DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.01.003

高粱机械化收获效果影响因素分析研究

邱述金[1]，张庆辉[1]，于泽虎[1]，李凯[1]，崔清亮[1]，原向阳[2*]

（1. 山西农业大学农业工程学院，山西太谷，030801；2. 山西农业大学农学院，山西太谷，030801）

摘要：针对高粱收获过程中的籽粒损失、破碎和含杂等问题，研究成熟时期和机收速率等因素对联合收获作业效果的影响规律。以晋杂22号高粱为研究对象，采用小区作业试验方案，分别在乳熟期、蜡熟期和完熟期设置3个机收速率水平进行高粱联合收获作业，机收速率设置为0.5 m/s，1.0 m/s，1.5 m/s，并测定破碎率、含杂率、总损失率与含水率等指标，获得成熟时期与机收速率对收获效果的影响规律。结果表明：成熟时期和机收速率对高粱籽粒含杂率、破碎率、总损失率等收获指标影响均极显著，对3项收获指标影响最大的因素均为成熟时期；在蜡熟期和机收速率为1.0 m/s时进行高粱联合收获作业能取得最佳效果，此时籽粒含水率为14.756%～15.746%，含杂率为0.14%，破碎率为0.29%，总损失率为5.48%。该研究获得了成熟时期和机收速率对高粱收获效果的影响规律，可为高粱机械化收获成熟时期合理选择与收获技术推广提供理论依据。

关键词：高粱成熟时期；机收速率；含水率；损失率；含杂率；破碎率

中图分类号：S225.5+2 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217（2024）01-0023-08

邱述金，张庆辉，于泽虎，李凯，崔清亮，原向阳. 高粱机械化收获效果影响因素分析研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(1)：23－30

QIU Shujin, ZHANG Qinghui, YU Zehu, LI Kai, CUI Qingliang, YUAN Xiangyang. Analysis and research on influencing factors of mechanized harvest of sorghum [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 23－30

0 引言

高粱是重要的杂粮作物，东北、华北、西南等地区是国内高粱主产区[1]，其产业发展有助于提升我国高粱产品质量，满足国内外市场需求，增加农民收入，具有重要意义[2]。2021年，中国高粱种植面积为675 khm^2，总产为3 134 kt，单产为4 642.95 kg/hm^2。但丘陵山区农业机械化水平较低，尤其是适合小地块作业的农机具还有待提升[3]。目前，普遍使用联合收获机对高粱进行收获作业，损失率高、破碎率高、含杂率高是高粱收获生产作业中存在的主要问题。

针对农作物收获作业中的相关问题，国内外专家学者对玉米、花生、水稻、谷子等作物的成熟时期对收获质量的影响方面开展了较多研究。孔凡磊等[4]研究了成熟时期对四川春玉米机械粒收质量的影响，试验表明将收获日期推迟10～15 d，玉米机械粒收能取得更好的收获效果。尚赏等[5]研究了收获期对豫东地区夏玉米机械粒收效果的影响，发现豫东地区适宜机械粒收的籽粒含水率为24.80%～29.80%，适宜收获期为9月30日—10月7日，较该地区传统收获时间推迟7～10 d。王红等[6]对收获期对玉米籽粒产量和秸秆青贮品质的影响进行了研究，表明在蜡熟后期至晚熟前期对西南地区玉米进行收获作业，能够较好地保证籽粒产量与秸秆的营养品质。郭峰等[7]研究了不同成熟时期对花生产量和品质的影响，指出随着收获期的推迟，单株花生结果数和饱果率均有所增加，从而提高花生产量。王海鸥等[8]研究了成熟时期及干燥方式对花生品质的影响，表明收获期越早，果仁粗蛋白和粗脂肪含量越低。

李海东等[9]研究了花生覆膜和露地栽培条件下不同成熟时期对产量及构成因素的影响，结果显示，随着收获期的延迟，烂果数、烂果率和落果率的增加速度越来越快，百果质量和百仁质量的增加速度逐步放缓。王桂民等[10]对成熟时期对稻麦轮作水稻机收效果的影响进行了研究，表明干物质损失是造成机收总损失率增加的主要因素。

收稿日期：2023-12-07 修回日期：2024-01-20

基金项目：国家谷子高粱产业技术体系（CARS-06-14.5-A28）；山西省基础研究计划项目（20210302124374）；山西省科技创新人才团队专项计划（202204051002036）

