

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.020

玉米空间分层施肥装置结构优化与试验

杨庆璐^{1,2} 黄幸媛^{1,2} 王庆杰^{1,2} 李洪文^{1,2} 王英博^{1,2} 王揽月³(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 北京市昌平区农业服务中心, 北京 102200)

摘要: 针对玉米分层施肥作业中开沟宽度大、回土效果差导致的肥料分层效果不明显、各层肥量难以控制等问题, 设计了一种各层肥量可调的空间分层施肥装置, 肥料可在土壤中形成半包围种子的分布状态。通过理论分析和设计计算确定了空间分层施肥装置的基本结构参数, 明确了影响分层施肥装置内肥料颗粒运动的主要因素。运用离散元法对分层施肥装置工作过程进行仿真分析, 选取施肥调节片前端宽度、后端宽度和安装角为试验因素, 以上层和中间排肥口出肥量为试验指标, 进行二次正交旋转组合仿真试验, 建立了试验指标与影响因素的回归模型, 仿真结果表明, 当施肥调节片前端宽度为 3.61 mm, 后端宽度为 21.52 mm, 安装角为 43.23°时, 上、中、下 3 层排肥口施肥量比例为最佳施肥比例 3:3:4。为验证仿真分析结果, 在不同作业速度和不同施肥量条件下, 进行了空间分层施肥装置的样机性能试验, 试验结果表明, 空间分层施肥装置能够实现各层肥量的目标施肥配比, 在不同作业速度和不同施肥量下各层施肥量变异系数不大于 4.3%, 各层肥料深度误差在 10 mm 以内, 各层肥料横向距离误差在 6 mm 以内, 工作性能稳定。

关键词: 玉米; 分层施肥装置; 结构优化

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0175-11

Structure Optimization and Experiment of Corn Layered Fertilization Device

YANG Qinglu^{1,2} HUANG Xingyuan^{1,2} WANG Qingjie^{1,2} LI Hongwen^{1,2} WANG Yingbo^{1,2} WANG Lanyue³

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

2. Beijing Key Laboratory of Design and Optimization in Modern Agricultural Equipment,
China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Changping District Agricultural Service Center of Beijing, Beijing 102200, China)

Abstract: The layered fertilization technology could apply the fertilizer required for the entire growth of corn into the soil in specific ratio, which can not only improve the utilization rate of fertilizer, but also reduce operating procedures, improve operating efficiency, save input and increase efficiency. Aiming at the problems of non-obviously effect of fertilizer layering and difficult-controlling for amount of fertilizer in each layer, which because of the large ditch width and poor soil returning effect, a spatial layered fertilization device with adjustable fertilizer amount in each layer was designed. A semi-enclosed seed distribution was formed in the soil by using this kind of device. The basic structural parameters of the spatial layered fertilization device and the main factors that affected the movement of fertilizer particles in the layered fertilization device was obtained through theoretical analysis and design calculations. The discrete element method was used to simulate the working process of the layered fertilization device. The front-end width, rear-end width and installation angle of fertilization adjustment piece was selected as test factors, and the amount of fertilizer discharged of the upper and middle fertilizer outlets was taken as the experiment indicators for a quadratic-regression orthogonal combination simulation test. A regression model of experiment index was established and influencing factors were obtained. The simulation results showed that the fertilizer application ratio of the upper, middle and lower three-layer fertilizer outlets was the best fertilization ratio as 3:3:4, while the front-end width of the fertilization adjustment piece, rear-

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)

作者简介: 杨庆璐(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: yangqinglu@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

end width and installation angle was 3.61 mm, 21.52 mm and 43.23°, respectively. In order to verify the results of the simulation analysis, the prototype performance test of the spatial layered fertilization device was carried out at different operating speeds and fertilization amounts. The test results showed that the spatial layered fertilization device could meet the target fertilization ratio of each layer. The coefficient of variation of fertilizer amount of each layer at different operating speeds and fertilization amounts, depth error of each layer and the horizontal distance error of each layer was within 4.3%, 10 mm and 6 mm, respectively. The field experiment also showed a stable working performance by using spatial layered fertilization device.

Key words: corn; layered fertilization device; structure optimization

0 引言

肥料是粮食作物的“粮食”，在粮食生产中发挥着不可替代的支撑作用，是实现作物增产的关键原材料，助推了我国农业的发展^[1-3]。玉米是喜肥作物，生育期长、产量高，需肥量比其他粮豆类作物多，合理施肥对提高玉米的产量具有关键性作用^[4-5]。目前我国玉米施肥以人工分期施肥为主，一般采用基肥和追肥相结合的方式，施肥量大，肥料利用率低，难以满足现代农业发展的要求^[6-9]。为实现“一控两减”的核心目标，减少肥料施用量，提高肥料利用率，研究施肥新技术，设计施肥新设备具有重要意义。

分层施肥技术可将玉米整个生长周期所需的肥料，一次性按比例分层施入土壤，不仅可以提高肥料的利用率，而且可以减少作业工序，提高作业效率，节本增效^[10-13]。文献[14-17]对分层施肥的效应进行了研究，对比试验表明，一次性分层施肥下玉米产量大于一次性浅层施肥或一次性深施化肥，可替代传统的分期施肥。

分层施肥装置是实现分层施肥的关键部件。刘进宝等^[18]设计了一种带螺旋导肥槽的分层施肥装置，肥料沿导肥槽旋转向下流动，从不同深度的出口排出，通过调整施肥口参数实现各层肥量调节。王云霞等^[19]设计了一种带施肥片的分层施肥装置，通过调整分层施肥装置的角度和上层出肥口处施肥片的工作长度，调整各层施肥量的比例。赵金等^[20]设计了一种可调全层施肥装置，通过在导肥槽后壁不同高度处开施肥口实现全层施肥，首层施肥口处安装导肥管，其他各层安装导肥片，通过调整导肥片长度，改变各层施肥量比例。以上研究设计的分层施肥装置均与直铲式深松铲配合使用，都能够实现各层肥料量的不同比例分配，但直铲式深松铲开沟宽度大，回土效果差，易形成土丘和沟痕^[21-22]，导致分层施肥效果受土壤状况影响较大。国外以机械化分期施肥为主，播种时仅施用少量种肥，中后期采用不同专用机械进行变量追肥，对分层施肥的研究较少。为提高分层施肥装置分层效果，本文针对因直

