

基于离散元的肥料流重构玉米分层施肥装置设计与试验

王守江^{1,2} 颜丙新² 李立伟² 董建军² 武广伟^{1,2}

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 为了提高玉米分层施肥的比例分肥精度以及肥层间覆土的稳定性,设计了一种肥料流重构的分层施肥装置,利用离散元法确定了圆弧散肥板半径的最佳值为 20 mm,并进行了肥料流重构与未重构的对比试验,试验结果表明:经过肥料流重构后的作业效果较优,且对 7:3 和 8:2 两种比例分肥有较好的稳定性。通过对分层施肥开沟运动学分析,确定开沟器入土角、浅层肥口的横向距离和机具作业速度为分层施肥效果的影响因素,建立了各因素与深、浅层肥深度变异系数的回归模型,并采用响应面法分析了各因素交互作用对试验指标的影响,运用多目标优化设计方法获得分层施肥装置的最佳作业参数:入土角为 39°、横向距离为 174 mm、作业速度为 4.3 km/h,根据优化结果加工分层施肥装置并进行田间试验,试验结果表明:深层肥深度变异系数为 4.78%,浅层肥深度变异系数为 6.41%,分层施肥作业稳定性可靠。

关键词: 玉米; 肥料流重构; 分层施肥装置; 离散元

中图分类号: S224.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0138-13

OSID:



Design and Experiment of Corn Layer Fertilization Device with Fertilizer Flow Reconstruction Based on Discrete Element Method

WANG Shoujiang^{1,2} YAN Bingxin² LI Liwei² DONG Jianjun² WU Guangwei^{1,2}

(1. Mechanical and Electronic Engineering Institute, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: To enhance the accuracy of proportional fertilizer distribution for corn layered fertilization and the stability of soil coverage between layers, a layered fertilizer flow reconstruction apparatus was developed. The optimal diameter of the circular bulk fertilizer disc was determined to be 20 mm by using the discrete element method. Subsequently, a comparative test was carried out between fertilizer flow reconstruction and non-reconstruction. The results demonstrated that after fertilizer flow reconstruction, the operational efficiency was improved, and the stability of both 7:3 and 8:2 ratio fertilizers was enhanced. By conducting kinematic analysis of ditching for layered fertilization, it was established that the trencher's angle, the lateral distance of the shallow fertilizer opening, and the machine's operating speed were key factors influencing the efficacy of layered fertilization. A regression model was formulated to correlate the variation coefficient of each factor with the depth of deep and shallow fertilizers. The impact of the interaction of each factor on the test index was then analyzed by using the response surface method. By using the multi-objective optimization design method, the optimum operation parameter insertion angle of the layered fertilizer applicator was 39°, the transverse spacing was 174 mm, and the operation speed was 4.3 km/h. Based on the optimized parameters, the layered fertilization device was manufactured, and field tests were conducted. The results revealed that the variation coefficient of deep fertilizer depth was 4.78%, while that of shallow fertilizer was 6.41%. The stratified fertilization operation exhibited stability and reliability. The research result can offer a theoretical and methodological foundation for the design of layered fertilization devices.

Key words: corn; fertilizer flow reconstruction; layer fertilizer device; discrete element method

收稿日期: 2023-12-27 修回日期: 2024-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701000)、国家农业重大科技项目(20221805)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02)

作者简介: 王守江(1996—),男,硕士生,主要从事农机装备智能化研究,E-mail: 18894032331@163.com

通信作者: 武广伟(1981—),男,研究员,博士,主要从事农机智能装备研究,E-mail: wugw@nrcita.org.cn

0 引言

基肥是玉米施肥作业的重要环节,占施肥总量的60%~70%,采用科学的施肥技术提高玉米基肥利用率和降低施用量有十分重要的意义^[1]。分层施肥技术依据玉米根系生长特点,将肥料按比例一次性施入不同深度的土壤,保证不同生长期的玉米可以吸收足量的养分,可以有效实现化肥的“减量增效”^[2-4]。

分层施肥装置是实现分层施肥的重要机具,其关键在于精确调节各层肥量、保持各肥层覆土厚度。对于各层分肥比例需稳定调节的问题,相关学者进行了深入研究,王云霞等^[5]设计了可调式分层施肥器,通过改变分层施肥器的安装角度和施肥片的工作长度达到调节肥量比例的目的;杨庆璐等^[6]设计了一种气力式肥料变量调节装置,通过调整相邻出肥口的面积来调节肥量比例;丁尚鹏^[7]通过优化外槽轮排肥器,改变槽轮工作长度的比值,实现种肥、基肥按比例调节。在一定程度上可以实现分肥比例调节,但未充分考虑肥料在肥管内的流动状态,导致分肥比例调节稳定性差。为了达到肥料分层施入的效果,姚万生等^[8]设计了一种阶梯状施肥开沟器,利用土壤回流到各个阶梯口的时间差进行分层施肥。赵艳忠等^[9]利用弧式施肥铲施放底肥,直斜错位圆盘开沟器施放口肥,通过调整底肥口和口肥的竖直距离,完成分层施肥。张俊雄等^[10]将开沟器侧面肥管内腔分割成4个排肥通道,利用每个通道的排肥口在竖直方向位置不同,形成肥料分层施放的效果。为了进一步提高分层施肥技术作业效果,学者对分层施肥装备关键部件进行了改进,于春玲^[11]为了提高分层施肥装备的排肥精度,设计了一种齿轮式防堵排肥器,改变了排肥脉动现象;宋少龙^[12]根据雄性蜣螂的弯曲角突具有优良破土能力,采用仿生学方法将角突曲线作为分层施肥开沟器的前刃形状,提高开沟的破土能力;刘晓东等^[13]在开沟器后面焊接了具有一定角度的扇形回土板,以此加快土壤快速覆盖下层肥料。但各肥层排肥口设计不合理,增加开沟器数目导致整机作业阻力增大,肥料分层施肥效果不佳,各肥层覆土稳定性差。

针对上述问题,本研究设计一种肥料流重构的分层施肥装置,通过对肥料流进行重构,提高比例分肥的精度和稳定性;研究分层施肥的土壤运动规律,设计分层施肥开沟器,开展相应的田间试验,并对相应的结构参数进行优化设计,实现玉米基肥分层施放的精量、稳定。

1 分层施肥装置结构与工作原理

分层施肥装置由分层施肥开沟器和肥料比例分流装置2部分组成,这两个部件由螺栓连接。其结构如图1所示,主要包括开沟器、圆肥管与方肥管转接头(下文称为转接头)、肥料比例调节装置和深浅层肥料分流装置。

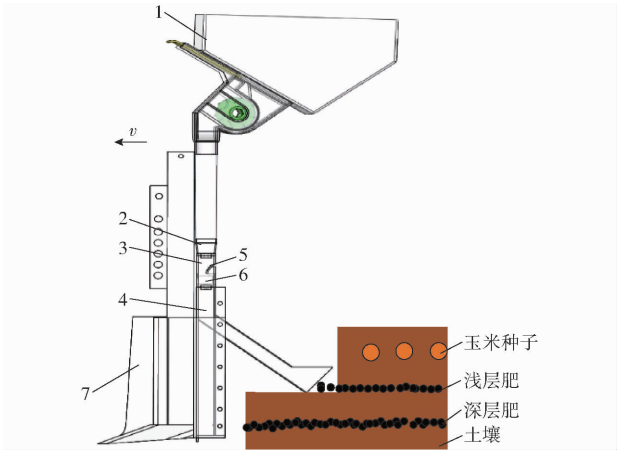


图1 分层施肥装置工作原理

Fig. 1 Working principle diagram of layered fertilization device

1. 排肥装置 2. 转接头 3. 肥料比例调节装置 4. 深浅层肥料分流装置 5. 圆弧散肥板 6. 肥料比例调节板 7. 分层施肥开沟器

如图1所示,在作业过程中,开沟器前角先切入土壤,破开团聚的土块,而后开沟器前刃从前角插入的地方切开竖直方向的土壤,形成肥沟的初型。随着机具继续前进,开沟器的侧翼板将土壤推向两侧,形成稳定的深层肥床。在开沟作业同时,肥料进入肥料比例调节装置进行肥料流重构:通过转接头使散乱的肥料流趋于密集,竖直掉落在圆弧散肥板上,经过与圆弧散肥板曲面的撞击后均匀分散,肥料比例调节装置按设定的比例对肥料进行分流,最后通过深浅层肥料分流装置分别施入不同深度的土壤。

2 关键部件设计

2.1 分层施肥开沟器

在分层施肥开沟作业过程中,开沟器结构是影响作业性能的重要因素。研究发现,不同开沟器的前刃曲线对开沟作业时所受的阻力有不同的影响^[14]。常用于开沟器前刃的曲线有幂函数曲线、指数函数曲线和对数函数曲线^[15],根据分层施肥开沟器要求破土能力强、回土快,本研究采用指数函数曲线作为开沟器前刃曲线。建立如图2所示的直角坐标系,设曲线起点M坐标为 (x_m, y_m) ,曲线终止点N坐标为 (x_n, y_n) 。