第一作者：邱述金，男，1988年生，山东昌邑人，博士，副教授；研究方向为农业机械装备设计。E-mail：sxauqsj@sina.com

*通信作者：原向阳，男，1981年生，山西阳城人，博士，教授；研究方向为现代杂粮生产。E-mail：yuanxiangyang200@163.com

刘晓亮等[11]对吉林西部稻区分期收获对稻米品质的影响进行了研究,指出不同成熟时期对各品种稻米品质均有影响。

杜志敏等[12]对收获期对北方杂交粳稻和常规粳稻品质的影响进行了研究,表明若要改善加工品质,需适当延后收获,若要改善外观品质则需将收获期适当提前。邱述金等[13]对成熟时期与收获方式对谷子收获效果的影响进行了研究,表明成熟时期对谷子的穗、叶片和茎秆含水率的影响均极显著,谷子含水率是影响谷子联合收获破碎率、总损失率、含杂率的显著因素。

王海莲等[14]对收获时期对甜高粱性状及品质的影响进行了研究,指出环境、生长时期以及环境和生长时期相互作用均对甜高粱相关收获指标有显著影响。还有学者对其他作物收获方式和收获品质等方面做了大量研究[15-22]。

这些研究为高粱机械收获时期和机收速率选择提供了参考,目前不同成熟时期与机收速率对高粱收获效果影响的相关研究还尚未报道。本文主要对成熟时期(乳熟期、蜡熟期、完熟期)和机收速率对高粱收获效果的影响进行研究,同时对不同成熟时期高粱籽粒的含水率对总损失率、含杂率和破碎率的影响进行分析。该研究为高粱机械收获效果提升和生产模式探索提供相关依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与作业装备

本试验材料选用晋杂22号高粱,该品种广泛种植于山西地区,试验样本全部取自山西省寿阳县南燕竹镇,播种采用条播方式,播种行距为500 mm,种植密度为450 000株/hm^2。

目前高粱收获存在损失率高等问题,本课题组对雷沃GM80联合收获机的割台和清选装置进行优化改装后,用于高粱的联合收获作业。高粱收获机的主要参数如表1所示。

表1 高粱收获机的主要参数

Table 1 Main parameters of sorghum harvester

参数	数值
结构形式	自走式
割台形式	链齿式
割幅/mm	2 750
工作行数	10
作业速度/(km·h^{-1})	≤6
喂入量/(kg·s^{-1})	≤8

1.2 试验方法

高粱的成熟时期分为乳熟期、蜡熟期、完熟期和枯熟期4个时期,4个成熟时期均可进行收获作业(图1),但不同时期的高粱各组分的生物力学特性差异显著[23-25],尤其枯熟期高粱茎秆、叶片干枯,籽粒极易脱落,导致损失率显著升高,因此本文研究乳熟期、蜡熟期、完熟期高粱的收获作业效果。

试验方法思路框图如图2所示,分别在乳熟期,蜡熟期,完熟期,对晋杂22号高粱进行联合收获作业,对3个成熟时期的机收速率均设置3个水平,分别为0.5 m/s,1.0 m/s,1.5 m/s,并在3个机收速率水平上分别进行3次重复试验,分别测定总损失率、破碎率、含杂率与籽粒含水率等试验指标。

田间试验采用小区作业试验方案,单次作业宽度为2.8 m,长度为25 m,选取成熟时期和机收速率为影响因素,以高粱总损失率、破碎率、含杂率等为试验指标进行试验,同时测定高粱籽粒含水率。试验数据采用SAS9.4软件进行处理。



图1 高粱收获田间试验

Figure 1 Field experiment of sorghum harvest

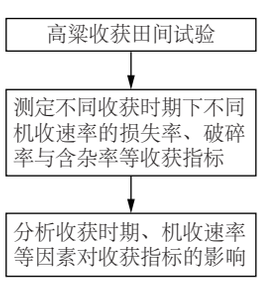


图2 试验方法思路框图

Figure 2 Block diagram of test method

1.3 试验指标测定

基于高粱收获无现行标准,本文的测试方法参考《收获机械联合收获机试验方法》(GB/T 8097—2008)和《农业机械试验方法测定方法的一般规定》(GB/T 5262—2008)。

