doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.009

基于颗粒肥料运动模型的排肥器优化与试验

刘晓东[1,2]　胡　瑞[1,2]　王登辉[1,2]　卢　邦[1,2]　王万超[1,2]　丁幼春[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: 针对螺旋锥体离心式排肥器排肥性能需提升、各参数对排肥性能影响规律不明确及相关理论和解析模型研究不深入的问题,建立了颗粒肥料在排肥器内的运动模型,通过理论分析确定了弧形锥体圆盘的母线方程及影响排肥器性能的主要结构参数和范围。采用 EDEM 离散元仿真软件,开展了以排肥器锥盘离送段水平倾角 δ、推板径向偏角 γ 及锥盘转速 n 为试验因素,以排肥量稳定性变异系数 C_{V1}、各排肥管道排出肥料的一致性变异系数 C_{V2} 及随机选取的某一路排肥管道的同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 作为响应指标的二次回归正交旋转组合试验,应用 Design-Expert 软件分析了各参数对排肥性能的影响规律,确定了排肥器最优结构参数为水平倾角 30.4°、推板径向偏角 3.2°、锥盘转速 130 r/min。为验证所优化排肥器的排肥性能,基于排肥器最优参数组合,开展排肥器在 100、110、120、130 r/min 的排量标定及性能验证试验,试验结果表明,排肥器行最大供肥速率为 1.6 kg/min,排肥量稳定性变异系数不大于 3.12%,各行排肥量一致性变异系数不大于 5.29%,同行排肥量一致性变异系数不大于 2.05%,各指标均满足施肥量要求。田间试验表明,排肥器排肥量稳定性变异系数不大于 4.57%、各行排肥量一致性变异系数不大于 6.98%、同行排肥量一致性变异系数不大于 3.56%,满足行业标准要求。该研究可为进一步提高排肥器性能及排肥器设计提供理论参考。

关键词: 排肥器; 油菜; 离心式; 集排器
中图分类号: S224.21　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0085-11　　**OSID**:

Optimization and Test of Fertilizer Apparatus Based on Granular Fertilizer Movement Model

LIU Xiaodong[1,2]　HU Rui[1,2]　WANG Denghui[1,2]　LU Bang[1,2]　WANG Wanchao[1,2]　DING Youchun[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: China's oilseed rape cultivation area is among the highest in the world, with about 6.2 million hectares planted year-round, and 85% concentrated in the Yangtze River Basin rice and oil rotation area, providing an important guarantee for the safety of China's edible oil supply. Precise and reasonable fertilization is an important way to reduce agricultural production costs, improve the quality and safety of agricultural products and reduce the pressure of environmental pollution. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council pointed out that supporting oilseed rape production in the Yangtze River Basin has presented new challenges and opportunities for chemical fertilizer reduction and precision application during oilseed rape production. On the basis of the spiral disturbance cone centrifugal fertilizer discharger designed in the previous stage, the problem of poor fertilizer discharge performance of the spiral cone centrifugal fertilizer discharger, unclear influence law of each parameter on fertilizer discharge performance and little research on related theories and analytical models was addressed. A model of the movement of granular fertilizer in the fertilizer discharger was established and the main structural parameters and ranges affecting the performance of the fertilizer discharger were determined through theoretical analysis. The EDEM discrete element simulation software was used to

收稿日期: 2021-08-01　修回日期: 2021-09-19
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600、2016YFD0200606)和湖北省重点研发计划项目(2020BAB097)
作者简介: 刘晓东(1991—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: 17863963882@163.com
通信作者: 丁幼春(1978—),男,教授,博士,主要从事油菜机械化生产智能化技术与装备研究,E-mail: kingbug163@163.com

carry out a quadratic regression orthogonal rotation combination test. In order to verify the performance of the optimized fertilizer discharger, a fertilizer discharge calibration and performance verification test was carried out based on the optimal combination of parameters of the fertilizer discharger. The test results showed that the variation coefficient of stability of fertilizer discharge volume and the variation coefficient of consistency of fertilizer discharge volume in each row was decreased, with the variation coefficient of stability of the fertilizer discharge volume was no more than 3.12% and the variation coefficient of the consistency of fertilizer discharge volume in each row was no more than 5.29%. The variation coefficient of consistency of fertilizer discharge volume was decreased with the increase of speed of fertilizer discharger, the difference between the rows was small, and variation coefficient of the consistency of fertilizer discharge volume of the rows was no more than 2.05%, indicating that the fertilizer discharger was stable and met the requirements of fertilizer discharge quality. There was an obvious linear relationship between the row fertilizer supply rate and the rotational speed of the fertilizer rower, which provided theoretical support for variable fertilizer application at a later stage. Field tests showed that the variation coefficient of the stability of fertilizer discharge volume was no more than 4.57%, the variation coefficient of the consistency of fertilizer discharge volume in each row was no more than 6.98% and the variation coefficient of the consistency of peer discharge volume was no more than 3.56%, meeting the requirements of the industry standard. The research result can provide a theoretical reference for improving the operational quality of fertilizer dischargers and design of fertilizer dischargers.

Key words: fertilizer apparatus; rapeseed; centrifugal; centralized metering device

0 引言

中国油菜种植面积居世界前列,常年种植面积约 660 hm^2,且 85% 集中在长江流域稻油轮作区,为我国食用油供给安全提供了重要保障[1]。精量合理施肥是降低农业生产成本、提高农产品质量安全水平、减轻环境污染压力的重要途径[2-3]。

施肥方式主要有以外槽轮排肥器为主的条施和以离心圆盘排肥器为主的撒施。外槽轮式排肥器是目前国内油菜播种采用的主要施肥装置,同时国内学者也对外槽轮排肥性能的影响机制展开了大量研究[4-8]。高丽萍等[9]构建了不同倾斜工况下的肥料颗粒在外槽轮排肥器内的动力学模型,分析了机具动态倾斜对肥料颗粒流动特性的影响,为油菜播种同步施肥性能优化提供了参考;施印炎等[10]建立了外槽轮式变量施肥机离散元模型,并对改进后的外槽轮排肥器进行了仿真分析,提高了排肥稳定性;何亚凯等[11]设计了一种气力输送式多行集排追肥机,排肥性能满足了作业标准要求;杨庆璐等[12]为提高肥料分配的稳定性,设计了一种基于外槽轮排肥器的气力集排式分层施肥调节装置;祝清震等[13]研究了槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响,为槽轮结构的优化提供了参考。

