

郑娟, 廖宜涛, 齐天翔, 等. 振动对气力式油菜精量排种器性能影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 233-242.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.02.029

## 振动对气力式油菜精量排种器性能影响

郑娟<sup>1</sup>, 廖宜涛<sup>1,2</sup>, 齐天翔<sup>1</sup>, 廖庆喜<sup>1,2</sup>, 高丽萍<sup>1</sup>, 刘嘉诚<sup>1</sup>

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 针对机械振动改变种子受力和运移状态, 继而导致精量排种器性能降低的问题, 基于振动排种器性能检测试验台, 开展无振动、不同振频、不同振幅对油菜精量排种器排种性能影响规律试验。结果显示: 无振动条件下, 吸种负压达到临界点前(合格指数 $\geq 90\%$ 所对应负压值)排种性能指标变化规律与转速大小规律相关, 转速越大, 合格指数和漏播指数指标值整体偏低, 呈降低趋势; 10、20 Hz 振频时, 振动导致排种器垂直方向位移增大, 投种无序性加大, 合格指数始终 $< 80\%$ , 明显低于无振动和 30 Hz 振频, 30 Hz 振频时临界负压绝对值较无振动时略低, 负压绝对值高于临界负压绝对值时的合格指数 $> 90\%$ ; 40 Hz 振频、振幅 $\geq 8 \text{ m/s}^2$ 时充种室及吸种区种群呈现“沸腾”状态, 低吸种负压绝对值即可实现高合格指数, 并可降低高负压绝对值时型孔重吸率。不同频率振幅工况组合下, 吸种临界负压绝对值差异显著, 达临界值前吸种负压对应的排种合格指数存在明显差异, 达临界值后机械振动影响降低。

**关键词** 精量排种器; 油菜; 正负气压组合式; 振动特性; 排种性能

**中图分类号** S223.2+3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)02-0233-10

油菜是我国主要的油料作物之一<sup>[1-2]</sup>, 精量播种技术能够实现精确控制油菜播量、粒距和出苗均匀性, 提高油菜作物成活率, 保证产量<sup>[3-4]</sup>。精量排种器直接影响和制约播种的质量和稳定性<sup>[5]</sup>。正负气压组合式油菜精量排种器(简称精量排种器)是 2BFQ-6 型精量联合直播机(简称联合直播机)的核心工作部件, 已在全国多地示范推广与应用<sup>[6-7]</sup>。目前对其研究主要集中在静态情况下(实验室台架试验)吸种效果影响因素及排种性能提高等方面<sup>[8-10]</sup>。联合直播机多工序田间耕作时地表凹凸不平, 且受机具自身回转工作部件影响, 产生的机械振动影响精量排种器排种稳定性<sup>[11]</sup>。因此, 研究振动特性对精量排种器的性能影响, 对田间播种质量提升有着重要的实际意义和参考价值。

近些年, 相关学者就田间作业机组振动仿真<sup>[12]</sup>、振动播种质量影响<sup>[13-14]</sup>等开展研究; 张石平等<sup>[15]</sup>通过对种盘施加振动激励, 发现种子在种盘中呈现“沸腾”状态时有利于其吸种, 提高播种机作业质量。张涛等<sup>[16]</sup>应用离散元软件对田间振动工况下气吸式排

种器内的种群状态和运动参数进行了模拟仿真, 台架试验表明一定振动有利于排种器吸种效果提升。王奇等<sup>[17]</sup>为探究机械振动对指夹式玉米精密排种器排种性能的影响, 建立了玉米免耕播种机的振动数学模型, 结果表明振动对粒距变异系数和合格指数有显著影响。上述研究通过理论和试验验证了振动特性会对精量排种器排种效果产生影响, 且多数基于免耕播种机和穴盘育苗精密播种设备上, 对工作条件和振动特性与其他播种设备存在差异的精量联合直播机及其精量排种器研究较少。

为探明播种机振动对排种器工作性能的影响, 本研究以正负气压组合式油菜精量排种器为研究对象, 以 2BFQ-6 型精量联合直播机田间播种工况下的振动测试分析结果为指导, 基于振动排种器性能检测试验台, 开展振动排种性能试验, 比较分析不同振动频率区间和振幅对排种性能指标的影响, 以期对精量排种器结构改进和生产中增大有益振动区间或降低振动干扰方面研究提供参考依据。

收稿日期: 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975238; 51875229); 国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)

郑娟, E-mail: zhengjuan@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖宜涛, E-mail: liaoyitao@mail.hzau.edu.cn

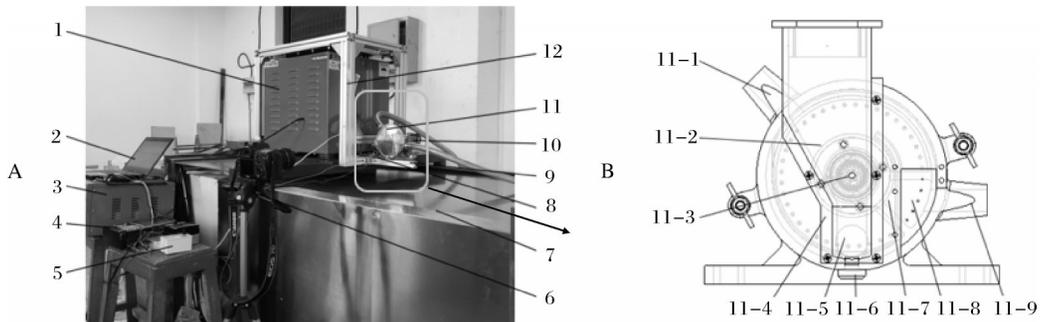
## 1 材料与方法

### 1.1 排种试验台与排种器结构

在黑龙江省农业机械工程研究院开发的JPZS-16计算机视觉排种器试验台上安装六自由度空间振动装置,设计搭建振动排种试验台,如图1。振动通过振动面板及铝合金框架传至排种器,步进电机通过联轴器将动力传递给排种器。为选出传递振动能量效果理想且满足田间测试时的振动幅值,对不同材料框架传动振动的效果进行测定,比较振动能量传递到排种器处的振动幅值,测定发现铝合金型材框架低频、中频和高频振动能量传递效果均能达到试验测定的目标幅值,故试验台使用铝合金材料框