1.3.1 高粱总损失率

每次试验完成后,分别测量收获总质量、割台落穗质量、割台掉粒质量和脱粒损失质量,按式(1)计算高粱总损失率。

$$Z_s=\frac{W_l+W_d+W_t}{W_z}\times 100\% \quad (1)$$

式中：Z_s——高粱总损失率，%；

W_z——高粱收获总质量，g；

W_l——割台落穗质量，g；

W_d——割台掉粒质量，g；

W_t——脱粒损失质量，g。

1.3.2　高粱破碎率

在每次试验完成后，将粮仓中所有高粱卸载至编织袋中，然后随机抽取 1 L 高粱籽粒进行称重，并称量其中破裂损伤的籽粒质量，按式(2)计算高粱破碎率。

$$Z_p=\frac{W_p}{W_{z1}}\times 100\% \quad (2)$$

式中：Z_p——高粱破碎率，%；

W_p——破碎高粱籽粒质量，g；

W_{z1}——抽取高粱总质量，g。

1.3.3　高粱含杂率

在每次试验结束后完全卸粮，随机抽取 1 L 高粱与杂质混合物样品进行称重，并称量其中杂质的质量，按式(3)计算高粱含杂率。

$$Z_z=\frac{W_{zz}}{W_{z2}}\times 100\% \quad (3)$$

式中：Z_z——高粱含杂率，%；

W_{zz}——杂质质量，g；

W_{z2}——抽取高粱与杂质混合物总质量，g。

1.3.4　籽粒含水率

每次试验结束卸粮后，立即取一定量无明显损伤、无病害的高粱籽粒并进行称重，均匀装入铝盒后置于恒温鼓风干燥箱中，设置温度为 105 ℃，干燥 4 h 后取出样品盒并加盖，在密封干燥器内冷却至室温称重，重复上述干燥过程，隔 30 min 取出冷却称重，直至前后两次质量差小于 0.005 g 为止。高粱籽粒的含水率

$$H_s=\frac{W_{zs}-W_{zg}}{W_{zs}}\times 100\% \quad (4)$$

式中：H_s——高粱籽粒含水率，%；

W_{zs}——高粱籽粒干燥前质量，g；

W_{zg}——高粱籽粒干燥后质量，g。

2　结果与分析

2.1　成熟时期和机收速率对高粱机收指标的显著性分析

对试验数据进行主体间效应分析，成熟时期和机收速率对高粱机械收获总损失率、含杂率及破碎率影响分析结果如表 2 所示。

表 2　成熟时期和机收速率对高粱机械收获总损失率、含杂率及破碎率影响

Table 2　Effect of maturity stage and mechanical harvesting rate on total los rate, impurity content and crushing rate of mechanical harvesting of sorghum

指标	项目	平方和	自由度	均方	F值	P值
总损失率	模型	8.364	8	1.043	411.22	＜0.000 1
	成熟时期	6.172	2	3.086	1 216.35	＜0.000 1
	机收速率	2.076	2	1.038	409.10	＜0.000 1
	成熟时期×机收速率	0.099	4	0.025	9.71	0.000 2
	误差	0.046	18	0.003	R^2=0.995	
含杂率	模型	53.288	8	6.661	72.63	＜0.000 1
	成熟时期	49.654	2	24.827	270.69	＜0.000 1
	机收速率	2.208	2	1.104	12.04	0.000 5
	成熟时期×机收速率	1.426	4	0.356	3.89	0.019 1
	误差	1.651	18	0.092	R^2=0.970	
破碎率	模型	17.881	8	2.235	30.34	＜0.000 1
	成熟时期	10.827	2	5.414	73.48	＜0.000 1
	机收速率	1.773	2	0.886	12.03	0.000 5
	成熟时期×机收速率	5.281	4	1.320	17.92	＜0.000 1
	误差	1.326	18	0.074	R^2=0.931	

以成熟时期、机收速率、成熟时期×机收速率为自变量，以总损失率为因变量进行方差分析，按 F 值从大到小排序依次为成熟时期、机收速率、成熟时期×机收速率，F 值分别为 1 216.35、409.10、9.71，说明影响该

地区总损失率的最主要因素为成熟时期,其次为机收速率、成熟时期×机收速率;以含杂率为因变量,以成熟时期、机收速率、成熟时期×机收速率为自变量,F值排序表现为成熟时期>机收速率>成熟时期×机收速率,F值分别为270.69、12.04、3.89;破碎率的F值排序为成熟时期>成熟时期×机收速率>机收速率,F值分别为73.48、17.92、12.03,3项指标的成熟时期F值均远远大于其他两个因素。进行高粱机械收获时,选择适宜收获期能显著提高收获质量。