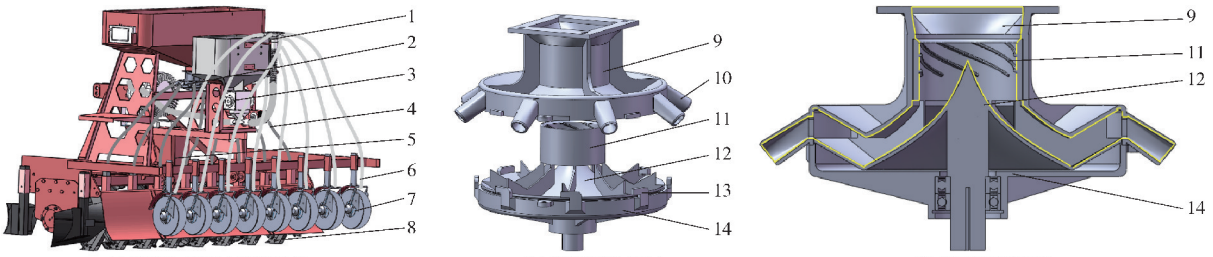
离心式排肥器由于其结构形式简单、作业幅宽大、撒肥均匀性好被广泛应用,国内外学者对撒肥装置和颗粒肥料在装置内的运动开展了大量研究[14-20]。吕金庆等[21-22]设计了一种锥盘式撒肥装置,通过理论分析和仿真试验确定了撒肥装置的最优参数,进一步提高了肥料抛撒均匀性;杨立伟等[23]采用三因素三水平和单因素试验分析了离心圆盘撒肥机排肥均匀性,为田间变量作业提供了基础。但目前基于离心式的集排多路排肥装置研究较少,离心撒肥均匀性的优势未能得到拓展应用,刘晓东等[24-25]设计了一种螺旋扰动防堵、锥体圆盘离送形式组合的集排式排肥器并取得了初步成效。为进一步提高排肥性能,本文基于颗粒肥料在排肥器内的运动模型,应用仿真软件对肥料颗粒运动过程进行离散元仿真分析,探究各参数对排肥性能的影响,优化参数并进行性能验证试验,以期为油菜播种施肥机械的研究设计提供理论参考。

1 总体结构与工作原理

螺旋扰动锥体离心式排肥器主要由上壳体、下壳体、弧形锥体圆盘等组成,安装在 2BYQ-8 型油菜直播机上,排肥器上壳体通过法兰盘与肥箱出肥口相连,上壳体与下壳体通过螺栓连接,弧形锥体圆盘与安装在下壳体上的轴承配合,同时为提高排肥器排量,将上壳体内出肥口设计为方形,增加出肥流量,图 1 中黄线构成的区域为颗粒肥料的流通区域。工作时,肥箱内的颗粒肥料通过肥箱落肥口进入排肥器,在螺旋扰动杯的卷携扰动和弧形锥体圆盘转动离送作用下,颗粒肥料从排肥管排出。排肥器结构如图 1 所示。

2 颗粒肥料运动分析及排肥器参数设计

肥料在排肥器内运动主要包括螺旋扰动杯



(a) 2BYQ-8型油菜直播机　(b) 排肥器分解图　(c) 排肥器剖视图

图 1　排肥器结构示意图

Fig. 1　Structural diagrams of fertilizer apparatus

1. 分配头　2. 排肥器　3. 排种器　4、6. 排肥管　5. 旋耕机组　7. 双圆盘开沟器　8. 施肥铲　9. 上壳体　10. 出肥管　11. 螺旋扰动杯　12. 弧形锥体圆盘　13. L 形锁扣　14. 下壳体

的卷携扰动、弧形锥体圆盘的均匀分配以及离送锥盘的离送等过程，其均肥和离送过程是影响排肥器排肥均匀性和稳定性的主要环节，为进一步提高排肥性能，各环节相关结构参数尚需优化改进。

2.1　颗粒肥料在弧形锥体圆盘上

颗粒肥料在排肥器内运动复杂，短时间内需要经过多个部件，其在弧形锥体圆盘上主要包含经过光滑的弧形锥体圆盘面所在螺旋扰动作用区的锥顶面、螺旋扰动杯和弧形锥体圆盘束口以及随布置的 8 个与径向呈一定夹角的离心推板约束下沿弧形锥体圆盘面的运动，其锥盘母线是影响各运动环节的主要因素。

颗粒肥料在螺旋扰动杯的卷携扰动及一直处于转动状态的弧形锥体圆盘锥顶的作用下均匀分散在锥顶四周，并进一步向排肥器边缘移动。颗粒肥料在向下运动过程中受力较为复杂，主要受到弧形锥体圆盘的支持力及摩擦力、上端肥料群的压力、侧边肥料群的阻力和下端肥料群的支持力等的相互作用，构成弧形锥体圆盘面的母线是影响肥料下移运动的主要因素，其弧面形状直接影响肥料下移速度及下移功耗。根据螺旋扰动弧形锥体圆盘结构形式，假设肥料为等粒度颗粒，则其以弧形锥盘轴线为圆心，位于相同半径处的颗粒肥料受到的力是相同的，将弧形锥体圆盘进行简化，选取位于弧形锥体圆盘面点 O 处的颗粒肥料作为研究对象，以点 O 处弧形锥体圆盘母线切线为 y 轴指向下方，以颗粒肥料受到的支持力方向为 x 轴，以颗粒肥料受到的垂直于 Oxy 面向右的摩擦力方向为 z 轴，其受力如图 2 所示。

为使颗粒肥料均匀分散在锥顶四周，即确保颗粒肥料沿弧形锥体圆盘均匀分肥的条件是在各力的合力作用下，沿锥体表面快速下滑，则根据受力分析建立颗粒肥料下移的受力方程为

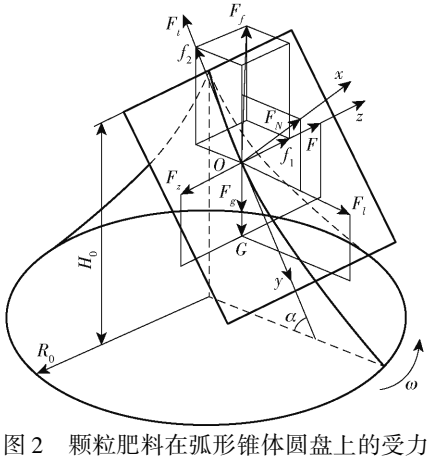


图 2　颗粒肥料在弧形锥体圆盘上的受力

Fig. 2　Structural diagram of fertilizer apparatus

$$\begin{cases} F_N - F_g\cos\alpha - G\cos\alpha + F_l\sin\alpha = 0 \\ F_g\sin\alpha + G\sin\alpha + F_l\cos\alpha - f_2 - F_t \geqslant 0 \\ F_N = F_g\cos\alpha + G\cos\alpha - F_l\sin\alpha \geqslant 0 \\ G = mg \\ F_l = m\omega^2 r \\ f_2 = \sqrt{f^2 - f_1^2} \\ F_f = \mu F_N \\ \alpha = \arctan\left(\dfrac{2H_0}{R_0}(r - R_0)\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中　F_N——弧形锥体圆盘对颗粒肥料支持力，N