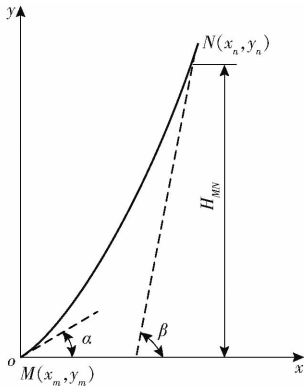


图 2 开沟器前刃曲线示意图

Fig. 2 Diagram of front edge curve of trencher

设分层施肥开沟器前刃曲线方程为

$$y = a^x - 1 \tag{1}$$

式中 a ——指数函数底数,大于 1

由式(1)可得

$$\begin{cases} y'_M = \tan\alpha = a^{x_m} \ln a \\ y'_N = \tan\beta = a^{x_n} \ln a \\ y_n - y_m = H_{MN} \end{cases} \tag{2}$$

式中 α ——曲线起始角, ($^\circ$)

β ——曲线终止角, ($^\circ$)

H_{MN} ——分层施肥深度, cm

y'_M ——曲线点 M 的导数

y'_N ——曲线点 N 的导数

联立式(1)、(2)可得

$$a = e^{\frac{\tan\beta - \tan\alpha}{H_{MN}}} \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)可得分层施肥开沟器前刃曲线方程为

$$y = (e^{\frac{\tan\beta - \tan\alpha}{H_{MN}}})^x - 1 \tag{4}$$

由式(4)可得,分层施肥开沟器前刃曲线的结构由曲线起始角 α 、曲线终止角 β 以及分层施肥深度 H_{MN} 决定。对分层施肥开沟器作业状况进行受力分析,如图 3 所示。

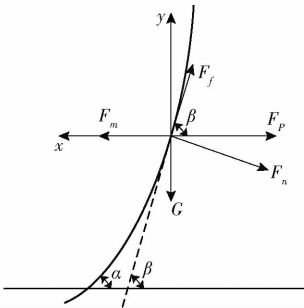


图 3 分层施肥开沟器前刃受力分析

Fig. 3 Analysis of force on front edge of layered fertilization trencher

根据分层施肥开沟器受力分析,建立平衡方程

$$F_m = F_p + F_f \cos\beta + F_n \sin\beta \tag{5}$$

$$G + F_n \cos\beta = F_f \sin\beta \tag{6}$$

其中

$$F_f = \mu_1 F_n \tag{7}$$

式中 F_m ——拖拉机拉力, N

F_p ——土壤对前刃阻力, N

F_f ——土壤对前刃摩擦力, N

F_n ——土壤对前刃法向力, N

G ——土壤对前刃重力, N

μ_1 ——土壤与分层施肥开沟器的摩擦因数

联立式(5)~(7)可得

$$\beta = \arccos \frac{\mu_1 (F_m - F_p) - G}{(1 + \mu_1^2) F_n} \quad (0^\circ < \beta < 90^\circ) \tag{8}$$

由式(8)可得,分层施肥开沟器前刃曲线终止角越大,分层施肥开沟器所受阻力越小。根据文献[16-17]可知,当前刃曲线终止角大于土壤摩擦角才具有滑切土壤的能力。查阅对比文献[18-19],土壤与作业机具间的摩擦角最小值为 10° ,因此为了保证分层施肥开沟器所受土壤阻力最小,前刃曲线终止角取 80° 。开沟器前刃曲线的起止角对滑切土壤的作业性能也有重要影响,为了减少作业阻力,依据文献[20]前刃曲线起止角取 30° 。根据玉米分层施肥农艺要求,分层施肥深度为 20 cm。

开沟器开沟作业对土壤的扰动直接影响分层施肥的作业质量。将土壤离散化分析,当开沟器入土后,土壤颗粒沿入土角被抬升,其受力情况如图 4 所示,土壤颗粒受力包括:开沟器前角的支持力 N 、沿斜面的摩擦力 f 和自身的重力 mg 。对土壤颗粒进行运动学分析,其中 θ 为开沟器入土角。

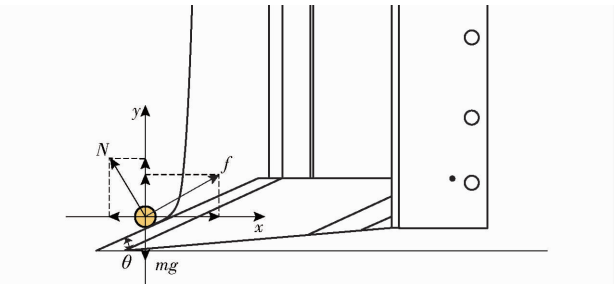


图 4 分层施肥开沟器受力分析

Fig. 4 Force analysis of layer fertilizing trencher

在 x 方向上运动微分方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = f \cos\theta - N \sin\theta \tag{9}$$

在 y 方向上运动微分方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = f \sin\theta + N \cos\theta - mg \tag{10}$$

对式(9)、(10)积分得出土壤颗粒在 x 、 y 方向速度方程

$$v_x = t \frac{f}{m} \cos\theta - t \frac{N}{m} \sin\theta + C_1 \tag{11}$$

$$v_y = t \frac{f}{m} \sin\theta + t \frac{N}{m} \cos\theta - gt + C_2 \tag{12}$$

式中 t ——土壤颗粒运动时间,s

$C_1、C_2$ ——积分常数

对式(11)、(12)进一步积分可得土壤颗粒在 $x、y$ 方向的位移方程

$$x = \frac{1}{2}t^2 \frac{f}{m} \cos\theta - \frac{1}{2}t^2 \frac{N}{m} \sin\theta + C_1t + C_3 \tag{13}$$

$$y = \frac{1}{2}t^2 \frac{f}{m} \sin\theta + \frac{1}{2}t^2 \frac{N}{m} \cos\theta - \frac{1}{2}gt^2 + C_2t + G_4 \tag{14}$$

式中 $C_3、G_4$ ——积分常数

通过对开沟器前角上方土壤颗粒的运动分析发现,开沟器入土角对土壤颗粒在 $x、y$ 方向的运动速度和位移均有影响,进而影响土壤的回流。

当土壤颗粒运动到开沟器的翼板两侧时,在水平面内的受力情况如图 5 所示,主要有开沟器翼板对土壤颗粒的支持力 N_2 和摩擦力 F_1 ,边缘土层对土壤颗粒的支持力 N_1 和摩擦力 F_2 。在合力的作用下,土壤颗粒向开沟器运动的反向移动。当土壤颗粒运动至翼板边缘,失去开沟器翼板的支持力后,在土层边缘的支持力 N_3 和自身重力的作用下,土壤颗粒流向肥沟内。

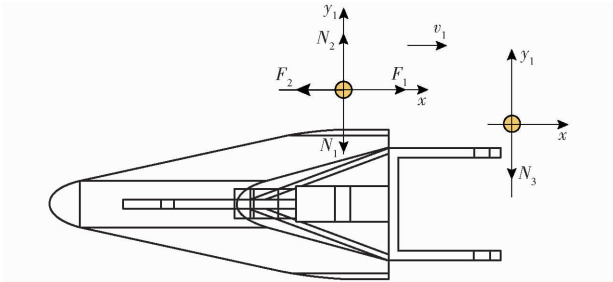


图 5 土壤颗粒受力分析
Fig. 5 Force analysis of soil particles

图 6 为土壤颗粒离开翼板后的运动轨迹。当 L_1 较短,翼板两侧土壤没有足够的时间回流,导致 L_3 的覆土深度不够,造成浅层肥料深施;当 L_1 较长,翼板两侧土壤充分回流,导致 L_3 的覆土深度大于农艺要求,造成浅层肥料浅施。综合上述分析,浅层肥口外伸的横向距离是影响分层施肥的重要因素。

2.2 肥料比例调节装置

肥料颗粒在肥管内的运动复杂多变,受多方面影响:肥料颗粒本身的物理参数影响,包括颗粒形状、直径、含水率、密度、弹性模量、泊松比等参数;施肥机械的影响,包括排肥器类型、排肥器安装角度、肥料被排肥器排出的速度、肥管材料和形状;施肥作业过程的影响,包括机具作业速度、振动等。因此,肥管内肥料颗粒分布散乱无序、肥料流运动复杂,直

