

腔盘式精量穴施肥装置设计与试验

刘正道¹ 王庆杰¹ 刘春鸽² 李洪文¹ 何进¹ 刘俊孝¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 施肥方式粗放是造成我国肥料利用率低的主要原因之一。与条状施肥相比,穴式施肥可有效提高肥料利用率。本文设计一种用于颗粒状肥料穴式施用的腔盘式精量穴施肥装置,通过理论分析确定了装置的主要结构和工作参数,并探讨了肥腔形状(圆弧型、直线型-钝角、直线型-锐角和抛物线型)对肥料运动的影响。运用离散元法(EDM)对不同结构和作业参数下的排肥盘充肥性能和肥群运动进行了仿真分析,结果表明:肥腔形状、前进速度和施肥量对各穴排肥量变异系数均有显著影响,随前进速度的增大和施肥量的减少,变异系数增大,且圆弧型肥腔排肥稳定性最好;前进速度和肥腔形状对肥料扰动度有显著影响,排肥盘经过箱体的时间及其对肥料扰动的形式和扰动量是影响排肥量稳定性的主要原因。在前进速度 7 km/h、排肥量 300 kg/hm² 的条件下,对 4 种排肥盘进行台架试验,结果表明,圆弧型肥腔性能最优,排肥量合格率为 94%,各穴排肥量变异系数为 6.5%,与仿真结果呈现相同规律,且满足作业排肥要求。

关键词: 穴式施肥; 腔盘式; 离散元仿真; 结构优化; 取肥稳定性

中图分类号: S224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0137-08

Design and Experiment of Precision Hole-fertilizing Apparatus with Notched Plate

LIU Zhengdao¹ WANG Qingjie¹ LIU Chungu² LI Hongwen¹ HE Jin¹ LIU Junxiao¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Extensive fertilization method is one of the main reasons for the low utilization rate of fertilizer in China. Compared with the strip-type fertilization, the hole-type fertilization method can effectively improve the efficiency of fertilizer utilization, but currently there is a lack of mature hole-type fertilization equipment. In view of the above problems, a kind of notched precision hole-fertilizing apparatus was designed, which was used for granular fertilizer. The main structure and working parameters of the device were determined through theoretical analysis, and the analyzing of the shape of fertilizer cavity was focused on. The discrete element method (EDM) was used to simulate and analyze the filling performance and fertilizer group movements under different conditions. The simulated results showed that the fertilizer cavity shape, operation speed and the fertilizing amount had significant influence on the fertilizing amount coefficient of variation between holes. With the increase of the operating speed and the reduction of fertilizing amount, the variation coefficient of fertilizing amount between holes was increased. Circular-type fertilizer cavity had the best stability in four kinds of shapes. The operating speed and fertilizer cavity shape had significant influence on the fertilizer disturbance coefficient. The time of fertilizer plate passing through the box and the form and size of disturbance on the fertilizer were main reasons affecting the stability of fertilization. Taking the qualified rate of fertilizing amount and coefficient of variation between holes as indicators, four types of fertilizer plates were arranged as verification test of at working speed of 7 km/h and fertilizing amount of 300 kg/hm². The results showed that the performance of the circular-type fertilizer cavity was the best with fertilizing amount qualified rate of 94% and the variation coefficient between holes was 6.5%, which satisfied the requirements of hole-fertilizing.

Key words: hole-fertilization; notched plate; discrete element simulation; structural optimization; fertilizing stability

收稿日期: 2018-04-03 修回日期: 2018-05-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 刘正道(1992—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: liuzd@cau.edu.cn

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

0 引言

化肥施用是农业生产中重要的作业环节,目前中国化肥年总用量已达 5 700 万 t,居世界第一位^[1]。种肥是在播种时随种子施入作物周围的肥料,对作物生长具有重要的作用^[2-3],但现有条状施肥方式化肥施用量大、利用率较低^[4-5],肥料的过量施用引发土壤酸化、地下水硝酸盐积累等环境问题^[6-8]。合理的施肥方式能提高肥料利用率,减少化肥施用量,如化肥深施技术^[9-10]、化肥分层施用技术^[11-13]和肥料穴施技术等。其中,肥料穴施技术可以定点定量精确施肥,单穴肥料供应单穴作物,肥料分布在利于作物根系吸收的范围内,具有很好的节肥增产效果^[14],是提高玉米、大豆等作物肥料利用效率的有效手段。

与条状施肥方式相比,穴式施肥虽然能够有效提高化肥利用率,但一般需要通过复杂的机械机构实现间歇或断续排肥,目前尚缺乏实用、成熟的穴式施肥装备^[15]。穴式施肥技术的研究主要分为扎穴和穴式排肥技术,王金武等^[16-18]围绕非规则齿轮行星系扎穴机构做了大量研究,进行了机构的优化设计、动力学分析和工作参数试验优化,但该机构主要用于液态肥料的施用。在颗粒肥料穴式施用方式研究方面,袁文胜等^[15]设计了一种匀轮式穴式施肥排肥器,并进行了仿真分析和试验;李沐桐等^[19-20]通过机械式触碰识别装置,结合曲柄连杆机构,实现中耕作物的精准穴式施肥,并通过正交旋转组合试验进行了参数的优化;张勋^[21]设计了多次定位成穴的种、肥联动机械机构,采用电磁铁驱动,实现穴播穴施肥;文献[22-23]设计了基于曲柄摇杆机构的穴式施肥装置,并进行了动力学建模和分析。上述装置主要通过排肥器和成穴机构的结合,实现穴式施肥,但由于结构复杂、生产效率低等原因,并未得到广泛应用。此外,随着高速播种技术的发展,播种机前进速度不断加快,要求穴式施肥排肥器能够实现快速、低位投肥。