架。振动试验台可模拟田间振动作业环境,种床带可模拟播种机前进运动,油菜种子经排种器排出后粘附在种床带上,检测装置对其进行实时检测,排种性能指标显示在控制计算机上。

本研究在设计搭建的振动排种试验台上开展,试验研究对象正负气压组合式油菜精量排种器,主要由排种盘、排种轴、气室、罩壳等组成,排种盘上均匀分布有型孔<sup>[18]</sup>。排种器安装在联合直播机上田间播种时,仿形地轮通过链传动带动排种轴进而使排种盘转动,油菜种子在充种区被负压气流吸附在型孔上随排种盘一起转动,待其转至正压气室区,种子在正压气流和重力的作用下脱离型孔进行卸种,完成排种过程<sup>[19]</sup>。



A: 振动排种试验台总体布局 General layout of vibration seeding test bed; 1. 六自由度空间振动装置 Six-degree space vibration test stand; 2. 振动台控制计算机 Shaker control computer; 3. 振动台控制器 Shaker controller; 4. COCO-80 动态信号分析仪 Dynamic signal analyzer; 5. 步进电机驱动器 Stepper motor driver; 6. 拍摄相机 Photography camera; 7. JPZS-16 计算机视觉排种器试验台 JPZS-16 computer vision seed rower test stand; 8. 356A16 型加速度传感器 356A16 acceleration sensor; 9. 铝合金型材排种器支架 Aluminum alloy profile seed rower bracket; 10. 步进电机 Stepper motors; 11. 正负气压组合式油菜精量排种器 Combined positive and negative precision seed metering device; 12. 铝合金框架 Aluminum alloy frame. B: 排种器结构示意图 Structure diagram of seed metering device; 11-1. 进气口 Inlet; 11-2. 负压气室区 Negative pressure air chamber area; 11-3. 排种轴 Seed discharge shaft; 11-4. 种子箱 Seed box; 11-5. 充种口 Seed filling port; 11-6. 卸种口 Seed unloading port; 11-7. 正压气室区 Positive pressure air chamber area; 11-8. 种盘 Seed disc 11-9. 出气口 Outlet.

图1 振动排种试验台总体布局(A)及排种器结构示意图(B)

Fig.1 General layout of vibration seeding test stand(A) and structure schematic(B)

### 1.2 试验材料

试验用正负气压组合式排种器的排种盘型孔数为40,型孔直径为1.2 mm。试验用油菜种子为“华油杂62”,经孔径1.4 mm筛网去除不饱满的种子及杂质,对筛选过后的油菜种子随机选取50粒测定其外形特征,统计结果见表1。

### 1.3 试验方法

参考笔者所在课题组前期对精量联合直播机振动测试分析结果<sup>[20]</sup>,发现播种机作业时垂直于地表方向振动最为剧烈,前后与水平方向的振动较平缓,因此,振动特性分析重点关注垂直方向的振动。转速、吸种负压和振动对气力式排种器排种性能有显著影响,本研究以排种轴转速、吸种负压、振动频率、

振动幅值为试验因素,开展排种器振动性能试验。试验卸种正压设置为0.2 kPa;吸种负压水平范围-5.2~-0.8 kPa,间隔0.4 kPa;排种轴转速范围20~40 r/min,间隔5 r/min。根据直播机频域特性分析结果,试验时振动频率选择0~150 Hz,间隔10 Hz,按频率大小分为低频(0~30 Hz)、中频(40~90 Hz)、高频(100~150 Hz)区间,根据播种机的主要振动特性,排种器低、中、高频振动试验振幅分别选取4、12、25 m/s<sup>2</sup>。

为使排种试验在试验方案指定振动条件下进行,对精量排种器处的振动加速度幅值进行实时测定,每组试验前调节振动台控制计算机参数,通过COCO-80动态信号分析仪进行标定,待振幅加速度

表1 试验用华油杂62油菜种子几何特征  
Table 1 Mechanical and physical properties of Huayouza 62

| 机械物理特性参数<br>Mechanical physical characteristics parameters | 数值<br>Value | 标准误差<br>Standard error |
|--|-------------|------------------------|
| 长/mm Length  | 2.53        | 0.113                  |
| 宽/mm Width   | 2.34        | 0.128                  |
| 高/mm Height  | 2.11        | 0.131                  |
| 平均粒径/mm Average particle size                              | 2.33        | —                      |
| 千粒重/g Thousand grain weight                                | 6.24        | —                      |
| 球形度/% Sphericity   | 91.71       | —                      |

注 Note: 长、宽、高等为50粒种子统计平均值。The length, width and height are all the statistical mean of 50 seeds.

达到试验方案指定幅值后,调节振动排种器性能检测试验台种床带调速旋钮,设置种床带前进速度。株距60 mm设定下,排种盘转速20、25、30、35、40 r/min对应的种床带速度分别为2.88、3.60、4.32、5.04、5.76 km/h,种床带运行平稳后,调节风压至指定气压,开启驱动电机进行排种性能测试。

### 1.4 评价指标

以不同频率、振幅、吸种负压、转速工作状态下的排种合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标,参考GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》进行振动排种试验;对排种各环节的试验指标进