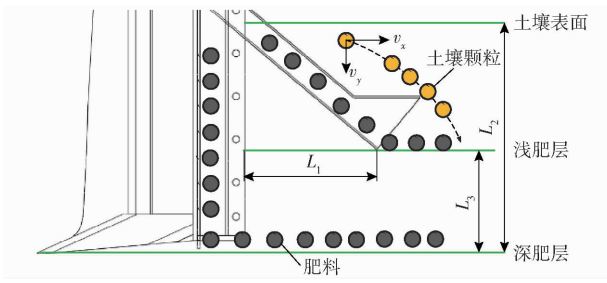


图 6 分层施肥覆土原理图
Fig. 6 Schematic of layered fertilization and soil covering

接按肥管截面积比值进行肥量比例调节的方法随机性大、稳定差。为了解决肥料颗粒分布散乱无序、肥料流运动复杂导致肥量比例调节不佳的问题,本研究设计了一种肥料流重构机构,主要结构包括转接头、肥料比例调节装置和深、浅层肥料分流装置。在施肥作业中,肥料经排肥器排出时为团簇状,经过肥管内壁和肥料颗粒之间相互碰撞后分散,从转接头大口流进,随着转接头直径逐渐收缩,即肥料通过的肥管截面积减小。与前面肥管相比,相同数量的肥料颗粒通过转接头这段“肥管”的空间减少,肥料颗粒随着转接头的形状变化趋于集中。当肥料流竖直下落与圆弧散肥板撞击后均匀分布在肥管横截面内;最后肥料经过肥料比例调节板分流,进入深浅层肥料分流装置,如图 7 所示。

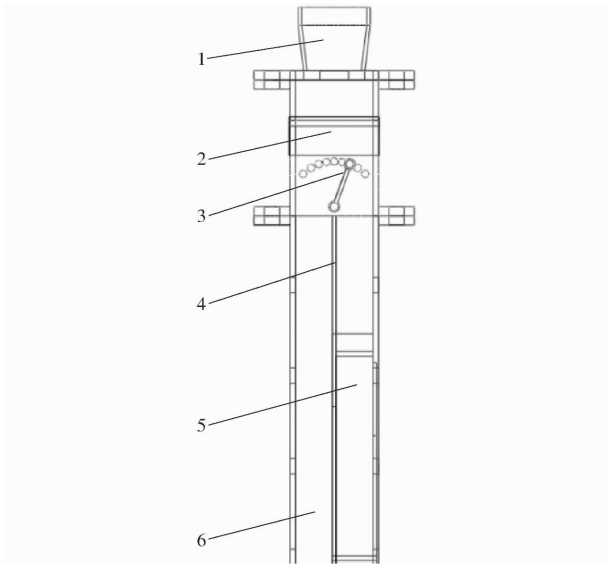


图 7 肥料比例分流装置结构图
Fig. 7 Structure diagram of fertilizer proportion diversion device

- 1. 转接头 2. 散肥板 3. 肥料比例调节板 4. 深、浅层肥料通道隔板 5. 浅层肥料通道 6. 深层肥料通道

本研究设计了一种转接头,利用大口径圆管承接肥料,通过将肥管直径逐渐收缩,使肥料通过的横截面积减小,散乱的肥料颗粒趋于集中。在作业过程中,当机具速度增加时,需要相应提高排肥轴转速

以满足施肥农艺要求,而排肥轴转速增加使单位时间内排入肥管内肥量增加。当较多的肥料进入转接头不能及时通过会造成壅肥现象,导致部分区域施肥不足。因此,在设计转接头出口直径时,除了考虑使肥料颗粒密集通过,还需考虑直径过小导致壅肥现象。为了适配多种排肥器,与一般排肥器的排肥口直径相近,将转接头入肥口直径设为 42 mm,出肥口直径设为 32 mm。

肥料流经转接头后掉落在圆弧散肥板上,与圆弧散肥板撞击前后的夹角相同^[21],但与圆弧面撞击的位置不同,使密集的肥料经过撞击后分散开,而分散效果与圆弧半径有关^[22],其散肥原理如图 8 所示。分散后的肥料颗粒经过肥料比例调节板分流,进入深浅层肥料分流装置。肥料比例调节板结构由 2 个直径为 3 mm 的空心圆柱和长方形板组成,实物通过 3D 打印而成。其中一个孔通过螺栓直径为 2 mm 的长螺栓连接,可使肥料比例板左右旋转,结构示意图如图 9 所示。

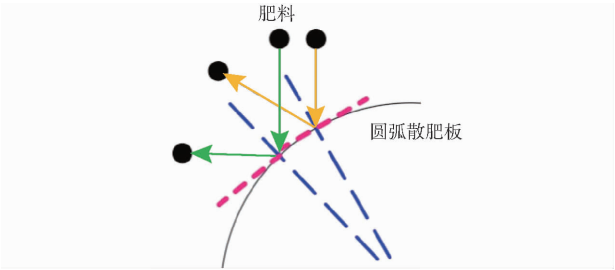


图 8 散肥原理图
Fig. 8 Schematic of dispersed fertilizer

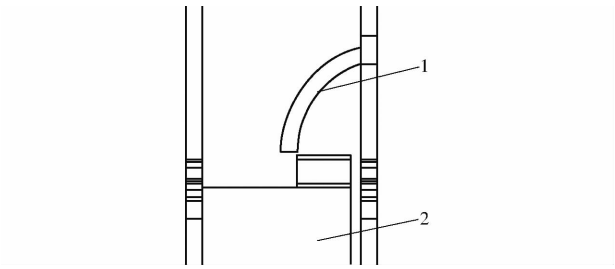


图 9 按比例分肥结构示意图
Fig. 9 Schematic of proportional fertilizer distribution structure
1. 圆弧散肥板 2. 肥料比例调节板

图 10 为各层肥料的比例调节原理图,将 L_{AB} 等分成 10 等份,通过调节肥料比例调节板在 L_{AB} 的位置来改变矩形 $AFED$ 和矩形 $BFEC$ 的面积比,实现深、浅肥量按比例(p)分肥,其中矩形 $AFED$ 和矩形 $BFEC$ 分别与深、浅层肥料通道相连。其中比例 p 计算式为

$$p = \frac{L_{AF}}{L_{FB}} = \frac{S_{\square AFED}}{S_{\square BFEC}}$$

(15)

肥料颗粒从分肥比例装置进入肥料比例分流装置,保证肥料从浅层分肥通道顺利流出是实现分层

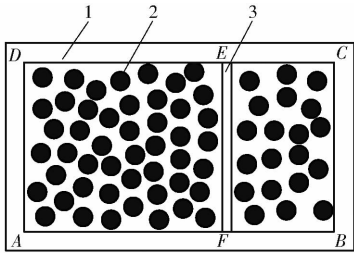


图 10 分肥原理图
Fig. 10 Fertilizer distribution principle diagram
1. 肥管 2. 肥料 3. 肥料比例调节板

施肥关键,如图 11 所示,对浅层肥口肥料颗粒进行运动学分析。

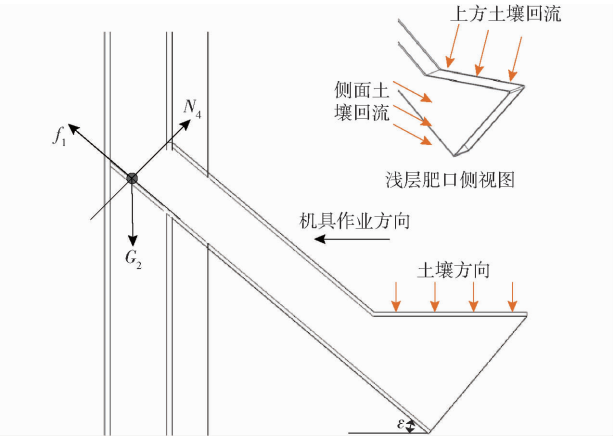


图 11 浅层肥料颗粒运动学分析
Fig. 11 Kinematic analysis of shallow fertilizer particles

通过对浅层肥口的肥料进行动力学分析,建立平衡方程

$$\begin{cases} G_2 \sin \varepsilon = f_1 \\ G_2 \cos \varepsilon = N_4 \\ f_1 = \mu_2 N_4 \end{cases}$$

(16)

式中 f_1 ——斜板对肥料颗粒摩擦力,N
 N_4 ——斜板对肥料支持力,N
 ε ——浅层肥口与水平面夹角,(°)
 G_2 ——颗粒肥料重力,N
 μ_2 ——肥料与斜板摩擦因数

由式(16)可得,肥料在浅层肥口能否顺利流出与浅层肥口和水平夹角 ε 相关。本研究设计的浅层肥口和水平面夹角 ε 为 50° ,即肥料与浅层肥口装置的静摩擦因数为 1.192,远大于静平衡的实际静摩擦因数 0.3;因此,肥料在浅层肥口处可以顺利流出。

此外,本研究设计了浅层排肥口水平外伸和倾斜侧板,以阻挡上方和侧面回流的土壤,从而避免浅层肥口被土壤堵塞,保证浅层肥口畅通。

3 离散元 (DEM) 仿真参数设定

随着计算机技术的发展,基于离散元法的数值

仿真技术在农业机械装备研究中得到了广泛应用^[23-24],离散元颗粒模型的物理参数是开展仿真研究的关键因素^[25]。本研究采用直接测量、查阅文献和参数标定相结合的方法来获取肥料和土壤颗粒的相关参数。