铲式深松铲作业时开沟宽度大、回土效果差导致的肥料分层效果不明显、各层肥量难以控制等问题，设计一种各层肥量可调的空间分层施肥装置，安装在曲面深松铲铲柄的后部，肥料从各层排肥口排出后均有土壤支撑，避免因回土不及时造成的上层肥料下移现象，以实现各层肥料的明显分层和各层肥量的比例可调。通过离散元法对肥料在空间分层施肥装置中的运动规律和影响各层施肥量比例的主要因素进行仿真试验研究，并通过田间试验进行分层效果的试验验证。

1 空间分层施肥器结构与工作原理

空间分层施肥是将玉米生长周期所需肥料一次性按比例分层施入土壤，且肥料在土壤中呈半包围种子的分布状态(图1)，不仅能够提高肥料的吸收利用率，而且可以提高机具作业效率^[23]。研究表明^[16,24]，肥料深施能够有效提高作物产量，种肥与基肥按3:3:4的比例分层施入土壤，增产效果最优，既不会造成烧苗，又保证作物生长不同阶段养分的利用。施肥深度 S_1 为200 mm，玉米播种深度 S_7 为30~50 mm，为避免烧种，肥料与种子横向距离 S_4 为50 mm，上层肥料与中层肥料横向距离 S_5 为15 mm，中层肥料与下层肥料横向距离 S_6 为35 mm。3层肥料分别施在60~200 mm土层中， S_2 为140 mm， S_3 为70 mm，3层肥料距地表距离分别为60、130、200 mm，呈半包围种子的分布状态。

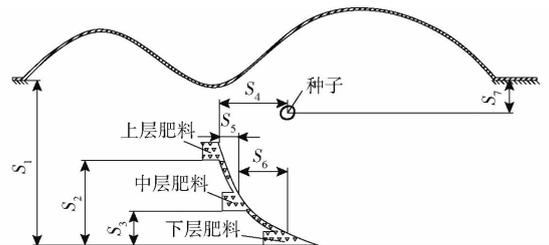


图1 空间分层施肥示意图

Fig. 1 Schematic of layered fertilization

空间分层施肥器是实现分层施肥的关键部件，主要由曲面深松铲和空间分层施肥装置组成，其结构如图2所示。

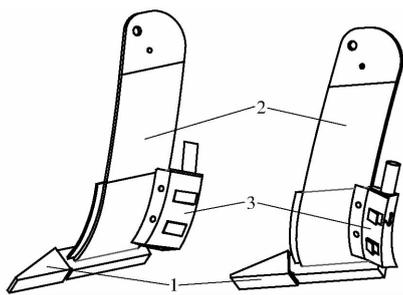


图 2 空间分层施肥器结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of layered fertilizer applicator

1. 铲尖 2. 曲面深松铲铲柄 3. 空间分层施肥装置

空间分层施肥装置安装在曲面深松铲铲柄的后部,通过调节分层施肥装置施肥调节片的角度来改变各层施肥量的比例,利用深松铲曲面铲柄的开沟特性实现分层施肥功能。机具作业时,深松铲入土前进破开土壤,同时地轮带动排肥器转动,肥料在重力作用下自由下落,由导肥管进入空间分层施肥装置,经过调节片调整,各层肥料按设定的比例从各层

排肥口排出。由于曲面深松铲的切土特性,开沟宽度小且沟壁为弯曲状,肥料从分层施肥装置各层排肥口排出后,会掉落在曲面沟壁上,各层肥料从排肥口排出后均有土壤支撑,可将肥料稳定在不同深度,避免了因回土不及时造成上层肥料下移现象,提高分层效果。

分层施肥作业可与玉米播种作业同时进行,施肥作业在前,播种作业在后。分层施肥作业完成后,播种装置将玉米种子播种在与上层肥料横向距离为 50 mm,深度 30 ~ 50 mm 的土壤中,避免烧种。

2 空间分层施肥装置设计

2.1 空间分层施肥装置结构

空间分层施肥装置通过螺栓固定安装在曲面深松铲铲柄的后部(图 2),主要由导肥管、导肥槽、施肥调节片、防护板、各层排肥口和连接板等组成,其结构如图 3 所示。

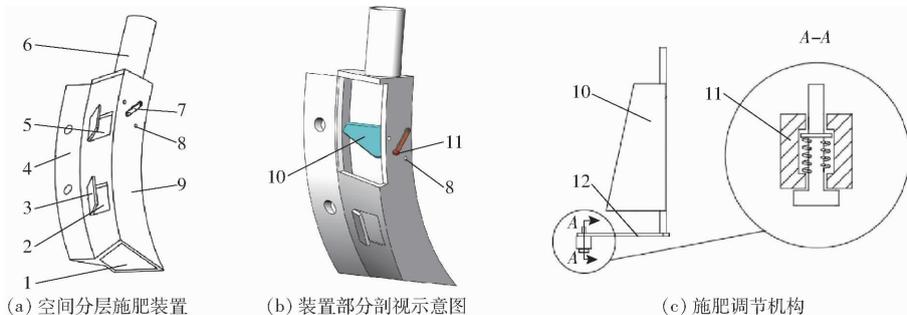


图 3 空间分层施肥装置结构示意图

Fig. 3 Structural schematic of adjustable layered fertilization device

1. 下层排肥口 2. 中层排肥口 3. 防护板 4. 连接板 5. 上层排肥口 6. 导肥管 7. 施肥调节机构
8. 调节机构固定孔 9. 导肥槽 10. 施肥调节片 11. 锁止机构 12. 调节手柄