行考核和记录,每组试验重复3次,取平均值作为试验结果进行记录,排种性能指标计算如下。

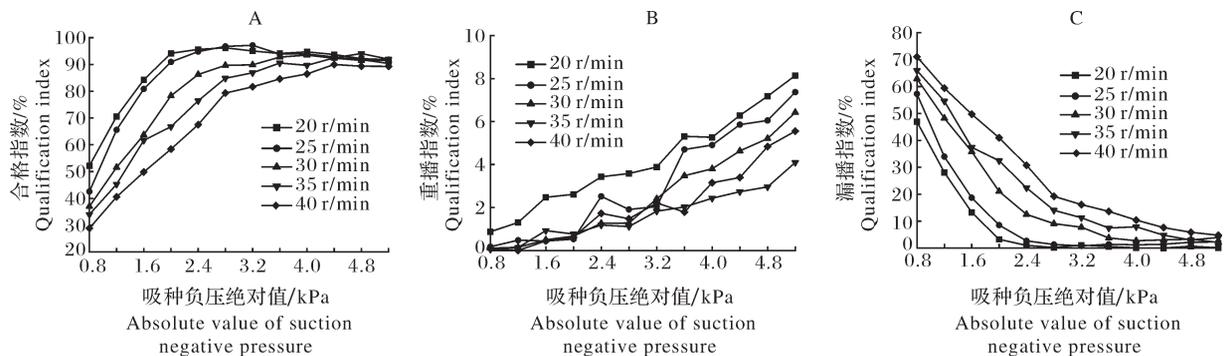
$$\begin{cases} A = \frac{n_1}{N'} \times 100\% \\ D = \frac{n_2}{N'} \times 100\% \\ M = \frac{n_0}{N'} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,A为合格指数,%;D为重播指数,%;M为漏播指数,%;N'为理论排种数;n<sub>0</sub>为漏播数;n<sub>1</sub>为单粒合格数;n<sub>2</sub>为重播数。确定理论粒距为X<sub>r</sub>,前进方向相邻种子的实际距离为L,当L>1.5X<sub>r</sub>为漏播,L<0.5X<sub>r</sub>为重播,L介于两者之间为合格。

## 2 结果与分析

### 2.1 无振动条件对排种性能的影响

无振动条件下吸种负压绝对值与合格指数、重播指数、漏播指数的关系如图2所示,结果显示随着吸种负压绝对值增大,排种盘型孔种子吸附率不断增加,20~35 r/min转速时合格指数先升高,漏播指数急速下降,当吸种负压绝对值达到一定值后,漏播指数趋向稳定,此时重播指数上升,合格指数呈轻微下降趋势;40 r/min转速时合格指数较其他区间低,但保持上升趋势,可能原因是由于高转速状态下型孔与充种室内种子的接触时间短,漏播概率较大,对吸种负压绝对值要求更高。



A:合格指数 Qualification index; B:重播指数 Replay index; C:漏播指数 Missed index.

图2 无振动条件下试验指标与吸种负压的关系

Fig.2 Relation of curve between test index and negative pressure of seed suction under non-vibration condition

试验转速区间内排种器重播指数随负压绝对值升高呈上升趋势,漏播指数先下降后趋于稳定,到达吸种临界负压绝对值前(合格指数达到90%),不同转速的合格指数、重播指数曲线上下排列顺序与转速大小规律相关,转速越大,合格指数曲线越靠近坐标轴,指数值整体较低,漏播指数关系曲线相反,转

速越大其曲线位置越偏离坐标轴,指数值整体较高,转速20 r/min的曲线最接近坐标轴,在相同试验参数下漏播指数最低。表明到达吸种临界负压绝对值前,相同吸种负压下排种轴转速越大对应的合格指数和重播指数越低,对应的漏播指数越高,由两方面因素引起,首先排种轴转速越快其排种盘型孔处的

线速度越快,型孔重吸概率变小,漏吸概率变大,导致其合格指数降低,其次本试验所用经筛选后的“华油杂62”种子尺寸及千粒重整体偏大,易漏播。

## 2.2 振动频率对排种性能的影响

由无振动条件下试验结果可知,20~35 r/min排种器排种性能变化规律基本一致,转速40 r/min与之有细微差别,故探究振动频率对排种器排种性能影响时,主要对20、40 r/min转速水平条件下的试验结果进行分析。

1) 低频振动对排种性能的影响。低频振动(0~30 Hz)排种试验按照田间试验测定结果设置振动幅值加速度为 $4\text{ m/s}^2$ ,排种轴转速20、40 r/min时低频各频率吸种负压与合格指数的关系如图3所示。

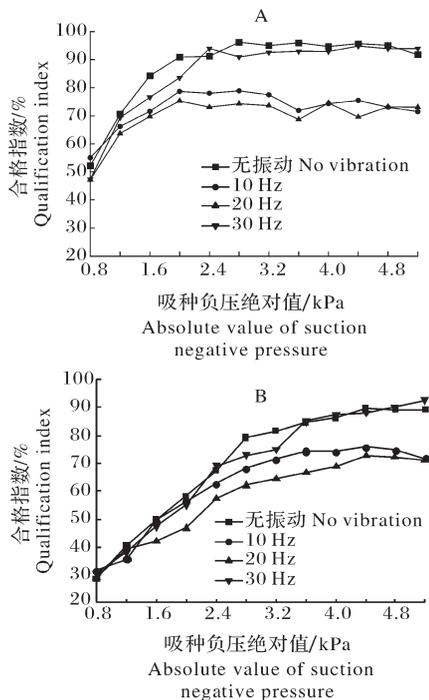


图3 低频各频率吸种负压与合格指数关系  
A: 排种轴转速 Shaft speed 20 r/min; B: 排种轴转速 Shaft speed 40 r/min.