3.1 肥料模型参数测量

以安徽省司尔特肥业有限公司所产复合肥为试验化肥,测取相关参数。根据肥料三维建模法,随机取出 100 粒肥料,利用电子游标卡尺测量,取肥料颗粒的平均长度为 3.78 mm、宽为 3.43 mm、高为 3.19 mm。根据公式

$$D = \sqrt[3]{HIL} \tag{17}$$

$$\Delta = \frac{D}{L} \times 100\% \tag{18}$$

式中 H ——肥料颗粒高度,mm
 I ——肥料颗粒宽度,mm
 L ——肥料颗粒长度,mm
 D ——肥料颗粒等效直径,mm
 Δ ——肥料颗粒球形率, %

计算得肥料等效直径为 3.45 mm,球形率为 91.5 %。

肥料含水率检测用干燥法,试验室所用干燥箱为上海一恒科学仪器公司所生产的 DHG - 9240A 型电热鼓风干燥箱。设定干燥箱内温度为 105℃,在常压下进行干燥,称量前后两次质量不变,可记为干燥后的化肥试样质量。

肥料的静摩擦因数利用斜面法检测,其检测原理如图 12 所示。根据斜面法自制静摩擦因数试验台,如图 13 所示,将肥料颗粒放至于试验台斜面上,随着舵机的转动,试验台缓慢上升。利用高速摄影记录肥料颗粒发生相对滑动的瞬间转角,代入公式

$$f' = G_4 \sin \theta_1 \tag{19}$$

$$N_5 = G_4 \cos \theta_1 \tag{20}$$

$$f_2 = \mu_3 N_5 \tag{21}$$

式中 θ_1 ——摩擦角, (°)
 G_4 ——颗粒肥料重力, N

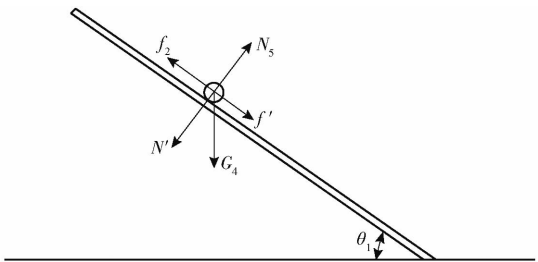


图 12 斜面法原理图

Fig. 12 Schematic of inclined plane method

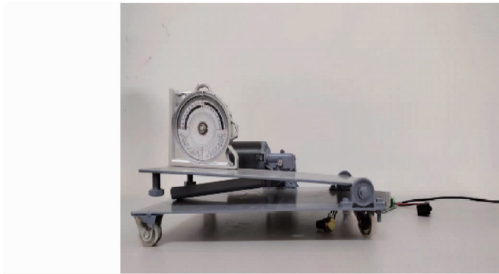


图 13 静摩擦因数试验台

Fig. 13 Static friction coefficient test bench

μ_3 ——静摩擦因数
 f' ——颗粒肥料沿斜面分力, N
 f_2 ——颗粒肥料摩擦力, N
 N_5 ——颗粒肥料所受支持力, N

可求得静摩擦因数,多次测量取平均值。

3.2 肥料仿真模型参数标定

颗粒肥料形成堆积角时的运动复杂多变,可以充分表征颗粒肥料特性。因此,本研究利用肥料堆积角进行仿真参数标定,如图 14 所示。通过自制的堆积角试验台进行肥料堆积角试验,分别在成型的肥料堆积角 4 个方向采集图像,利用 Matlab 进行灰度化和二值化处理。为了减少肥料颗粒轮廓影响、准确提取肥料堆积角轮廓曲线,采用闭运算除去图中肥料堆内轮廓线条。通过提取肥料堆的轮廓边缘点进行最小二乘法拟合,基于线性拟合方程计算出肥料实际堆积角,多次测量求取平均值。

结合实测肥料参数及参考文献[26-29],在

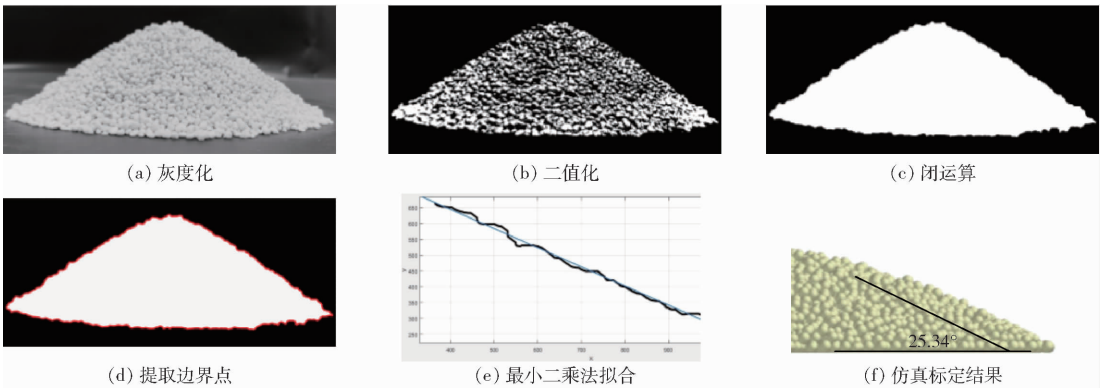


图 14 肥料堆积角标定

Fig. 14 Calibration of fertilizer stacking angle

EDEM 软件中进行参数标定,利用后处理功能对仿真环境堆积角测定,并与实际堆积角进行比较。通过多次仿真试验结果标定,实际堆积角为 26.09° ,仿真环境堆积角为 25.34° ,相对误差为 2.87% ,标定结果与实际结果相近,具体参数如表 1 所示。

表 1 肥料离散元仿真参数

Tab. 1 Fertilizer discrete element simulation parameters		
项目	参数	数值
肥料颗粒	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 930
	剪切模量/Pa	2.0×10^8
	泊松比	0.3
肥料-肥料	静摩擦因数	0.65
	滚动摩擦因数	0.05
	碰撞恢复系数	0.02
分肥比例装置	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 830
	剪切模量/Pa	7.27×10^{10}
	泊松比	0.35
肥料-分肥比例装置	静摩擦因数	0.3
	滚动摩擦因数	0.01
	碰撞恢复系数	0.37

4 分层施肥装置性能试验

4.1 比例分肥装置性能试验

4.1.1 仿真试验

通过理论分析难以获得肥料比例调节装置的较优结构参数,不同于不同深度土壤颗粒,颗粒肥料本身物理特性差异不大,易于获得物理参数,建立仿真模型便捷,计算过程简单。

图 15 为仿真试验中任意时刻肥管截面图,肥料经过排肥器排入肥管为团簇状,团簇状肥料形成的肥料流是不完全连续的;此外,肥料经过肥管碰撞和肥料颗粒间的相互作用散乱分布在肥管。直接按肥管面积比进行肥量比例调节容易造成肥量比例精度低、不稳定。为了改变肥料流散乱无序造成分肥比例精度低、不稳定的现象,本研究设计了肥料流重构装置,以提高分肥比例作业性能。

肥料从转接头大口进入,转接头直径逐渐减小,使肥料颗粒通过肥管空间减少而变得密集,改变其散乱的状态;另一方面,直径过小会造成壅肥现象,如图 16 所示。因此,本研究初步以转接头出肥口半径为 10 mm,半径逐步增加 1 mm,建立不同的转接头模型,通过仿真试验获得最佳出肥口半径。为了满足施肥农艺要求,当机具速度发生变化时,需要匹配相应的排肥转速,而排肥转速变化使单位时间内排入肥管的肥量改变。因此,适应不同肥量的肥料比例调节能力是评价该肥料比例调节装置的重要指标,设定排肥转速范围为 $30\sim90\text{ r/min}$ 。

