

油菜深施肥播种机动态倾斜工况排肥性能试验

高丽萍¹ 陈 慧^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 张青松¹ 李玥宾¹ 廖宜涛^{1,2}

(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: 针对油菜播种机同步深施肥作业中肥料条带集中, 机具受地表坡度变化等因素作用发生倾斜时, 各条带施肥量变化情况不明确的问题, 以油菜深施肥播种机排肥系统为研究对象, 构建不同倾斜工况下肥料颗粒的动力学模型, 分析机具动态倾斜对肥料颗粒流动特性的影响, 利用测试平台模拟播种机在 1°~5° 动态倾斜作业工况, 开展外槽轮排肥器各行排量一致性和总排量稳定性影响试验, 并建立倾斜状态对施肥均匀性影响的数学模型。试验结果表明, 播种机处于水平状态理想工况时, 排肥器各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数平均为 8.75% 和 0.89%; 当播种机沿作业方向前后动态单向倾斜或俯仰, 随着角度增大, 排肥器各行排量一致性和总排量稳定性变异系数逐渐减小, 最低可达 8.35% 和 0.41%, 说明沿作业方向的前后俯仰摆动对外槽轮排肥性能具有增益效应; 而播种机沿垂直作业方向左右动态单向倾斜或往复摆动角逐渐增大时, 排肥器各行排量一致性和总排量稳定性变异系数逐渐增大, 往复摆动最大倾角为 5° 时达到最大值 11.41% 和 2.16%。研究结果为油菜机械化播种同步深施肥作业和播种机施肥性能优化提供了参考。

关键词: 油菜播种机; 深施肥; 动态倾斜; 均匀性

中图分类号: S223.2⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0064-09

Experiment on Fertilizing Performance of Dynamic Tilt Condition of Seeder with Deep Fertilizer for Rapeseed

GAO Liping¹ CHEN Hui^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} ZHANG Qingsong¹ LI Yuebin¹ LIAO Yitao^{1,2}

(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: The existing combined precision seeder for rapeseed would tilt when it delivers fertilizer into seedbed simultaneously with rape seed, which is affected by the change of land slope and other factors, and it has persistent challenge that solving the problem fertilizer strip is concentrated cause uneven application of fertilizer and low fertilizer efficiency in the field, highlighting a need for investigating the unclear problem that change law of fertilizer amount in each strip under inclined state. In order to clarify the relationship between uniformity of fertilizer and inclined state, the fertilizer system combined precision seeder for rapeseed was taken as the research object, and the dynamic model of fertilizer particles under different inclined state was constructed, which was used to analyze the influence of inclined state on the flow characteristics of fertilizer. Firstly, the working condition of seeder in the field under the different tilted angle in the range of 1°~5° was simulated by test platform, and single factor experiment was carried out to investigate the influence of the different inclined states with apiece row consistency variability coefficient and the stability variability coefficient of the outer groove-wheel fertilizer. Furthermore, the mathematical model of the influence of the inclined state with the fertilization uniformity was established. The test results showed that the apiece row consistency variability coefficient and the stability variability coefficient of the fertilizer feed was 8.75% and 0.89% when the seeder was in the

收稿日期: 2020-08-06 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200901)、国家自然科学基金项目(32001427)、中国博士后科学基金项目(590320118)、国家油菜产业体系专项(CARS-12)和湖北省博士后科技活动项目(590320101)

作者简介: 高丽萍(1993—),女,博士生,主要从事油菜播种技术与装备研究,E-mail: gaoliping@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖宜涛(1982—),男,副教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

horizontal ideal state; while with the increase of the angle range of single swing or reciprocating swing in the operation direction, the apiece row consistency variability coefficient and stability variability coefficient of the fertilizer feed were gradually decreased, with the lowest value of 8.35% and 0.41%, which indicated that the swing along the operation direction had an enhancement effect on the fertilization uniformity of the fertilizer feed. However, with the increase of the angle range of single swing or reciprocating swing in the vertical operation direction, the apiece row consistency variability coefficient and stability variability coefficient of the fertilizer feed were gradually increased, and the maximum values reached 11.41% and 2.16% when the inclination angle was 5°. This study provided a reference for field production and fertilization performance optimization of rape synchronous deep fertilization seeder.

Key words: rapeseed seeder; deep fertilizer; dynamic tilt; uniformity

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,且兼具饲料、绿肥、菜薹食用、优质花蜜和观光等多种用途^[1-2]。油菜是一种肥料依赖型作物,施肥可促进油菜植株和根系的生长,保证粮油高产稳产^[3-4]。深施肥技术应用于油菜精量联合直播技术中,能有效降低肥料因挥发或地表径流而造成的损失,提高肥料利用率^[5-6],机械化深施肥时,肥料成条带状集中分布^[7-9],要求各行施肥量保持均匀一致,以保证各行油菜生长期肥料吸收量的一致。

播种机实际作业时,地表局部不平、整体坡度、作业受力不均匀等因素均会导致机具发生前后俯仰、左右摆动和振动,处于动态运动工况,影响作业性能^[10-11]。研究表明气送式宽幅精量免耕播种机上气送式集排器在水平地表工作时其供种和排种环节呈现平稳随机过程,地表倾斜角的增加破坏了气送式集排器排种过程的随机平稳过程,影响排种均匀性和各行排量一致性^[12];地表局部不平度产生激励的振动虽会使气吸式排种器充种室中的种群产生“沸腾”现象提高吸种成功率,降低漏吸概率;同时影响种子在分配器中的随机性,各行排种均匀性下降^[13-16]。