2.2 成熟时期对高粱收获效果与含水率的影响

对机收速率为1.0 m/s,不同成熟时期的高粱机械收获的含杂率、破碎率、总损失率与含水率进行分析,结果如表3所示,表中数据均为试验均值。

表3 不同成熟时期高粱机收效果

Table 3 Mechanical harvest effect of sorghum at different maturity stages

成熟时期	含杂率/%	破碎率/%	总损失率/%	含水率/%
乳熟期	3.00±0.54a	1.25±0.23a	6.52±0.06a	16.896±0.21a
蜡熟期	0.21±0.08c	0.38±0.11b	5.50±0.03c	15.193±0.29b
完熟期	1.78±0.07b	0.62±0.06b	5.87±0.06b	13.250±0.25c

注:同一列数据后不同字母表示数据间有显著差别($P<0.05$),下同。

由表3可知,成熟时期对高粱收获含杂率、破碎率、总损失率均有显著影响,高粱机械收获含杂率随成熟时期的推迟呈现先降低后增高的趋势,在蜡熟期达到最低,含杂率为0.21%,乳熟期的含杂率最高为3.00%;蜡熟期和完熟期的高粱破碎率均显著低于乳熟期,蜡熟期最低为0.38%,乳熟期最高为1.25%;高粱机收的总损失率呈现先降低后增高的趋势,蜡熟期的总损失率低于乳熟期及完熟期为5.50%,在乳熟期总损失率达到最大为6.52%;高粱籽粒的含水率随成熟时期的推迟逐渐降低。

在3个成熟时期的籽粒含水率范围为12.972%~17.169%,乳熟期含水率最高,为16.641%~17.169%,完熟期含水率最低,为12.972%~13.663%。高粱蜡熟期籽粒含水率为14.756%~15.746%,高粱机械收获总损失率最小,机械收获产量较高;若成熟时期延迟至枯熟期,则籽粒含水率进一步降低,极易受外界因素影响造成落粒损失,割台损失率也增大,导致总损失率进一步升高。

2.3 机收速率对高粱收获效果的影响

对蜡熟期不同机收速率的高粱机械收获的含杂率、破碎率、总损失率进行分析,结果如表4所示,表中数据均为试验均值。

由表4可知,随机收速率的提高,含杂率呈先降低后升高的趋势,在机收速率1.0 m/s时最低为0.21%,在机收速率1.5 m/s时最高为0.4%;高粱破碎率随着机收速率的提高呈现逐渐降低的趋势,在机收速率为1.5 m/s时最低为0.35%,机收速率为0.5 m/s时最高为0.49%,总损失率则随着机收速率的增大表现为先降低后增大的规律,在机收速率为1.0 m/s时最低为5.50%,在0.5 m/s时最高为6.03%。

表4 不同机收速率高粱机收效果

Table 4 Mechanical harvest effect of sorghum with different mechanical harvest rates

机收速率/(kg·s^{-1})	含杂率/%	破碎率/%	总损失率/%
0.5	0.29±0.14b	0.49±0.07a	6.03±0.05a
1.0	0.21±0.08b	0.38±0.11b	5.50±0.03c
1.5	0.40±0.09a	0.35±0.14b	5.76±0.06b

2.4 成熟时期与机收速率相互作用对高粱收获效果的影响

对不同成熟时期和机收速率相互作用对高粱机械收获的总损失率、破碎率、含杂率进行分析,分析结果如图3、图4和图5所示。

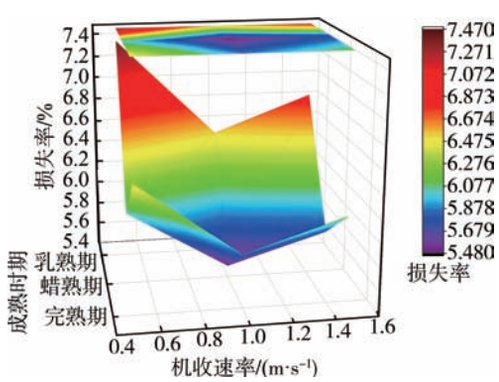


图3 成熟时期及机收速率互作对收获总损失率影响

Figure 3 Effect of interaction between maturity stage and machine harvest rate on total harvest loss rate.