G——颗粒肥料重力，N

F_g——颗粒肥料受到上端肥料群的压力，N

F_l——颗粒肥料受到的惯性离心力，N

f——颗粒肥料与弧形锥体圆盘之间的摩擦力，N

f_1——摩擦力在 x 轴上的分力，N

f_2——摩擦力在 y 轴上的分力，N

F_f——颗粒肥料受到锥盘的摩擦力，N

μ——动摩擦因数

F_t——颗粒肥料受到下端肥料群的支持力，N

m——颗粒肥料质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

ω——弧形锥体圆盘角速度,rad/s

r——颗粒肥料与弧形锥体圆盘轴线距离,mm

α——颗粒肥料在弧形锥体圆盘母线点 O 处的切线与水平面夹角,(°)

H_0——弧形锥体圆盘高度,mm

R_0——弧形锥体圆盘底圆半径,mm

根据式(1)可得

$$\sqrt{\frac{F_t-(F_g+G)\sin\alpha}{mr\cos\alpha}}\leqslant\omega\leqslant\sqrt{\frac{F_g+G}{mr\tan\alpha}} \tag{2}$$

由式(2)可知,当排肥器尺寸确定后,弧形锥体圆盘的转速对分肥均匀性具有影响,为获得低损、低耗及较好的分肥均匀性,需保证弧形锥体圆盘在低转速下完成稳定均匀排肥。

假设 α 为定值,则随颗粒肥料与弧形锥体圆盘轴线距离 r 的增加,弧形锥体圆盘角速度 ω 在较小时即可满足肥料的排出要求,但在颗粒肥料与弧形锥体圆盘轴线距离 r 较小时,需要较高的角速度才能满足肥料的排出要求;若 r 较小时,此时,若 α 较大时,弧形锥体圆盘转速较低时也能实现肥料排出,根据上述分析,所设计的弧形锥体圆盘母线从锥盘边缘处到锥顶处的切线与水平面的夹角需逐渐增加,且在无外力作用下,颗粒肥料从锥顶运动到锥盘边缘的时间越短越好,可保证颗粒肥料快速将肥室充满,形成稳定的颗粒流从排肥器排出,增加排肥器的稳定性。课题组前期设计的旋转抛物面形式的弧形锥体圆盘[24],其上颗粒肥料从顶端向下端的运动并不是最快的,而根据费马定理求解最速降线的原理可知,颗粒肥料从弧形锥体圆盘顶端向下端运动存在最速降线,所设计的弧形锥体圆盘母线可近似为最速降线,最速降线即摆线,颗粒肥料可以快速向下运动,其完全满足弧形锥体圆盘母线的设计要求,摆线方程为

$$\begin{cases}x=r(\theta-\sin\theta)\\ y=r(1-\cos\theta)\end{cases} \tag{3}$$

式中 θ——圆的半径所经过的角度,rad

在保证设计的弧形锥体圆盘锥顶位置和锥盘直径不变的情况,将 x 值和 y 值[24]代入式(3)得

$$\begin{cases}75=r(\theta-\sin\theta)\\ 80=r(1-\cos\theta)\end{cases} \tag{4}$$

利用 Matlab 软件解得弧形锥体圆盘的母线方程为

$$\begin{cases}x=47.8(\theta-\sin\theta)\\ y=47.8(1-\cos\theta)\end{cases} \tag{5}$$

通过初步仿真试验验证,优化后的弧形锥体圆盘较课题组前期设计的旋转抛物面形式的弧形锥体圆盘排肥效果均有所提升。

2.2 颗粒肥料在锥盘上

颗粒肥料在扰动杯卷携扰动及离心作用下经弧形锥体圆盘顺利进入各肥室后,在离送推板及离心力作用下经锥盘从排肥口排出,但颗粒肥料在锥盘离送过程中各因素对其运动的影响规律需进一步通过理论分析确定,为排肥器参数优化提供支撑。

为便于分析,忽略颗粒肥料之间的相互作用,则颗粒肥料在锥盘和离送推板上受力如图 3 所示,以锥盘和弧形锥体圆盘母线交点旋转构成的圆面圆心 O 为原点,构建空间直角坐标系 $Oxyz$ 和 $Ox'y'z'$,x 轴平行于推板从弧形锥体圆盘轴心指向外缘,y 轴于水平面内与 x 轴垂直,z 轴垂直于 Oxy 面指向弧形锥体圆盘顶端;x'轴平行于推板,与水平面呈 δ 角的锥盘离送段向外,z'轴垂直于 $Ox'y'$面指向弧形锥体圆盘上方。

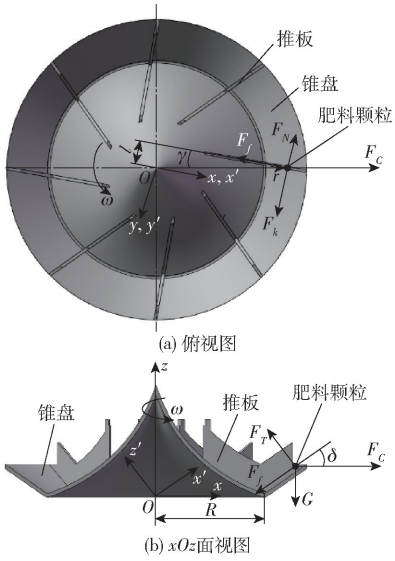


图 3 颗粒肥料在锥盘上的受力示意图

Fig. 3 Schematic of forces on cone disc for granular fertilizers

根据颗粒肥料在锥盘上的受力分析,建立颗粒肥料受力方程为

$$F_C\cos\delta\cos\gamma-F_f-G\sin\delta\cos\gamma=F \tag{6}$$

式中 F_C——颗粒肥料受到的离心力,N

F——颗粒肥料受到的合力,N

δ——锥盘离送段水平倾角,(°)

γ——推板径向偏角,(°)

颗粒肥料受到锥盘的摩擦力为颗粒肥料与锥盘之间的摩擦力和颗粒肥料与推板之间的摩擦力之和,则有

$$F_f=f_Z(G\cos\delta+F_C\sin\delta)+f_t(G\sin\delta\sin\gamma+F_k-F_C\sin\gamma) \tag{7}$$

式中 f_Z——颗粒肥料与锥盘之间的摩擦因数

f_t——颗粒肥料与推板之间的摩擦因数

F_k——颗粒肥料受到的科里奥利力，N

颗粒肥料受到的重力为

$$G = mg \tag{8}$$

颗粒肥料受到的离心力为

$$F_C = m\omega^2 r \tag{9}$$

颗粒肥料受到的科里奥利力为

$$F_k = 2m\omega\cos\delta\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

将式(7)～(10)代入式(6)有

$$\omega^2 r(\cos\delta\cos\gamma + f_t\sin\gamma - f_Z\sin\delta) - 2f_t\omega\cos\delta\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - g(\sin\delta\cos\gamma + f_Z\cos\delta + f_t\sin\delta\sin\gamma) = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} \tag{11}$$