外槽轮式排种排肥器对种子及肥料颗粒适应性强,且结构简单、调节方便,已成为标准件得到广泛应用,特别是作为排肥器用于各类具有施肥功能的播种机上。但受各凹槽依次取肥的结构影响,外槽轮排种排肥器工作中存在脉动现象,影响排肥性能^[17]。顿国强等^[18]利用 EDEM 探究不同结构外槽轮排肥器对排肥流量的影响;赵学观等^[19]在普通外槽轮排肥器基础上采用柔性叶轮,提高了排肥器对带动层肥流量的控制,提高排肥均匀性;顿国强等^[20]通过对外槽轮排肥舌倒角结构的优化,得出排肥舌倒角弧长与单个凹槽弧长比为 0.85 时,外槽轮排肥质量波动最小。以上研究主要分析外槽轮结构对排肥均匀性的影响,但对田间动态倾斜状态下的

影响缺乏研究。

本文针对油菜播种机同步深施肥作业中肥带集中,机具受地表坡度变化等因素作用发生动态倾斜时,各条带施肥量变化规律不明确的问题,开展播种机沿作业方向前后、左右动态倾斜对排肥性能影响的试验,探究倾斜状态对外槽轮式排肥器排肥性能的影响规律,为油菜精量联合播种机结构优化提供参考。

1 深施肥播种机工作原理

油菜深施肥播种机结构如图 1 所示,主要由主机架、传动系统、开畦沟系统、旋耕部件、排肥系统、深施肥部件、排种系统、开种沟装置等组成^[8]。

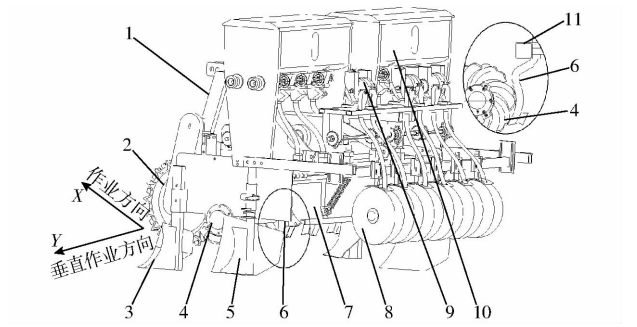


图 1 油菜深施肥播种机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of rapeseed seeder with deep fertilizer

1. 主机架
2. 仿形驱动地轮
3. 开畦沟前犁
4. 旋耕部件
5. 开畦沟后犁
6. 包络式施肥铲
7. 平土板
8. 双圆盘开沟器
9. 排种系统
10. 排肥系统
11. 机架后梁

工作时,播种机在拖拉机牵引下前进,仿形驱动地轮通过链传动带动排种排肥系统工作,播施种子肥料;安装于主机架后梁的施肥铲整体包络旋耕刀片运动轨迹,与施肥铲相互配合作业。旋耕机构依靠中央齿轮驱动刀轴转动,由上至下切削厢面土壤与地表残茬,实现两者细碎混合的同时可对施肥铲体上的黏附物进行主动刮削、抛撒;施肥铲阻隔碎土,并通过包络式腔体引导肥料均匀投放至肥沟,通过旋耕对土壤的抛撒作用实现

肥料覆盖深埋,随后平土板对种床进行平整,利于肥料与土壤的充分接触,且形成适宜油菜播种的种床厢面。

排肥器选用标准外槽轮排肥器,6个凹槽,最大工作长度为60 mm、槽轮直径70 mm,其对肥料颗粒适应性强、工作可靠^[21]。深施肥铲安装于主机架后梁和平土板之间,铲体阻隔碎土,通过包络式腔体引导肥料颗粒投放至肥沟,且铲体包络旋耕刀片运动轨迹,利用旋耕刀刮削黏附在铲体上的秸秆土壤混合物,避免堵塞排肥口影响施肥均匀性,以满足行间带状施肥时肥带宽度在3~5 cm。而播种机在田间作业下各行施肥量由排肥器控制,排肥器在机具动态倾斜时受到肥料颗粒流动性和充肥效果的影响,造成各行施肥量不均匀,因此需要对播种机不同倾斜状态下(沿作业方向和沿垂直作业方向,分别对应图1中X、Y轴)的肥料流动过程和变化规律进行分析和试验研究。

2 排肥器排肥特性及倾斜状态受力分析

2.1 外槽轮排肥器排肥特性

外槽轮排肥器主要由排肥盒、外槽轮、阻塞套、梅花挡圈、排肥舌、排肥管口组成,如图2所示。

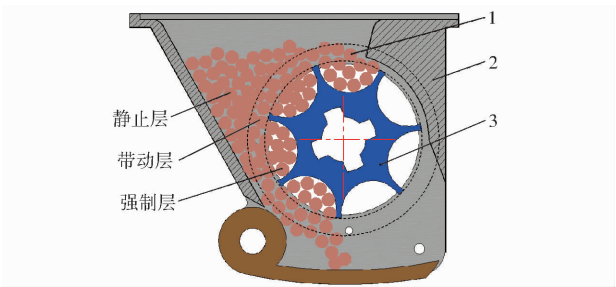


图2 外槽轮排肥器

Fig.2 Fertilizer discharging characteristics of outer grooved wheel

1. 肥料颗粒 2. 排肥盒 3. 外槽轮

肥料颗粒由于重力作用,由肥箱底部排肥孔进入外槽轮排肥器内,外槽轮由排肥轴驱动旋转,肥料颗粒依靠自身重力填充入外槽轮凹槽内随槽轮转动,在外槽轮强制作用下由排肥舌上部边缘滑落从排肥口排出。因充入凹槽内的肥料颗粒随槽轮的转动强制流动,处于槽轮边缘的肥料颗粒与槽齿间存在内摩擦作用力而随之旋转,断面空间的肥料颗粒运动速度沿槽轮半径方向由内向外逐渐减小为零,因而肥料颗粒流动空间由内向外依次分为强制层、带动层、静止层3部分^[22]。由外槽轮排肥器的工作过程可知,槽轮每转的排肥量 q_0 由外槽轮强制层排量 q_1 和带动层排量 q_2 组成^[23],即