针对国内玉米播种条状施肥方式造成的化肥利用率低、施用量大、施肥作业效率低等问题,通过理论设计、仿真分析和室内试验,本文设计一种腔盘式精量穴施肥装置,以期实现精准、稳定取肥和低位、快速投肥,为玉米精量施肥技术的发展提供装备和技术参考。

1 结构和工作原理

穴式施肥装置主要由机架、拨草轮、限深轮、开沟器、肥箱、排肥盘、进气管和出肥管组成,如图 1 所示。

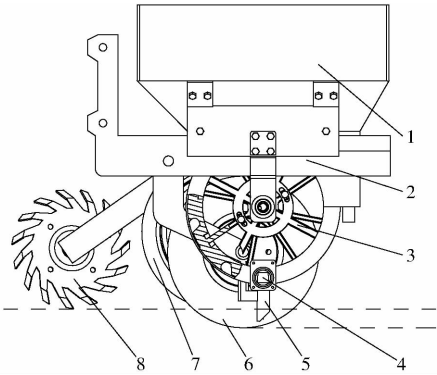


图 1 精量穴施肥装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of hole-type fertilization device

1. 肥箱 2. 机架 3. 排肥盘 4. 进气管 5. 出肥管 6. 开沟器
7. 限深轮 8. 拨草轮

穴式施肥装置通过平行四连杆仿形机构安装在播种机机架上,整个装置可随地表上下浮动,并通过限深轮限深。拨草轮位于装置最前端,清除装置前端杂草和根茬;开沟器采用圆盘式开沟器,开出肥沟,开沟器固定架后固定安装出肥管,出肥管底端略高于开沟器底平面,且设计为斜面,防止土壤拥堵排肥口;肥箱底部开槽并安装护肥腔,护肥腔底部开口,一端连接进气管,一端连接出肥管;排肥盘外围有均布的肥腔,排肥盘转动过程肥腔经过肥箱时充满肥料,转离肥箱后肥箱护肥腔使肥料保持在肥腔内,当肥腔经过护肥腔底部开口时,肥料被进气口气流吹出肥腔进入出肥管,并快速投入肥沟,完成穴式施肥。

穴式施肥装置的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 穴式施肥装置主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of hole-type fertilization device

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	640×550×250
施肥深度/cm	4~6
施肥量/(kg·hm ⁻²)	150~600(可调)
施肥间距/mm	200~300(可调)

2 关键部件设计

2.1 排肥盘设计

2.1.1 结构及工作原理

排肥盘主要由排肥盘定子和转子组成,其结构如图 2 所示。排肥盘定子固定安装在排肥盘轴上,在动力机构带动下绕护肥腔中心轴转动,转子安装在定子轴上,可在定子的安装槽内相对定子转动,定子和转子在排肥盘外围组成若干均布的缺口即为肥腔。转子和定子的相对位置通过固定螺栓固定,松动固定螺栓可调节定子和转子的相对角度,进而调

节肥腔大小,实现施肥量的无级调节。转子和定子间填充弹性体,避免在转子和定子相对角度发生变化时出现间隙,造成漏肥现象。

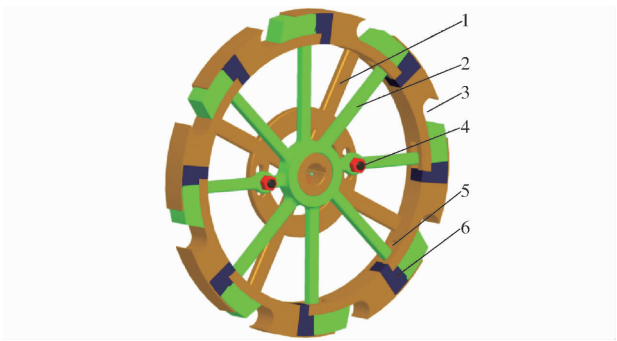


图 2 排肥盘三维结构图

Fig.2 3D structure diagram of fertilizer plate

1. 排肥盘定子 2. 排肥盘转子 3. 肥腔 4. 固定螺栓 5. 安装槽 6. 弹性填充物

为实现肥料深施,根据《农业机械设计手册》,装置选取圆盘式开沟器直径为 300 mm。为确保从出口口吹出的肥料顺利落入肥沟,缩短投肥时间,保证低位投肥,排肥盘底部应略高于开沟器底端且紧靠开沟器侧边(图 1)。肥箱安装位置随肥盘直径变小而降低,若排肥盘直径过小,肥箱与开沟器干涉;但随排肥盘直径变大,肥箱护肥腔部分超出开沟器边缘,与地面形成干涉。因此,本文选取肥盘直径 D 与开沟器直径相同,即 $D = 300\text{ mm}$ 。

排肥盘角速度由肥腔个数、施肥间距和机具前进速度决定,即

式 中 n ——肥腔个数

$$\frac{360}{n\omega} = \frac{s}{278v} \tag{1}$$

ω ——排肥盘角速度, $(^\circ)/\text{s}$
 s ——施肥间距, mm
 v ——机具前进速度, km/h

由式(1)知,肥腔个数越多,排肥盘角速度越低,为保证肥腔在肥箱内充足的取肥时间,肥腔个数应尽可能多。在保证每个肥腔结构尺寸和调节间隙的前提下,最多布置 8 个肥腔,即取 $n = 8$ 。以我国北方一年两熟区玉米播种为例,取施肥间距 s 为 200 ~ 300 mm,机具前进速度为 3 ~ 9 km/h,则排肥盘角速度 ω 为 125 ~ 562.5 $(^\circ)/\text{s}$ 。