由表1可知,成熟时期及机收速率的相互作用对高粱收获总损失率、籽粒破碎率均影响极显著($P<0.01$),对高粱籽粒含杂率影响显著($P<0.05$)。由图3可知,总损失率在乳熟期及机收速率为0.5 m/s时最高,为7.47%,在蜡熟期及机收速率为1.0 m/s时最低,为5.48%。由图4可以得到,高粱籽粒含杂率在乳熟期及机收速率为1.5 m/s时最高,为4.69%,在蜡熟期及机收速率为1.0 m/s时最低,为0.14%;由图5看出,籽粒破碎率在乳熟期及机收速率为0.5 m/s时最高,达到

了 3.69%，在蜡熟期及机收速率为 1.5 m/s 时最低，为 0.22%。由高粱收获效果来看，无论是总损失率、含杂率，还是籽粒破碎率，均为乳熟期最高，随着成熟时期推迟至蜡熟期，三项数据均达到最低值；总损失率及含杂率也在机收速率为 1.0 m/s 时最低，籽粒破碎率虽在 1.5 m/s 时达到最低为 0.22%，但与 1.0 m/s 时差距很小，此时破碎率为 0.29%。综上，在蜡熟期和机收速率为 1.0 m/s 时进行机械收获能获得最佳收获效果。

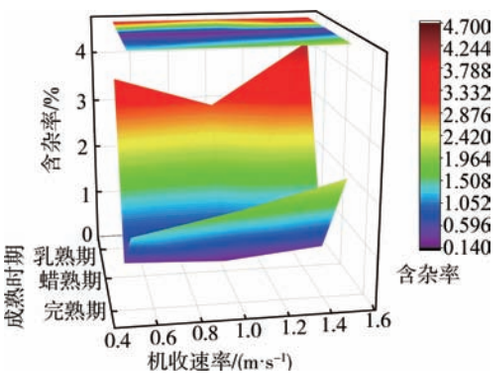


图 4　成熟时期及机收速率互作对收获籽粒含杂率影响

Figure 4　Effect of interaction between mature stage and mechanical harvest rate on impurity content of harvested grain.

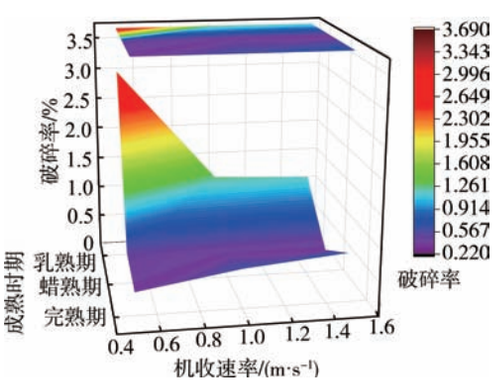


图 5　成熟时期及机收速率双因素互作对收获破碎率影响

Figure 5　Effect of interaction between mature period and machine yield rate on harvest crushing rate.

2.5　籽粒含水率与高粱机械收获效果的相关性

对高粱籽粒含水率与高粱机械收获效果进行相关性分析，结果如表 5 所示。

表 5　籽粒含水率与高粱机械收获质量的相关性

Table 5　Correlation between grain moisture content and sorghum mechanical harvest quality

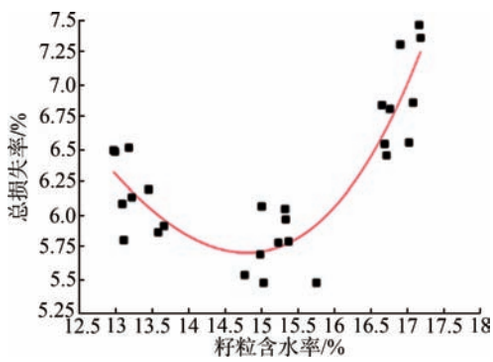
指标	籽粒含水率	总损失率	含杂率	破碎率
籽粒含水率	1.000			
总损失率	0.754	1.000		
含杂率	0.770	0.815	1.000	
破碎率	0.746	0.807	0.682	1.000

注：相关性均在 0.01 水平显著。

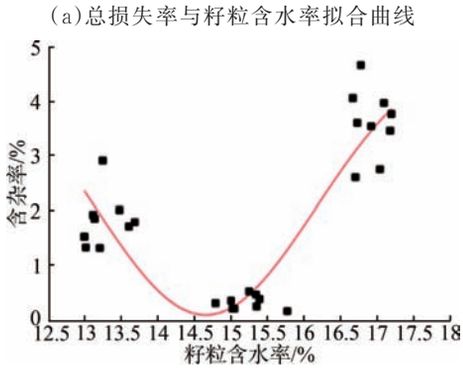
在高粱机械收获过程中，籽粒含水率与总损失率、含杂率、破碎率均呈极显著的相关关系，相关性均在 0.01 水平显著。总损失率与含水率相关系数为 0.754，含杂率与含水率相关系数为 0.770，破碎率与含水率相关系数为 0.746。