导肥管通过塑性肥管与排肥器相连,肥料由排肥器经导肥管进入空间分层施肥装置;装置通过连接板与曲面深松铲相连,由螺栓固定,安装在曲面深松铲铲柄的后部;导肥槽侧面不同高度处设置 3 层排肥口,上层和中层排肥口处焊接防护板,避免排肥口入土后被土壤堵塞,保证肥料顺利排出;施肥调节片安装在导肥槽内部上层排肥口的位置,调节手柄和调节片为固定连接,焊接在一起,调整调节手柄在导肥槽上的角度即可调节施肥调节片的角度(图 3b);调节手柄通过锁止机构(图 3c)插入导肥槽的不同固定孔内,从而使调节片固定在某一角度。通过调节调整片的角度,改变导肥槽内部空间结构,控制肥料颗粒的运动轨迹,从而改变各层施肥量的比例。

h 、犁铧安装角 ε 、始端直线长度 S 和抛物线两端点切线的夹角 ω 等参数确定^[25-26],如图 4 所示。

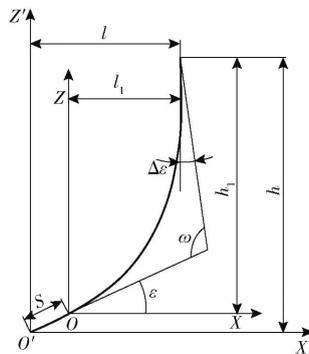


图 4 导肥槽侧面导曲线

Fig. 4 Guide curve on side of fertilizer guide tank

导曲线的一般方程式为

$$x^2 + \frac{2(m \cot \Delta \varepsilon + n)}{(m - n \cot \varepsilon)^2} xz + \frac{(m \cot \Delta \varepsilon + n)^2}{(m - n \cot \varepsilon)^2} z^2 + \frac{4mn^2 \cot \varepsilon}{(m - n \cot \varepsilon)^2} x - \frac{4mn^2}{(m - n \cot \varepsilon)^2} z = 0 \quad (1)$$

2.2 空间分层施肥装置基本参数

导肥槽侧面为曲面设计,其参数由曲面深松铲的导曲线确定,导曲线为曲面与犁刃线的垂直平面相交的截面线,其尺寸和形状由导曲线开度 l 、高度

$$\begin{aligned}
 \text{其中} \quad m &= h_1 - L \cot \varepsilon \\
 n &= h_1 \cot \Delta \varepsilon + L \\
 h_1 &= h - S \sin \varepsilon \\
 l_1 &= l - S \cos \varepsilon
 \end{aligned}$$

式中 l_1 ——抛物线开度, mm
 L ——导曲线平面位置, mm
 h_1 ——抛物线高度, mm

曲面深松铲参数为: $l = 150$ mm, $h = 300$ mm, $\omega = 120^\circ$, $\varepsilon = 25^\circ$, $S = 30$ mm, $L = 250$ mm, 得到导肥槽侧面的导曲线如图4所示。

导肥槽由前后两个侧边为弧线形的平板和左右两个弧状的曲面板拼接而成, 其横断面近似为梯形(图5a), 前侧平板宽度与曲面深松铲铲柄宽度相同, 为10 mm。为避免阻力过大, 后侧平板宽度 m_2 需小于深松铲的最大侧弯值, 取为50 mm。总施肥深度为200 mm, 则导肥槽垂直高度为200 mm, 上层排肥口距导肥槽上端的距离 h_2 为60 mm, 上层与中层排肥口距离 h_3 为70 mm, 中层与下层排肥口距离 h_4 为70 mm。经预试验确定, 装置两侧曲面板宽度 m_1 为60 mm, 上、中层排肥口宽度 m_3 、 m_4 为55 mm, 高度 h_5 、 h_6 为20 mm 时, 肥料能从各排肥口顺利排出。

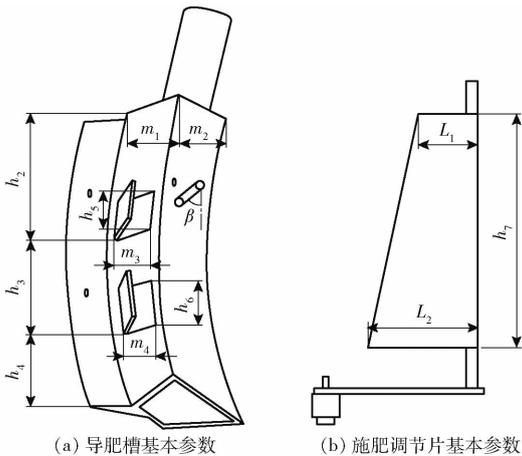


图5 空间分层施肥装置基本参数

Fig. 5 Basic parameters of adjustable layered fertilization device

为保证施肥调节片能够在导肥槽内旋转以改变其工作角度, 施肥调节片长度 h_7 应小于曲面板的宽度 m_1 , 经预试验, 最终确定施肥调节片的长度 h_7 为50 mm。施肥调节片前端宽度 L_1 与后端宽度 L_2 是影响肥料各层分配的关键参数, 前端宽度 L_1 应小于导肥槽前侧平板宽度, 即应小于10 mm, 后端宽度 L_2 应小于导肥槽后侧平板的宽度 m_2 , 即应小于50 mm, 才能实现施肥调节片在导肥槽内自由旋转(图5b)。施肥调节片在导肥槽内的安装角 β , 即施肥调节片平面与竖直方向的夹角(图5a), 直接影响导肥槽内

肥料在施肥调节片处是否发生堵塞, 同时影响肥料在导肥槽内的运动轨迹, 进而影响各层肥料的分配比例, 施肥调节片两个极限位置分别为: 调节片平面与竖直方向重合、调节片平面与水平方向重合。因此该角度取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

综上, 影响空间分层施肥装置各层施肥量比例的主要因素有: 施肥调节片前端宽度 L_1 、后端宽度 L_2 和施肥调节片安装角 β 。各因素的取值范围: L_1 小于10 mm, L_2 小于50 mm, β 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

3 空间分层施肥装置仿真试验

空间分层施肥装置是空间分层施肥器的关键部件, 其分肥性能对施肥器的分层施肥效果有重要影响。采用 SolidWorks 和离散元法 (EDEM) 分别建立空间分层施肥装置的仿真模型, 进行仿真试验, 通过研究施肥调节片前端宽度、后端宽度和安装角对各层肥料分配量的影响, 优化施肥调节片的结构和工作参数。

3.1 离散元模型参数设定

采用离散元法仿真分析肥料在施肥装置中的运动过程, 选取史丹利玉米复合肥为试验对象, 通过试验测量其物理特性参数, 肥料颗粒呈圆球形, 其球形率为96%, 可将肥料颗粒视为等效粒径为3.66 mm的球形^[27], 颗粒尺寸随机分布, 84%的颗粒粒径在3.1~4.2 mm之间。肥料颗粒和施肥装置模型的变量参数如表1所示^[28-29]。

表1 变量参数

Tab. 1 Pre-treatment parameters

参数	肥料颗粒	施肥装置
泊松比	0.25	0.30
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1328	7800
剪切模量/Pa	1.0×10^7	7.0×10^{10}
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.095	0.590
静摩擦因数(与颗粒)	0.250	0.312
滚动摩擦因数(与颗粒)	0.10	0.01