施肥穴距调节通过改变排肥盘转速和机具前进速度的配比(传动比)来实现,若将排肥装置用于精量播种机,施肥穴距与播种穴距应保持一致。排肥盘每旋转 1 周排 8 穴肥料,若排种盘旋转一周排种数为 a ,则排肥盘和排种盘之间的传动比为 $a/8$,将两者通过传动装置相连,即可实现同步调节。种子和肥料在机具前进方向的间距则通过调节排种盘和

排肥盘的安装角来实现,即让肥料落入土壤的时间相对种子落入土壤的时间有一定的延后(或提前),安装角度差的计算公式为

$$\Delta\theta = \left(\frac{\Delta s}{27.8v} - t_1 + t_2 \right) \omega \tag{2}$$

式 中 $\Delta\theta$ ——排种盘和排肥盘初始安装角度差, $(^\circ)$

Δs ——肥料和种子在机具前进方向上的间距, mm

t_1 ——种子从排种盘落入土壤的时间, s

t_2 ——肥料从离开肥盘到落入土壤的时间, s

2.1.2 肥腔设计

肥腔是排肥装置取肥、运肥的直接载体,肥腔的形状直接影响排肥装置的排肥性能,其结构如图 3 所示。图中 ω 方向表示排肥盘转动方向,调节段长度可通过改变排肥盘转子和定子的相对角度进行调节,调节段长度为零时,出口段和进口段体积总和为排肥器最小排肥量。

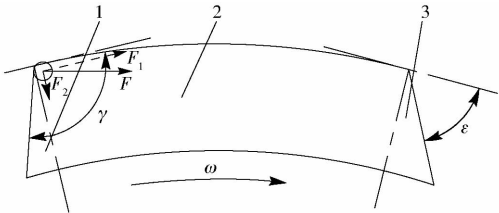


图 3 肥腔原理图

Fig.3 Schematic diagram of fertilizer filling cavity

1. 出口段 2. 调节段 3. 入口段

肥腔的结构参数主要包括单个肥腔的体积、入口端面与速度方向的夹角 ε 和出口端面与速度方向的夹角 γ 。其中单个肥腔的体积计算公式为

$$V_0 = \frac{msl}{1 \times 10^7 \rho} \tag{3}$$

式 中 V_0 ——肥腔体积, cm^3
 m ——施肥量, kg/hm^2
 l ——播种行距,取玉米播种行距为 600 mm
 ρ ——化肥堆积密度,测得 $1.028\text{ g}/\text{cm}^3$

目前我国玉米种肥施用以缓释复合肥为主,施肥量一般在 250 ~ 500 kg/hm^2 ^[24-25],穴式施肥方式可提高化肥利用率,减少施肥量,本文在设定施肥量调节范围时适当降低排肥量下限,即取施肥量范围为 150 ~ 600 kg/hm^2 。为满足最大种植密度下穴式排肥要求,取 $s = 200\text{ mm}$,则单个肥腔体积 V_0 为 1.75 ~ 7.00 cm^3 。肥腔宽度为 25 mm,厚度为 15 mm,则弹性填充体在长度方向上变化范围为 4.67 ~ 18.67 mm。

排肥盘转动过程入口端面对附近颗粒除支撑外无其他作用力,肥料靠重力充入肥腔,当 $\varepsilon < 90^\circ$ 时,进口段肥料靠侧边肥料的挤压作用填充,易出现虚

填或空填现象,因此 ε 应大于 90° 。出口端面附近肥料颗粒将受到与出口端面垂直的推力 F ,当 $\gamma < 90^\circ$ 时,推力 F 在径向方向的分力为离心力,使肥料颗粒顺端面划出肥腔;当 $\gamma > 90^\circ$ 时,推力 F 在径向方向的分力为向心力,使肥料颗粒向肥腔内部运动,将原有肥箱内颗粒挤出肥箱。因此, γ 的大小直接影响肥盘经过肥腔时对肥料的扰动,进而影响肥腔的充肥性能。此外,端面曲线的走势将影响肥料在肥腔内的运动。

肥腔形状根据 γ 的大小可分为锐角型和钝角型,根据曲线走势,可分为直线、双端曲线和单端曲线3种类型,本文分别选取直线、圆弧(双端曲线)和抛物线(单端曲线)作为典型代表,研究曲线走势对充肥性能的影响。钝角型3种曲线走势中圆弧型圆弧半径较大,端面曲线接近直线,抛物线型类似于端面底部加圆角,对结构影响不大,因此本文最终设计了直线型(钝角)、直线型(锐角)、圆弧型(锐角)和抛物线型(锐角)4种形状的肥腔,由于圆弧型和抛物线型只有锐角形式,下文直接用圆弧型和抛物线型表示,4种肥腔形状如图4所示。