2.6　籽粒含水率对高粱机械收获效果的影响

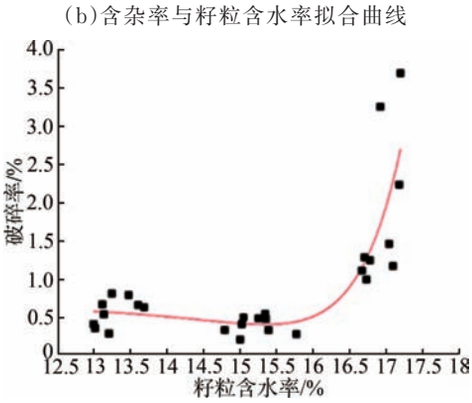
分析籽粒含水率对高粱机收指标的影响规律，如图 6 所示。



(a)总损失率与籽粒含水率拟合曲线



(b)含杂率与籽粒含水率拟合曲线



(c)破碎率与籽粒含水率拟合曲线

图 6　籽粒含水率与高粱机械收获指标间的关系

Figure 6　Relationship between grain moisture content and mechanical harvest index of sorghum

由图 6 可知，总损失率随着籽粒含水率升高呈现先下降后上升的趋势，由 6.52% 下降至 5.48% 再上升至 7.47%；含杂率具有类似的曲线，也呈现先下降后上升的趋势，由 2.92% 下降至 0.142% 再上升至 4.687%；破碎率则随着籽粒含水率的增加呈现先缓慢

下降后快速上升的趋势,由0.82%下降至0.22%再上升至3.687%。获得总损失率、含杂率和破碎率的拟合方程,如式(5)~式(7)所示。

$$Z_s = 39.876 + 0.585e^{\frac{H_s}{4.700}} - 19.492e^{\frac{H_s}{16.504}} \quad (5)$$

$$Z_z = 5.077 - 5.006e^{-\frac{(H_s-14.630)^2}{4.512}} \quad (6)$$

$$Z_p = 0.643 + 0.067e^{\frac{(H_s-12.631)}{0.827}} - 0.110e^{\frac{(H_s-12.631)}{0.936}} \quad (7)$$

式中:Z_s——高粱总损失率,%;

Z_z——高粱含杂率,%;

Z_p——高粱破碎率,%;

H_s——高粱籽粒含水率,%。

3 结论

1)成熟时期对高粱收获的总损失率、含杂率和破碎率影响均显著,在机收速率1.0 m/s时,乳熟期高粱机械收获的总损失率为6.52%,含杂率为3.00%,破碎率为1.25%;蜡熟期机械收获的高粱总损失率为5.50%,含杂率为0.21%,破碎率为0.38%;完熟期高粱机械收获的总损失率为5.87%,含杂率为1.78%,破碎率为0.62%。

2)机收速率对高粱机收效果的影响极显著,在蜡熟期,机收速率为0.5 m/s时,高粱机械收获的总损失率为6.03%,含杂率为0.29%,破碎率为0.49%;机收速率为1.0 m/s时,高粱机械收获的总损失率为5.50%,含杂率为0.21%,破碎率为0.38%;机收速率为1.5m/s时,高粱机械收获的总损失率为5.76%,含杂率为0.40%,破碎率为0.35%。

3)高粱成熟时期与机收速率共同作用对高粱机械收获总损失率和破碎率影响极显著,对含杂率影响显著,在蜡熟期及机收速率为1.0 m/s时总损失及含杂率均为最低,总损失率为5.48%,含杂率为0.14%,破碎率在蜡熟期及机收速率为1.5 m/s时达到最低为0.22%,但与蜡熟期及机收速率为1.0 m/s差距不大,破碎率为0.29%,综合考虑在蜡熟期和机收速率为1.0 m/s收获能取得最佳的收获效果。

参 考 文 献

[1] 邹剑秋. 基于1961—2020年FAO数据的世界高粱产业分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 1-10.
ZOU Jianqiu. World sorghum industry analysis based on 1961—2020 FAO data [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2023, 43(1): 1-10.