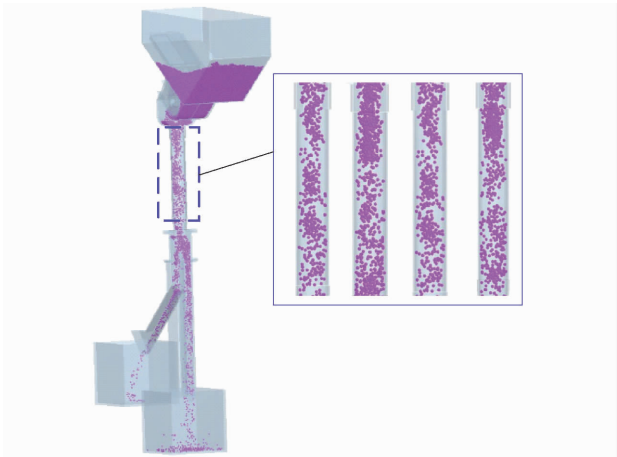


图 15 任意时刻肥管截面图

Fig. 15 Cross-section diagram of tube at any time

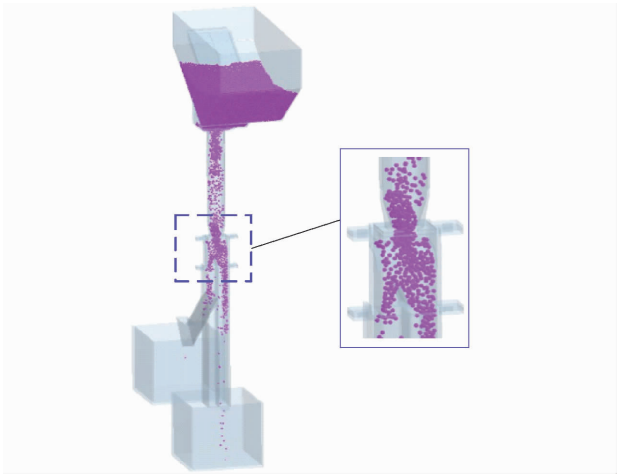


图 16 转接头截面图

Fig. 16 Section diagram of adapter

通过仿真试验分析发现,随着排肥转速增加,外槽轮排肥脉动现象减弱,密集团簇颗粒肥料间隔缩短,排肥口过小容易造成壅肥现象,当出肥口半径为 10、11、12 mm,排肥转速为 40 r/min 时,在出肥口处出现壅肥现象,部分肥料颗粒停滞在出肥口处,造成实际施肥量少于目标施肥量。当排肥口半径为 13、14 mm,随着排肥转速增加,在排肥转速为 70 r/min 时出现壅肥现象。当出肥口半径为 15、16 mm,没有明显的壅肥现象,但出肥口半径为 15 mm 时,随着排肥转速增加,团簇肥料较为密集时,通过转接头有极少数壅肥情况。因此在保证肥料颗粒变得密集的情况下,避免出现壅肥现象,本研究出肥口半径取 16 mm。

图 17 为颗粒肥料流的运动矢量图,肥料颗粒通过转接头与圆弧散肥板碰撞后分散。根据理论分析,圆弧散肥板的半径是影响比例分肥精度的重要因素。因此,本研究建立圆弧散肥板半径为 15、20、25 mm 的比例分肥装置模型,利用 EDEM 软件开展仿真试验,在深浅肥口分别设置一个 Geometry Bin,

实时测取颗粒数量。在排肥转速 30 ~ 90 r/min 范围内,记录任意 3 个时刻深浅肥口流出肥料颗粒数目,计算肥量比例平均值。

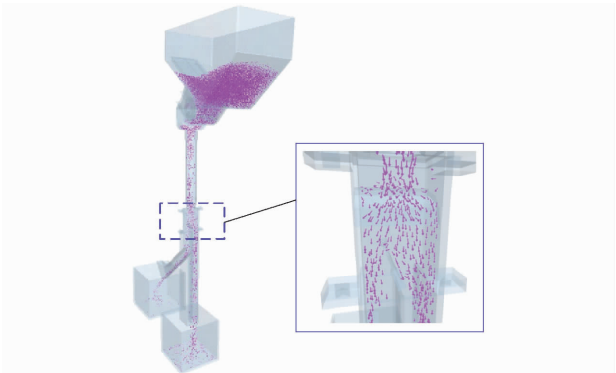


图 17 颗粒肥料流运动矢量图

Fig. 17 Vector diagram of particle fertilizer flow

设置仿真模型分肥比例为 7:3,深浅肥口肥量比仿真试验结果如表 2 所示。通过数据分析发现,当圆弧散肥板半径为 15 mm 时,分肥比大于目标比值 2.33,且相比另外两个试验水平的差值最大。当圆弧散肥板的半径为 20 mm 时,随着排肥转速增大,排肥性能逐渐趋向目标值,且与目标值的最大差值均小于另外两个试验水平。当圆弧散肥板的半径为 25 mm 时,排肥转速为 60、70、80、90 r/min 的分肥准确度较高,但排肥转速为 30、40、50 r/min 分肥差值较大。经过分析可得,当圆弧散肥板的半径为 20 mm 时,比例分肥准确度较高,且在不同的转速下分肥稳定性高。

表 2 分肥比例为 7:3 的深浅肥口肥量比仿真试验结果

Tab. 2 Result of simulation test with ratio of 7:3

散肥板半 径/mm	排肥转速/(r·min ⁻¹)						
	30	40	50	60	70	80	90
15	2.70	2.63	2.65	2.57	2.54	2.51	2.49
20	2.40	2.39	2.35	2.30	2.29	2.32	2.32
25	2.50	2.60	2.50	2.32	2.29	2.33	2.31

4.1.2 台架试验

EDEM 离散元仿真试验是在理想环境下进行,为了进一步验证仿真试验结果,本研究搭建试验台架进行验证试验。根据玉米分层施肥农艺要求,深浅层肥料比一般为 7:3,不同地区的土壤肥沃程度不同,部分地区深浅层肥料比例为 6:4 和 8:2,因此

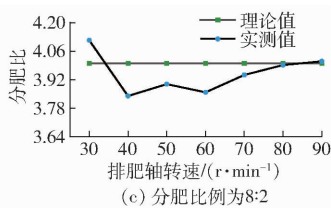
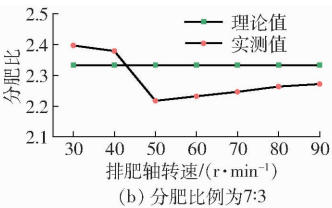
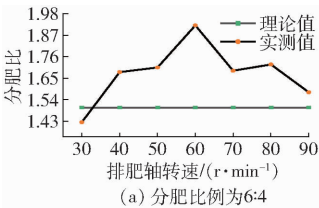


图 20 肥料流重构的分肥比变化曲线

Fig. 20 Change curves of fertilizer ratio in fertilizer flow reconstruction

本研究对 6:4 和 8:2 两种比例分肥的作业性能进行检验。

如图 18 所示,加工比例分肥装置,搭建试验台架,开展肥料流重构的肥量比例调节装置台架试验。为了验证肥料流重构的肥料比例调节装置作业的可靠性,本研究用普通管替换转接头,并去掉圆弧散肥板,进行对照试验。

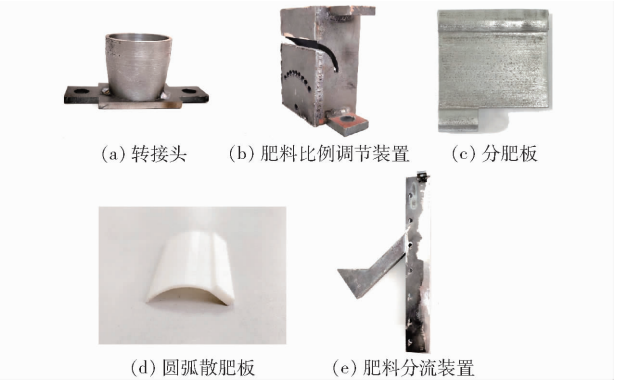


图 18 实物图

Fig. 18 Physical pictures

图 19 为试验台架分别在深、浅肥口布置收肥盒,在转速 30 ~ 90 r/min 范围内,每 10 r 为一个作业梯度,每个速度下试验 3 次,分别称量深、浅肥口排出的肥料。

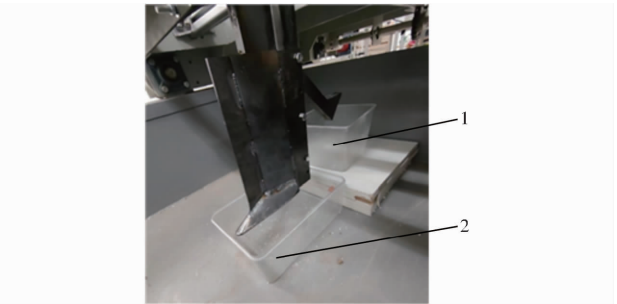


图 19 台架试验

Fig. 19 Bench test diagram

1. 浅层接肥盒子 2. 深层接肥盒子

根据称量结果,计算每种排肥转速下深、浅层肥量比例的平均值,并与理论比例进行比较,如图 20a 所示,设置肥量比例为 6:4,实测值随排肥轴转速的增加,呈增加趋势;当排肥转速为 60 r/min 时,实测值与理论值差值最大,而后呈下降趋势。如图 20b 所示,设置肥料比例为 7:3,实测值随排肥转速的增

加,先减少后增加,且增加趋势缓慢,逐渐接近理论值,当排肥转速为 50 r/min 时,实测值与理论值差值最大。如图 20c 所示,设置肥料比例为 8:2,实测值随排肥转速的增加,先减小后增加,在排肥转速为 90 r/min 时接近理论值。

通过对比分析发现,本研究设计的肥料流重构分层施肥装置对分肥比 6:4 差值最大,为 0.420 5,其它转速下的差值在 0~0.2 之间,转速的影响变化较小;对分肥比 7:3 和 8:2 的最大差值分别为 0.116 26 和 0.160 25,其差值相对理论值较小,且随着排肥转速的增加,分肥比例的准确性提高,逐渐接近理论值。