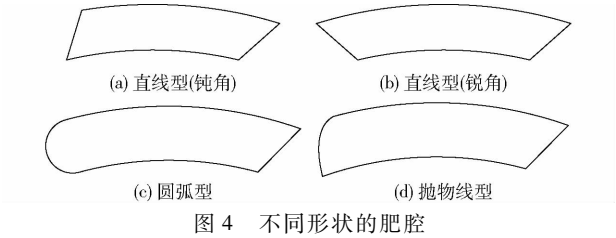


图 4 Different shapes of fertilizer filling cavity

2.2 肥箱及排肥机构设计

肥箱主要由箱体、护肥腔、进气口、出肥口和清肥口组成,进气口处安装进气管,出肥口处安装出肥管,进气管和出肥管组成排肥机构,肥箱及排肥机构结构如图5所示。肥箱除用于储存肥料外还起到固定排肥盘的作用,安装后排肥盘顶部在箱体内,其余大部分位于护肥腔内,护肥腔用于保护排肥盘肥腔内肥料。进气管与风机相连,提供持续风压,出肥管末端略高于施肥开沟器底部,工作过程出肥管末端接近沟底。当肥腔运送肥料经过进气口和出肥口中间时,进气管、肥腔和出肥管连通构成排肥气路,肥料在气流作用下被快速送至沟底。

肥箱的主要结构参数包括箱体容量、排肥盘进入箱体时箱体端面与竖直方向的夹角 α 和排肥盘离开箱体时箱体端面与竖直方向的夹角 β ,其中箱体容量根据作物施肥量和单次加肥周期内工作量确定。 α 和 β 的大小决定排肥盘在箱体内的时间,即取肥时间,两者越大,取肥时间越长,充肥性能越好。

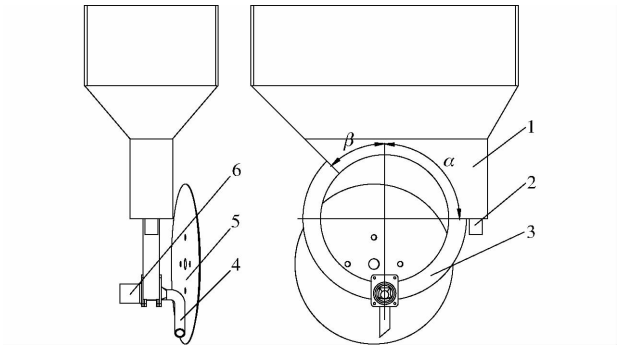


图 5 肥箱及排肥机构结构图

Fig. 5 Structure diagram of fertilizer box and discharging mechanism

1. 箱体 2. 清肥口 3. 护肥腔 4. 出肥管 5. 施肥开沟器 6. 进气管

但当 $\alpha > 90^\circ$ 时,肥箱在进口段出现空填区,因此取 $\alpha = 90^\circ$;当 $0^\circ < \beta < 45^\circ$ 时,肥腔内肥料在离开箱体进入护肥腔前始终受上部肥料挤压而不断压实,当 $\beta > 45^\circ$ 时则易出现虚填现象,因此取 $\beta = 45^\circ$ 。

3 仿真分析

排肥盘作为穴式施肥装置的关键部件,其充肥性能优良与否将直接影响装置的排肥性能。因此,本文采用 Pro/E 和离散元法 (EDEM) 分别建立排肥盘和肥料仿真模型进行仿真试验,分析不同速度、肥腔形状和施肥量对肥料的扰动以及排肥量稳定性的影响规律,以优化排肥盘结构参数。

3.1 参数设定

一些学者围绕肥料颗粒的特征参数进行了试验,并将其应用到 EDEM 中^[26-27],但均未对其在 EDEM 中的实际仿真效果进行标定。本文在进行仿真试验前,首先在前人试验的基础上,采用侧壁坍塌法对肥料颗粒参数进行标定。本试验选取颗粒状复合肥(中农集团,N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)为试验对象,肥料颗粒基本呈圆球形,平均直径 3.41 mm,82% 的颗粒直径在 2.9 ~ 4.0 mm 之间,且颗粒大小随机分布。由于肥料颗粒表面没有黏附力,选择 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,应用批处理功能,在不同颗粒材料参数和接触参数下进行仿真试验,得到最接近实际效果的一组试验,如图 6 所示,模型变量参数如表 2 所示。

3.2 仿真试验设计与试验指标

肥腔的结构参数主要包括肥腔的形状和体积,作业参数主要包括排肥盘的转速,其中肥腔体积决定排肥装置的单穴施肥量,排肥盘的转速由机具前进速度决定。因此,为研究不同结构和作业参数对排肥装置排肥性能的影响,以各穴排肥量变异系数

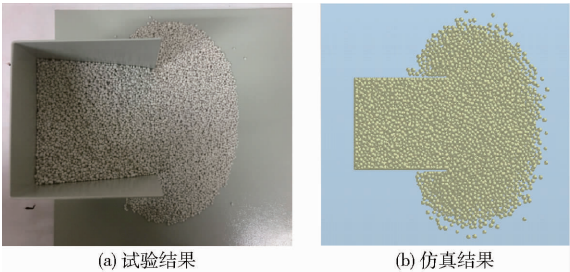


图 6 肥料颗粒参数标定(侧壁坍塌试验)
Fig.6 Fertilizer particle parameter calibration
(side wall collapse test)

表 2 全局变量
Tab.2 Pre-treatment parameters

属性	肥料	肥箱	肥盘
泊松比	0.25	0.28	0.41
剪切模量/Pa	1.0×10^7	8.1×10^{10}	2.18×10^9
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 861	7 135	1 160

属性	颗粒-颗粒	颗粒-肥箱	颗粒-肥盘
恢复系数	0.3	0.5	0.5
静摩擦因数	0.6	0.4	0.6
动摩擦因数	0.3	0.05	0.15

和肥料扰动度为试验指标,以肥腔形状、前进速度和施肥量为试验因素,设计 3 因素 4 水平正交试验,各因素水平如表 3 所示。

表 3 因素水平
Tab.3 Experimental factors and levels

水平	肥腔形状	因素	
		前进速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	施肥量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
1	圆弧型	3	150
2	直线型(钝角)	5	300
3	直线型(锐角)	7	450
4	抛物线型	9	600