图3 低频各频率吸种负压与合格指数关系  
Fig.3 Relation curve between negative pressure of seed suction at low frequency and qualification index

由图3可知,转速为20 r/min时,无振动、30 Hz低频频率下对应的临界负压约 $-3.2$ 、 $-2.4$  kPa,30 Hz振频条件下临界负压绝对值较无振动状态略低,高于临界负压绝对值后对应的合格指数均 $>90\%$ ,且合格指数随着吸种负压绝对值的增大缓慢增大,无明显下降趋势,而无振动状态下的合格指数出现下降趋势,表明30 Hz低频振动条件下排种器工作较稳定。吸种负压超过 $-4.4$  kPa后,30 Hz振动状

态下的排种器合格指数下降不明显,无振动条件下合格指数呈下降趋势,原因可能是振动降低了高吸种负压绝对值时的型孔重吸现象。试验中发现重播指数在转速30 r/min、振频30 Hz、负压 $-4.4$  kPa条件下稳定在4%左右,随吸种负压绝对值的增大上升不明显,30 Hz振频其他转速除吸种临界负压各不相同以外,试验指标与吸种负压趋势与此相近。

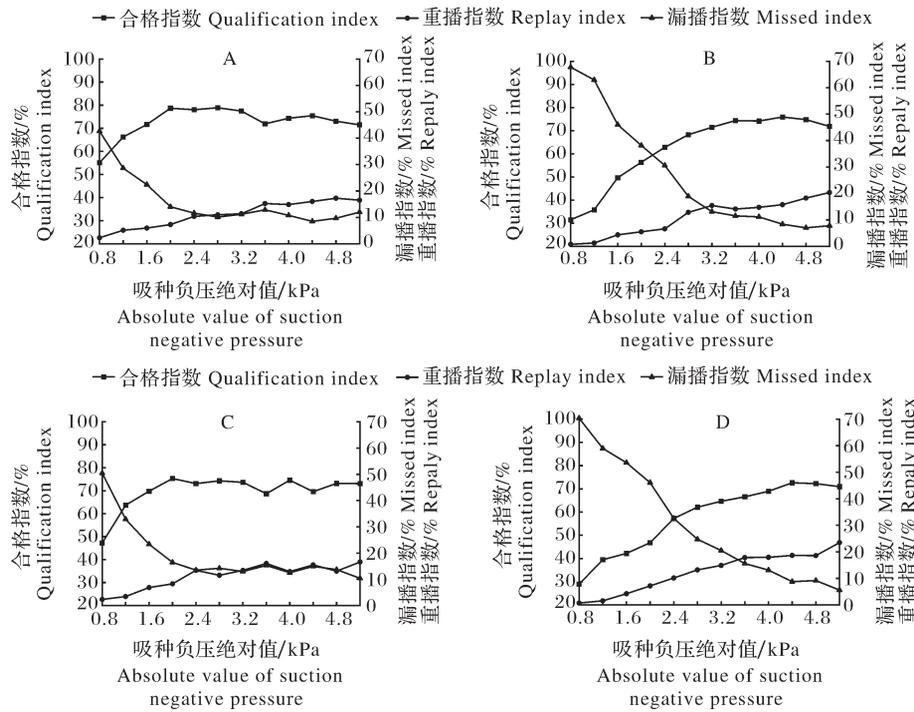
10、20 Hz低频频率振动条件下,排种合格指数明显低于无振动和30 Hz振动频率条件下,在整个吸种负压区内排种器合格指数均 $<80\%$ ,试验结果发现此规律同样适用其他3个转速水平下10、20 Hz频率时吸种负压与合格指数曲线趋势,为探究出现此现象的原因,试验得到10、20 Hz低频率下吸种负压绝对值与排种试验指标间的关系,如图4。

由图4可知,转速20 r/min时,10、20 Hz振频下吸种负压达到 $-2.0$  kPa后合格指数趋于稳定,转速40 r/min时,10、20 Hz振频下吸种负压达到 $-3.6$ 、 $-4.4$  kPa后合格指数趋于稳定状态,4种情况到达各自的吸种负压临界点时,均出现不同程度的小幅下降,但合格指数始终 $<80\%$ ,原因主要在于相同振动加速度幅值下,振动频率越小产生的振动位移越大,当振频为10、20 Hz时,排种器因振动台激励作用在垂直方向上产生较大的位移变化,导致其在投种时落种无序性显著增加且落种轨迹的直线度差,种子带经过振动排种器性能检测试验台检测后显示重播指数和漏播指数均高于其他条件,致使其合格指数远低于平均值。

2) 中频振动对排种性能的影响。中频振动(40~90 Hz)振动幅值按照田间试验测定结果设置为 $12\text{ m/s}^2$ 。排种轴转速20、40 r/min时对应的中频各频率吸种负压与合格指数的关系如图5所示。

由图5可知,排种器在振频50~90 Hz工作时吸种临界负压绝对值差异不大,转速20 r/min时各频率临界负压约 $-2.4$  kPa,转速40 r/min时各频率临界负压约 $-3.6$  kPa,在吸种临界负压值至 $-5.2$  kPa区间内,合格指数变化不大,都稳定在90%以上,与已有小粒径种子合理工作负压范围研究结论一致<sup>[19]</sup>,稳定工作负压约为1~2倍临界负压。

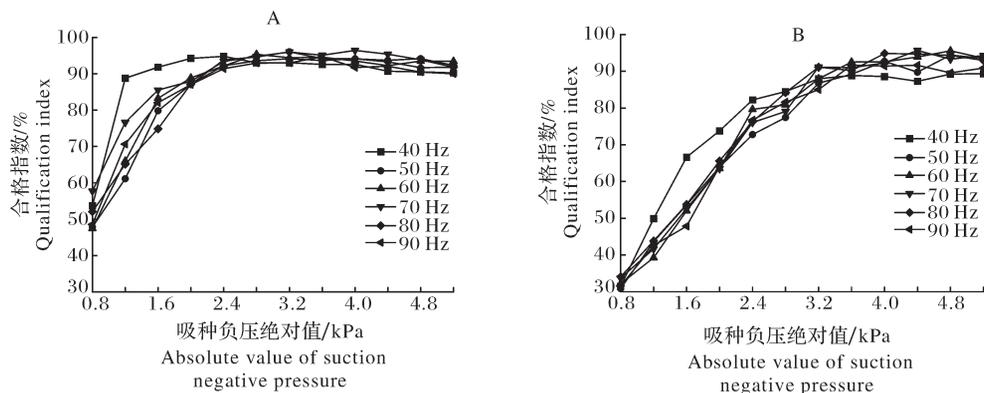
由图5A可知,转速20 r/min、振幅 $12\text{ m/s}^2$ 、振频40 Hz时,吸种负压在 $-2.0$ ~ $-1.2$  kPa区间内排种合格指数明显高于无振动和其他中频频率下的合格指数。图5B显示40 r/min转速时吸种负压在



A: 振频 10 Hz, 转速 20 r/min Vibration frequency 10 Hz, shaft speed 20 r/min; B: 振频 10 Hz, 转速 40 r/min Vibration frequency 10 Hz, shaft speed 40 r/min; C: 振频 20 Hz, 转速 20 r/min Vibration frequency 20 Hz, shaft speed 20 r/min; D: 振频 20 Hz, 转速 40 r/min Vibration frequency 20 Hz, shaft speed 40 r/min.