式(11)中包含了坐标系 $Oxyz$ 和 $Ox'y'z'$ 中的变量，因此需将直角坐标系转换为柱坐标系表示式(11)，根据图 3 可得颗粒肥料在锥盘上位移 x 为

$$x = \frac{r}{\cos\delta\cos\gamma} \tag{12}$$

根据图 3a 结合式(12)有

$$x = \frac{r}{\cos\delta\sqrt{r^2 - l^2}} \tag{13}$$

式中　l——推板与圆心的垂直距离，mm

分别求 x 对时间 t 的一阶导数和二阶导数，则有

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}r}\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\cos\delta}\frac{r^3 - 2rl^2}{\sqrt{(r^2 - l^2)^3}}\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = A_1\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = \frac{1}{\cos\delta}\frac{(3r^2 - 2l^2)(r^2 - l^2) - 3r(r^3 - 2rl^2)}{\sqrt{(r^2 - l^2)^5}}\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \frac{1}{\cos\delta}\frac{r^3 - 2rl^2}{\sqrt{(r^2 - l^2)^3}}\frac{\mathrm{d}^2r}{\mathrm{d}t^2} = A_1\frac{\mathrm{d}^2r}{\mathrm{d}t^2} + A_2\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{15}$$

定义参数 A_3、A_4 和 A_5 为

$$A_3 = 2f_t\omega\cos\delta A_1 \tag{16}$$

$$A_4 = \omega^2(f_Z\sin\delta - \cos\delta\cos\gamma - f_t\sin\gamma) \tag{17}$$

$$A_5 = g(\sin\delta\cos\gamma + f_Z\cos\delta + f_t\sin\delta\sin\gamma) \tag{18}$$

将式(14)和式(15)代入式(11)，则有

$$A_1\frac{\mathrm{d}^2r}{\mathrm{d}t^2} + A_2\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2 + A_3\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} + A_4r + A_5 = 0 \tag{19}$$

根据上述分析可知，颗粒肥料在锥盘内的运动与锥盘离送段水平倾角 δ、锥盘角速度 ω 以及推板径向偏角 γ 有关。为便于分析，后续角速度均用角速度转换后的锥盘转速 n 代替。

2.3　结构参数分析

锥盘离送段水平倾角 δ 受颗粒肥料的休止角及排肥盘转速影响，根据文献[24]可知，锥盘离送段水平倾角 $\delta \leqslant 35°$，其最大值可根据颗粒肥料排出的必要条件求得，即

$$\begin{cases}\omega \geqslant \sqrt{\dfrac{g}{R}\tan(\delta + \theta')} \\ \omega = 2\pi n\end{cases} \tag{20}$$

式中　R——锥盘谷点到圆心的距离，mm

θ'——颗粒肥料的自然休止角，(°)

根据油菜施肥量的要求，当机具前进速度为 3.6 km/h、机具排肥行数为 8 行(幅宽 2.3 m)，结合文献[24]中不同锥盘转速对应的行供肥速率，则锥盘转速为 130 r/min 时可满足 525 kg/hm^2 的较高施肥量要求，此时可得锥盘离送段水平倾角 δ 为 24°，且当锥盘转速为 100 r/min 时可满足大部分油菜低速直播施肥量需求。

设计的推板与径向呈一定偏角 γ，是为保证颗粒肥料从排肥器内排出时减少与推板的摩擦，偏角越大越有利于颗粒肥料的排出，但当偏角过大时，进入肥室的通道变窄影响颗粒肥料的顺利排送，且无法满足排肥器排肥管的最大流量需求。将锥盘简化如图 4 所示，CD 为颗粒肥料通过的最小通道的水平距离，需满足

$$h\sqrt{(x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2} \geqslant \pi R_3 \tag{21}$$

式中　h——推板高度，取 25 mm

x_C、y_C——点 C 的横、纵坐标，mm

x_D、y_D——点 D 的横、纵坐标，mm

R_3——排肥管内半径，取 10 mm

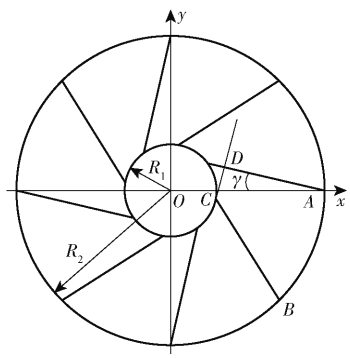


图 4　锥盘机构简化图

Fig. 4　Simplified diagram of conical disc mechanism

由图 4 可知，通过构建半径为 R_1 的圆的方程与直线 BC 的方程联立，求得点 C 坐标为

$$\begin{cases}y_{BC} = -\tan\left(\dfrac{\pi}{4} + \gamma\right)x + 21.92\left(\tan\left(\dfrac{\pi}{4} + \gamma\right) - 1\right) \\ x^2 + y^2 = 961\end{cases} \tag{22}$$

将式(22)求得的点 C 坐标值代入直线 CD 与直线 AD 的联立方程组

$$\begin{cases}y_{CD} = \tan\left(\dfrac{\pi}{2} - \gamma\right)x + y_C - \tan\left(\dfrac{\pi}{2} - \gamma\right)x_C \\ y_{AD} = -x\tan\gamma + 110\tan\gamma\end{cases} \tag{23}$$

可求得点 D 坐标值,将点 C、D 坐标值代入式(21)可得 $\gamma \leqslant 16°$。

3 排肥器结构仿真优化与分析

颗粒肥料在锥盘内的运动直接决定排肥器的排肥稳定性和均匀性,根据上述分析,应用 EDEM 仿真分析软件分析锥盘离送段水平倾角、锥盘转速及推板径向偏角对排肥性能的影响,探究排肥器的最优结构参数。

3.1 优化设计数学模型

以排肥器排肥量稳定性变异系数 C_{V1}、各行排肥量一致性变异系数 C_{V2}、同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 最小为优化目标,令设计变量 $\boldsymbol{X}=(\delta, n, \gamma)$,同时结合实际加工精度,建立排肥器优化设计数学模型

$$\begin{cases} \min C_{V1}=f(\boldsymbol{X}) \\ \min C_{V2}=g(\boldsymbol{X}) \\ \min C_{V3}=h(\boldsymbol{X}) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 24° \leqslant \delta \leqslant 35° \\ 0° \leqslant \gamma \leqslant 16° \\ 100\ \text{r/min} \leqslant n \leqslant 130\ \text{r/min} \end{cases} \end{cases} \tag{24}$$