各试验指标测试方法如图 7 所示,后处理阶段,通过 Selection Group 功能在过排肥盘旋转中心且垂直于肥盘平面的平面内创建 2 个网格单元组,网格单元组 1 包含所在平面内肥箱和肥腔内所有颗粒,

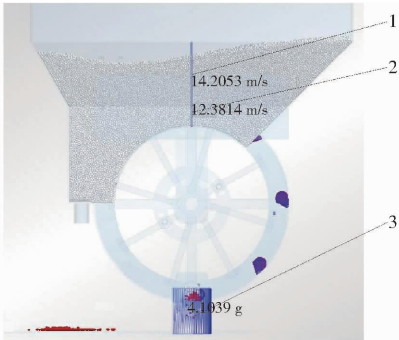


图 7 网格单元组和质量流量传感器位置
Fig.7 Position of grid bin group and mass flow sensor
1. 网格单元组 1 2. 网格单元组 2 3. 质量流量传感器

网格单元组 2 仅包含所在平面内肥腔内颗粒,分别记录肥盘转动阶段单元组内颗粒速度总和;在出肥口创建质量流量传感器,记录肥箱转动阶段传感器区域内颗粒质量总和。

各测试指标计算公式:
各穴排肥量变异系数为

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (m_{imax} - \overline{m}_{max})^2}}{\overline{m}_{max}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 n_1 ——仿真时间段内经过质量流量传感器的肥腔数量(除去第一个和最后一个)
 m_{imax} ——第 i 个肥腔经过质量流量传感器过程中传感器区域内最大质量, g
 $\overline{m}_{max}$ —— m_{imax} 的算术平均值, g
扰动度为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (v_{1imax} - v_{2imax})}{n_2} \quad (5)$$

式中 n_2 ——仿真时间段内经过网格单元组的肥腔数量(除去第一个和最后一个)
 v_{1imax} ——第 i 个肥腔经过网格单元组 1 过程中网格单元组内颗粒速度总和的最大值, m/s
 v_{2imax} ——第 i 个肥腔经过网格单元组 2 过程中网格单元组内颗粒速度总和的最大值, m/s

为了保证在整个仿真试验过程持续供肥,且仍有足够多的余肥存于肥箱,将肥箱颗粒质量定为 10 kg;为保证肥料顺利排出,沿进气管和出肥管添加 Moving Plan 接触模型,模拟气力作用下肥料的运动,将肥料从肥腔中送出。仿真时间步长设置为瑞利时间步长的 15%,输出时间步长为 0.01 s,网格大小为 5.44 mm,仿真总时间 2.5 s。

3.3 试验结果与分析

试验结果如表 4 所示,方差、极差分析如表 5 所示。 A 、 B 、 C 分别为肥腔形状、前进速度、施肥量的水平值。

各因素对各穴排肥量变异系数的影响:前进速度和施肥量对各穴排肥量变异系数有显著影响($P < 0.05$),肥腔形状影响较显著($0.05 < P < 0.1$),主次关系为:前进速度、施肥量、肥腔形状。各边际均值结果表明,随前进速度的增加和施肥量的减小,各穴排肥量变异系数增大;不同肥腔形状下,圆弧形肥腔各穴排肥量变异系数最小,直线型(锐角)各穴排肥量变异系数最大。各穴排肥量变异系数分别为最大($A_3B_4C_1$)和最小($A_1B_1C_3$)时排肥量随时间变

化如图 8 所示。

各因素对扰动度的影响:前进速度对扰动度影响显著($P < 0.05$),肥腔形状对扰动度影响较显著($0.05 < P < 0.1$),施肥量对扰动度影响不显著($P > 0.1$),主次关系为:前进速度、肥腔形状、施肥量。各边际均值结果表明,随前进速度的增加,肥盘对箱体内部肥料扰动增加;不同肥腔形状下,圆弧形肥腔和直线型(锐角)肥腔对肥箱内肥料扰动较大,直线型(钝角)和抛物线型肥腔对箱体内部肥料的扰动相对较小。扰动度分别为最大($A_1B_4C_2$)和最小($A_2B_1C_3$)时经过网格单元组颗粒总速度随时间变化如图 9 所示。

3.4 讨论

分析 3 种因素影响排肥量稳定性的原因:当机具前进速度增大时,排肥盘相对转速增大,虽然排肥盘对肥箱内肥料扰动有一定的增大,但排肥盘经过肥箱时间变短,取肥时间变短,不同肥腔间肥量波动增大,造成排肥量稳定性变差;当施肥量较少时,肥

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Experiment layout and results					
试验序号	A	B	C	各穴排肥量 变异系数/%	扰动度 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	1	1	1	2.7	8.81
2	1	2	2	2.4	9.64
3	1	3	3	3.2	10.68
4	1	4	4	3.5	11.15
5	2	1	2	3.0	8.67
6	2	2	1	3.3	8.84
7	2	3	4	3.2	8.78
8	2	4	3	3.7	9.46
9	3	1	3	2.6	9.15
10	3	2	4	3.2	9.78
11	3	3	1	4.2	10.13
12	3	4	2	4.0	10.22
13	4	1	4	2.3	8.19
14	4	2	3	2.5	8.20
15	4	3	2	3.6	9.70
16	4	4	1	4.4	10.14