$$q_0 = q_1 + q_2 \tag{1}$$

其中
$$\begin{cases} q_1 = \varphi M l \lambda f_z = \pi d l \lambda \left(\frac{f_z \varphi}{t} + \tau \right) \\ q_2 = \pi d l \tau \lambda \\ f_z = \frac{r^2}{2} (\pi - \psi - \sin(\pi - \psi)) + \\ \frac{d^2}{8} (\alpha' - \sin \alpha') + \frac{b^2 - 4 r \cos^2 \frac{\psi}{2}}{4 \tan \frac{\psi}{2}} \\ \alpha' = 2 \arcsin \frac{b}{d} = \psi - 2 \arcsin \left(\frac{2y}{d} \sin \frac{\psi}{2} \right) \\ \varepsilon = \tau + f_z \psi / t \\ t = \frac{\pi d}{M} \end{cases} \tag{2}$$

式中 φ ——凹槽充满系数
 M ——槽数,个
 l ——槽轮有效工作长度,mm
 λ ——肥料颗粒容重,g/cm³
 d ——外槽轮外径,mm
 τ ——带动层特性系数,与带动层厚度 C_0 有关,即 $\tau = f(C_0)$
 f_z ——槽轮截面积
 ε ——综合系数

由式(2)可知,外槽轮排肥器排肥量与排肥槽工作长度、排肥轴转速、肥料颗粒容重、凹槽充满系数、带动层厚度等参数有关。当播种机前后动态俯仰或左右动态摆动时,随肥箱内肥料颗粒的移动,会对肥箱底部下压力和外槽轮带动层内肥料颗粒的位置产生影响,进而影响排肥器的充肥过程连续性以及排肥过程均匀性和稳定性。

2.2 倾斜状态肥料颗粒受力分析

2.2.1 肥箱内肥料颗粒流动过程分析

肥料颗粒为散粒体,播种机动态倾斜时,肥料处于流动状态,肥料颗粒流动过程与肥料颗粒物理机械特性有关外,还与其他物体的相互作用以及在力作用下产生的运动有关。排肥器工作时,即将填入排肥盒的肥料颗粒属于部分滑动流^[23],填充肥料颗粒因自身体止角和摩擦角而在肥箱中产生的倒锥形空穴,对排肥器的充肥过程连续性和排肥过程均匀性、稳定性产生较大影响。提高肥料颗粒的流动性是提高排肥器排肥性能的重要手段之一^[24],而外部倾斜摇晃会驱动肥料发生滑动,直接影响充肥过程连续性,因而对肥料颗粒在肥箱流至排肥器的运动状态进行动力学分析。

当播种机在沿作业方向(X轴)前后动态俯仰状态下工作时,其运动状态可用简谐振动公式^[25-26]表示,在肥箱内建立平面直角坐标系 xOz ,如图3所

示。图中 F 为肥料间摩擦力, N ; G 为肥料颗粒重力, N ; S 为种子加速度, m/s^2 ; N 为肥料颗粒所受支持力, N ; θ 为加速度方向角, $(^\circ)$; β 为机具倾斜角, $(^\circ)$ 。

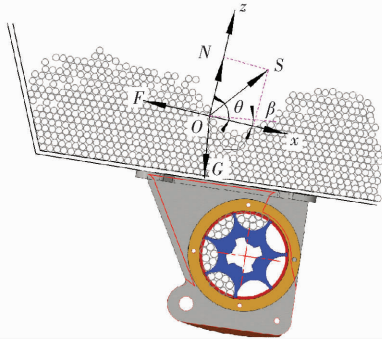


图 3 肥料颗粒在肥箱内受力情况

Fig. 3 Stress diagram of fertilizer particles in fertilizer box

x 轴正向为肥料颗粒滑动方向, z 轴垂直于滑动方向, 则肥料颗粒滑动位移为

$$L = T \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中 L ——肥料颗粒位移, mm

T ——振幅, mm

ω ——振动角速度, rad/s

t ——运动时间, s

根据肥料颗粒在肥箱内的运动分析, 得到肥料颗粒在肥箱内发生滑动条件为

$$\frac{T(2\pi f_T)^2}{g} \sin(\omega t) > \frac{\cos\beta}{\sin\theta} \quad (4)$$

式中 f_T ——播种机外部激励振频, Hz

g ——重力加速度, m/s^2

由式(4)可知, 播种机在沿作业方向(X 轴)倾斜的地表工作时, 在其他作业工况相同的情况下, 机具倾斜角越大, 越易促使肥料颗粒在肥箱内发生滑动, 提高肥料颗粒间的流动性, 特别是机具作业时瞬时前后俯仰、动态运动, 会使肥料颗粒保持流动状态, 提高肥料填充的连续性^[14-15]。当播种机沿垂直作业方向(Y 轴)左右往复动态摆动时, 肥箱内肥料颗粒的流动情况与沿作业方向前后动态俯仰时类似, 都会增加肥料的流动性。