图 4 振频为 10 和 20 Hz 时吸种负压与试验指标关系

Fig.4 Relation curve between negative pressure of seed suction and test index at 10 Hz and 20 Hz vibration frequency



A: 排种轴转速 20 r/min Shaft speed 20 r/min; B: 排种轴转速 40 r/min Shaft speed 40 r/min.

图 5 中频各频率吸种负压与合格指数关系

Fig.5 Relation curve between negative pressure of seed suction at medium frequency and qualification index

—1.2 ~—2.8 kPa 区间内排种合格指数均高于其他频率合格指数。结合台架试验,其原因在于 40 Hz 振频时,吸种负压未达到稳定拐前排种器的漏播指数远低于其他工况下的漏播指数(20 r/min 转速拐点为 -1.6 kPa, 40 r/min 转速拐点为 -2.8 kPa)。

开展振频 40 Hz、不同转速和负压组合下的排种性能试验,得到试验指标与吸种负压的关系如图 6 所示,整理无振动与振频 40 Hz 时排种器的临界负压

值,见表 2。对比图 2A、6A 可发现,振动频率 40 Hz 时 5 个不同转速下合格指数与吸种负压曲线分布规律与无振动条件下基本一致,但由表 2 可看出,同转速下振频 40 Hz 的吸种临界负压绝对值较无振动下降了 0.4~1.2 kPa,结合试验过程发现,振频 40 Hz 时充种室内种子离散度较高,种群呈现“沸腾”状态,较低负压绝对值下种子即可被排种盘型孔吸附,达到较高的排种合格指数。

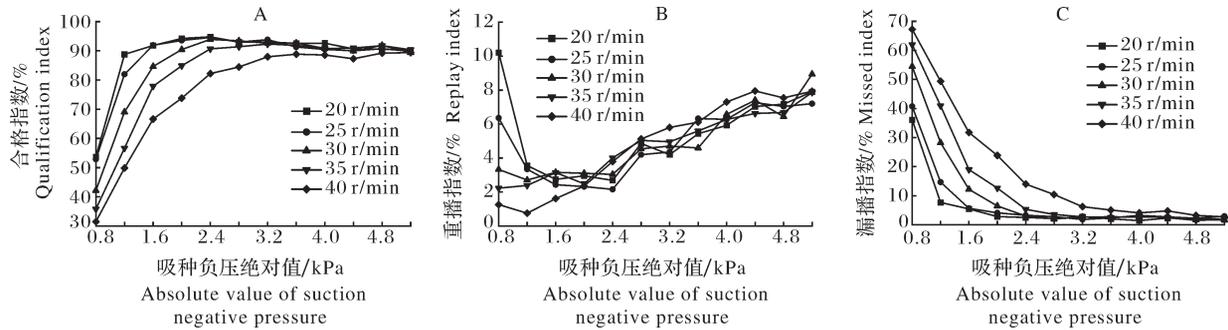
不同转速下重播指数呈高位先降再升的趋势,此现象主要由于振频40 Hz、吸种负压绝对值较低时,振动工作状态下被吸附的种子因型孔处吸附力小于种子自身重力、所受内摩擦力以及振动惯性力的合力会被振落,导致低吸种负压绝对值高重播概率现象。随着吸种负压绝对值升高,型孔对种子吸附力增大,种子被振落概率大大降低,重播指数出现下降趋势;随着吸种负压继续增大,型孔出现重吸的概率增大,重播指数呈上升趋势。40 Hz 频率振动下,吸种负压绝对值较高时(负压绝对值 $\geq 4.4$  kPa)各转速的重播指数总体水平高于无振动条件,漏播指数总体水平低于无振动条件,说明种子在“沸腾”状态时,其相对排种盘的速度降低,从而更容易被型

孔吸附,故振频40 Hz 高吸种负压绝对值时重播指数升高,漏播指数降低。

表2 不同转速振频40 Hz与无振动条件排种器临界负值对比

Table 2 Comparison of critical negative pressure of seed-metering device with different speed vibration frequency of 40 Hz and without vibration conditions kPa

| 转速/(r/min)<br>Shaft speed | 振频40 Hz<br>Vibration frequency 40 Hz | 无振动<br>No vibration |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| 20                        | -1.6                                 | -2.0                |
| 25                        | -1.6                                 | -2.0                |
| 30                        | -2.0                                 | -3.2                |
| 35                        | -2.4                                 | -3.6                |
| 40                        | -3.6                                 | -4.0                |



A: 吸种负压与合格指数关系 Relationship curve between seed suction negative pressure and qualification index; B: 吸种负压与重播指数关系 Relationship curve between seed suction negative pressure and replay index; C: 吸种负压与漏播指数关系 Relationship curve between seed suction negative pressure and missed seeding index.