颗粒肥料在排肥器内受到肥料之间的挤压、摩擦以及颗粒与排肥器的摩擦等作用,难以通过理论分析建立目标函数,通过离散元仿真分析软件模拟颗粒肥料在不同结构参数排肥器下的排肥性能,以排肥器锥盘离送段水平倾角、锥盘转速以及推板径向偏角为试验因素,以不同时段的总排肥量稳定性变异系数 C_{V1}、各排肥管道排出肥料的一致性变异系数 C_{V2} 和随机选取的某一路排肥管道的同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 作为响应指标,开展二次回归正交旋转组合试验,应用 Design-Expert 软件分析各参数对排肥性能的影响,建立排肥量稳定性变异系数、各行排肥量一致性变异系数及同行排肥量一致性变异系数与各参数之间的回归方程,用于排肥器的结构参数优化。

3.2 模型建立

将排肥器模型分为上壳体和螺旋扰动锥体圆盘两个模块,材料均为高精度 ABS 树脂[25],采用 SolidWorks 按照 1∶1的比例构建,为确保模拟真实排肥场景,设置颗粒肥料生成量为 50 000 粒,总仿真时间为 13 s,仿真模型如图 5 所示。由于颗粒肥料为类球形散粒体,颗粒表面无黏附作用,因此选择 Hertz-Mindlin (no-slip)无滑动接触模型[19],同时结合文献[25-26],颗粒肥料-颗粒肥料、颗粒肥料-排肥器的接触参数如表 1 所示。

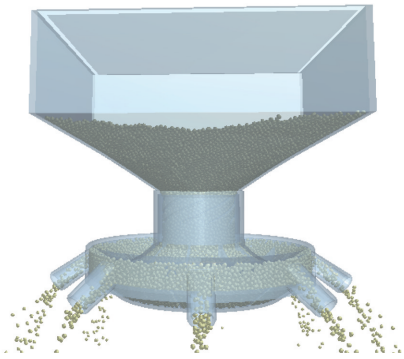


图 5 排肥器仿真模型

Fig. 5 Simulation model of fertilizer apparatus

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameters setting

项目	参数	数值
颗粒肥料	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	845.61
排肥器	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.9×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	1 060
颗粒肥料-颗粒肥料	恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.34
	动摩擦因数	0.16
颗粒肥料-排肥器	恢复系数	0.20
	静摩擦因数	0.18
	动摩擦因数	0.01

3.3 仿真试验与分析

3.3.1 试验设计

为保证颗粒肥料静止于排肥器内,螺旋扰动锥体圆盘 1 s 后开始转动,转动时间为 12 s,每 3 s 取一次该时段内的排肥管排出的肥料质量。为获得各排肥管道排肥量及总排肥量,在 EDEM 仿真分析软件后处理 Setup Selections 模块中分别添加 8 个位于各排肥管出口平行于水平面的方形 Grid Bin Group 网格箱体,统计各排肥管道排肥质量。根据排肥器结构参数分析,确定锥盘离送段水平倾角 δ 为 24°~35°、锥盘转速 n 为 100~130 r/min、推板径向偏角 γ 为 0°~16°,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码

Tab. 2 Factors and codes in experiments

编码	因素		
	水平倾角 δ/(°)	推板径向偏角 γ/(°)	锥盘转速 n/(r·min^{-1})
-1	24.0	0	100
0	29.5	8	115
1	35.0	16	130

3.3.2 结果分析与回归模型建立

根据三因素三水平正交旋转组合试验方案,共

进行 17 组试验，得到如表 3 所示的试验结果，X_1、X_2、X_3 为因素编码值，利用 Design-Expert 软件对试验结果进行二次回归分析，得到排肥量稳定性变异系数 C_{V1} 和各行排肥量一致性变异系数 C_{V2} 的回归方程，并进行显著性检验。

(1)排肥量稳定性变异系数 C_{V1} 的显著性分析

对二次回归模型进行方差分析和显著性检验，排肥量稳定性变异系数的方差分析如表 4 所示，将不显著项剔除，得到排肥量稳定性变异系数的二次回归模型为

$$C_{V1}=2.98+0.14X_1+0.48X_2-1.03X_3+0.47X_1X_2-0.2X_1X_3+0.46X_1^2+0.52X_2^2-0.35X_3^2 \quad (25)$$

根据表 4 可知，二次回归模型 $P<0.01$ 极显著，失拟项 $P>0.05$ 失拟不显著，说明拟合模型能正确反映各因素与误差之间的关系，可以较好地对试验结果进行预测。主因素中锥盘转速 n 对排肥量稳定性变异系数 C_{V1} 影响最显著，交互项中水平倾角 δ 和径向偏角 γ 对排肥量稳定性变异系数 C_{V1} 影响最大，根据模型回归系数可知，各因素对 C_{V1} 的影响由大到小依次为 X_3、X_2、X_1。

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test scheme and result

试验号	因素 水平倾角 X_1	因素 推板径向偏角 X_2	因素 锥盘转速 X_3	排肥量稳定性变异系数 C_{V1}/%	各行排肥量一致性变异系数 C_{V2}%	同行排肥量稳定性变异系数 C_{V3}/%
1	-1	-1	0	3.91	4.76	2.98
2	1	-1	0	3.15	4.09	2.56
3	-1	1	0	3.82	5.13	2.91
4	1	1	0	4.96	5.19	3.47
5	-1	0	-1	3.65	5.26	3.27
6	1	0	-1	4.43	4.98	3.22
7	-1	0	1	2.14	2.44	2.08
8	1	0	1	2.13	2.65	2.16
9	0	-1	-1	3.77	4.98	2.95
10	0	1	-1	4.76	4.87	3.17
11	0	-1	1	1.47	1.75	1.65
12	0	1	1	2.59	3.45	1.96
13	0	0	0	2.93	3.39	2.64
14	0	0	0	3.12	3.34	2.66
15	0	0	0	2.82	3.24	2.61
16	0	0	0	3.07	3.41	2.67
17	0	0	0	2.94	3.22	2.72

表 4　C_{V1} 回归方差分析

Tab. 4　Variance analysis of regression equation

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	14.16	9	1.57	73.53	<0.000 1 **
X_1	0.17	1	0.17	7.73	0.027 3 *
X_2	1.83	1	1.83	85.69	<0.000 1 **
X_3	8.57	1	8.57	400.47	<0.000 1 **
X_1X_2	0.90	1	0.90	42.17	0.000 3 **
X_1X_3	0.16	1	0.16	7.29	0.030 6 *
X_2X_3	0.004 2	1	0.004 2	0.20	0.670 2
X_1^2	0.90	1	0.90	42.00	0.000 3 **
X_2^2	1.15	1	1.15	53.61	0.000 2 **
X_3^2	0.52	1	0.52	24.14	0.001 7 **
残差	0.15	7	0.021		
失拟	0.092	3	0.031	2.15	0.236 5
误差	0.057	4	0.014		
总和	14.31	16			