2.2.2 沿作业方向前后动态俯仰排肥过程受力分析

由外槽轮排肥器工作原理可知, 外槽轮转动时除凹槽中充满肥料外, 由于肥料颗粒间的摩擦会带动槽轮外部一圈肥料颗粒随之运动, 从而形成带动层。带动层可以看作以槽轮轴线为轴心的一层层流动环, 其运动速度由里向外逐渐减小^[27]。在充肥过程中, 带动层肥料颗粒若处于三角区(以 OO_1 为半径, 过点 O 的圆柱面在垂直于槽轮轴心线的平面上形成的区域)不被槽轮带下, 易形成楔角, 对肥料颗粒造成挤压出现结块等现象, 进而影响排肥稳定性。

为分析带动层肥料颗粒流动性, 建立空间力系如图 4a 所示。 O 为排肥盒弧面与肥料流斜面上任意一处交点, O_1 为外槽轮轴心; P 为槽轮对肥料颗粒拨动力; P_n 和 P_t 分别为拨动力 P 垂直方向和水平方向分力; P'_n 为 P_n 反力; P'_{nn} 和 P'_{nt} 分别为 P'_n 沿 OO_1 水平和垂直方向分力; F_{pn} 、 F_{pt} 分别为 P_n 、 P'_n 形成的摩擦阻力; F_N 为凹槽壁对肥料颗粒支持力; F_c 为肥料颗粒惯性离心力; F_f 为肥料颗粒间摩擦力; n 为排肥轮角速度; μ 为 y 轴与肥料颗粒所在位置夹角; α 为排肥盒弧面与平行于槽轮轴线铅垂面夹角, 称为进料口倾角, 由排肥盒斜面与槽轮安装位置决定。

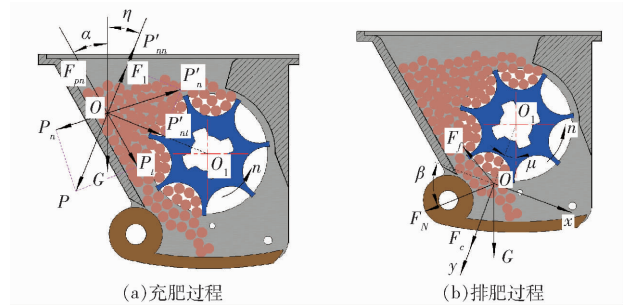


图 4 肥料颗粒在排肥器内受力情况
Fig. 4 Force condition of fertilizer particles in fertilizer exhauster

因肥料颗粒间内摩擦力、附着力等作用, 作用在肥料颗粒的重力 G 影响较小, 因而将其忽略不计。为满足排肥器排量稳定性要求, 进料口倾角 α 需满足

$$F_1 + P'_{nn} < P \quad (5)$$

$$P \sin^2 \gamma + P \sin \gamma \cos \gamma \tan \varphi_1 < P \quad (6)$$

$$\gamma = \alpha + \eta \quad (7)$$

$$\tan \gamma \tan \varphi_1 < 1 \quad (8)$$

$$\tan \varphi_1 = \tan(90^\circ - \alpha - \eta) \quad (9)$$

$$\alpha < 90^\circ - \varphi_1 - \eta \quad (10)$$

式中 φ_1 为肥料颗粒内摩擦角, 夹角 η 与带动层厚度 C_0 有关, 且其与带动层厚度呈正相关线性关系^[25]。由式(8)分析可知, 当机具沿作业方向(X 轴)受动态倾斜影响, 肥箱内肥料颗粒的流动会影响排肥器中带动层内肥料颗粒的运动, 机具倾斜角越大肥箱内肥料颗粒越易发生滑动, 排肥器带动层内肥料颗粒数量增加带动层厚度越大, 致使进料口倾角有一定程度的减小, 进而使排肥更加均匀准确^[24-25]。

肥料颗粒在排肥过程中的受力分析如图 4b 所示, 当处于临界投肥状态时平衡方程为

$$\begin{cases} G \sin \mu + F_f \cos \beta - F_N \sin \beta = F_c \\ G \cos \mu - F_N \cos \beta - F_f \sin \beta = 0 \\ F_f = \mu_1 F_N \\ F_c = m n^2 r \end{cases} \quad (9)$$

得
$$n = \sqrt{\frac{\sin(\mu - \beta) + \mu_1 \cos(\mu - \beta)}{r(\cos\beta + \mu_1 \sin\beta)}} g \quad (10)$$

式中 μ_1 ——肥料颗粒与凹槽间摩擦因数
 m ——肥料颗粒质量, g

由式(10)可得,在相同转速下,肥料颗粒投肥位置角 μ 随机具动态倾斜角 β 增加而增加,说明适当增加机具沿作业方向(X 轴)前后动态俯仰的倾斜角 β 可使投肥位置提前,避免肥料颗粒堵塞排肥轮凹槽。

2.2.3 左右往复动态摆动排肥过程受力分析

当机具沿垂直作业方向(Y 轴)左右往复动态摆动时,肥料颗粒在凹槽内会向倾斜方向滑动,并对该侧槽轮挡圈产生挤压力^[28]。为分析倾斜角与侧向挤压力之间的关系,建立空间力系 xQy 如图 5 所示。

