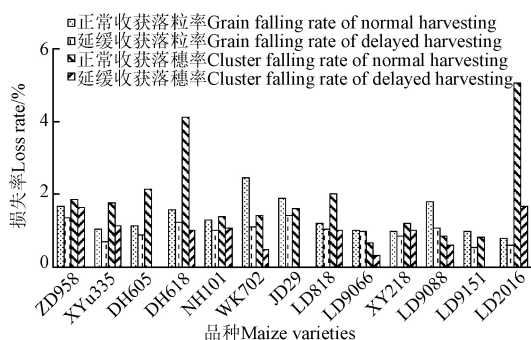


图4 延缓收获对不同品种玉米的落穗率与落粒率影响

Fig.4 Cluster falling rate and grain falling rate of different maize varieties influenced by normal delayed harvesting

### 2.3 籽粒含水率对收获损失的影响

采用果穗收获时，籽粒含水率与各损失间的相关分析表明（见表3）：籽粒含水率与落粒率、落穗率及总损失率之间没有显著相关性，这说明籽粒含水率并非玉米果穗收获损失的显著影响因素。落穗率与总损失率呈极显著正相关，证明果穗收获时落穗损失占总损失的比例大，落穗率是总损失率的主要构成。

就不同玉米品种的落粒率与落穗率而言，除了鲁单9151的落穗率轻微小于其落粒率外，所有玉米品种的落穗率均大于其落粒率。落穗率占总损失率的最大比例为92.21%（浚单29），平均比例为75.28%，说明果穗收获时，果穗掉落与漏摘的损失大于籽粒掉落的损失。收获损失随着籽粒含水率的变化趋势大致为：落粒率随着籽

粒含水率的变化比较平稳，且占总损失率的比例较小；落穗率占总损失率的比例较大，落穗率随籽粒含水率的变化与总损失率随籽粒含水率的变化趋势类似。落穗率与总损失率随着籽粒含水率的增加呈现先浮动变化后有所增大的趋势，且在含水率为28.84%时的损失率最小。

表3 籽粒含水率与果穗收获各损失率间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between grain moisture content and loss rates in maize ear harvesting

指标 Index	含水率 Grain moisture content	落粒率 Grain falling rate	落穗率 Cluster falling rate	总损失率 Total loss rate
含水率 Grain moisture content	1.00			
落粒率 Grain falling rate	-0.53	1.00		
落穗率 Cluster falling rate	-0.28	0.43	1.00	
总损失率 Total loss rate	-0.34	0.55	0.99**	1.00

注：\*\* 在 0.01 水平上相关性显著，下同。

Note: \*\* indicates significantly correlation at the level of 0.01, the same below.

采用籽粒收获时，籽粒含水率与各损失率间的相关分析表明（见表4）：籽粒含水率与落粒率、总损失率呈现显著正相关，说明籽粒含水率是影响玉米机收总损失、尤其是落粒损失的显著因素；籽粒含水率与落穗率之间没有显著相关性，说明籽粒收获时含水率并不显著影响果穗掉落与漏摘量。

正常籽粒收获时，其落粒率最高的前4个玉米品种分别为伟科702（2.46%）、浚单29（1.89%）、鲁单9088（1.80%）和郑单958（1.66%），此时各品种含水率分别为31.48%、32.12%、28.84%和31.66%。经过6d的籽粒田间自然脱水，延缓籽粒收获时，落粒率最高为1.41%（浚单29），此时浚单29的含水率为26.01%；其余3个品种伟科702、鲁单9088和郑单958的落粒率降至1.09%、1.07%和1.34%。这说明籽粒含水率的下降导致了落粒率的下降。正常籽粒收获时，落穗率较高玉米品种有鲁单2016（5.07%）、登海618（4.13%），此时二者含水率分别为26.84%和23.54%。延缓籽粒收获时，落穗率较高的品种有鲁单2016（1.66%）和郑单958（1.63%），此时含水率分别为20.19%和24.49%。而登海618的落穗率降至1.02%。相关性分析显示籽粒含水率与落穗率之间无显著相关性，这说明籽粒的自然脱水虽然导致了落穗损失降低，但是落穗损失降低并不完全是因为籽粒含水率的下降。

不同于果穗收获时落穗损失占总损失的比例大，籽粒收获时的落穗损失与落粒损失相当。同时，落粒率与总损失率呈显著正相关、落穗率与总损失率呈极显著正相关，说明籽粒收获时落穗损失与落粒损失都显著影响总损失，且落穗率的影响更显著。13个玉米品种在2个收获时间的落穗率与落粒率变化显示了对任一品种而言，含水率降低会导致落穗率与落粒率显著降低。若排除品种差异，收获损失随着籽粒含水率的变化趋势大致为：落粒率、落穗率和总损失率随着籽粒含水率的变化