表 5 方差、极差分析结果

Tab.5 Results of variance and range analysis

指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P	k_1	k_2	k_3	k_4
各穴排肥量变异系数	A	6.275×10^{-5}	3	2.092×10^{-5}	3.535	0.088	0.030	0.033	0.035	0.032
	B	4.127×10^{-4}	3	1.376×10^{-4}	23.254	0.001	0.027	0.029	0.036	0.039
	C	1.048×10^{-4}	3	3.492×10^{-5}	5.901	0.032	0.037	0.033	0.030	0.031
扰动度	A	3.745	3	1.248	4.483	0.056	10.070	8.938	9.820	9.056
	B	5.729	3	1.910	6.858	0.023	8.705	9.115	9.823	10.243
	C	0.069	3	0.023	0.083	0.967	9.480	9.558	9.372	9.475

注: $P < 0.05$ (显著), $0.05 < P < 0.10$ (较显著)。

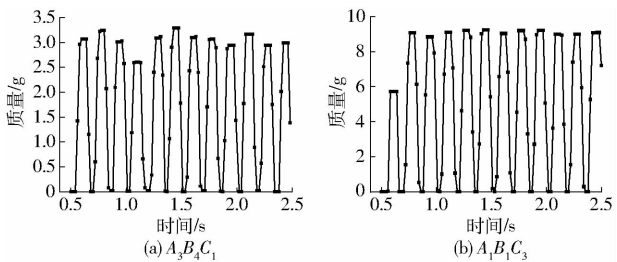


图 8 经过质量流量传感器的颗粒质量随时间的变化
Fig.8 Changes of mass of fertilizer through mass flow sensor with time

腔充肥口变小,且转动过程肥盘对肥腔的扰动变小,充肥性能变差,排肥量稳定性随之变差。

肥腔形状对排肥量稳定性的影响主要由于其对肥料扰动的不同造成的。在 4 种肥腔仿真试验中,圆弧形肥腔和直线型(锐角)肥腔对肥料的扰动最大,但圆弧形肥腔推动肥腔周围肥料向肥腔入口端运动(图 10a),肥腔内肥料在反作用力下被挤压,充肥更加充实;而直线型(锐角)肥腔周围肥料及肥腔表层肥料运动呈流线型(图 10c),肥盘转动过程肥腔底

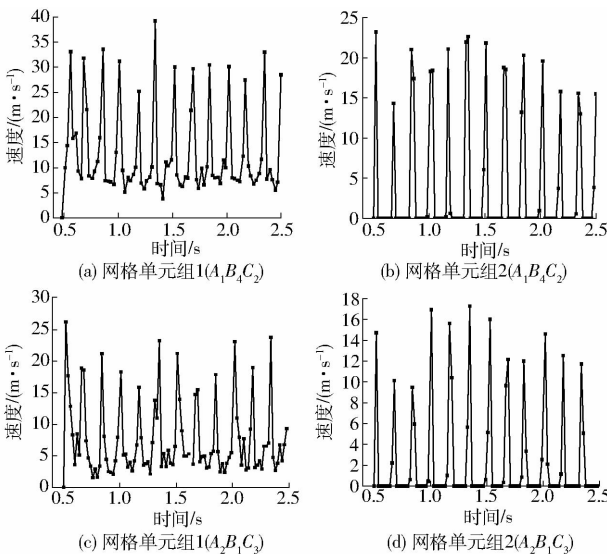


图 9 经过网格单元组颗粒总速度随时间变化曲线
Fig.9 Changing curves of velocity of fertilizer through grid bin group with time

部肥料受力较小,形成“外层实内层松”现象,充肥不足。而直线型(钝角)和抛物线型肥腔周围肥料

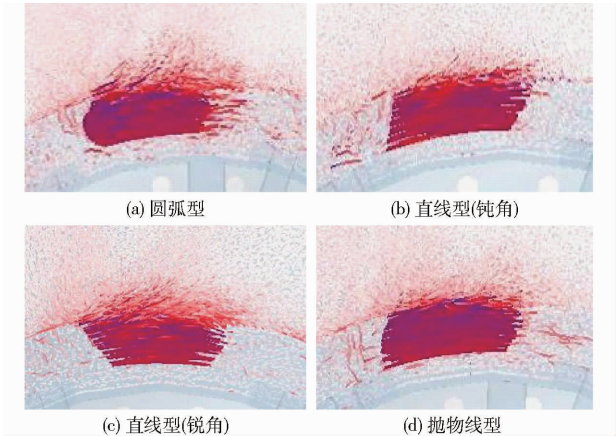


图 10 肥料扰动情况

Fig. 10 Fertilizer disturbance conditions

扰动情况虽然和圆弧型肥腔相似,但在肥腔出口端面底部形成“死角”(图 10b 和图 10d),肥料扰动量小,出现“入口松出口实”现象,充肥稳定性相对较差。

综上所述,充肥时间是影响排肥量稳定性最主要的因素,前进速度越小,充肥时间越长,排肥稳定性越好;在保证充肥时间的前提下,肥腔对肥料的扰动形式和扰动量的大小将影响排肥量稳定性,4 种肥腔形状中圆弧型肥腔排肥盘作业时充肥稳定性最好。

4 试验验证

加工了仿真所用的 4 种肥腔形状的排肥盘,在农业部保护性耕作研究中心排种器性能试验台上进行验证试验,试验装置如图 11 所示。为验证在高速低施肥量条件下的排肥性能,前进速度和施肥量均选取正交试验结果中相对较差水平,即输送带前进速度为 7 km/h,施肥量为 300 kg/hm²,当肥腔和入风口相通时,入风口处空气流速为 6.5 m/s。试验材料选取仿真所用的颗粒状复合肥,质量含水率为 4.37%。在装置运行平稳后,选取 50 穴肥料进行称量,记录排肥量随时间变化。施肥量差异在 ±5% 以内为合格,计算排肥量合格率和各穴排肥量变异系数。

