

大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验

赵淑红 杨罗罗 张鑫 侯磊涛 袁溢文 杨悦乾
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 在玉米-大豆轮作免耕种植模式下,针对玉米根土结合体较大且垄向分布不均匀,阻碍大豆垄上双行播种开沟器垄向运动,导致播种深度均匀性和行距一致性较差等问题,设计了一种锯齿式大豆垄上双行播种开沟器。在阐述锯齿式大豆垄上双行播种开沟器结构和工作原理的基础上,对前刀曲线进行了设计,推导出前刀曲线方程;分析了侧刃切割根系力学模型,确定侧刃为锯齿形;对玉米根土结合体进行农艺学测量,确定了锯齿形侧刃的关键参数;根据大豆播种的农艺要求,明确了开沟器主体内导种管以交错形式布置,同时确定了锯齿式开沟器的入土隙角为5°。离散元仿真试验结果表明:锯齿式开沟器能有效切断玉米根系且有较优的工作稳定性,进而验证了设计的合理性。在机组前进速度7 km/h、开沟深度50 mm条件下,以根系切断率为主要指标进行田间性能试验,结果表明:锯齿形侧刃有较强的锯切能力,平均根系切断率达97.25%。与双圆盘开沟器进行田间对比试验,结果表明:锯齿式开沟器比双圆盘开沟器开沟深度变异系数降低43.33%、种子横向距离变异系数降低60.81%。仿真试验和田间试验均表明锯齿式开沟器满足免耕大豆垄上双行播种农艺要求。

关键词: 大豆; 双行; 免耕播种; 开沟器; 锯齿; 离散元

中图分类号: S223.2*4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)01-0074-11 **OSID:** 

Design and Experiment of Zigzag Opener for Double-row No-tillage Seeding on Soybean Ridge

ZHAO Shuhong YANG Luoluo ZHANG Xin HOU Leitao YUAN Yiwen YANG Yueqian
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Under the corn – soybean rotation no-tillage planting mode, the corn root-soil combination is large and the ridge distribution is uneven, which hinders the ridge movement of the double-row sowing opener on the soybean ridge, resulting in the uniformity of the seeding depth and the consistency of the row spacing. For poor problems, a double-row sowing opener on a sawtooth soybean ridge was designed. Based on the description of the structure and working principle of the double-row sowing opener on the zigzag soybean ridge, the rake curve was designed, and the rake curve equation was deduced; the mechanical model of the side cutting root system was analyzed, and the side cutting was determined to be sawtooth. The agronomic measurement of the corn root-soil combination determined the key parameters of the sawtooth side edge; according to the agronomic requirements of soybean seeding, it was clear that the seed guide tube in the main body of the opener was arranged in a staggered manner, and the sawtooth opening was determined. The gap angle of the ditch device was 5°. The results of the discrete element simulation verification test showed that the sawtooth opener can effectively cut the corn root system and had better working stability, which verified the rationality of the design idea. Under the conditions of a forward speed of 7 km/h and a trenching depth of 50 mm, the field performance test was conducted with the root cutting rate as the main indicator. The results showed that the serrated side edge had a strong sawing ability, and the average root cutting rate was 97.25%. Field comparison experiments with double-disc openers showed that compared with double-disc openers, the coefficient of variation of trenching depth was reduced by 43.33%, and the coefficient of variation of transverse seed spacing was reduced by 60.81%. Both the simulation test and the field test showed that the sawtooth opener met the agronomic requirements of double-row sowing on no-till soybean ridges.

Key words: soybean; double-row; no-tillage sowing; opener; sawtooth; discrete element

0 引言

大豆属养地作物,玉米为耗地作物,玉米-大豆轮作可有效储存土壤营养成分^[1-4]。东北黑土地大豆垄作主要以窄行密植为主,垄上双行较单行种植增产 15% 以上^[5]。由于大豆种子发育对种床的要求较高,而免耕播种可有效提高降水利用率、增加土壤中有机的含量,故免耕播种更有利于大豆作物的生长^[6-7]。免耕播种过程主要包括破茬、施肥、开沟、排种、覆土、镇压等作业程序,其中开沟质量是影响播种精确性的重要因素之一^[8-11]。但在播种作业时,由于玉米根土结合体较大且垄向分布不均,破茬刀和施肥铲只能沿机组前进方向将根土结合体纵向(垄向的竖直方向)切开和扰动,地表下的根土结合体仍然团聚较大,进而阻碍开沟器垄向运动,致使无法满足大豆双行播种深度均匀性和行距一致性的要求。因此,解决地表下玉米根土结合体对开沟质量的影响,可有效提高播种质量。

目前,大豆垄上双行免耕播种机主要采用双圆盘开沟器,双圆盘开沟器在作业时,土壤扰动大且无护种装置,种子容易与沟墙碰撞,从而导致种子分布均匀性和播深一致性差^[12-13]。贾洪雷等^[9]设计了大豆播种双 V 型筑沟器,解决了双圆盘开沟器土壤扰动大、大豆种子易弹跳等问题。侯守印等^[11]设计了一种分体式大豆垄上双行免耕播种开沟器,解决了免耕作业过程中开沟器入土难、易堵塞等问题。VAMERALI 等^[14]设计了一种宽翼型锐角免耕播种开沟器,解决了种床土壤紧实度不足等问题。但针对解决地表下玉米根土结合体阻碍大豆双行播种开沟器垄向运动,进而影响其开沟质量的研究鲜见报道。