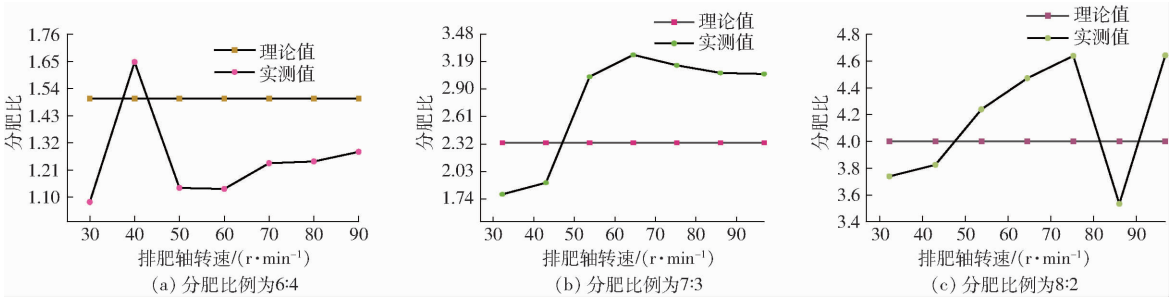


图 21 肥料流未重构的分肥比变化曲线

Fig. 21 Change curves of fertilizer ratio without reconstruction in fertilizer flow

通过有无肥料流重构对比发现,设置肥料比例为 6:4,最大差值基本相同,差值变化在 0~0.3 范围内。当设置肥料比例为 7:3,经过肥料流重构的差值远小于未经过肥料流重构的差值,且随着转速的增加趋近于理论值,变化波动范围小。当设置肥料比例为 8:2,经过肥料流重构的差值小于未经过肥料流重构的差值,且随着转速增加与理论值基本重合。

综合上述研究,经过肥料流重构的作业效果优于未经肥料流重构的肥料比例调节装置,肥料比例为 7:3、8:2 的作业差值较小,波动范围较小,按比例分肥稳定性好。

为了进一步检验肥料流重构的比例分肥作业的稳定性,分别求出肥料流重构与肥料流未重构的比例分肥变异系数。对于图 22 中经过肥料流重构的分肥比例变异系数变化曲线,排肥转速为 30 r/min 时,比例 6:4 的变异系数最小,随着转速增加,变异系数逐渐增加,多处于 14.4%~18% 之间,表明比例 6:4 分肥性能稳定不高;当排肥转速大于 40 r/min 时,比例为 7:3 和 8:2 的分肥变异系数逐渐下降,小于 7%,表明这两种比例分肥的稳定性随着转速的增加而增加。

图 22 中未经过肥料流重构的分肥比例变异系数,均远大于经过肥料流重构的比例分肥装置,波动

图 21 为未经过肥料流重构的比例分肥试验结果。如图 21a 所示,设置肥料调节比例为 6:4,当转速为 30 r/min 时,实测值与理论值的差值最大,转速在 30~50 r/min 范围内分肥比实测值变化波动较大,转速大于 60 r/min 时趋向于理论值。如图 21b 所示,设置肥料调节比例为 7:3,在不同的排肥转速,所有的实测值与理论值的差值较大,当排肥转速为 60 r/min 时,最大差值为 0.923。如图 21c 所示,设置肥料调节比例为 8:2,随着转速增加,实测值与理论值之间的差值先减小后增大,差值最大为 0.643 2。当转速为 70~90 r/min 时分肥比实测值变化波动较大。

范围大。其中比例 7:3 分肥的变异系数值最大,波动范围最大,比例分肥的稳定性最差。当排肥转速大于 70 r/min 时,比例 6:4 的变异系数逐渐减小,与肥料流重构后的变异系数接近。

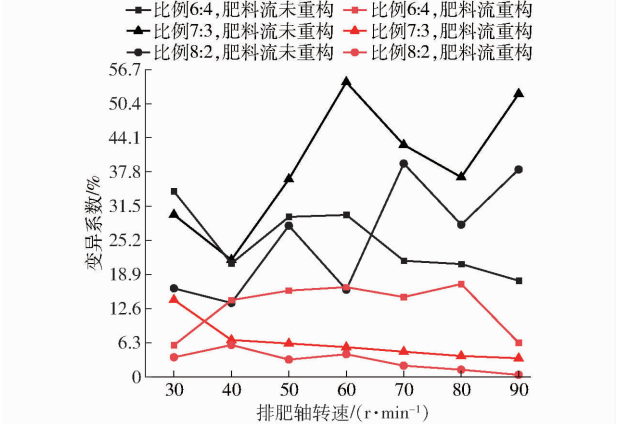


图 22 分肥比例变异系数变化曲线

Fig. 22 Coefficient variation curves of fertilizer distribution ratio

经过上述研究发现,肥料流重构的作业效果优于肥料流未重构的比例分肥装置,稳定性较高,其中比例 7:3 和 8:2 分肥性能较好。

4.2 分层施肥作业性能试验

4.2.1 试验设计

根据上述理论分析,确定分层施肥开沟器的入土角和浅层肥口的横向距离为试验因素,参考文

献[7,30–31],其中分层施肥开沟器入土角分别为 30°、40°、50°,浅层肥口的横向距离为 140、175、210 mm。分别制作不同入土角的分层施肥开沟器和不同横向距离的肥料分流装置,如图 23、24 所示。

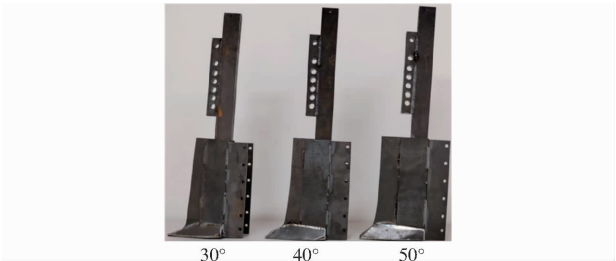


图 23 不同入土角的分层施肥开沟器

Fig. 23 Layered fertilization trenching device at different soil entry angles

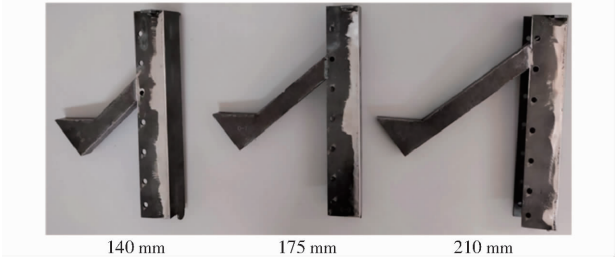
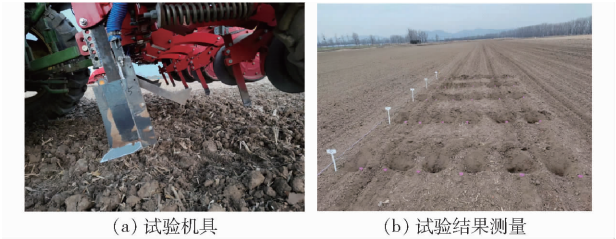


图 24 不同横向距离的肥料分流装置

Fig. 24 Fertilizer diversion devices at different lateral distances

参考文献[32],机具作业速度对土壤回流运动有显著影响,因此试验中设定机具作业速度为 4、6、8 km/h,在北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地开展分层施肥装置作业性能试验。试验前利用大犁对土壤进行深翻,而后利用旋耕机进行多次旋耕,保证土壤细碎。如图 25 所示,每种因素组合取 5 个测量点,分别测量深层肥深度和浅层肥深度,计算其变异系数。



(a) 试验机具 (b) 试验结果测量

图 25 田间试验

Fig. 25 Field experiment

如表 3 所示,对试验因素进行编码,其中入土角、横向距离和作业速度对应的试验因素编码值分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 。利用 Design-Expert 设计二次旋转正交试验,试验指标为深层肥深度变异系数 Y_1 和浅层肥深度变异系数 Y_2 ,试验设计和试验结果如表 4 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Encoding for experimental factors

编码	因素		
	入土角	横向距离	作业速度
	$x_1/(^\circ)$	x_2/mm	$x_3/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$
– 1	30	140	4
0	40	175	6
1	50	210	8

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental design scheme and results

序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	– 1	– 1	0	7. 89	12. 02
2	1	– 1	0	13. 79	8. 29
3	– 1	1	0	8. 05	7. 25
4	1	1	0	12. 81	4. 95
5	– 1	0	– 1	6. 65	6. 38
6	1	0	– 1	8. 29	8. 06
7	– 1	0	1	7. 02	11. 71
8	1	0	1	14. 01	7. 83
9	0	– 1	– 1	5. 02	6. 31
10	0	1	– 1	4. 92	8. 36
11	0	– 1	1	8. 58	12. 74
12	0	1	1	8. 26	7. 18
13	0	0	0	7. 28	5. 90
14	0	0	0	6. 23	7. 58
15	0	0	0	4. 02	5. 40
16	0	0	0	5. 03	5. 92
17	0	0	0	6. 21	4. 82