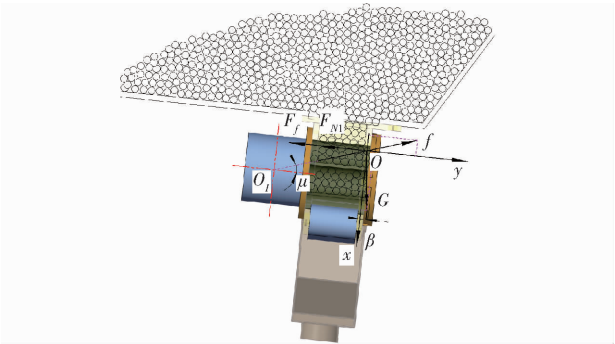


图 5 肥料颗粒在凹槽内受力情况

Fig. 5 Force condition of fertilizer particles in groove

根据肥料颗粒的受力分析和达朗贝尔原理,建立受力平衡方程

$$\begin{cases} F_{N1} + f \cos \mu + G \sin \beta = F_f \\ G \cos \beta = f \sin \mu \\ F_f = \mu_1 F_{N1} \\ G = mg \end{cases} \quad (11)$$

得
$$F_{N1} = \frac{\cos(\mu - \beta)}{\mu_1 \sin \mu} \quad (12)$$

式中 F_{N1} ——倾斜状态肥料颗粒对槽轮挡圈的反向挤压力

f ——槽轮转动对肥料颗粒拨动阻力

由式(12)可知,当机具倾斜角 β 增大时,肥料颗粒向一边倾斜易受挤压粘结在外槽轮凹槽内,进而堵塞槽轮影响排肥均匀性和稳定性。

综合上述肥料颗粒在肥箱和排肥器内的倾斜状态的受力分析可知,不同方向的倾斜和倾斜角会对排肥性能产生影响。沿作业方向(X 轴)前后动态俯仰有利于排肥器充肥过程的连续性且会促使排肥过程中投肥位置提前,避免肥料滞留在槽轮三角区内,形成楔角;沿垂直作业方向(Y 轴)左右往复动态摆动会增大肥料颗粒对槽轮内壁的挤压力,造成肥

料颗粒易黏附在凹槽内,导致排肥器排量不均匀稳定。为验证理论分析是否符合实际,通过试验确定不同倾斜工况下各行排肥器排肥量之间的差异,探究倾斜角对排肥性能的影响规律。

3 动态倾斜排肥性能试验

3.1 试验材料与方法

为明确播种机动态倾斜工况下的排肥性能变化情况,在华中农业大学农业农村部油菜全程机械化科研基地开展不同倾斜工况对油菜播种机施肥性能影响试验。试验设备为智能种植机测试平台,该平台可模拟播种机在地表的工作状态,实现播种机沿作业方向前后、左右动态倾斜 $-5^\circ \sim 5^\circ$,测试平台及试验装置如图 6 所示。



图 6 测试平台与试验装置

Fig. 6 Seeder test platform

1. 深施肥播种机 2. 调速器 3. 测试平台机头 4. 测试平台

根据排肥器结构和散粒体“粮仓效应”可知^[29],当肥箱内肥料高度达 120 mm 后,肥箱底部充肥压力不随肥料量的变化而变化;且当播种机沿垂直作业方向(Y 轴)左右往复动态摆动角最大值为 5° 时,为保证肥箱底部始终有肥料颗粒,计算得肥料群高度临界值为 71 mm。试验用播种机肥箱高度为 220 mm,因此试验时为避免排肥器内无肥料颗粒充入,肥箱内肥料颗粒不小于肥箱容积 $1/2$,以保证肥料颗粒充足。两个肥箱对称安装于播种机左右两侧,且两侧肥箱各配置 3 个排肥器。播种机动态倾斜对两侧肥箱影响一致,因此以左侧肥箱为对象,从左向右将 3 个排肥器分别编号为 1、2、3 号以便于试验统计。试验所用肥料颗粒为适宜油菜直播深施的“宜施壮”油菜专用缓释肥。

试验包括水平状态理想工况排肥试验和动态倾斜状态工况排肥试验,其中水平理想工况试验确定排肥器在转速 20 ~ 50 r/min、工作长度在 35 ~ 55 mm 时较优的排肥轴转速和槽轮工作长度。倾斜试验中整机沿作业方向(X 轴)向前或向后单向摆动、前后动态俯仰及沿垂直作业方向(Y 轴)向左或向右单向摆动、左右往复动态摆动时,设置试验水平为 $1^\circ \sim 5^\circ$,每间隔 1° 为一个水平,设定排肥轴转速和有效工作长度

为水平理想工况试验中确定的较优转速和长度。

试验时用塑料盒收集 3 个排肥器 60 s 内各排肥口的排肥质量,试验重复 3 次且每次试验结束后,对外槽轮排肥器进行清理,以减少每次试验误差。试验按照 JB/T 9783—2013《播种机 外槽轮排种器》进行排肥器排肥性能测定,试验结果取 3 次重复的平均值,试验指标计算式为

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{ij} \\ s_j = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \\ \delta = \frac{1}{n_0} \sum_{j=1}^{n_0} \frac{s_j}{\bar{x}_j} \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n_0} \sum_{j=1}^{n_0} \sum_{i=1}^k x_{ij} \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{n_0-1} \sum_{j=1}^{n_0} \left(\sum_{i=1}^k x_{ij} - \bar{x} \right)^2} \\ K_z = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases} \quad (14)$$