3.2 单因素试验

由分析可知, 影响空间分层施肥装置内肥料颗粒运动的主要影响因素有施肥调节片前端宽度、后端宽度和安装角, 其中施肥调节片安装角为施肥装置重要的工作参数, 为研究其对分层施肥装置各层肥量的影响, 取施肥调节片前端宽度为5 mm, 后端宽度为25 mm, 安装角分别为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° , 进行单因素仿真试验。以玉米施肥播种作业最大速度为10 km/h, 最大施肥量为 $750 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 种植行距为600 mm 计算, 施肥速率约为125 g/s, 因此设置肥料生成速率为125 g/s, 生

成时间为 3 s,总仿真时间为 5 s,仿真完成后,利用 EDEM 软件后处理模块统计各层排肥口出肥量,每组仿真试验重复 3 次,记录并计算各层排肥口平

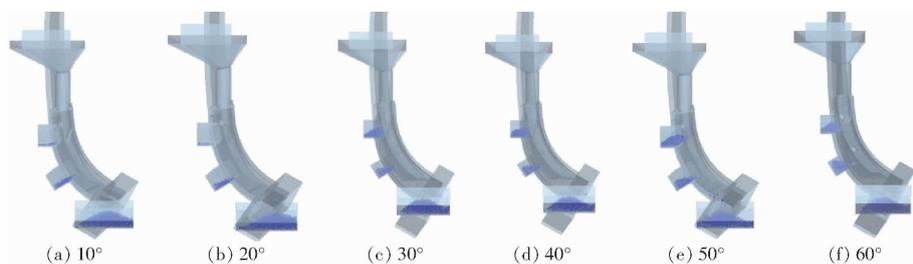


图 6 不同安装角下各层施肥量变化图

Fig. 6 Change graphs of fertilization amount of each layer at different installation angles

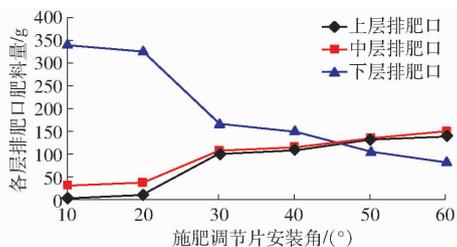


图 7 不同安装角下各层排肥口肥料量

Fig. 7 Amount of fertilizer in each layer of fertilizer outlet at different installation angles

试验结果表明,随着施肥调节片安装角的增大上层和中层排肥口处肥料不断增加,安装角从 20°到 30°时,各层排肥口处肥料量变化最大,当安装角从 40°到 50°时,上层和中层排肥口处肥料量逐渐增多并超过了下层排肥口处肥料量。同时仿真试验发现,当安装角大于 50°时,由于调节片工作宽度增加,导致分层施肥装置内肥料流动速度降低,极易发生堵塞。

根据相关研究^[16,24],各层施肥比例为 3:3:4 时,符合玉米生长需肥规律,能有效提高玉米产量。通过仿真试验可知,当施肥调节片安装角为 30°~50°之间的某一安装角度时,能够形成上、中、下 3 层施肥量比例为 3:3:4,因此将施肥调节片安装角取值范围设定为 30°~50°。

3.3 二次正交旋转组合仿真试验

3.3.1 仿真试验设计

为研究各因素对肥料颗粒在分层施肥装置内运动的影响规律,优化分层施肥装置结构参数,以施肥调节片前端宽度、施肥调节片后端宽度和施肥调节片安装角为试验因素,以上层和中层排肥口出肥量为试验指标,进行二次正交旋转组合仿真试验,研究各试验因素对排肥口出肥量的影响规律,优化分层施肥装置结构和工作参数。各试验因素的水平范围为:施肥调节片前端宽度 0~10 mm;施肥调节片后端宽度 0~50 mm;施肥调节片安装角 30°~50°。试

均出肥量。不同施肥调节片安装角下各层排肥口出肥情况,如图 6 所示。各层排肥口肥料量,如图 7 所示。

验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors and levels

编码	因素		
	前端宽度 A/mm	后端宽度 B/mm	安装角 C/(°)
1. 682	10.00	50.00	50.00
1	7.97	39.87	45.95
0	5.00	25.00	40.00
-1	2.03	10.13	34.05
-1. 682	0	0	30.00

仿真试验中,设置 EDEM 中颗粒生成速率为 125 g/s,生成时间为 3 s,总仿真时间为 5 s,仿真完成后,利用软件后处理模块统计上层和中层排肥口出肥量,每组仿真试验重复 3 次,记录并计算上层和中层排肥口平均出肥量。试验方案与试验结果如表 3 所示。

3.3.2 仿真试验结果与分析

3.3.2.1 试验结果方差分析与回归模型建立

利用 Design-Expert 软件对仿真试验的结果进行方差分析和多元回归拟合^[30],建立上层和中层排肥口出肥量与各试验因素之间的回归方程,并进行显著性检验。

(1) 上层排肥口出肥量

对试验结果进行分析拟合,得到上层排肥口出肥量 Y_1 的方差分析结果,如表 4 所示。由表 4 可知,试验整体模型拟合度极显著 ($P < 0.01$),线性主效应项中施肥调节片前端宽度 A 、施肥调节片后端宽度 B 、施肥调节片安装角 C 对试验指标上层排肥口出肥量 Y_1 的影响极显著 ($P < 0.01$),交互项中施肥调节片前端宽度和施肥调节片后端宽度 AB 对试验指标影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$),二次主效应项中施肥调节片前端宽度 A 的二次项对试验指标影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$),二次主效应项中施肥调节片后端宽度 B 的二次项对试验指标影响较显著