4. 2. 2 试验结果分析

利用 Design-Expert 软件对表 4 的试验结果进行分析和拟合,建立深层肥深度变异系数 Y_1 和浅层肥深度变异系数 Y_2 的回归模型。

(1) 深层肥深度变异系数显著性分析

深层肥深度变异系数的方差和显著性分析如表 5 所示,回归模型 Y_1 的拟合度为极显著 ($P < 0. 01$)。其中 X_1 、 X_1^2 、 X_3 的 P 值均小于 0. 01,说明其对深层肥深度变异系数的影响极显著; X_1X_3 的 P 值小于 0. 05,说明入土角和作业速度的交互作用对深层肥深度的变异系数有显著影响;横向距离 (X_2) 的 P 值大于 0. 05,说明横向距离对深层肥深度变异系数没有影响,但 X_2^2 的 P 值小于 0. 05,说明其对深层肥深度变异系数有显著影响。通过表 5 数据分析可知,影响深层肥深度变异系数的最主要因素是入土角,其次是作业速度,横向距离没有影响;获得深层肥深度变异系数回归方程为

$$Y_1 = 5. 75 + 2. 41X_1 - 0. 16X_2 + 1. 62X_3 - 0. 29X_1X_2 + 1. 34X_1X_3 - 0. 06X_2X_3 + 3. 59X_1^2 + 1. 29X_2^2 - 0. 35X_3^2$$

(22)

表 5 模型方差分析
Tab.5 Model variance analysis

方差来源	深层肥深度变异系数				浅层肥深度变异系数			
	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	138.82	9	15.62	0.000 8	84.07	9	7.50	0.007 3
<i>X</i> ₁	46.51	1	47.11	0.000 2	8.47	1	6.80	0.035 0
<i>X</i> ₂	0.192 2	1	0.194 7	0.672 4	16.88	1	13.55	0.007 8
<i>X</i> ₃	21.09	1	21.36	0.002 4	13.39	1	10.75	0.013 5
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.324 9	1	0.329 1	0.584 2	0.511 2	1	0.410 5	0.542 1
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	7.16	1	7.25	0.031 0	7.73	1	6.21	0.041 5
<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.012 1	1	0.012 3	0.915 0	14.48	1	11.63	0.011 3
<i>X</i> ₁ ²	54.24	1	54.94	0.000 1	4.43	1	3.56	0.101 3
<i>X</i> ₂ ²	7.03	1	7.12	0.032 1	5.84	1	4.69	0.067 0
<i>X</i> ₃ ²	0.518 0	1	0.524 7	0.492 4	10.06	1	8.08	0.025 0
残差	6.91	7			8.72	7		
失拟	0.617 1	3	0.130 7	0.936 9	4.48	3	1.41	0.362 8
误差	6.29	4			4.24	4		
总和	145.73	16			92.79	16		

(2)浅层肥深度变异系数显著性分析

浅层肥深度变异系数的方差和显著性分析如表 5 所示,回归模型 *Y*₂ 拟合度为极显著 (*P* < 0.01)。其中 *X*₂ 的 *P* 值小于 0.01, *X*₂ 对浅层肥深度变异系数有极显著影响; *X*₁、*X*₃、*X*₃² 的 *P* 值小于 0.05,说明其对浅层肥深度变异系数有显著影响; *X*₁*X*₃、*X*₂*X*₃ 的 *P* 值均小于 0.05,说明其交互作用对浅层肥深度变异系数有显著影响。通过表 5 数据分析可知,影响深层肥深度变异系数的最主要因素为横向距离,其次为作业速度,最后为入土角。获得浅

层肥深度变异系数为回归方程为

$$Y_2 = 5.92 - 1.03X_1 - 1.45X_2 + 1.29X_3 + 0.36X_1X_2 - 1.39X_1X_3 - 1.90X_2X_3 + 1.03X_1^2 + 1.18X_2^2 + 1.55X_3^2 \quad (23)$$

根据表 5 方差分析,入土角与作业速度的交互作用对深层肥深度变异系数和浅层肥深度变异系数有显著影响,同时横向距离与作业速度的交互作用对浅层肥深度变异系数有显著影响,利用 Origin 软件进行处理,得到响应面如图 26 所示。

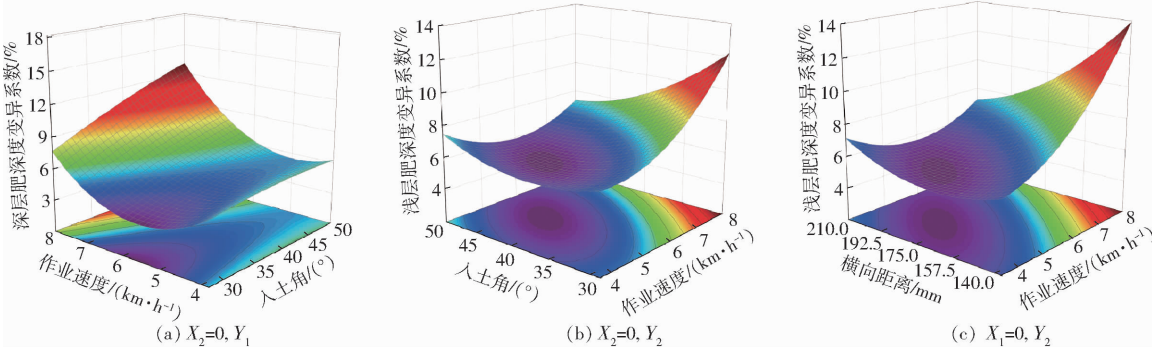


图 26 试验因素交互作用对试验指标影响的响应曲面

Fig. 26 Response surfaces of influence of interaction of test factors on test index

如图 26a 所示,当入土角为定值时,随着作业速度增加,深层肥深度变异系数先减小后增加,作业速度在 5 ~ 6 km/h 时,深层肥深度变异系数最小。当作业速度为定值时,随着入土角增大,深层肥深度变异系数缓慢增大。

如图 26b 所示,当作业速度为定值,且小于 7 km/h 时,随着入土角增加,浅层肥深度变异系数先减小后缓慢增加;当作业速度为定值,且大于 7 km/h 时,随着入土角增加,浅层肥深度变异系数

缓慢减小。当入土角为定值且大于 34°时,随着作业速度的增加,浅层肥深度变异系数先缓慢减少后增大;当入土角为定值且小于 34°时,随着作业速度的增加,浅层肥变深度异系数持续增大。

如图 26c 所示,各因素交互作用的变化趋势与图 26b 相似。当作业速度为定值且小于 7 km/h 时,随着横向距离增大,浅层肥深度变异系数先减小后增大;当作业速度为定值且大于 7 km/h 时,随着横向距离增大,浅层肥深度变异系数急剧减小。当横

向距离为定值且大于 168 mm 时,随着作业速度的增大,浅层肥深度变异系数先缓慢减少后增大;当横向距离定值且小于 168 mm 时,随着作业速度的增大,浅层肥深度变异系数持续增大。

4.2.3 优化设计

为了获得分层施肥装置稳定的分层施肥作业性能,利用 Design-Expert 软件以深层肥深度变异系数和浅层肥深度变异系数最小为优化目标,进行多目标优化求解,目标和优化条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

通过求解获得最佳结构参数(圆整后)为:入土角为 39°、横向距离为 174 mm、作业速度为 4.3 km/h。根据优化的结构参数进行田间验证试验,其分层施肥效果如图 27 所示,深层肥深度变异系数为 4.78%,浅层肥深度变异系数为 6.41%,分层施肥效果稳定可靠。

5 结论

(1)为了提高分层施肥装置的肥料比例分配精度、肥层间覆土深度的稳定性,设计了一种肥料流重构的玉米分层施肥装置,分别对分层施肥开

沟器和分肥比例装置的工作原理及结构参数进行分析。



图 27 分层施肥作业效果

Fig. 27 Effect of layered fertilization operation

(2)通过离散元仿真确定了圆弧散肥板半径的最佳值为 20 mm,并通过台架试验对肥料流重构和未经过肥料流重构的装置进行对比试验,试验结果表明,经过肥料流重构的比例分肥作业效果较优,且分肥比例为 7:3、8:2 的稳定性较好。

(3)通过试验确定各试验因素对分层施肥效果的影响,利用 Design-Expert 进行多目标优化设计,确定入土角为 39°、横向距离为 174 mm、作业速度为 4.3 km/h 时作业效果最佳,并进行了田间验证试验,试验结果表明:深层肥深度变异系数为 4.78%,浅层肥深度变异系数为 6.41%,分层施肥作业稳定性可靠。