比较平稳,但是都有随含水率降低而降低的趋势,只是降低的趋势并不明显。

表 4 籽粒含水率与籽粒收获各损失率间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between grain moisture content and loss rates in maize grain harvesting

指标 Index	含水率 Grain moisture content	落粒率 Grain falling rate	落穗率 Cluster falling rate	总损失率 Total loss rate	破碎率 Broken rate	含杂率 Rate of chips
含水率 Grain moisture content	1.00					
落粒率 Grain falling rate	0.68**	1.00				
落穗率 Cluster falling rate	0.21	0.12	1.00			
总损失率 Total loss rate	0.42*	0.48*	0.94**	1.00		
破碎率 Broken rate	0.58**	0.37	0.36	0.45*	1.00	
含杂率 Rate of chips	0.86**	0.58**	0.16	0.34	0.48*	1.00

注: \* 在 0.05 水平上相关性显著。

Note: \* indicates significantly correlation at the level of 0.05.

## 2.4 籽粒含水率对籽粒收获质量的影响

不同含水率下的籽粒破碎率和含杂率变化情况见图 5。正常籽粒收获和延缓籽粒收获时,由于含水率下降,籽粒破碎率和含杂率显著下降。且相关性分析表明籽粒含水率与破碎率、含杂率之间呈现极显著正相关,说明籽粒含水率是影响玉米籽粒收获质量的主要因素之一。

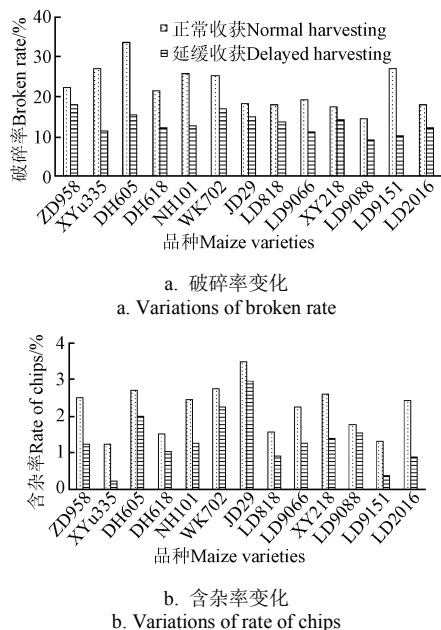


图 5 延缓收获对破碎率和含杂率的影响

Fig.5 Effect of delayed harvesting on broken rate and rate of chips

正常籽粒收获时,籽粒破碎率在含水率较低(<25%)时随着含水率增加有增大的趋势。延缓籽粒收获时,籽粒破碎率随着含水率增加有增大的趋势。在籽粒含水率<25%的样本中,有 81.82%的样本籽粒破碎率低于 15%。

收获时籽粒含水率位于较优含水率(18%~24%)时,籽粒破碎率<13%。收获时籽粒破碎率最低的品种为鲁单 9066 (9.19%),此时籽粒含水率为 23.55%;而收获时含水率最低的品种为先玉 335 (籽粒含水率为 17.62%),其籽粒破碎率为 11.50%。这说明籽粒破碎率的最低值并不出现在籽粒含水率最低时,这与柴宗文等<sup>[11]</sup>的研究结论一致。这也进一步说明当籽粒含水率低于一定值时,含水率不能解释籽粒破碎率升高的原因,而穗轴机械强度可能是此趋势变化的原因<sup>[4]</sup>。

国家标准中规定,籽粒收获时的籽粒破碎率≤5%。此次试验中,正常收获时平均籽粒破碎率为 22.18%,延缓收获时平均籽粒破碎率为 13.23%;13 个玉米品种中无一品种的籽粒破碎率达到国标要求。延缓收获时籽粒破碎率高主要是由于此时收获时籽粒含水率集中于 20~25%,且 53.85%的玉米品种籽粒的含水率低于 23%,造成籽粒较干,玉米籽粒易碎;且玉米籽粒干燥时自身易出现裂纹,这些都造成破碎籽粒的占比增加。另外,非专业驾驶员驾驶收获机进行收获作业,一定程度上使籽粒破碎率增加。