式中 x_{ij} ——第 j 次第 i 行的外槽轮排肥量, g/min
 k ——外槽轮排肥器个数, 6 个
 $\bar{x}_j$ ——第 j 次单行排肥量均值, g/min
 s_j ——第 j 次试验排肥量标准差, g/min
 δ ——各行排量一致性变异系数, %
 $\bar{x}$ ——单次的排肥量平均值, g/min
 σ ——单次的排肥量标准差, g/min
 K_z ——总排量稳定性变异系数, %
 n_0 ——试验次数, 本试验重复 3 次

3.2 试验结果与分析

3.2.1 水平状态理想工况排肥试验

当播种机处于水平状态理想工况时,排肥器的排肥稳定性试验结果如图 7 所示。试验结果表明,排肥轴转速为 25 r/min 时各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数最小,分别为 8.75% 和 0.89%,其均满足行业标准 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》;且 3 次重复试验单个排肥器稳定性变异系数也最低,为 1.1%。因此倾斜试验中将排肥轴转速固定为 25 r/min。

根据研究可知,外槽轮排肥槽工作长度应大于肥料颗粒直径的 1.5~2 倍^[30],避免肥料颗粒充肥过程中受阻,采用的油菜专用缓释肥其三轴尺寸平均值为 4.27 mm×3.70 mm×3.25 mm,其等效直径为 3.71 mm,因此槽轮最小工作长度为 7 mm;且槽轮工作长度大于 30 mm 时排肥器工作较为稳定,其排肥量增长呈线性趋势^[19,31]。因此在排肥轴转速

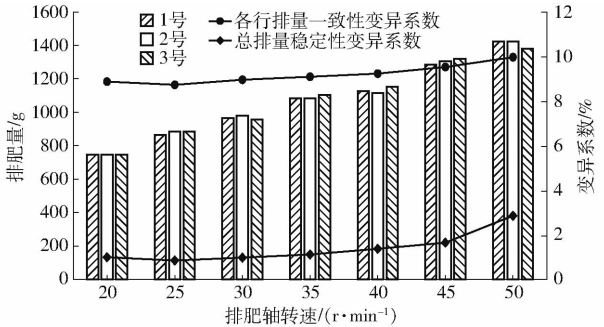


图 7 转速与排肥稳定性变化规律

Fig.7 Variation law of rotation speed and fertilizer discharge stability

为 25 r/min、槽轮工作长度取值范围 35~55 mm,每隔 10 mm 为一个水平开展单因素试验。试验结果表明,在槽轮工作长度为 45 mm 时单个排肥器稳定性变异系数最小,为 0.73%。因此倾斜试验中外槽轮工作长度固定为 45 mm。

3.2.2 单向动态倾斜排肥性能分析

图 8 为播种机沿作业方向(X 轴)或垂直作业方向(Y 轴)单向摆动时的各行排量一致性和总排量稳定性变异系数的变化规律。前期测定当机具处于水平理想工况,排肥轴转速为 25 r/min,外槽轮工作长度 45 mm 时,排肥器各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数为 8.75% 和 0.89%。由图 8 可知,在排肥轴转速和槽轮工作长度与水平理想工况试验条件相同时,当播种机随作业方向(X 轴)单向动态摆动倾斜角的逐渐增大,各行排量一致性和总排量稳定性变异系数逐渐减小,最低可达 8.35% 和 0.41%,排肥性能指标相较于水平理想工况分别降低了 4.57% 和 53.93%;而当播种机在沿垂直作业方向(Y 轴)单向动态摆动倾斜角逐渐增大时,各行排量一致性和总排量稳定性变异系数也呈增大趋势,倾斜角为 5° 时达到最大值 11.41% 和 2.16%,排肥性能指标相较于水平理想工况增加了 30.4% 和 142.70%,表明沿播种机作业方向的动态倾斜颠簸对排肥稳定性具有增益效应。

3.2.3 前后动态俯仰的排肥性能分析

图 9 为播种机沿作业方向(X 轴)前后动态俯仰不同角度时的各行排量一致性和总排量稳定性变异系数的变化规律。由图可知,随着倾斜角的增大,排肥器各行排量一致性和总排量稳定性变异系数逐渐减小。该现象的产生是因当机具沿作业方向(X 轴)前后动态俯仰时,肥箱内肥料颗粒受到外部作用力影响流动性增加,填充了排肥器上端由于肥料颗粒下落形成的倒锥形空穴,进而填补排肥器带动层的肥料颗粒数量;且机具动态俯仰角度增大避免肥料颗粒堵塞在外槽轮凹槽内,提高了排肥器每圈

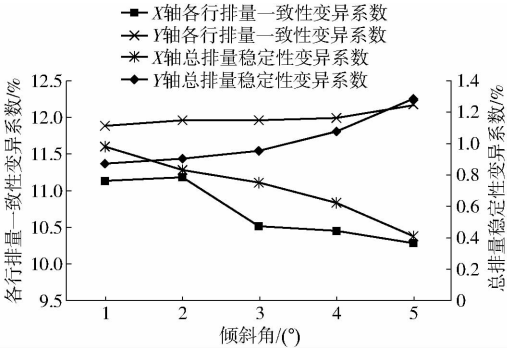


图 8 播种机单向倾斜角与变异系数的关系
Fig. 8 Relationship between one way swing angle and coefficient of variation of planter

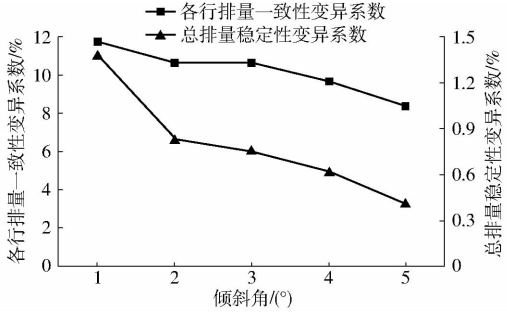


图 9 X 轴前后动态俯仰时变异系数变化曲线
Fig. 9 Variation curves of variation coefficient of X-axis in reciprocating dynamic swing