[2] 李顺国, 刘猛, 刘斐, 等. 中国高粱产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 471-482.
LI Shunguo, LIU Meng, LIU Fei, et al. Current status and future prospective of sorghum production and seed industry in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 54(3): 471-482.

[3] 许洪峰. 山西省高粱联合收割机研制与发展建议[J]. 农业技术与装备, 2012(20): 24-25.

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

[5] 尚赏, 郭书亚, 张艳, 等. 不同收获期对豫东地区夏玉米机械粒收质量的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 867-873.
SHANG Shang, GUO Shuya, ZHANG Yan, et al. Effects of different harvesting date on mechanical grain-harvesting quality of summer maize in Eastern Henan [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(4): 867-873.

[6] 王红, 关皓, 陈明, 等. 收获期对玉米籽粒产量和秸秆青贮品质的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(6): 1574-1581.
WANG Hong, GUAN Hao, CHEN Ming, et al. Effect of different harvesting periods on grain yield and stalk silage quality of maize [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(6): 1574-1581.

[7] 郭峰, 李庆凯, 范仲学, 等. 不同收获时期对花生产量和品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 84-90.
GUO Feng, LI Qingkai, FAN Zhongxue, et al. Effects of different harvest time on yield and quality of peanut [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 84-90.

[8] 王海鸥, 胡志超, 陈守江, 等. 收获时期及干燥方式对花生品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 292-300.
WANG Haiou, HU Zhichao, CHEN Shoujiang, et al. Effects of different harvesting dates and drying methods on peanut quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 292-300.

[9] 李海东, 李文金, 康涛, 等. 花生覆膜和露地栽培条件下不同收获时期对产量及构成因素的影响[J]. 花生学报, 2021, 50(3): 75-79.
LI Haidong, LI Wenjin, KANG Tao, et al. Effects of different harvest time on yield and its components of peanut under plastic film mulching and open field cultivation [J]. Journal of Peanut Science, 2021, 50(3): 75-79.

[10] 王桂民, 易中懿, 陈聪, 等. 收获时期对稻麦轮作水稻机收损失构成的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 36-42.
WANG Guimin, YI Zhongyi, CHEN Cong, et al. Effect

of harvesting date on loss component characteristics of rice mechanical harvested in rice and wheat rotation area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 36－42.

[11] 刘晓亮，侯立刚，齐春艳，等．吉林西部稻区分期收获对稻米品质的影响[J]．东北农业科学，2019，44(3)：5－8.
LIU Xiaoliang, HOU Ligang, QI Chunyan, et al. Effect of staged harvest on rice quality in western rice area of Jilin Province [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(3): 5－8.

[12] 杜志敏，杨宇尘，夏原野，等．收获期对北方杂交粳稻和常规粳稻品质的影响[J]．作物杂志，2018(1)：147－151.
DU Zhimin, YANG Yuchen, XIA Yuanye, et al. Effects of harvest time on quality traits of hybrid japonica rice and inbred japonica rice in Northern China [J]. Crops, 2018 (1): 147－151.

[13] 邱述金，原向阳，张泽乾，等．成熟时期与收获方式对谷子收获效果的影响[J]．山西农业大学学报(自然科学版)，2021，41(6)：108－114.
QIU Shujin, YUAN Xiangyang, ZHANG Zeqian, et al. The effects of maturity period and harvesting methods on the harvesting performance of millet [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 41(6): 108－114.

[14] 王海莲，王润丰，刘宾，等．不同生长时期收获对甜高粱农艺性状及营养品质的影响[J]．中国农业科学，2020，53(14)：2804－2813.
WANG Hailian, WANG Runfeng, LIU Bin, et al. Effects of harvesting at different growth stage on agronomic and nutritional quality related traits of sweet sorghum [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53 (14): 2804－2813.

[15] 王东，于振文，张永丽，等．收获时期对优质强筋冬小麦籽粒产量和品质的影响[J]．山东农业科学，2003(5)：6－8.
WANG Dong, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al. Effect of harvest stage on kernel yield and quality of winter wheat with high quality and strong gluten [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2003(5): 6－8.

[16] 左青松，黄海东，曹石，等．不同成熟时期对油菜机械收获损失率及籽粒品质的影响[J]．作物学报，2014，40(4)：650－656.
ZUO Qingsong, HUANG Haidong, CAO Shi, et al. Effects of harvesting date on yield loss percentage of mechanical harvest and seed quality in rapeseed [J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(4): 650－656.