籽粒含杂率随着含水率增加有增大的趋势。国家标准中规定,籽粒收获时的含杂率≤3%。正常时间籽粒收获时,籽粒含杂率均值为 2.20%,仅浚单 29 的籽粒含杂率(3.49%)高于国家标准,此时籽粒含水率为 32.12%。其余 12 个品种的玉米籽粒收获时含杂率均符合国家标准。且在延缓籽粒收获时,在籽粒含水率<25%的样本中,100%的样本籽粒含杂率低于 2%。

含杂率是评价玉米籽粒收获质量的一个重要指标,国标(GB/T-21962—2008)规定籽粒收获时含杂率≤3%。通过对 78 组样本分析(图 6)可知:含杂率随着籽粒含水率增加而增大,这与相关研究结论吻合<sup>[9]</sup>,前述分析表明两者之间呈极显著正相关关系( $r=0.86^{**}$ ),可用方程  $R_c=0.174M-2.6404$  ( $R^2=0.6016^{**}$ ,  $n=78$ ) 拟合。若利用此方程进行估测,当籽粒含水率增加到 32.40%时,估计含杂率为 2.997%,接近含杂率≤3%的国标要求。故如果仅从含杂率角度考虑,只要籽粒含水率低于 32.40%的收获就可以保证含杂率满足国标要求。

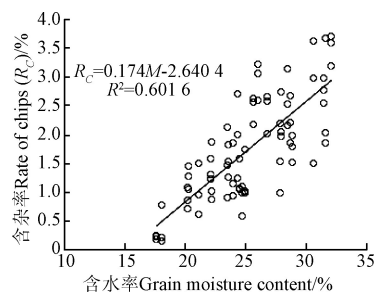


图 6 含杂率与玉米籽粒含水率间的关系

Fig.6 Relationship between rate of chips and maize grain moisture content

## 3 结 论

1) 延缓收获可使籽粒含水率显著下降,从而达到籽

粒收获机对含水率的基本要求,但是不同品种的籽粒含水率下降程度不同。因此,为提高玉米籽粒收获质量,除考虑籽粒延缓收获时间外,还需要与品种的含水率变化特征相符。同时,由于籽粒破碎率的最低值并非出现在籽粒含水率最低时,因此单纯通过延缓收获改变籽粒含水率并不能解决降低籽粒机收破碎率高的问题。

2) 正常收获时果穗收获和籽粒收获的收获总损失率分别为 2.59% 和 3.28%,且二者之间没有显著差异。落穗率分别占总损失率的 75.28% (果穗收获) 和 54.53% (籽粒收获),但是机械收获方式仅显著影响落粒率。延缓进行籽粒收获时,所有参试玉米品种的总损失率都显著降低;且延缓收获对落粒率和落穗率均有显著影响。

3) 果穗收获方式时,籽粒含水率与总损失率、落穗率和落粒率之间不存在显著相关性;而采用籽粒收获方式时,籽粒含水率与落粒率、总损失率、籽粒破碎率及籽粒含杂率之间存在显著相关性。说明籽粒含水率并非玉米果穗收获损失的主要影响因素;籽粒收获对收获时机有更严格的要求,需要通过对含水率的密切监视及合理的收获时机安排降低籽粒收获损失。

4) 籽粒收获方式下,含杂率随籽粒含水率的增加有线性增加的趋势;不同含水率下籽粒含杂率的数值可用线性方程进行估测。若仅从含杂率角度考虑,只要籽粒含水率低于 32.40% 时收获就可以保证含杂率满足国标要求。