注：** 表示极显著影响（$P<0.01$）；* 表示显著影响（$0.01\leqslant P<0.05$），下同。

(2)各行排肥量一致性变异系数 C_{V2} 的显著性分析

各行排肥量一致性变异系数的方差分析如表 5 所示，剔除不显著项，得到各行排肥量一致性变异系数 C_{V2} 的二次回归模型为

$$C_{V2}=3.32+0.38X_2-1.23X_3+0.18X_1X_2+0.45X_2X_3+0.77X_1^2+0.7X_2^2-0.26X_3^2 \quad (26)$$

表 5　C_{V2} 回归方差分析

Tab. 5　Variance analysis of regression equation

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	19.21	9	2.13	150.44	<0.000 1 **
X_1	0.058	1	0.058	4.07	0.083 3
X_2	1.17	1	1.17	82.51	<0.000 1 **
X_3	12.00	1	12.00	846.27	<0.000 1 **
X_1X_2	0.13	1	0.13	9.39	0.018 2 *
X_1X_3	0.06	1	0.06	4.23	0.078 7
X_2X_3	0.82	1	0.82	57.74	0.000 1 **
X_1^2	2.50	1	2.50	176.55	<0.000 1 **
X_2^2	2.07	1	2.07	145.96	<0.000 1 **
X_3^2	0.28	1	0.28	19.87	0.002 9 **
残差	0.099	7	0.014		
失拟	0.069	3	0.023	3.11	0.150 9
误差	0.030	4	0.007 45		
总和	19.31	16			

由表 5 可知，二次回归模型 $P<0.01$ 极显著，失拟项 $P>0.05$ 失拟不显著，说明拟合模型能正确反映各因素与误差之间的关系，可以较好地对试验结果进行预测，X_2、X_3、X_2X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 项极显著，X_1X_2 项影响显著，其余项均不显著，根据模型回归系数可知，各因素对 C_{V2} 的影响由大到小依次为 X_3、X_2、X_1。

(3)同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 的显著性分析

同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 的方差分析如表 6 所示，同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 的二次回归模型为

$$C_{V3}=2.66+0.17X_2-0.6X_3+0.24X_1X_2+0.29X_1^2-0.26X_3^2 \quad (27)$$

由表 6 可知,拟合模型能正确反映各因素与误差之间的关系,可以较好地对试验结果进行预测,根据模型回归系数可知,各因素对 C_{V3} 的影响由大到小依次为 X_3、X_2、X_1。

表 6 C_{V3} 回归方差分析

Tab. 6 Variance analysis of regression equation

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.92	9	0.44	106.78	<0.0001 **
X_1	0.0036	1	0.0036	0.88	0.3782
X_2	0.23	1	0.23	57.47	0.0001 **
X_3	2.83	1	2.83	693.80	<0.0001 **
X_1X_2	0.24	1	0.24	58.82	0.0001 **
X_1X_3	0.0042	1	0.0042	1.03	0.3429
X_2X_3	0.002	1	0.002	0.50	0.5040
X_1^2	0.34	1	0.34	83.78	<0.0001 **
X_2^2	0.0052	1	0.0052	1.26	0.2980
X_3^2	0.29	1	0.29	71.07	<0.0001 **
残差	0.029	7	0.0041		
失拟	0.022	3	0.0073	4.44	0.0920
误差	0.0066	4	0.0017		
总和	3.95	16			

3.3.3 响应面分析

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行处理,将任一因素固定在零水平,排肥器性能指标的双因素响应面图如图 6 所示。

由图 6 可知,当水平倾角 δ 取中间值且径向偏角 γ 较小时,排肥量稳定性变异系数 C_{V1} 较小;当水平倾角 δ 固定时,排肥量稳定性变异系数 C_{V1} 随排肥器转速 n 的增加而减小;当水平倾角 δ 取值较大且径向偏角 γ 较小时,各行排肥量一致性变异系数 C_{V2} 较小;径向偏角 γ 固定时,各行排肥量一致性变异系数 C_{V2} 随排肥器转速 n 的增加而减小;当水平倾角 δ 固定时,同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 随径向偏角 γ 的减小而减小,且当水平倾角 δ 取较大值、径向偏角 γ 值较小时,同行排肥量一致性变异系数 C_{V3} 较小。利用 Design-Expert 软件中的 Optimization - Numerical 模块求得各参数的最优组合为 $\delta=30.4°$,$\gamma=3.2°$,$n=130$ r/min,该参数也验证了排肥器排肥性能随排肥器转速增加而提升的结论[24]。

4 排肥性能试验与分析

为进一步验证所优化排肥器的排肥性能及排肥器在不同转速下的排肥适应性,基于排肥器最优参数组合,开展排肥器性能验证试验及不同转速的排量标定与排肥性能试验。

4.1 台架试验

4.1.1 试验条件与方法

以史丹利复合肥为试验材料,应用自制的排肥器性能试验台开展试验,排肥器采用高精度光敏树脂打印,排肥器性能试验台如图 7 所示。

试验参照 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》规定的试验方法,考察排肥器的排肥性能。试验时首先利用速为激光测速仪对带负载电机转速进行测定,后用可调直流稳压电源开关作为电机运行和停止的按钮,每次试验排肥器转动 30 s,并