表3 试验方案与试验结果

Tab.3 Test plan and experimental data

试验 编号	前端宽度 A/mm	后端宽度 B/mm	安装角 C/(°)	上层出肥 量 Y_1 /g	中层出肥 量 Y_2 /g
1	2.03	10.13	34.05	64.11	71.37
2	7.97	10.13	34.05	104.14	107.54
3	2.03	39.87	34.05	109.32	109.42
4	7.97	39.87	34.05	118.55	134.78
5	2.03	10.13	45.95	92.81	91.48
6	7.97	10.13	45.95	121.33	126.34
7	2.03	39.87	45.95	124.32	127.54
8	7.97	39.87	45.95	141.52	140.61
9	0.00	25.00	40.00	88.54	84.75
10	10.00	25.00	40.00	133.52	135.64
11	5.00	0.00	40.00	78.45	82.82
12	5.00	50.00	40.00	146.32	143.38
13	5.00	25.00	30.00	101.54	107.25
14	5.00	25.00	50.00	133.38	134.63
15	5.00	25.00	40.00	109.38	115.13
16	5.00	25.00	40.00	121.23	118.36
17	5.00	25.00	40.00	114.31	111.05
18	5.00	25.00	40.00	123.54	125.98
19	5.00	25.00	40.00	118.32	121.34
20	5.00	25.00	40.00	123.41	121.62
21	5.00	25.00	40.00	127.62	125.18
22	5.00	25.00	40.00	115.44	118.34
23	5.00	25.00	40.00	117.48	120.71

($0.05 \leq P < 0.1$),其他各项不显著,各因素对上层排肥口出肥量影响由大到小是 B 、 A 、 C 。将不显著交互项和二次主效应项的平方和及自由度并入残差项中,剔除不显著因素,再次进行方差分析,结果如表4所示。得到各因素水平对上层排肥口出肥量 Y_1 影响的回归方程为

$$Y_1 = -32.01372 + 11.23514A + 2.40874B + 1.69213C - 0.11913AB - 0.40544A^2 - 0.014050B^2 \quad (2)$$

对得到的回归方程进行失拟性检验,如表4所示,失拟项 $P=0.4541$,不显著($P>0.1$),试验指标与试验因素存在显著的二次关系,试验分析结果合理。

(2)中层排肥口出肥量

对试验结果进行分析拟合,得到中层排肥口出肥量 Y_2 的方差分析结果,如表4所示。由表4可知,试验整体模型拟合度极显著($P<0.01$),线性主效应项中施肥调节片前端宽度 A 、施肥调节片后端宽度 B 、施肥调节片安装角 C ,二次主效应中施肥调节片前端宽度 A 的二次项对试验指标中层排肥口出肥量 Y_2 的影响极显著($P<0.01$),交互项中施肥

表4 上层和中层排肥口出肥量方差分析

Tab.4 Variance analysis of amount of fertilizer discharged from upper and middle fertilizer outlets

项目	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
上层排肥口出肥量	模型	7 850.17/7 813.10	9/6	872.24/1 302.18	23.45/40.03	<0.000 1*** / <0.000 1***
	A	2 131.79/2 131.79	1/1	2 131.79/2 131.79	57.32/65.53	<0.000 1*** / <0.000 1***
	B	3 722.21/3 722.21	1/1	3 722.21/3 722.21	100.09/114.41	<0.000 1*** / <0.000 1***
	C	1 382.53/1 382.53	1/1	1 382.53/1 382.53	37.17/42.50	<0.000 1*** / <0.000 1***
	AB	221.76/221.76	1/1	221.76/221.76	5.96/6.82	0.029 7** / 0.018 9**
	AC	1.57	1	1.57	0.042	0.840 6
	BC	7.84	1	7.84	0.21	0.653 7
	A^2	205.10/204.06	1/1	205.10/204.06	5.51/6.27	0.035 3** / 0.023 5**
	B^2	154.05/153.15	1/1	154.05/153.15	4.14/4.71	0.062 7* / 0.045 4**
	C^2	27.66	1	27.66	0.74	0.404 1
	残差	483.47/520.54	13/16	37.19/32.53		
失拟项	234.15/271.22	5/8	46.83/33.90	1.50/1.09	0.289 5/0.454 1	
总和	8 333.64/833.64	22/22				
中层排肥口出肥量	模型	7 600.68/7 548.55	9/6	844.52/1 258.09	45.30/68.35	<0.000 1*** / <0.000 1***
	A	2 785.64/2 785.64	1/1	2 785.64/2 785.64	149.42/151.35	<0.000 1*** / <0.000 1***
	B	3 462.94/3 462.94	1/1	3 462.94/3 462.94	185.75/188.14	<0.000 1*** / <0.000 1***
	C	868.49/868.49	1/1	868.49/868.49	46.58/47.19	<0.000 1*** / <0.000 1***
	AB	132.84/132.85	1/1	132.84/132.85	7.13/7.22	0.019 3** / 0.016 2**
	AC	23.12	1	23.12	1.24	0.285 6
	BC	27.98	1	27.98	1.50	0.242 3
	A^2	199.56/199.77	1/1	199.56/199.77	10.70/10.85	0.006 1*** / 0.004 6***
	B^2	100.65/100.80	1/1	100.65/100.80	5.40/5.48	0.037 0** / 0.032 6**
	C^2	1.03	1	1.03	0.055	0.817 5
	残差	242.36/294.49	13/16	18.64/18.41		
失拟项	66.16/118.29	5/8	13.23/14.79	0.60/0.67	0.702 1/0.706 9	
总和	7 843.04/7 843.04	22/22				

注:“/”后数字为剔除不显著因素后方差分析结果;***表示极显著($P<0.01$),**表示显著($0.01 \leq P < 0.05$),*表示较显著($0.05 \leq P < 0.1$)。

调节片前端宽度和施肥调节片后端宽度 AB , 二次主效应项中施肥调节片后端宽度 B 的二次项对试验指标影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$), 其他各项不显著, 各因素对中层排肥口出肥量影响由大到小是 B 、 A 、 C 。将不显著交互项和二次主效应项的平方和及自由度并入残差项中, 剔除不显著因素, 再次进行方差分析, 结果如表 4 所示。得到各因素水平对中层排肥口出肥量 Y_2 影响的回归方程为

$$Y_2 = -13.20779 + 11.12048A + 2.10215B + 1.34116C - 0.092207AB - 0.40115A^2 - 0.0113980B^2 \quad (3)$$

对上述回归方程进行失拟性检验, 如表 4 所示, 失拟项 $P = 0.7069$, 不显著 ($P > 0.1$), 试验指标与试验因素存在显著的二次关系, 试验分析结果合理。

3.3.2.2 响应曲面分析

为分析各因素与试验指标之间的关系, 利用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析处理, 得到施肥调节片前端宽度、施肥调节片后端宽度和施肥调节片安装角之间的交互因素对上层和中层排肥口出肥量的影响效应响应曲面, 如图 8 所示。