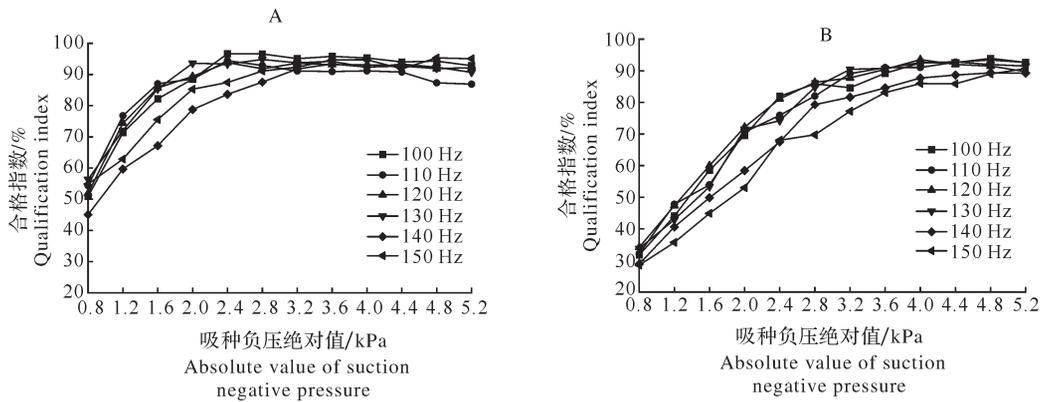
图6 40 Hz 振频下试验指标与吸种负压的关系

Fig.6 Relation curve between test index and seed suction negative pressure at 40 Hz vibration frequency

3) 高频振动对排种性能的影响。高频振动(100~150 Hz)振动幅值按照田间试验测定结果设置为 $25 \text{ m/s}^2$ 。排种轴转速分别为20、40 r/min时对应的高频各频率吸种负压绝对值与合格指数的关系如图7所示。在高频振动区间,100~130 Hz 振频条件下,合格指数随吸种负压绝对值的变化趋势与振频50~90 Hz 一致,转速20 r/min时吸种临界负压均约-2.4 kPa,转速40 r/min时临界负压均约-3.6 kPa,但当振动频率达到140 Hz后,5个不同转速下排种器的临界负压绝对值均有所上升,试验结果显示,振频140、150 Hz 时负压达到临界值前对应的排种器漏播指数比100~130 Hz 时更大,合格指数降低,分析可能由于高频振动影响排种器气室内的气流状态,降低了排种器的吸种概率。

总体来说,在不同振动条件下,排种器的合格指

数均先随着吸种负压绝对值增大而增大,当到达一定吸种负压值后趋于稳定,但趋于稳定的临界负压值不同。低频振动(0~30 Hz)区间,10、20 Hz 振频时不同转速水平排种器投种合格指数始终低于80%;中频振动(40~90 Hz)区间,40 Hz 振频时充种室及吸种区种群呈“沸腾”状态,“沸腾”状态的种子在达到吸种负压稳定拐点前更易被排种盘吸附,而在高吸种负压绝对值时其对应的重播指数也更高;振动频率 $> 40$  Hz 的中频区间及高频区间(100~150 Hz),由于频率升高,种群不再呈现“沸腾”状态,仅种群表层种子在特定频率下会出现扰动状态,此时振动频率对排种合格指数的影响不明显;不同振频、转速组合下排种器的临界吸种负压存在差异,临界负压与振动频率及振幅是非线性关系,对引起种群“沸腾”的特殊频率振动敏感。对比不同振频下的排种器性能参数发现,吸种负压绝对值低于临界负压绝对值时,不



A: 排种轴转速 Shaft speed 20 r/min; B: 排种轴转速 Shaft speed 40 r/min.

图7 高频各频率吸种负压与合格指数关系

Fig.7 Relation curve between negative pressure of seed suction at high frequencies and qualification index

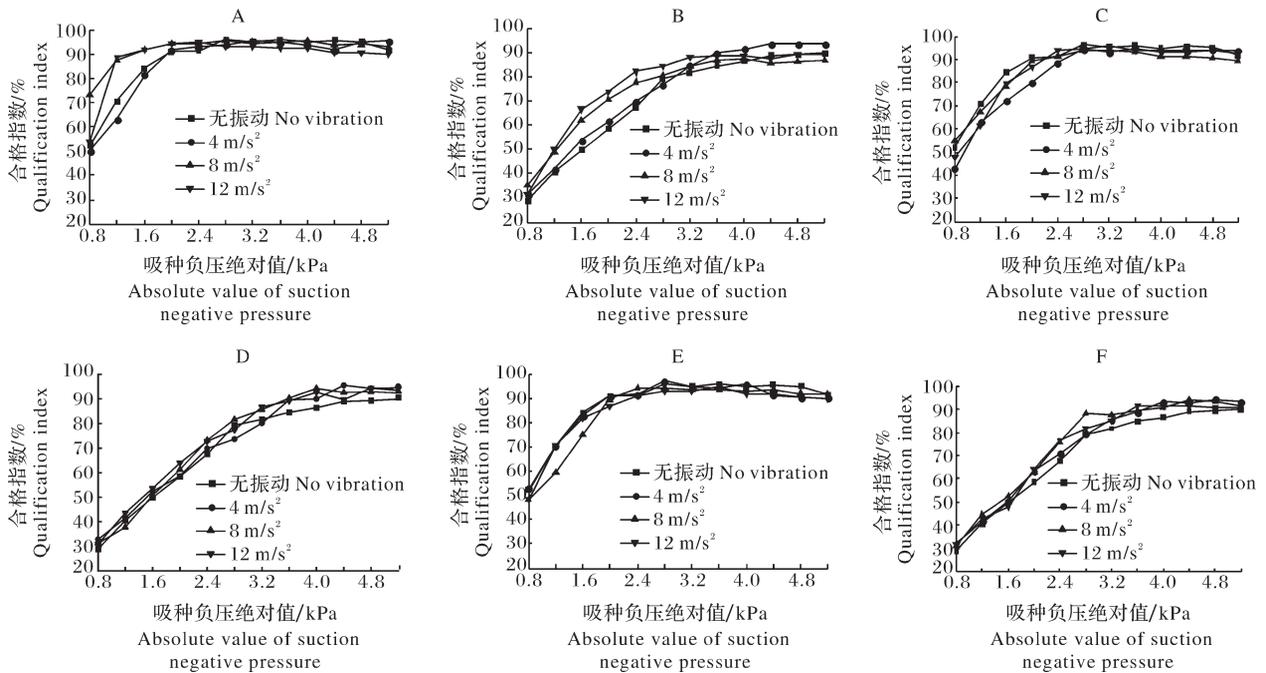
同吸种负压绝对值对应的排种合格指数存在明显差别,而到达吸种临界负压后,不同频率下的排种合格指数相近,说明到达吸种临界负压前,机械振动对排种性能存在明显影响,而到达吸种临界负压后机械振动对其排种性能影响较小。