[17] 赵燕梅，钟华，崔志文，等．不同品种、刈割时期苜蓿的营养特性[J]．草业与畜牧，2015(1)：17－22.
ZHAO Yanmei, ZHONG Hua, CUI Zhiwen, et al. Nutritional properties of different varieties and harvest periods of alfalfa [J]. Prataculture Animal Husbandry, 2015(1): 17－22.

[18] 郑楠，宋宪友，房郁妍，等．不同收获时期对大麻全麻率的影响[J]．黑龙江农业科学，2013(8)：21－23.
ZHENG Nan, SONG Xianyou, FANG Yuyan, et al. Study on the influence of harvest time on total fiber content of hemp[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013(8): 21－23.

[19] 杨欢，张黎骅，陈平，等．收获时期对西南地区套作大豆机收效果及产量的影响[J]．东北农业大学学报，2019，50(2)：62－70.
YANG Huan, ZHANG Lihua, CHEN Ping, et al. Effect of harvest date on mechanical harvest quality and yield of intercropped soybean in Southwestern China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50 (2): 62－70.

[20] 屈洋，马红战，刘洋，等．收获期对机收大豆损失率的影响[J]．现代农业科技，2019(13)：13－14.
QU Yang, MA Hongzhan, LIU Yang, et al. Effect of harvest date on loss rate of machine-harvested soybeans [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(13): 13－14.

[21] DANESHVAR E, ZARRINMEHR M J, KOUSHA M, et al. Performance evaluation of different harvesting methods and cultivation media on the harvesting efficiency of microalga and their fatty acids profile [J]. Fuel, 2020: 118592.

[22] 张隆梅，刘岗微，齐彦栋，等．农业机械无人驾驶系统关键技术研究进展[J]．智能化农业装备学报(中英文)，2022，3(1)：27－36.
ZHANG Longmei, LIU Gangwei, QI Yandong, et al. Research progress on key technologies of agricultural machinery unmanned driving system [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2022, 3(1): 27－36.

[23] 冯禹，邱述金，原向阳，等．高粱穗瓣籽粒拉伸力学特性研究[J]．农业工程，2021，11(3)：119－124.
FENG Yu, QIU Shujin, YUAN Xiangyang, et al. Tensile characteristics of sorghum spikelet and grains[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(3): 119－124.

[24] 冯禹，邱述金，原向阳，等．高粱籽粒压缩力学特性研究[J]．中国农业科技导报，2022，24(5)：102－110.
FENG Yu, QIU Shujin, YUAN Xiangyang, et al. Research on compression mechanical characteristics of sorghum grains [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(5): 102－110.

[25] 陈超科，李法德，闫银发，等．高粱秸秆力学特性的试验[J]．中国农机化学报，2016，37(5)：130－135，159.

Analysis and research on influencing factors of mechanized harvest of sorghum

QIU Shujin[1], ZHANG Qinghui[1], YU Zehu[1], LI Kai[1],
CUI Qingliang[1], YUAN Xiangyang[2*]

(1. *College of Agriculture Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu* 030801, *China*;
2. *College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu* 030801, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of grain loss, breakage and impurity in sorghum harvest, the influence of maturity and mechanical harvest rate on the effect of combined harvest was studied. Taking Jinza No. 22 sorghum as the research object, the plot experiment scheme was adopted, and three mechanical harvesting rates were set at the milk ripening stage, wax ripening stage and complete ripening stage, respectively, and the mechanical harvesting rates were set at 0.5 m/s, 1.0 m/s and 1.5 m/s, and the indexes such as crushing rate, impurity content, total loss rate and moisture content were measured, so as to obtain the influence rules of mature stage and mechanical harvesting rate on the harvesting effect. The results showed that the maturity stage and mechanical harvest rate had significant effects on the harvest indexes of sorghum, such as impurity content, crushing rate and total loss rate, and the most influential factors on the three harvest indexes were maturity stage. The best results can be achieved when the wax is ripe and the mechanical harvest rate is 1.0 m/s, when the grain moisture content is from 14.756% to 15.746%, the impurity content is 0.14%, the crushing rate is 0.29% and the total loss rate is 5.48%. This study obtained the influence law of mature period and mechanical harvest rate on sorghum harvest effect, which can provide theoretical basis for reasonable selection of mature period and popularization of harvesting technology of sorghum mechanization.

Keywords: sorghum maturity stage; harvesting velocity; moisture content; loss rate; impurity rate; broken rate