试验所得圆弧型、直线型(钝角)、直线型(锐角)和抛物线型 4 种肥腔形状排肥盘的排肥量合格率分别为 94%、92%、92% 和 96%,各穴排肥量变异系数分别为 6.5%、7.1%、9.9% 和 8.3%。4 种肥腔形状的排肥盘排肥量合格率无显著差异,但均略

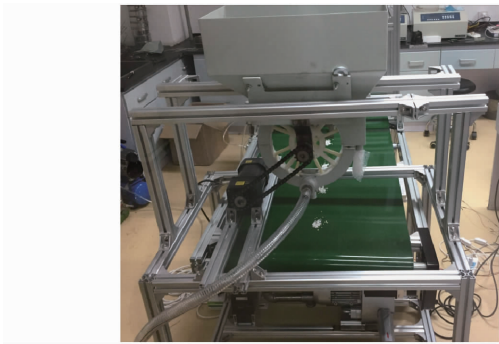


图 11 室内验证试验

Fig. 11 Indoor verification test

小于施肥量,主要由于肥腔空间小,肥料颗粒与颗粒以及颗粒与肥盘间间隙较大,肥腔内肥料堆积密度小于所测量大颗粒群堆积密度;受装置振动和制造精度等因素的影响,各穴排肥量变异系数均大于仿真试验结果,但不同肥腔形状对各穴排肥量变异系数的影响规律相同,均为圆弧型肥腔排肥稳定性最好。

5 结论

(1)为提高肥料利用效率,设计了一种腔盘式精量穴施肥装置,可实现精量、稳定取肥和低位、快速投肥。主要对排肥盘和肥箱进行了结构设计及理论分析,确定肥盘直径为 300 mm,肥腔个数为 8,单个肥腔体积调节范围为 1.75 ~ 7.00 cm³。重点对排肥盘肥腔结构进行了分析,得出肥腔结构是影响排肥盘取肥性能主要因素的结论。

(2)设计了圆弧型、直线型(钝角)、直线型(锐角)和抛物线型 4 种肥腔,选取前进速度、施肥量和肥腔形状为试验因素,以扰动度和各穴排肥量变异系数为评价指标,进行 3 因素 4 水平正交仿真试验,结果表明:随前进速度增大和排肥量减小,各穴排肥量变异系数增大,圆弧型肥腔排肥性能最好;前进速度和肥腔形状对肥料扰动度有显著影响,排肥盘经过箱体的时间、肥腔对肥料扰动的形式和扰动量是影响排肥量稳定性的主要原因。

(3)前进速度为 7 km/h、排肥量为 300 kg/hm² 条件下,对排肥装置进行台架试验,结果表明,圆弧型肥腔的各穴排肥量变异性系数最小(6.5%),排肥量合格率为 94%,与仿真结果相吻合,且满足玉米播种作业要求。

参 考 文 献

1 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)
2 JA V, GW R. Corn production as affected by tillage system and starter fertilizer[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(3): 532 - 540.
3 李前,陈延玲,陈晓超,等. 基肥、种肥施用技术对东北春玉米苗期生长及产量的影响[J]. 玉米科学, 2017(1): 147 - 152.

- LI Qian, CHEN Yanling, CHEN Xiaochao, et al. Effect of basal and seed fertilizers on seedling growth and grain yield in spring maize in northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2017(1): 147–152. (in Chinese)
- 4 邵蕾, 张民, 王丽霞. 不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 115–119. SHAO Lei, ZHANG Min, WANG Lixia. Effects of different controlled-release fertilizers and different applying methods on fertilizer use efficiency and nitrogen balance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 115–119. (in Chinese)
- 5 李坤, 袁文胜, 张文毅, 等. 玉米施肥技术与施肥机械的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 264–268. LI Kun, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. Research status and development trend of corn fertilizing technology and fertilizing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 264–268. (in Chinese)
- 6 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 671–679. SHI Changliang, GUO Yan, ZHU Junfeng. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 671–679. (in Chinese)
- 7 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214–221. LIU Qinpu. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 214–221. (in Chinese)
- 8 李立娜. 吉林玉米带典型区域地下水硝态氮污染状况调查分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2006. LI Li'na. Jilin corn belt typical regions groundwater Nitrate-nitrogen pollution condition diagnosis [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 9 张耀国, 曹成茂. 化肥深施对作物产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2000, 27(3): 288–290. ZHANG Yaoguo, CAO Chengmao. Influence of subsoil application on crop yield[J]. Journal of Anhui Agriculture University, 2000, 27(3): 288–290. (in Chinese)
- 10 姬长英, 吕正洋, 汤拯东, 等. 1GH-6型水田化肥深施机应用效果分析[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 34–37. JI Changying, LÜ Zhengpan, TANG Zhengdong, et al. Effect of application of fertilizer deep distributor model 1GH-6 on rice growing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 34–37. (in Chinese)
- 11 王云霞, 梁志杰, 崔涛, 等. 玉米分层施肥器结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 163–169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s025&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. 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. (in Chinese)
- 12 王振华, 张喜英, 陈素英, 等. 分层施肥及供水对冬小麦生理特性、根系分布和产量的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(6): 176–180. WANG Zhenhua, ZHANG Xiyi, CHEN Suying, et al. Effects of localized irrigation and fertilizing on physiological traits, root distribution and yield of winter wheat[J]. ACTA Agriculture Boreali-sinica, 2008, 23(6): 176–180. (in Chinese)
- 13 王志伟, 张银平, 刁培松, 等. 小麦深松分层施肥宽苗带免耕播种机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 102–106. WANG Zhiwei, ZHANG Yinping, DIAO Peisong, et al. Design and experiment on wheat precision no-tillage planter with subsoiling layered fertilization and wide seedling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 102–106. (in Chinese)
- 14 汤海涛, 马国辉, 罗锡文, 等. 水稻机械精量穴直播定位深施肥节氮栽培效果研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(1): 111–114. TANG Haitao, MA Guohui, LUO Xiwen, et al. Effects of mechanical precise hill-drop drilling and located depth-fertilization on rice nitrogen-saving[J]. Research of Agriculture Modernization, 2011, 32(1): 111–114. (in Chinese)
- 15 袁文胜, 李坤, 金诚谦, 等. 穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 145–149. YUAN Wensheng, LI Kun, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of hill placement fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 145–149. (in Chinese)
- 16 王金武, 周文琪, 王秀, 等. 基于三次拉格朗日曲线拟合轨迹的斜置式扎穴机构研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 79–85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170509&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.009. WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, WANG Xiu, et al. Oblique type pricking hole mechanism based on Lagrange curve for cubic fitting trajectory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 79–85. (in Chinese)
- 17 王金武, 周文琪, 王金峰, 等. 斜置式非规则齿轮行星轮系扎穴机构工作参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 66–70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170608&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.008. WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, WANG Jinfeng, et al. Experiment and optimization of working parameters for pricking hole mechanism of oblique type non-circular gears planetary system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 66–70. (in Chinese)
- 18 王金武, 刘亚华, 王金峰, 等. 全椭圆齿轮行星系液态肥深施机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 59–65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121011&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.011. WANG Jinwu, LIU Yahua, WANG Jinfeng, et al. Optimization design and experiment of liquid-fertilizer applying deep-fertilization mechanism for planetary elliptic gears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 59–65. (in Chinese)