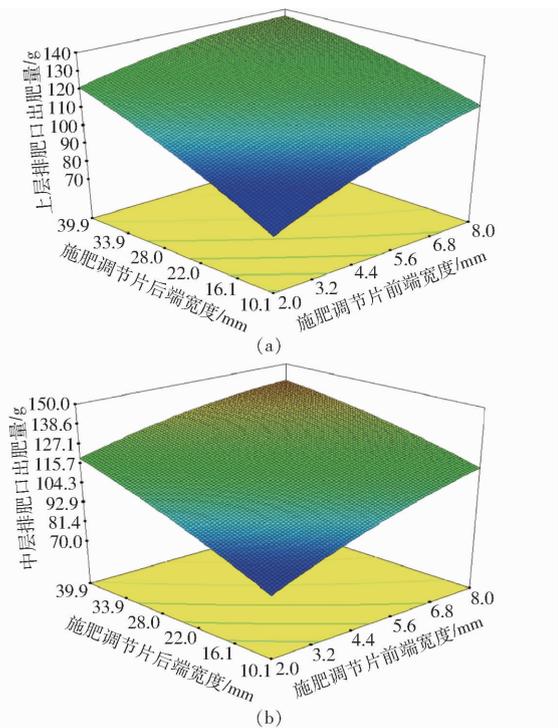


图 8 出肥量双因素响应曲面

Fig. 8 Response surfaces of double parameters on amount of fertilizer discharged

根据前文分析, 上、中、下 3 层排肥口出肥量比例为 3:3:4 时, 能有效提高肥料的利用率, 仿真试验中生成肥料颗粒的总量为 375 g, 当上层和中层排肥口出肥量均为 112.5 g 时, 才能够满足上、中、下 3 层为 3:3:4 的施肥比例, 因此以上层和中层排肥口出肥量

为 112.5 g 为目标肥量, 进行分析。

当施肥调节片安装角为 40° 时, 施肥调节片前端宽度和后端宽度的交互作用对上层排肥口出肥量的影响如图 8a 所示。当施肥调节片前端宽度一定时, 施肥调节片后端宽度与上层排肥口出肥量呈正相关, 以上层排肥口出肥量为 112.5 g 为目标, 较优的施肥调节片后端宽度范围为 20.04 ~ 33.26 mm; 当施肥调节片后端宽度一定时, 施肥调节片前端宽度与上层排肥口出肥量呈正相关, 以上层排肥口出肥量为 112.5 g 为目标, 较优的施肥调节片前端宽度范围为 4.79 ~ 7.97 mm。2 个交互项中施肥调节片后端宽度为影响试验指标的主要因素。

当施肥调节片安装角为 40° 时, 施肥调节片前端宽度和后端宽度的交互作用对中层排肥口出肥量的影响如图 8b 所示。当施肥调节片前端宽度一定时, 施肥调节片后端宽度与中层排肥口出肥量呈正相关, 以中层排肥口出肥量为 112.5 g 为目标, 较优的施肥调节片后端宽度范围为 20.04 ~ 33.26 mm; 当施肥调节片后端宽度一定时, 施肥调节片前端宽度与中层排肥口出肥量呈正相关, 以中层排肥口出肥量为 112.5 g 为目标, 较优的施肥调节片前端宽度范围为 3.51 ~ 7.97 mm。2 个交互项中施肥调节片后端宽度为影响试验指标的主要因素。

3.3.2.3 参数优化

为获得分层施肥装置较优分配性能下施肥调节片的结构和工作参数, 利用 Design-Expert 软件的优化模块, 对 2 个回归模型进行优化求解, 根据分层施肥装置的实际作业条件和工作要求, 选择目标函数的约束条件, 进行优化求解。

目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} Y_1(A, B, C) = 112.5 \text{ g} \\ Y_2(A, B, C) = 112.5 \text{ g} \\ \text{s. t. } \begin{cases} 3.51 \text{ mm} \leq A \leq 7.97 \text{ mm} \\ 20.04 \text{ mm} \leq B \leq 33.26 \text{ mm} \\ 34.05^\circ \leq C \leq 45.95^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

优化求解得施肥调节片前端宽度为 3.61 mm, 后端宽度为 21.52 mm, 安装角为 43.23° 时, 上、中、下 3 层排肥口出肥量比例为 3:3:4, 满足施肥比例的设计要求。

4 田间试验

4.1 试验装置

为验证仿真试验得到的优化参数, 加工了空间分层施肥装置, 并进行田间试验验证。为便于实际加工, 将优化得到的结构和工作参数进行取整, 取施

肥调节片前端宽度为3.6 mm,后端宽度为21.5 mm,安装角为43°。试验样机如图9所示。

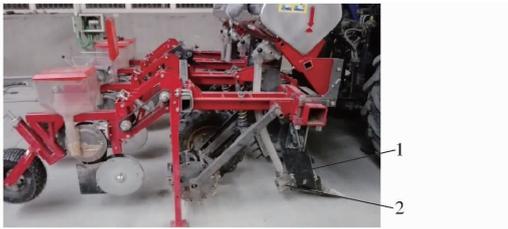


图9 试验样机

Fig.9 Test prototype

1. 曲面深松铲 2. 空间分层施肥装置

4.2 试验设计与方法

为验证不同作业速度和不同施肥量条件下,空间分层施肥装置的各层肥料分配性能和分层施肥性能,进行样机性能试验。玉米施肥播种速度一般在6~10 km/h,施肥量为350~750 kg/hm²,试验中取作业速度为6、7、8、9、10 km/h,施肥量为350、550、750 kg/hm²,进行试验验证。试验前对施肥量进行标定,根据不同作业速度下不同的施肥量,进行排肥器排肥速度的换算,使施肥量近似为目标值。机具实际作业时,前进速度难以严格控制为某一值,因此作业速度为目标速度的近似值。由于试验指标为各层施肥量的比例,作业速度和施肥量的微波动对试

验结果影响较小,可忽略不计。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 各层肥料分配性能试验

为验证空间分层施肥装置各层肥料分配性能,按照不同试验组合进行试验,收集、称量并计算各层排肥口出肥量的比例。因分层施肥装置入土后难以测量各层排肥口的出肥量,因此将机具通过三点悬挂提升,转动地轮,实现排肥功能,测试不同试验组合下各层肥料分配比例。将空间分层施肥装置各层排肥口处固定集肥袋(图10),收集各层肥料,试验完成后测量各层集肥袋肥量,计算各层施肥比例,试验结果如表5所示。