参 考 文 献

[1] 杨笛. 中国玉米产量增长的驱动因素分析[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
YANG Di. Contribution analysis of driving factors for maize yield growth in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)

[2] 宋朝玉,王圣健,黄俊杰,等. 分层施肥对夏玉米养分吸收及养分系数的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2023,40(1): 1-7.
SONG Chaoyu, WANG Shenjian, HUANG Junjie, et al. Effects of layered fertilization on nutrient absorption and nutrient coefficient of summer maize[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2023,40(1): 1-7. (in Chinese)

[3] 赵萍,徐国发,李增玺,等. 秋季深耕分层施肥对辽北地区玉米产量及土壤理化特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021,52(4): 500-505.
ZHAO Ping, XU Guofa, LI Zengxi, et al. Effects on maize yield and soil physical and chemical properties through deep tillage and layered fertilization in autumn in northern Liaoning Province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(4): 500-505. (in Chinese)

[4] 赵堂甫,肖厚军,赵欢,等. 基肥深施对贵州高产玉米产量和养分吸收利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020,39(增刊 1): 21-25.
ZHAO Tangfu, XIAO Houjun, ZHAO Huan, et al. Response of maize yield, biological traits and nutrient utilization and soil fertility to fertilization depth in Guizhou[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(Supp. 1): 21-25. (in Chinese)

[5] 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构设计与试验[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.): 163-169. (in Chinese)

[6] 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)

- [7] 丁尚鹏. 基于离散元法的肥料调比与分层施肥仿真及试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
DING Shangpeng. Simulation and test of the fertilizer adjusting ratio and layered fertilization based on discrete element method [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [8] 姚万生, 薛少平, 朱瑞祥, 等. 组合式下位分层施肥播种开沟器的研制[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008,36(8): 223–228.
YAO Wansheng, XUE Shaoping, ZHU Ruixiang, et al. Development of the combined layered fertilizing-seeding ditcher[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2008,36(8): 223–228. (in Chinese)
- [9] 赵艳忠, 王勇, 龚振平, 等. 免耕播种机侧深分层施肥播种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(8): 40–50.
ZHAO Yanzhong, WANG Yong, GONG Zhenping, et al. Design and experiment on side deep and layered fertilizing and seeding components of no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(8): 40–50. (in Chinese)
- [10] 张俊雄, 刘华猛, 高金, 等. 玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(9): 66–72.
ZHANG Junxiong, LIU Huameng, GAO Jin, et al. Simulation and test of corn layer alignment position hole fertilization seeder based on SPH[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(9): 66–72. (in Chinese)
- [11] 于春玲. 基于离散元的齿轮式防堵分层施肥装置设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2021.
YU Chunling. Design and test study of gear type anti-blocking separated layer fertilization device based on discrete element method[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [12] 宋少龙. 精准对行分层施肥机分层施肥装置的优化设计与试验研究[D]. 石河子:石河子大学, 2022.
SONG Shaolong. Optimal design and experimental research on the layered fertilizer apparatus of the specific row-following layered fertilize[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)
- [13] 刘晓东, 王绪平, 陈礼源, 等. 油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021,37(5): 1–10.
LIU Xiaodong, WANG Xuping, CHNE Liyuan, et al. Design and experiment of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 1–10. (in Chinese)
- [14] 刘瑞, 李衍军, 刘春晓, 等. 铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(9): 89–96.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Chunxiao, et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9): 89–96. (in Chinese)
- [15] 马超. 东北玉米区深施肥带状耕作装置设计与试验[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2022.
MA Chao. Design and experiment of deep fertilization strip tillage device for corn in northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2022. (in Chinese)
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [17] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报, 1982,6(2): 64–69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982, 6(2): 64–69. (in Chinese)
- [18] 李尚平, 潘家枫, 钟家勤, 等. 基于有效落种空间的甘蔗横向种植机开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 162–170.
LI Shangping, PAN Jiafeng, ZHONG Jiaqin, et al. Design and experiment of furrow opener for transversal sugarcane planter based on effective seeding space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7): 162–170. (in Chinese)
- [19] 王军增, 孙伟, 王虎存, 等. 尖角长翼型开沟器的研究[J]. 农机化研究, 2021,43(11): 64–70.
WANG Junzeng, SUN Wei, WANG Hucun, et al. Research of long wing and sharp angle opener[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(11): 64–70. (in Chinese)
- [20] 赵淑红, 刘宏俊, 谭贺文, 等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(5): 32–39.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32–39. (in Chinese)
- [21] 刘伟. 基于排种流量信息的小麦播种机播种量监测调控技术研究[D]. 镇江:江苏大学, 2020.
LIU Wei. Research on seeding rate monitoring and controlling technology based on information of seed flow rate for wheat drill [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
- [22] 王磊. 油麦兼用型宽幅高速气送式播种机关键部件设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
WANG Lei. Design and experiment on broad width and high speed air-assisted planter for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [23] BANGURA K, GONG H, DENG R, et al. Simulation analysis of fertilizer discharge process using the discrete element method (DEM)[J]. PloS One, 2020,15(7): e0235872.
- [24] QI L, CHEN Y, SADEK M. Simulations of soil flow properties using the discrete element method (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,157: 254–260.
- [25] ZHAO H, HUANG Y, LIU Z, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery: a review[J]. Agriculture, 2021,11(5): 425.

- LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [25] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247–253.
- LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247–253. (in Chinese)
- [26] 谢伟, 彭磊, 蒋苹, 等. 收获期油菜茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112–120.
- XIE Wei, PENG Lei, JIANG Ping, et al. Discrete element model building and optimizing of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112–120. (in Chinese)
- [27] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modeling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105–117.
- [28] 王金峰, 张鑫, 唐汉, 等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 28–39.
- WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 28–39. (in Chinese)
- [29] 施丽莉, 顾峰玮, 胡志超, 等. 稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒机理分析与机构优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 74–83.
- SHI Lili, GU Fengwei, HU Zhichao, et al. Analysis and optimization of uniform throwing devices by no-tillage planter of wheat after rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 74–83. (in Chinese)
- [30] 郭俊, 张庆怡, MUHAMMAD Sohail Memon, 等. 仿鼯鼠足趾排列的旋耕-秸秆粉碎锯齿刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 43–50.
- GUO Jun, ZHANG Qingyi, MUHAMMAD Sohail Memon, et al. Design and experiment of bionic mole's toe arrangement serrated blade for soil-rototilling and straw-shattering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 43–50. (in Chinese)
- [31] ZHANG G S, ZHANG Z Q, XIAO M H, et al. Soil-cutting simulation and parameter optimization of rotary blade's three-axis resistances by response surface method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 164: 104902.
- [32] 祝英豪, 张居敏, 曾荣, 等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 49–57, 273.
- ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49–57, 273. (in Chinese)
- [33] 郝建军, 龙思放, 李浩, 等. 机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 34–42.
- HAO Jianjun, LONG Sifang, LI Hao, et al. Development of discrete element model and calibration of simulation parameters for mechanically-harvested yam[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 34–42. (in Chinese)

(上接第 150 页)

- [26] 杨庆璐, 李洪文, 何进, 等. 基于气力分配的不同肥料分层深施装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 61–73.
- YANG Qinglu, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of layered deep fertilization device of different fertilizers based on pneumatic distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 61–73. (in Chinese)
- [27] 刘立晶, 马超, 刘忠军. 基于 EDEM 的带状深松全层施肥铲作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 74–83.
- LIU Lijing, MA Chao, LIU Zhongjun. EDEM-based parameter optimization and experiment of full-layer fertilization shovel for strip subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 74–83. (in Chinese)
- [28] 石金杉, 齐浩凯, 孙富才, 等. 深松防堵分层施肥铲优化设计与试验[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(5): 96–102.
- SHI Jinshan, QI Haokai, SUN Fucui, et al. Optimization design and experiment of subsoiling and anti-blocking layered fertilizer shovel[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2020, 43(5): 96–102. (in Chinese)
- [29] 宋少龙, 张东超, 汤智辉, 等. 基于离散元法的分层施肥靴参数优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 125–136.
- SONG Shaolong, ZHANG Dongchao, TANG Zhihui, et al. Parameter optimization and test of layered fertilization boot based on discrete element method[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(10): 125–136. (in Chinese)
- [30] 何义川, 汤智辉, 温浩军, 等. 棉花基肥对行分层深施机的设计与试验[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(3): 528–536.
- HE Yichuan, TANG Zhihui, WEN Haojun, et al. Design and experiment of cotton basal fertilizer alignment row spacing and stratified fertilizing machine[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(3): 528–536. (in Chinese)
- [31] 第一机械部机械研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [32] 刘进宝, 汤智辉, 郑炫, 等. 2FHF-4.56 型宽行距作物基肥对行分层深施机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 1–11.
- LIU Jinbao, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Design and experiments of the 2FHF-4.56 type base-fertilizer row-following and layered deep fertilizing machine for wide row spacing crops[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 1–11. (in Chinese)