- Electronics in Agriculture, 2003, 39(1): 39 – 59.
- 21 KÖRNER O, VAN STRATEN G. Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 18 – 30.
- 22 MA Guoqi, QIN Linlin, LIU Xinghua, et al. Modeling and predictive control of greenhouse temperature-humidity system based on MLD and time-series [C] // Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese. IEEE, 2015: 2234 – 2239.
- 23 冯培梯. 系统辨识 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.
- 24 张溥明, 王忠志. 系统模型与辨识 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.
- 25 WILLMOTT C J, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance [J]. Climate Research, 2005, 30(1): 79 – 82.
- 26 李莉, 李佳, 高青, 等. 昼夜温差对番茄生长发育、产量及果实品质的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2700 – 2706.
- LI Li, LI Jia, GAO Qing, et al. Effects of day and night temperature difference on growth, development, yield, and fruit quality of tomatoes [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2700 – 2706. (in Chinese)
- 27 张国祥, 刘星星, 张领先, 等. 基于 CFD 的日光温室温度与卷帘开度关系研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 279 – 286. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170935&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.035.
- ZHANG Guoxiang, LIU Xingxing, ZHANG Lingxian, et al. Relationship between indoor temperature and rolling shutter opening of solar greenhouse based on CFD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 279 – 286. (in Chinese)
- 28 毛罕平, 晋春, 陈勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望 [J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 1 – 13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180201&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.001.
- MAO Hanping, JIN Chun, CHEN Yong. Analysis and prospect of research progress on greenhouse environmental control methods [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 1 – 13. (in Chinese)
-
- (上接第 144 页)
- 19 李沐桐, 温翔宇, 周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 37 – 43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160906&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.006.
- LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 37 – 43. (in Chinese)
- 20 李沐桐. 玉米苗期精准穴施肥机构设计及试验 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- LI Mutong. Design and test analysis of maize precision fertilization mechanism of acupoint [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 21 张勋. 玉米穴播穴施肥装置的设计研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- ZHANG Xun. Research on the equipment of hill-drop drill and fertilization [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- 22 吴然然, 张刘扬, 钱梵梵, 等. 玉米穴施肥装置的设计与仿真 [J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(5): 941 – 946.
- WU Ranran, ZHANG Liuyang, QIAN Fanfan, et al. Design and simulation of cave-fertilizer apparatus for maize [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(5): 941 – 946. (in Chinese)
- 23 钱梵梵. 玉米穴施肥机的设计与试验 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- QIAN Fanfan. The design and test of corn hole fertilizing machine [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 24 陈艳萍, 肖尧, 孔令杰, 等. 缓释肥施用量对超高产夏玉米氮素积累分配的影响 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(27): 34 – 40.
- CHEN Yanping, XIAO Yao, KONG Lingjie, et al. Effects of slow-release fertilizer treatments on nitrogen accumulation and distribution of super-high yield summer maize [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(27): 34 – 40. (in Chinese)
- 25 陈国清, 肖尧, 景立权, 等. 不同缓释肥水平对超高产夏玉米产量及群体质量的影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 182 – 187.
- CHEN Guoqing, XIAO Yao, JING Liqun, et al. Effects of slow-release fertilizer treatments on yield and population quality of super-high yield summer maize [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30): 182 – 187. (in Chinese)
- 26 LANDRY H, THIRION F, LAGUË C, et al. Numerical modeling of the flow of organic fertilizers in land application equipment [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 51(1–2): 35 – 53.
- 27 刘彩玲, 黎艳妮, 宋建农, 等. 基于 EDEM 的离心圆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 experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32 – 39. (in Chinese)