#### [参 考 文 献]

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] Yang Li, Cui Tao, Qu Zhe, et al. Development and application of mechanized maize harvesters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(3): 15—28.
- [3] Babić L J, Radojević M, Pavkov I, et al. Physical properties and compression loading behaviour of corn seed[J]. International Agrophysics, 2013, 27(2): 119—126.
- [4] Mohamed A F, Abdel M. Mechanical properties of corn kernels[J]. Misr Journal of Agricultural Engineering, 2009, 26(4): 1901—1922.
- [5] 徐立章, 李耀明, 王显仁. 谷物脱粒损伤的研究进展分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 303—307.  
Xu Lizhang, Li Yaoming, Wang Xianren. Research development of grain damage during threshing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 303—307. (in Chinese with English abstract)
- [6] Volkovas V, Petkevičius S, špokas L. Establishment of maize grain elasticity on the basis of impact load[J]. Mechanika, 2006, 6(62): 64—67.
- [7] 张新伟, 易克传, 高连兴. 玉米种子与脱粒部件碰撞过程中的接触力学分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(14): 285—290.
- [8] Zhang Xinwei, Yi Kechuan, Gao Lianxing. Contacting mechanics analysis during impact process between corn seeds and threshing component[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(14): 285—290. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨立权, 王万章, 张红梅, 等. 切流-横轴流玉米脱粒系统改进设计及台架试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 35—43.  
Yang Liquan, Wang Wanzhang, Zhang Hongmei, et al. Improved design and bench test based on tangential flow-transverse axial flow maize threshing system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 35—43. (in Chinese with English abstract)
- [10] 邱志峰, 崔中凯, 张华, 等. 纹杆块与钉尺组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 28—34.  
Di Zhifeng, Cui Zhongkai, Zhang Hua, et al. Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 28—34. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王博, 王俊, 杜冬冬. 基于 HyperMesh 和 LS-DYNA 的玉米籽粒碰撞损伤动态过程的有限元分析[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44(4): 465—475.  
Wang Bo, Wang Jun, Du Dongdong. Finite element analysis of dynamic impact damage process of maize kernel based on HyperMesh and LS-DYNA[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Science, 2018, 44(4): 465—475. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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 Zongwen, Wang Keru, Guo Yinqiao, 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. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Lulu, Lei Xiaopeng, Xie Ruizhi, et al. Analysis of influential factors on mechanical grain harvest quality of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2044—2051. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李少昆, 王克如, 谢瑞芝, 等. 玉米籽粒机械收获破碎率研究[J]. 作物杂志, 2017(2): 76—80.  
Li Shaokun, Wang Keru, Xie Ruizhi, et al. Grain breakage



- rate of maize by mechanical harvesting in China[J]. *Crops*, 2017(2): 76—80. (in Chinese with English abstract)
- [14] 范国昌, 王惠新, 籍俊杰, 等. 影响玉米摘穗过程中籽粒破碎和籽粒损失率的因素分析[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(4): 72—74.
- Fan Guochang, Wang Huixin, Ji Junjie, et al. Analysis influence factor on seed damage rate and loss rate during picking corn-cob[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(4): 72—74. (in Chinese with English abstract)
- [15] 裴志超, 周继华, 郎书文, 等. 北京市适宜机收粒春玉米品种筛选研究[J]. *农业科技通讯*, 2016(4): 107—111.
- [16] 柳枫贺. 影响玉米机械收粒质量的主要因素研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- Liu Fenghe. Study on Main Influencing Factors for The Quality of Mechanical Harvesting Maize Grain[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郭银巧. 影响玉米机械收粒质量及农户机收采用行为的因素分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- Guo Yinqiao. Analysis on Factors Influencing Quality of Mechanized Kernel Harvesting and Characteristics of Farmer Adaption in Typical Ecoregion of Maize in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [18] 高连兴, 李飞, 张新伟, 等. 含水率对种子玉米脱粒性能的影响机理[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(12): 92—96.
- Gao Lianxing, Li Fei, Zhang Xinwei, et al. Mechanism of moisture content affect on corn seed threshing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(12): 92—96. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张翔, 杨然兵, 尚书旗. 立式轴流玉米单穗种子脱粒机试验参数优化[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(S1): 73—79.
- Zhang Xiang, Yang Ranbing, Shang Shuqi. Experimental parameter optimization of vertical axial-flow single panicle thresher for corn[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(S1): 73—79. (in Chinese with English abstract)
- [20] 曲宏杰, 张道林, 杨廷文, 等. 含水率对玉米脱粒性能影响的试验研究[J]. *农机化研究*, 2014, 36(2): 153—156.
- Qu Hongjie, Zhang Daolin, Yang Tingwen, et al. Experimental research on corn threshing performance effected by moisture content[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(2): 153—156. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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.
- [22] Chowdhury M H, Buchele W F. The nature of corn kernel damage inflicted in the shelling crescent of grain combines[J]. *International Journal for Engineering Modelling*, 1978, 21(4): 610—614.
- [23] 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 Ruizhi, Lei Xiaopeng, Wang Keru, et al. Research on corn mechanically harvesting grain quality in Huanghuaihai plain[J]. *Crops*, 2014(2): 76—79. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王磊. 早熟耐密宜机收玉米品种筛选与示范[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2016.
- Wang Lei. Screening and Demonstration of Maize Varieties with Early Maturing, Dense Tolerance and Machine Harvest Suitable Traits[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王克如, 李少昆. 玉米籽粒机械收获破碎率研究进展[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2018—2026.
- Wang Keru, Li Shaokun. Progresses in research on grain broken rate by mechanical grain harvesting[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2018—2026. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵如浪, 王永宏, 李少昆, 等. 宁夏宜机收玉米品种的初步筛选[J]. *玉米科学*, 2019, 27(1): 130—135.
- Zhao Rulang, Wang Yonghong, Li Shaokun, et al. Screening of maize cultivars suitable for mechanical kernel harvest in Ningxia[J]. *Journal of Maize Science*, 2019, 27(1): 130—135. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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 Keru, Li Shaokun, Wang Yanbo, et al. Screening maize varieties suitable for mechanical harvesting grain in the central Liaoning Province[J]. *Crops*, 2018(3): 97—102. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王克如, 孔令杰, 袁建华, 等. 江苏沿海地区夏玉米机械粒收质量与品种筛选研究[J]. *玉米科学*, 2018, 26(5): 110—116.
- Wang Keru, Kong Lingjie, Yuan Jianhua, et al. Grain quality of maize mechanical kernel harvest and varieties screen in Jiangsu coastal area[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(5): 110—116. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘哲, 唐日晶, 赵祖亮, 等. 黄淮海地区玉米品种适宜性精细区划研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 281—288.
- Liu Zhe, Tang Rijing, Zhao Zuliang, et al. Regionalization of maize cultivars cultivated in Huang-Huai-Hai plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 281—288. (in Chinese with English abstract)
- [30] 农业机械试验条件测定方法的一般规定: GB/T 5262-2008[S].