### 2.3 振动幅值对排种性能的影响

由以上分析可知,振频40 Hz时种群出现了“沸腾”现象,为探究“沸腾”现象与振动幅值的相关性以及相同频率不同振幅下排种器的排种规律,对中

频振动(40~90 Hz)试验部分补充添加振幅加速度4、8 m/s<sup>2</sup>的振动排种试验。因50~90 Hz区间排种规律和吸种临界负压差异不大,故简化开展振动频率取值40、50、90 Hz,转速取值20、40 r/min时,无振动、4、8、12 m/s<sup>2</sup>4种振幅下吸种负压与合格指数的关系研究,其关系如图8所示。

由图8可知,振频40 Hz时,2种转速水平下,振幅8、12 m/s<sup>2</sup>对应的曲线在负压拐点前对应的合格指数均高于无振动和振幅4 m/s<sup>2</sup>条件下,振幅4 m/s<sup>2</sup>



A: 振频40 Hz, 转速20 r/min Vibration frequency 40 Hz, shaft speed 20 r/min; B: 振频40 Hz, 转速40 r/min Vibration frequency 40 Hz, shaft speed 40 r/min; C: 振频50 Hz, 转速20 r/min Vibration frequency 50 Hz, shaft speed 20 r/min; D: 振频50 Hz, 转速40 r/min Vibration frequency 50 Hz, shaft speed 40 r/min; E: 振频90 Hz, 转速20 r/min Vibration frequency 90 Hz, shaft speed 20 r/min; F: 振频90 Hz, 转速40 r/min Vibration frequency 90 Hz, shaft speed 40 r/min.

图8 不同振幅吸种负压与合格指数关系

Fig.8 Relation curve between negative pressure of seed suction with different amplitudes and qualification index

与无振动时曲线趋势一致,8、12 m/s<sup>2</sup>排种曲线总体趋势一致,但在负压-0.8 kPa时,振幅8 m/s<sup>2</sup>对应的合格指数要明显高于振幅12 m/s<sup>2</sup>对应的合格指数,结合试验现象分析振幅8、12 m/s<sup>2</sup>时排种器充种室和吸种区种子皆处于“沸腾”状态,低吸种负压时,种子更易被吸附,振幅8 m/s<sup>2</sup>时排种器的振动幅度小于振幅12 m/s<sup>2</sup>状态的振动幅度,被振落的种子数量较少,故振幅8 m/s<sup>2</sup>在-0.8 kPa时对应的合格指数更高,而排种器在振幅4 m/s<sup>2</sup>条件下工作,吸种区种子无明显振动,未达到“沸腾”状态,故合格指数整体趋势与无振动时相差不大。

除振频40 Hz时种群出现“沸腾”状态外,中频等其他频率均无此现象。对比振频50、90 Hz时不同转速振幅组合下排种器合格指数曲线,发现各振幅水平下合格指数随吸种负压的变化趋势基本一致,但吸种临界负压值存在一定差异。转速40 r/min时,无振动条件下漏播指数较高,排种合格指数最高达到90.94%(-5.2 kPa取得),40 Hz振频下,振幅4 m/s<sup>2</sup>时排种器合格指数可达90%以上,振幅8、12 m/s<sup>2</sup>时由于种群“沸腾”导致重播指数较高,合格指数均<90%;而在振频50~90 Hz频率区间,3个不同振幅水平下排种器合格指数均>90%,但达到90%的吸种临界负压存在差异,分析其主要原因在于中频振动降低了低吸种负压绝对值时排种器的漏播指数和重播指数,使得转速40 r/min时合格指数均>90%,吸种临界负压存在差异主要原因是,不同振动条件下排种器负压吸种区气压状态各异,且排种器工作时本身存在一定的随机性。

### 3 讨论

无振动排种时不同转速工况的吸种临界负压(合格指数达90%)不同;由于高转速状态下型孔与充种室内种子的接触时间短,漏播概率较大,对吸种负压绝对值要求更高,因此转速越大,其吸种临界负压绝对值越大;到达吸种临界负压前,相同吸种负压下排种轴转速越大对应的合格指数和重播指数越低,对应的漏播指数越高。

分析振动频率和幅值对排种性能的影响可知:低频区间频率10、20 Hz时,振动导致排种器垂直方向位移增大,显著降低排种器合格指数,排种合格指数明显低于无振动和30 Hz振动频率条件下,在整个吸种负压区间内排种器的合格指数皆<80%;中频

区间振频40 Hz时,振幅加速度 $\geq 8$  m/s<sup>2</sup>后,种群处于“沸腾”状态,振动幅值越大,掉落种子概率越小,增加低吸种负压绝对值区间排种器的吸种概率,在较大负压绝对值水平时,振动会降低型孔重吸率;不同频率振幅组合工况下,吸种临界负压存在差异,达到吸种临界负压前不同吸种负压对应的排种合格指数存在明显差异,到达吸种临界负压后,机械振动对排种性能影响较小。

本研究通过排种器振动台架试验考察了振频、振幅对排种性能的影响规律,可为精量排种器结构改进以及生产中降低机械干扰或增大有益振动区间研究提供参考。下一步可以对投种、导种环节运移状态的不同振频、振幅影响规律进行研究。