图10 各层肥料分配性能试验

Fig.10 Experiment on fertilizer distribution performance of each layer

表5 各层施肥量比例

Tab.5 Proportion of amount of fertilizer discharged in each layer

%

施肥量/ (kg·hm ⁻²)	施肥位置	作业速度/(km·h ⁻¹)					平均值	变异系数
		6	7	8	9	10		
350	上层	28.47	31.26	30.74	29.44	31.41	30.26	4.2
	中层	29.32	30.43	31.32	30.65	28.31	30.01	4.0
	下层	42.21	38.31	37.94	39.91	40.28	39.73	4.3
550	上层	29.31	30.34	31.65	28.56	30.74	30.12	4.0
	中层	29.09	31.16	29.24	30.51	31.64	30.33	3.7
	下层	41.60	38.50	39.11	40.93	37.62	39.55	4.2
750	上层	29.32	30.41	31.40	31.57	29.62	30.46	3.3
	中层	29.25	31.58	30.73	29.76	30.13	30.29	3.0
	下层	41.43	38.01	37.87	38.67	40.25	39.25	3.9

由试验结果可知,在作业速度不同、施肥量相同时,3层排肥口出肥量的比例变化不大,中层排肥口出肥量变异系数小于其他2层,下层排肥口出肥量变异系数最大,各层的最大变异系数为4.3%,满足排肥要求。在作业速度相同、施肥量不同时,3层排肥口出肥量的比例变化较小,随施肥量的增加,各层排肥口出肥量变异系数呈减小趋势,最小为3.0%。试验结果表明,在不同作业速度和不同施肥量条件下,空间分层施肥装置各层排肥口出肥量比例符合3:3:4的配比要求。

4.3.2 分层施肥性能试验

为验证空间分层施肥装置分层施肥性能,按照

不同试验组合进行试验,试验完成后,每组试验随机选取3个点,横向剖开施肥后的土壤(图11),测量各层肥料的施肥深度以及各层肥料的横向距离(以土壤中各层肥料的中心作为测量点),取平均值,结果如表6所示。经试验测得,空间分层施肥装置上层排肥口排出的肥料主要分布在距地表60.6~68.7 mm之间,中层排肥口排出的肥料主要分布在132.1~139.2 mm之间,下层排肥口排出的肥料主要分布在194.2~198.4 mm之间,与设计的理论施肥深度(60、130、200 mm)相差10 mm以内;上层与中层排肥口横向距离在13.6~16.4 mm之间,中层

与下层排肥口横向距离在 31.3 ~ 36.4 mm 之间,与设计的理论距离(15.35 mm)相差 6 mm 以内。各层肥量分配上呈现出下层肥料多,上层和中层肥料少,达到预期效果。

选用史丹利玉米复合肥,其球形率为 96%,等效粒径为 3.66 mm,肥料品牌不同其物理特性参数会存在一定差异,其中肥料颗粒球形率和等效粒径对装置排肥过程影响较大。目前常见的玉米颗粒复合肥与该肥料相比,各项物理性状基本相同,三轴尺寸和球形率等参数的差值在 10% 以内,因此该肥料有一定代表性,优化后的空间分层施肥装置可适用于与试验所用肥料物理性状相近的其他肥料。



图 11 分层施肥效果图

Fig. 11 Effect picture of layered fertilization

5 结论

(1)设计了一种玉米空间分层施肥装置,可将肥料施至深度 60 ~ 200 mm,施肥比例易于调节,上、中、下层肥料可达到最佳施肥比例 3:3:4,且肥料从上到下均匀分布不断接近种子主根系,利于玉米生长。

(2)运用离散元法揭示了肥料下落过程中的运动规律,分析不同施肥调节片安装角下,各层肥料的分配效果,采用二次正交旋转组合试验,确定了在最

表 6 各层肥料位置分布
Tab. 6 Fertilizer location distribution in each layer

作业速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	肥料位置	施肥量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
		350	550	750
6	上层深度	62.5	65.4	66.2
	中层深度	133.2	132.6	138.4
	下层深度	195.6	197.3	196.1
	上层与中层横向距离	15.2	14.7	15.6
	中层与下层横向距离	33.4	31.3	34.8
	7	上层深度	65.4	68.7
中层深度		135.6	136.0	139.2
下层深度		194.5	196.4	197.3
上层与中层横向距离		14.3	13.7	15.4
中层与下层横向距离		35.1	34.8	35.6
8		上层深度	61.5	66.7
	中层深度	132.5	134.3	135.8
	下层深度	197.6	194.2	195.4
	上层与中层横向距离	15.2	14.3	13.6
	中层与下层横向距离	34.8	36.4	33.7
	9	上层深度	64.5	62.7
中层深度		133.6	135.5	137.4
下层深度		196.6	197.5	198.4
上层与中层横向距离		14.3	16.1	15.6
中层与下层横向距离		33.7	36.1	35.8
10		上层深度	60.6	65.4
	中层深度	133.5	132.1	136.4
	下层深度	195.3	197.8	194.2
	上层与中层横向距离	16.4	15.8	15.4
	中层与下层横向距离	34.3	35.6	34.8

佳施肥配比 3:3:4 情况下,施肥调节片前端宽度为 3.61 mm,后端宽度为 21.52 mm,安装角为 43.23°。

(3)在不同作业速度和不同施肥量条件下,进行了空间分层施肥装置的田间试验,各层的施肥量变异系数不大于 4.3%,表明分层施肥装置的工作性能比较稳定。各层肥料在土壤中的分布深度、各层肥料之间的横向距离与理论设计的误差分别在 10、6 mm 以内,各层肥量分配上呈现出下层肥料多,上层和中层肥料少,达到预期效果。

参 考 文 献

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [2] 张福锁. 没有化肥就没有现在的农业[J]. 黑龙江粮食,2017(8):49-50.
ZHANG Fusuo. Without fertilizer, there would be no current agriculture[J]. Heilongjiang Grain, 2017(8):49-50. (in Chinese)
- [3] 张福锁. 科学认识化肥的作用及合理利用[J]. 农机科技推广,2017(1):38-40,43.
ZHANG Fusuo. Scientific understanding of the function of chemical fertilizer and its rational utilization[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2017(1):38-40,43 (in Chinese)
- [4] 周全,赵洪利. 玉米大豆机械化施肥技术探讨[J]. 现代化农业,2014,22(4):9-10.
ZHOU Quan, ZHAO Hongli. Discussion on mechanized fertilization technology of corn and soybean[J]. Modernizing