排出的肥量均匀性。通过 Origin 对试验结果进行回归拟合,得到沿作业方向(X 轴)前后动态俯仰时倾斜角与排肥器各行排量一致性和总排量稳定性之间的数学模型为

$$y_1 = -0.1x^2 - 0.182x + 11.852 \quad (R^2 = 0.951) \quad (15)$$

$$y_2 = 0.045x^2 - 0.485x + 1.758 \quad (R^2 = 0.936) \quad (16)$$

式中 y_1 ——各行排量一致性变异系数, %
 y_2 ——总排量稳定性变异系数, %
 x ——动态倾斜角, (°)

3.2.4 左右往复动态摆动排肥性能分析

图 10 为播种机沿垂直作业方向(Y 轴)左右往复动态摆动不同倾斜角时的各行排量一致性和总排量稳定性变异系数的变化规律。

由图 10 可知,随着动态倾斜角的增大,排肥器各行排量一致性和总排量稳定性变异系数逐渐增大。原因在于因肥箱长度较长当机具沿垂直作业方向(Y 轴)左右往复动态摆动时,肥料颗粒会流向机具倾斜方向较低的一侧,致使较高侧排肥口处肥料颗粒群高度减小,导致肥箱底部肥料群压力减小,肥料颗粒不能均匀落入外槽轮凹槽内;且倾斜角越大,槽轮内的肥料颗粒越易受挤压粘结在凹槽内,造成排肥器堵塞,其于受力分析结果一致。对试验结果

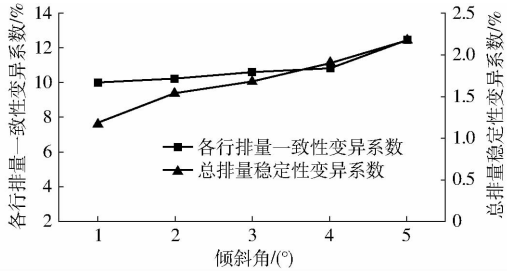


图 10 Y 轴左右往复动态摆动时变异系数变化曲线
Fig. 10 Variation curves of coefficient of variation of Y-axis in reciprocating dynamic swing

进行回归拟合,得到沿垂直作业方向(Y 轴)左右往复动态摆动时倾斜角与排肥器各行排量一致性和总排量稳定性之间的数学模型为

$$y_1 = 0.053x^2 + 0.027x + 9.92 \quad (R^2 = 0.988) \quad (17)$$

$$y_2 = -0.011x^2 + 0.299x + 0.912 \quad (R^2 = 0.985) \quad (18)$$

通过以上试验,发现不同倾斜工况对外槽轮排肥器的影响与受力分析结果一致,可有效指导实际生产实践,提高播种机在实际作业工况下的施肥性能,保证机械直播中深施肥作业的质量。

4 结论

(1)通过对排肥系统倾斜状态下肥料颗粒受力分析可知:当播种机沿作业方向(X 轴)前后动态摆动时会促使排肥器排肥过程中投肥位置提前,避免肥料颗粒堵塞在槽轮内,提高排肥均匀性;而沿垂直作业方向(Y 轴)左右动态摆动会增大槽轮内肥料颗粒对槽轮内壁的挤压力,导致肥料颗粒易黏附在凹槽内,降低排肥过程中排量的均匀性和稳定性。

(2)利用种植机械智能测试平台模拟播种机在不同动态倾斜工况下的作业性能,当播种机处于水平状态理想工况时,排肥器各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数为 8.75% 和 0.89%;由于排肥量较大,总排量稳定性变异系数较低,总排肥量较为稳定;但受肥料颗粒尺寸影响,排肥器各行排量一致性较差,用于深施肥播种时还需要进一步改进其结构。

(3)播种机随作业方向(X 轴)单向摆动或前后往复俯仰角度的增大,排肥器各行排量一致性和总排量稳定性变异系数逐渐减小,最低可达 8.35% 和 0.41%,相较于水平状态理想工况,各行排量一致性变异系数变化不大,但总排量稳定性变异系数降低了 53.93%,排肥性能有所提升;而播种机沿垂直作业方向(Y 轴)左右摆动角达到 5°时,排肥器各行排量一致性和总排量稳定性变异系数分别为 11.41%

和 2.16%，分别增加了 30.4% 和 142.70%，排肥性能有所下降。结果表明深施肥播种机在作业时，沿机具作业方向（X 轴）前后动态俯仰对排肥性能影响较小，垂直作业方向（Y 轴）左右倾斜摆动对排肥器排肥性能影响较大，在深施肥播种机田间挂接调整、使用时应重点关注。

参 考 文 献

[1] 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 Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, 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)

[2] 王汉中. 中国油菜品种改良的中长期发展战略[J]. 中国油料作物学报,2004,26(2):99-102.