### 参考文献 References

- [1] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等.油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J].华中农业大学学报,2021,40(2):24-44.WAN X Y, LIAO Q X, LIAO Y T, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24-44 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张青松,廖庆喜,肖文立,等.油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J].中国油料作物学报,2018,40(5):702-711.ZHANG Q S, LIAO Q X, XIAO W L, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2018, 40(5): 702-711 (in Chinese with English abstract).
- [3] 杨丽,颜丙新,张东兴,等.玉米精密播种技术研究进展[J].农业机械学报,2016,47(11):38-48.YANG L, YAN B X, ZHANG D X, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(11): 38-48 (in Chinese with English abstract).
- [4] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等.油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):65-75.LIAO Y T, GAO L P, LIAO Q X, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(2): 65-75 (in Chinese with English abstract).
- [5] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J].农业机械学报,2017,48(9):1-16.LIAO Q X, LEI X L, LIAO Y T, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(9): 1-16 (in Chinese with English abstract).
- [6] 田波平,廖庆喜,黄海东,等.2BFQ-6型油菜精量联合直播机的设计[J].农业机械学报,2008,39(10):211-213.TIAN B P,

- LIAO Q X, HUANG H D, et al. Design of 2BFQ-6 rape precision combined direct seeding machine [J]. Transactions of the CSAM, 2008, 39(10): 211-213 (in Chinese with English abstract).
- [7] 廖庆喜, 杨松, 廖宜涛, 等. 油菜精量联合直播机气力排种系统性能和参数建模[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 9-15. LIAO Q X, YANG S, LIAO Y T, et al. Modeling for performance and parameters of pneumatic seed-metering system of precision planter for rapeseed [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 9-15 (in Chinese with English abstract).
- [8] 廖庆喜, 李继波, 覃国良. 气力式油菜精量排种器试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 44-48. LIAO Q X, LI J B, QIN G L. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed [J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(8): 44-48 (in Chinese with English abstract).
- [9] 丛锦玲, 余佳佳, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46-52. CONG J L, YU J J, CAO X Y, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(1): 46-52 (in Chinese with English abstract).
- [10] 舒彩霞, 韦跃培, 廖宜涛, 等. 油菜气力式排种系统参数对其负压特性的影响及风机选型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 26-33. SHU C X, WEI Y P, LIAO Y T, et al. Influence of air blower parameters of pneumatic seed-metering system for rapeseed on negative pressure characteristics and air blower selection [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 26-33 (in Chinese with English abstract).
- [11] 盛美萍, 杨宏晖. 振动信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017. SHENG M P, YANG H H. Vibration signal processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017 (in Chinese).
- [12] 杨自栋, 耿端阳, 彭丽芳, 等. 基于农田不平度的拖拉机机组输入谱推导与振动仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 62-66. YANG Z D, GENG D Y, PENG L F, et al. Deduction of input spectrum of tractor-implement combination and vibration simulation base on farm surface roughness [J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(12): 62-66 (in Chinese with English abstract).
- [13] 鹿芳媛, 马旭, 齐龙, 等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25. LU F Y, MA X, QI L, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 17-25 (in Chinese with English abstract).
- [14] MIN Y B, KIM S T, KWON H D, et al. Effect of the seed hopper vibration on the seeding performance of the vacuum suction nozzle seeder [J]. Journal of biosystems engineering, 2008, 33(3): 179-185.
- [15] 张石平, 陈进, 李耀明. 振动气吸式穴盘精量播种装置种子群“沸腾”运动分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 20-24. ZHANG S P, CHEN J, LI Y M. Analysis of seeds ‘Boiling’ motion on vibrational air-suction tray seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 20-24 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 27-35. ZHANG T, LIU F, ZHAO M Q, et al. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 27-35 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王奇, 朱龙图, 李名伟, 等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 9-18. WANG Q, ZHU L T, LI M W, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 9-18 (in Chinese with English abstract).
- [18] 余佳佳. 气力式油菜精量排种器结构解析与排种过程仿真研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. YU J J. Study on structural analysis and metering process simulation of pneumatic precision metering device for rapeseed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [19] 廖宜涛, 廖庆喜, 王磊, 等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 10-17. LIAO Y T, LIAO Q X, WANG L, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10-17 (in Chinese with English abstract).
- [20] 廖宜涛, 齐天翔, 廖庆喜, 等. 气力式油菜精量联合直播机振动特性及对排种性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1184-1196. LIAO Y T, QI T X, LIAO Q X, et al. Vibration characteristics of pneumatic combined precision rapeseed seeder and its effect on seeding performance [J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2022, 52(5): 1184-1196 (in Chinese with English abstract).

## Effect of vibration on performance of pneumatic rapeseed precision metering device

ZHENG Juan<sup>1</sup>, LIAO Yitao<sup>1,2</sup>, QI Tianxiang<sup>1</sup>, LIAO Qingxi<sup>1,2</sup>, GAO Liping<sup>1</sup>, LIU Jiacheng<sup>1</sup>

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

**Abstract** Aiming at the problem that mechanical vibration changes the force and transport state of seeds, which then leads to the reduction of precision seeding performance, an experimental study was conducted on the effect of vibration frequency and amplitude on the seeding performance of rapeseed precision seeder based on the vibration seeder performance testing test bench. The results showed that the critical negative pressure at 30 Hz vibration frequency is slightly lower than the state without vibration, and the qualification index is higher than 90% after the critical negative pressure, at 10 Hz and 20 Hz vibration frequency, the vibration causes the increase of vertical displacement of seed metering device, and the increase of seed feeding disorder, and the seed throwing qualification index is always less than 80%, which is obviously lower than no vibration and 30 Hz vibration frequency. Under the condition of 40 Hz vibration frequency and amplitude  $\geq 8 \text{ m/s}^2$ , the seed filling chamber and seed suction area showed the state of “boiling”, and the higher qualification index can be obtained at a lower seed suction negative pressure, and the vibration under the higher negative pressure will reduce the resorption rate of shaped hole. With different combinations of frequency and amplitude conditions, the critical negative pressure of seed suction varied significantly, and the seed discharge qualification index corresponding to the negative pressure of seed suction before reaching the critical value was significantly different, and the influence of mechanical vibration was reduced after reaching the critical value. This study provides a reference for the improvement of the vibration adaptive structure of rape precision seed raiser, and provides a basis for the research on increasing the beneficial vibration interval or reducing the vibration interference in production.

**Keywords** precision seed metering; rapeseed; combination of positive and negative air pressure; vibration characteristics; seeding performance

(责任编辑:陆文昌)