- Agriculture,2014,22(4):9-10. (in Chinese)
- [5] 夏循峰,胡宏. 我国肥料的使用现状及新型肥料的发展[J]. 化工技术与开发,2011,40(11):45-48.
XIA Xunfeng, HU Hong. Utilization present situation of fertilizers in China and new type of fertilizers [J]. Technology & Development of Chemical Industry,2011,40(11):45-48. (in Chinese)
- [6] 张东兴,杨丽,孙士明,等. 玉米全程机械化生产技术与装备[M]. 北京: 中国农业大学出版社,2014.
- [7] 赵飞燕,吴秋平,韩燕. 不同施肥方式对玉米生长及产量的影响[J]. 山西农业科学,2018,46(10):1668-1670,1698.
ZHAO Feiyan, WU Qiuping, HAN Yan. Effects of different fertilization methods on growth and yield of maize [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2018,46(10):1668-1670,1698. (in Chinese)
- [8] 刘宇杰,刘晓燕,刘梅. 不同施肥方式对玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 现代农业,2019(1):40-43.
LIU Yujie, LIU Xiaoyan, LIU Mei. Effects of different fertilization methods on corn yield and fertilizer utilization [J]. Modern Agriculture,2019(1):40-43. (in Chinese)
- [9] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式变量施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)
- [10] 王秀,赵四申,高清海,等. 夏玉米免耕播种不同机械施肥方式的生态及经济效益分析[J]. 河北农业大学学报,2000,23(1):85-87.
WANG Xiu, ZHAO Sishen, GAO Qinghai, et al. The ecological and economic analysis of mechanical adding fertilizer in zero tillage corn seeding [J]. Journal of Agricultural University of Hebei,2000,23(1):85-87. (in Chinese)
- [11] 赵法箴. 玉米分层深施肥试验及机械施肥技术的研究与应用[J]. 农机化研究,1996,18(4):62-63.
ZHAO Fazhen. Research and application of maize layer deep fertilization experiment and mechanical fertilization technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,1996,18(4):62-63. (in Chinese)
- [12] 刘兆辉,吴小宾,谭德水,等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学,2018,51(20):3827-3839.
LIU Zhaohui, WU Xiaobin, TAN Deshui, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China [J]. Scientia Agricultura Sinica,2018,51(20):3827-3839. (in Chinese)
- [13] 李国生,吴小宾,魏建林,等. 分层施肥对玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 山东农业科学,2020,52(3):66-71.
LI Guosheng, WU Xiaobin, WEI Jianlin, et al. Effect of stratified fertilization on yield and nitrogen use efficiency of corn [J]. Shandong Agricultural Sciences,2020,52(3):66-71. (in Chinese)
- [14] 张美微,乔江方,谷利敏,等. 不同土层氮肥配施方式对夏玉米生长发育及氮肥利用的影响[J]. 中国农学通报,2017(20):66-70.
ZHANG Meiwei, QIAO Jiangfang, GU Limin, et al. Influence of nitrogen fertilizer combined application in different soil layers on growth development and nitrogen use of summer maize [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2017(20):66-70. (in Chinese)
- [15] 郭建勋. 化肥机械深施与传统施肥和人工施肥对比[J]. 农业工程,2013,3(1):26-27.
GUO Jianxun. Comparison between deep mechanized application of fertilizer and traditional fertilization or artificial fertilization [J]. Agricultural Engineering,2013,3(1):26-27. (in Chinese)
- [16] 桑金梅,牛淑芳,张玉玲,等. 机械深施化肥技术在玉米生产上的应用[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2003,23(4):328-330.
SANG Jinmei, NIU Shufang, ZHANG Yuling, et al. Application of fertilizer-mechanical-deep-ploughing technique in corn-growing [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition),2003,23(4):328-330. (in Chinese)
- [17] 吴景贵,任成礼,代静玉,等. 玉米一次性分层施肥技术研究[J]. 土壤肥料,1995,1(1):29-32.
WU Jinggui, REN Chengli, DAI Jingyu, et al. Study on one-time stratified fertilization technology for maize [J]. Soils and Fertilizers,1995,1(1):29-32. (in Chinese)
- [18] 刘进宝,赵岩,郑炫,等. 2FQ-5 多层施肥机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2017,52(3):140-147.
LIU Jinbao, ZHAO Yan, ZHENG Xuan, et al. Design and experiment of 2FQ-5 multilayer fertilizer machine [J]. Journal of Gansu Agricultural University,2017,52(3):140-147. (in Chinese)
- [19] 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.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering,2016,47(Supp.):163-169. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)
- [20] 赵金,张晋国. 玉米深松全程施肥精量播种机关键部件的设计[J]. 农机化研究,2012,34(5):83-85,90.
ZHAO Jin, ZHANG Jinguo. The design of the key components of precise planter with subsoil and whole layer fertilization [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012,34(5):83-85,90. (in Chinese)
- [21] 赵淑红,王加一,陈君执,等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):82-92.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage [J/

- OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 82 - 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.011. (in Chinese)
- [22] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80 - 88. HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80 - 88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
- [23] 黄幸媛. 空间分层施肥玉米播种机关键部件设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. HUANG Xingyuan. Design and experiment of a layered fertilization device for corn planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [24] 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, 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)
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [26] 何永强, 贺俊林, 杨作梅. 犁体曲面离散元仿真试验与参数优化[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 189 - 193, 257. HE Yongqiang, HE Junlin, YANG Zuomei. Discrete element simulation and parameter optimization of plow surface[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 189 - 193, 257. (in Chinese)
- [27] COSKUN M, YALCIN L, OZARSLAN C. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays*saccharata Sturt)[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4): 523 - 528.
- [28] 刘正道, 王庆杰, 刘春鸽, 等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 137 - 144, 355. LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LIU Chungge, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 137 - 144, 355. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.015. (in Chinese)
- [29] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD - DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 81 - 89. YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 - 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
- [30] 王英博, 荣高, 李洪文, 等. 立式驱动浅旋耙设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 38 - 47. WANG Yingbo, RONG Gao, LI Hongwen, et al. Design and parameter optimization of vertical driving-type surface rotary tillage machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 38 - 47. (in Chinese)