[3] 鲁剑巍,任涛,丛日环,等. 我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):712-720.
LU Jianwei, REN Tao, CONG Rihuan, et al. Prospects of research on fertilization status and technology of rapeseed in China [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 712-720. (in Chinese)

[4] 方娅婷,李会枝,廖世鹏,等. 氮肥和磷肥用量对油菜开花性状的影响[J]. 中国油料作物学报,2019,41(2):199-204.
FANG Yating, LI Huizhi, LIAO Shipeng, et al. Effects of nitrogen and phosphorus application rate on flowering characteristics of oilseed rape[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(2): 199-204. (in Chinese)

[5] 谷晓博,李援农,黄鹏,等. 种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(10):113-123.
GU Xiaobo, LI Yuannong, HUANG Peng, et al. Effects of planting patterns and nitrogen application rates on yield, water and nitrogen use efficiencies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10):113-123. (in Chinese)

[6] 张智,丛日环,鲁剑巍. 中国冬油菜产业氮肥减施增效潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6):1494-1504.
ZHANG Zhi, CONG Rihuan, LU Jianwei. Potential analysis on winter oilseed rape production under reducing nitrogen input and increasing its efficiency in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(6): 1494-1504. (in Chinese)

[7] 肖文立,肖文芳,廖宜涛,等. 油菜直播机犁式正位深施肥装置设计与性能试验[J]. 华中农业大学学报,2018,37(4):131-137.
XIAO Wenli, XIAO Wenfang, LIAO Yitao, et al. Design and performance test of plough-type positive deep fertilization device for rapeseed direct planter[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(4):131-137. (in Chinese)

[8] 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/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):65-75.
LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):65-75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002008&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.008. (in Chinese)

[9] 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构设计及试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):163-169.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):163-169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)

[10] ANAATCHAR M, PRASANNA G V K, GURUSWAMY T. Neural network prediction of performance parameters an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010(72):87-98.

[11] JIN Minfeng, DING Yongqian, YU Hongfeng, et al. Optimal structure design and performance tests of seed metering device with fluted rollers for precision wheat seeding machine[J]. IFAC PapersOnLine, 2018, 51(17):509-514.

[12] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 地表坡度对油菜宽幅精量免耕播种机排种性能的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(7):11-21.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Effects of land slope on seeding performance of a broad width precision no-tillage planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7):11-21. (in Chinese)

[13] 张晓冬,李成华,李建桥,等. 铲式玉米精密播种机振动特性模型建立与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):88-93.
ZHANG Xiaodong, LI Chenghua, LI Jianqiao, et al. Mathematic vibration model of spade punch planter of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):88-93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.015. (in Chinese)

[14] 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 Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, 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)

[15] 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 Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, 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)
- [16] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Comparative energy study of the air-stream loading systems of air-seeders[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2018, 11(1):30–37.
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[K]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [18] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等. 双齿轮式排肥器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):87–96.
DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):87–96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200310&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.010. (in Chinese)
- [19] 赵学观,何亚凯,王松林,等. 双变量排肥系统充肥性能分析与试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(6):104–110.
ZHAO Xueguan, HE Yakai, WANG Songlin, et al. Fertilizer filling performance analysis and experimental study of bivariate fertilizer drainage system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6):104–110. (in Chinese)
- [20] 顿国强,叶金,夏雯桢,等. 基于 EDEM 的反转啮合齿轮式排肥器的仿真设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2019,50(2):231–237.
DUN Guoqiang, YE Jin, XIA Wenzhen, et al. Simulation design and test of reverse rotation meshing gear fertilizer apparatus based on EDEM[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(2):231–237. (in Chinese)
- [21] 顿国强,于春玲,杨永振,等. 外槽轮排肥器排肥离散元仿真及排肥舌参数优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(6):661–665.
DUN Guoqiang, YU Chunling, YANG Yongzhen, et al. Discharging characteristic test of outer-groove wheel fertilizer and parameter optimization of fertilizer tongue by discrete element simulation[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(6):661–665. (in Chinese)
- [22] 吴苗苗. 水稻侧深施肥机的设计[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.
- [23] 潘世强,赵亚祥,金亮,等. 2BFJ-6 型变量施肥机外槽轮式排肥器的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(1):40–42.
PAN Shiqiang, ZHAO Yaxiang, JIN Liang, et al. Design and experimental research of external grooved wheel fertilizer apparatus of 2BFJ-6 type variable rate fertilizer applicator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1):40–42. (in Chinese)
- [24] HADI K, HOSSEIN N, BAHRAM B, et al. Assessing an unfired-based seed drill monitoring system under field operating conitions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019(162):543–551.
- [25] 柳忠魁,刘延璋. 槽轮式排料装置的进料口倾角和带动层厚度[J]. 北京农业机械化学院学报,1983(3):43–51.
- [26] 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 Fangyuan, MA Xu, QI Long, 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)
- [27] 施印炎,陈满,汪小昆,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):97–103.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):97–103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012. (in Chinese)
- [28] 雷小龙,李蒙良,张黎骅,等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可定量供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(19):9–18
LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19):9–18. (in Chinese)
- [29] 王都,舒彩霞,廖宜涛,等. 集排离心式油菜精量排种器充种控制方法与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(6):182–189.
WANG Dou, SHU Caixia, LIAO Yitao, et al. Control method and test of seed-filling of centralized centrifugal precision seed-metering device[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(6):182–189. (in Chinese)
- [30] 张占胜. 搅浆平地机施肥装置的研究与设计[J]. 农机使用与维修,2012(4):66.
- [31] 汪博涛,白璐,丁尚鹏,等. 外槽轮排肥器关键工作参数对排肥量影响的仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(10):1–6,23.
WANG Botao, BAI Lu, DING Shangpeng, et al. Simulation and experimental study on impact of fluted-roller fertilizer key parameters on fertilizer[J]. Journal of Chinnese Agricultural Mechanization, 2017, 38(10):1–6,23. (in Chinese)