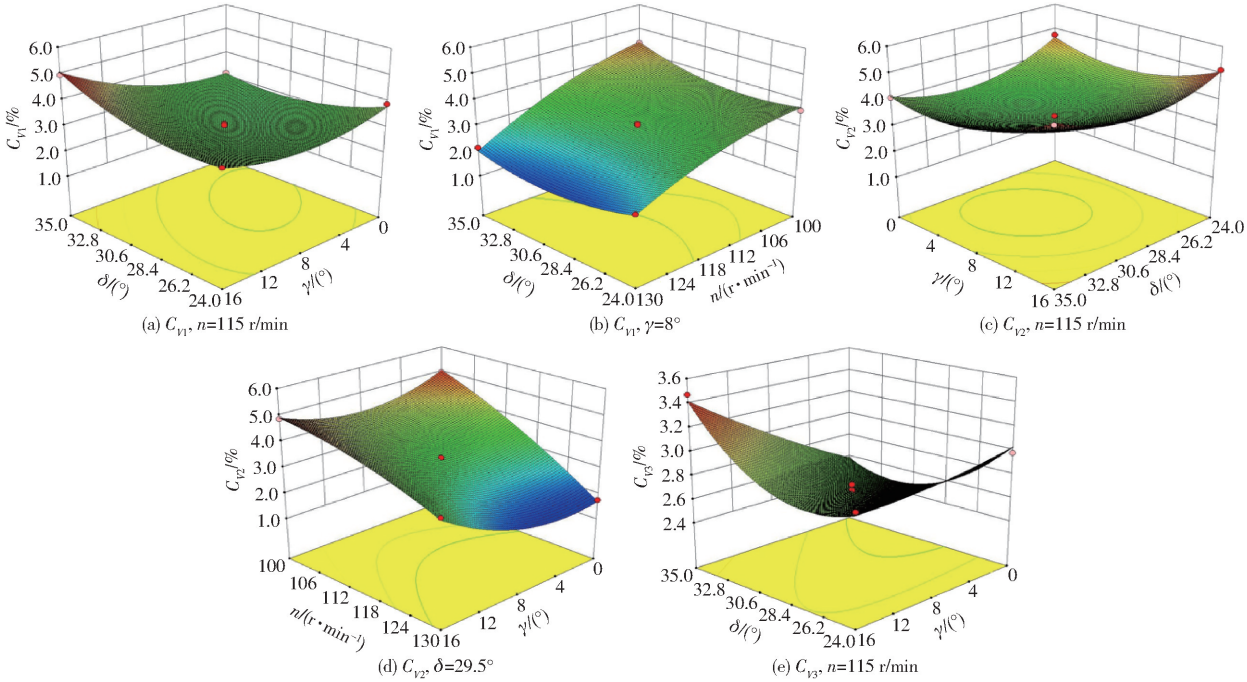


图 6 排肥器性能指标的双因素响应面图

Fig. 6 Response surfaces of double parameters about performance indicators for fertilizer apparatus

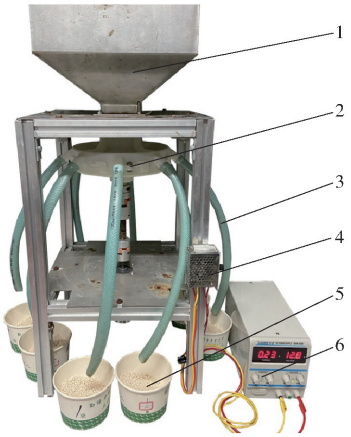


图 7　排肥器性能试验台

Fig. 7　Performance test benches of fertilizer apparatus

1. 肥箱　2. 排肥器　3. 排肥管　4. 调速器　5. 接肥盒　6. 可调直流稳压电源

用接肥盒收集每次试验中排肥管排出的肥料并称量，每次试验重复 3 次取平均值。

4.1.2　试验结果与分析

排肥量稳定性变异系数、各行排肥量一致性变异系数和行供肥速率与排肥器转速的关系如图 8 所示。由图 8 可知，随排肥器转速增加，排肥量稳定性变异系数和各行排肥量一致性变异系数均下降，排肥量稳定性变异系数不大于 3.12%，各行排肥量一致性变异系数不大于 5.29%，均较优化前指标有所提升，且完全满足行业标准要求。行供肥速率与排肥器转速存在明显的线性关系，为后期变量施肥提供了理论支撑，行最大供肥速率为 1 600 g/min，以播种机前进速度 5.5 km/h，机具作业幅宽 2.3 m，施肥行数 8 行为例，该供肥速率可满足的施肥量为 600 kg/hm^2，完全满足油菜施肥量要求[24]。

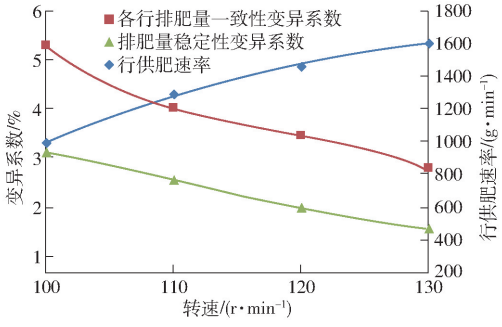


图 8　排肥性能与排肥速率标定

Fig. 8　Fertilizer discharge performance and calibration of discharge volumes

同行排肥量一致性变异系数与转速关系如图 9 所示。由图 9 可知，随排肥器转速增加，同行排肥量一致性变异系数有减小趋势，但相互之间差异很小，当排肥器转速较高时同行排肥量一致性变异系数相近且较低，当排肥器转速为 100 r/min，同行排肥量一致性变异系数最高，但此时同行排肥量一致性变异系数不大于 2.05%，说明排肥器排肥稳定，满足排肥质量要求。

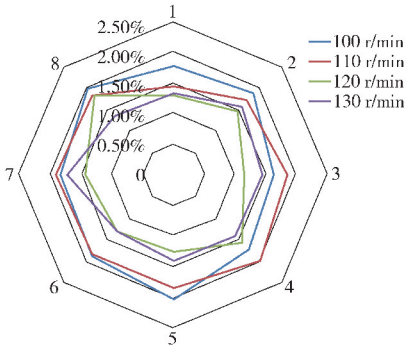


图 9　同行排肥量一致性变异系数与转速关系

Fig. 9　Variation coefficient of fertilizing amount consistency in the same row in relation to speed

4.2　田间试验

为进一步验证排肥器在田间复杂作业环境的适应性，于 2021 年 7 月 29 日在湖北省监利市试验示范基地开展田间试验，排肥器田间性能试验如图 10 所示。选用 2BYQ－8 型油菜直播机作为试验平台，肥料为史丹利复合肥，采用东方红 LX954－C 型拖拉机慢Ⅳ挡开展试验，拖拉机蓄电池作为排肥器驱动电机的电源，并利用直流电机调速器调节排肥器转速，开展以排肥器的排肥量稳定性变异系数、各行排肥量一致性变异系数、同行排肥量一致性变异系数为指标，排肥器转速在 100 ~ 130 r/min，每 10 r/min 一个水平，共 4 个转速 12 次试验。根据台架试验知，各行之间同行排肥量一致性变异系数差异较小，因此仅随机选取某一路排肥管道进行同行排肥量一致性试验，试验结果如表 7 所示。由表 7 可知，排肥器各管道之间同行排量一致性变异系数差异较小，当排肥器转速为 130 r/min 时，同行排量一致性变异系数最小；当排肥器转速增加时各行排肥量一致性变异系数和排肥量稳定性变异系数均减小，当排肥器转速较低时，各行排肥量一致性变异系数不大于 6.98%，排肥量稳定性变异系数不大于



图 10　田间试验

Fig. 10　Field performance

1. 气送式排种装置　2. 螺旋锥体离心式排肥器　3. 2BYQ－8 型油菜直播机

表 7 田间排肥性能分析

Tab. 7 Analysis of fertilizing performance in field

锥体圆盘转速/(r·min⁻¹)	同行排量一致性变异系数/%								各行排量一致性变异系数/%	排肥量稳定性变异系数/%
	排肥管 1	排肥管 2	排肥管 3	排肥管 4	排肥管 5	排肥管 6	排肥管 7	排肥管 8		
100	3.36	2.78	2.39	2.11	2.40	2.32	2.64	2.81	6.98	4.57
110	2.05	2.51	3.24	2.77	2.56	2.22	2.66	2.03	6.13	4.27
120	2.70	2.31	2.33	2.40	2.33	2.02	3.13	2.99	5.26	3.56
130	2.24	2.15	2.11	2.58	2.51	2.39	2.49	2.60	4.33	3.04