## Effect of harvesting methods and grain moisture content on maize harvesting quality

Fang Huimin, Niu Mengmeng, Shi Song, Liu Hu, Zhou Jin<sup>\*</sup>

(Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China)

**Abstract:** In China, maize crops are harvested about 35.93% underplanting area and 39.16% share of the total yield. Maize grains are the most significant concerns during the harvesting stage for the further process towards foods yield for the designing of the harvester, thresher, handling, processing, and storage equipment. The maize grain harvesting quality is affected by maize variety characteristics, dehydration rate after physiological maturity and grain moisture content, etc. Therefore, the harvesting area of maize grain harvesting only accounts for 5%-6% of the total maize production area though maize grain harvesting technology is the key technology of modern production of maize and a developing direction of maize harvesting. Therefore, the present research was planned to analyze the effect of harvesting techniques (maize harvesting and maize grain harvesting), moisture content (17.62% to 32.12 %) and thirteen maize grains varieties (ZD958, XYu335, DH605, DH618, NH101, WK702, JD29, LD818, LD9066, XY218, LD9088, LD9151, LD2016) on maize harvesting quality. Further, cluster falling rate, grain falling rate, grain broken rate and rate of chips were assessed during harvesting time. The results revealed that the grain moisture content of maize varieties decreased significantly ( $P<0.05$ ) from 32.12% to 17.62% towards the normal and delayed harvesting periods, but the change rates of grain moisture content among maize varieties were different. The total harvesting loss rates were 2.59% and 3.28% observed towards maize harvesting and maize grain harvesting, and there was no significant difference ( $P>0.05$ ) found between maize harvesting and maize grain harvesting. The cluster falling rate occupied 75.28% (maize harvesting) and 54.53% (maize grain harvesting) of total loss rate. Furthermore, the mechanical harvesting method significantly ( $P<0.05$ ) affected grain falling rate during the normal harvesting time, grain falling rate and cluster falling rate decreased significantly ( $P<0.05$ ) during the delayed harvesting time. There was no significant correlation between grain moisture content and loss rates (including total loss rate, cluster falling rate and grain falling rate) when maize harvesting was adapted. As for maize grain harvesting, there was significant correlations between grain moisture content and grain falling rate, total loss rate, broken rate, rate of chips. Further, the average rate of chips, total loss rate and broken rate (1.32%, 1.74%, and 13.23%) were found under the delayed harvesting period. Thus, results revealed that the average rate of chips and total loss rate was observed not higher than the national standard requirements of 3% and 5%, whereas the average broken rate was observed higher than the national standard requirement of 5%. The linear relationship between the rate of chips and the grain moisture content was developed. According to the relationship, the rate of chips can meet the national requirement if the grain moisture content rate is less than 32.40%. Therefore, it is concluded that the delayed harvesting period would minimize the losses of harvesting and provide a guideline to farmers for harvesting the grains on the appropriate time. This study can provide data support and scientific basis for the research and popularization of maize grain harvesting technology.

**Keywords:** agricultural machinery; harvesting; moisture content; total loss rate; broken rate; rate of chips