4.57%,同行排肥量一致性变异系数不大于3.36%,满足田间施肥质量要求。

5 结论

(1)通过颗粒肥料在排肥器内运动模型的建立及分析,确定了弧形锥体圆盘的母线方程及影响排肥器性能的主要结构参数和范围。应用 EDEM 离散元仿真软件,开展了影响排肥性能的三因素三水平二次正交旋转组合试验,并利用 Design-Expert 软件分析了各参数对排肥性能的影响规律,确定了排肥器最优结构参数为水平倾角 30.4°、推板径向偏角 3.2°、锥盘转速 130 r/min。

(2)排肥器台架试验表明,排肥量稳定性变异系数不大于 3.12%,各行排肥量一致性变异系数不大于 5.29%,同行排肥量一致性变异系数不大于 2.05%,说明排肥器排肥稳定,满足排肥质量要求;行最大供肥速率为 1.6 kg/min,满足油菜施肥量要求。田间试验表明,排肥器的排肥量稳定性变异系数不大于 4.57%、各行排肥量一致性变异系数不大于 6.98%、同行排肥量一致性变异系数不大于 3.36%,优于行业标准要求,且较排肥器优化前排肥性能有所提升,为变精量排肥提供了技术支撑。

参 考 文 献

[1] 吴崇友,吴俊,张敏,等. 油菜毯状苗机械移栽技术研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(12):6-10.
WU Chongyou, WU Jun, ZHANG Min, et al. Research on machine transplanting techniques of blanket rapeseed[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(12):6-10. (in Chinese)

[2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报,2016,32(1):1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(1):1-11. (in Chinese)

[3] 陈学庚,温浩军,张伟荣,等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业,2020,2(4):1-16.
CHEN Xuegeng, WEN Haojun, ZHANG Weirong, et al. Adrences and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture,2020,2(4):1-16. (in Chinese)

[4] 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.
WANG Botao, BAI Lu, DING Shangpeng, et al. Simulation and experimental study on impact of fluted-roller fertilizer key parameters on fertilizer amount[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(10): 1-6. (in Chinese)

[5] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 稻麦精准追肥机执行机构的设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2015,36(6):119-124.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of precision fertilizer applicator actuator of rice and wheat[J]. Journal of South China Agricultural University,2015,36(6):119-124. (in Chinese)

[6] 杨洲,朱卿创,孙健峰,等. 基于 EDEM 和 3D 打印成型的外槽轮排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究,2018,40(5):175-180.
YANG Zhou, ZHU Qingchuang, SUN Jianfeng, et al. Study on the performance of fluted roller fertilizer distributor based on EDEM and 3D printing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(5): 175-180. (in Chinese)

[7] 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 amount[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(10):1-6,23. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 高丽萍,陈慧,廖庆喜,等. 油菜深施肥播种机动态倾斜工况排肥性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):64-72.
GAO Liping, CHEN Hui, LIAO Qingxi, et al. Experiment on fertilizing performance of dynamic tilt condition of seeder with deep fertilizer for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 1):64-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2020s108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.008. (in Chinese)

[10] 施印炎,陈满,汪小旦,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)

[11] 何亚凯,杨学军,翟长远,等. 集排风送式玉米分层追肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11):54 - 63.
HE Yakai, YANG Xuejun, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of air-assisted layered fertilization machine of centralized distributing for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):54 - 63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.006. (in Chinese)

[12] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式变量排肥系统分层施肥量调节装置研制[J]. 农业工程学报,2020,36(1):1 - 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Development of layered fertilizer amount adjustment device of pneumatic centralized variable fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(1):1 - 10. (in Chinese)

[13] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(18):12 - 20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):12 - 20. (in Chinese)

[14] 韩守强,闫银发,宋占华,等. 配肥撒肥机研究及发展现状[J]. 农业工程,2017,7(6):5 - 8,13.
HAN Shouqiang, YAN Yinfa, SONG Zhanhua, et al. Research and development status of mixed fertilizer applicator[J]. Agricultural Engineering,2017,7(6):5 - 8,13. (in Chinese)

[15] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):86 - 93,113.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable-rate fertilizer spreader with centrifugal distribution cover for rice paddy surface fertilization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(3): 86 - 93, 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180310&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.010. (in Chinese)

[16] 杨怀君,汤智辉,孟祥金,等. 离心式变量撒肥机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2017,52(1):144 - 149.
YANG Huaijun, TANG Zhihui, MENG Xiangjin, et al. Design and performance test of centrifugal type of variable rate fertilizer[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2017,52(1): 144 - 149. (in Chinese)

[17] HOFSTEE J W, HUISMAN W. Handling and spreading of fertilizers part 1: physical properties of fertilizer in relation to particle motion[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1990,47(4):213 - 234.

[18] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14):32 - 39.
LIU Cailing,LI Yanni,SONG Jiannong,et al. Performance analysis and test of centrifugal disc spreader based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(14):32 - 39. (in Chinese)

[19] VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology,2009,190(3):348 - 360.

[20] SHI Y, CHEN M, WANG X, et al. Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable-rate fertilizer applicator based on DEM software[J]. Computers & Electronics in Agriculture,2018,144:249 - 259.

[21] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 锥盘式撒肥装置的性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(11):16 - 24.
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying,et al. Performance analysis and experiment on granular fertilizer spreader with cone disc[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(11):16 - 24. (in Chinese)

[22] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等. 锥形撒肥圆盘中肥料颗粒运动模型优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):85 - 91,111.
LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Optimization and experiment of fertilizer particle motion model in conical spreading disk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):85 - 91,111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/ reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180610&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.010. (in Chinese)

[23] 杨立伟,陈龙胜,张俊逸,等. 离心圆盘式撒肥机撒肥均匀性试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):108 - 114.
YANG Liwei, CHEN Longsheng, ZHANG Junyi, et al. Test and analysis of uniformity of centrifugal disc spreading[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):108 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2019s018&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.018. (in Chinese)

[24] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等. 螺旋扰动锥体离心式排肥器设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(2):34 - 43.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Design and experiment of spiral disturbance cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(2):34 - 43. (in Chinese)

[25] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等. 螺旋锥体离心式排肥器扰动防堵机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(12):44 - 54.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Mechanism analysis and test of disturbance and blockage prevention of spiral cone centrifugal fertilizer apparatus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):44 - 54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.005. (in Chinese)

[26] 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)