本文设计一种锯齿式大豆双行播种开沟器,以提高播种深度均匀性、行距一致性,实现交错播种。通过理论分析和农艺学测量,设计前刀、锯齿形侧刃等锯齿式开沟器关键参数,并开展离散元仿真验证试验、田间性能和对比较试验,以期为提高大豆垄上双行免耕播种机播种质量提供参考。

1 总体结构与工作原理

大豆垄上双行免耕播种机是本文所设计的锯齿式播种开沟器工作平台,如图 1 所示。主要由排种系统、锯齿式开沟器、破茬刀、施肥铲、地轮、覆土器、肥箱、镇压轮等构成。锯齿式开沟器主要由铲柄、前刀、锯齿形侧刃、挡土板、导种管等组成,如图 2 所示。

大豆垄上双行免耕播种作业时,首先通过圆盘

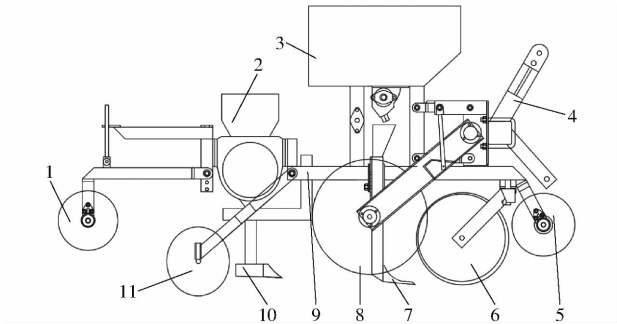


图 1 大豆垄上双行免耕播种机结构示意图

Fig.1 Schematic of double-row no-tillage planter on soybean ridge

- 1.镇压轮 2.排种系统 3.肥箱 4.三点悬挂架 5.前镇压轮
6.圆盘破茬刀 7.圆弧施肥铲 8.地轮 9.单体梁 10.锯齿式开沟器 11.覆土器

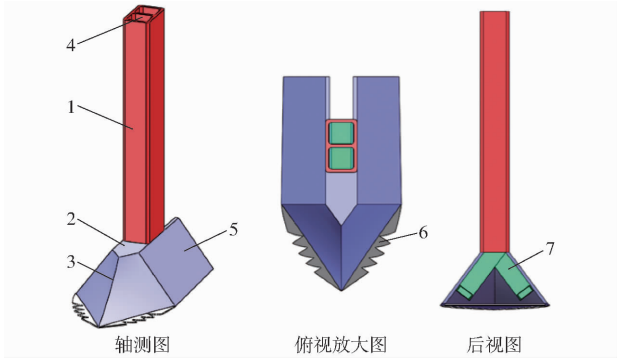


图 2 锯齿式开沟器结构图

Fig.2 Sawtooth opener structure diagram

- 1.铲柄 2.5.挡土板 3.前刀 4.分种板 6.锯齿形侧刃 7.导种管

破茬刀对玉米根茬沿机组前进方向进行纵向切割;其次圆弧施肥铲开出较小肥沟;最后锯齿式开沟器的前刀先将土壤沿竖直方向切开,接着锯齿形侧刃横向(垄向的水平方向)切断阻碍开沟器垄向运动的根系,以保证播种深度均匀性和行距一致性,构建良好种床环境;同时,大豆种子从双行排种器排种口进入被分种板分开的铲柄内部,落到前后布置的两导种管中,进行交错播种。

2 开沟器关键参数设计

2.1 前刀曲线设计

对于前刀,刃口形状一般分为曲线和直线两种,刃口为曲线时开沟阻力更小^[15]。免耕作业时,不同的前刀曲线对于耕层土壤与表层秸秆的运动以及翻土效果有着重要的影响。在作业过程中,拥有凹线型刃口曲线的开沟器开出的种沟宽度、抛土宽度以及土壤扰动沟型截面积比刃口曲线为凸线型要小^[16],所以前刀曲线优先选择凹型曲线。在土壤团聚体内部,可近似认为土壤颗粒之间的距离保持恒定。如图 3 所示, M 、 N 表示土壤团聚体内部两颗

粒,两颗粒之间距离为定值,假设 N 在重力的作用下做竖直下落运动,那么 M 在重力及 N 对其的作用力下运动,其运动轨迹符合曳物线的性质。若选取曳物线为前刀曲线,则前刀在触土作业时,土壤颗粒有沿着前刀曲线向前运动的趋势,可以提高开沟器工作稳定性并减少土壤扰动,故前刀曲线设计为曳物线形。

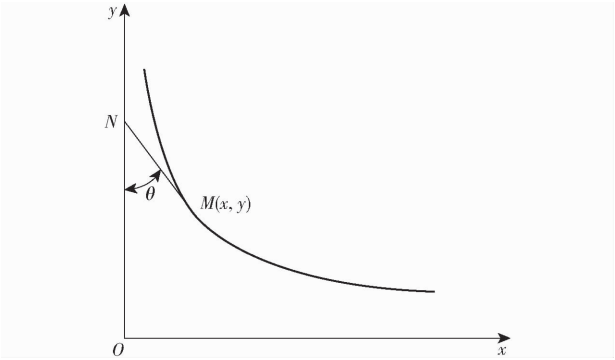


图 3 曳物线
Fig. 3 Tractrix

在平面 xOy 内,设参数方程为

$$\begin{cases} x = x(\theta) \\ y = y(\theta) \end{cases} \tag{1}$$

式中 θ —— y 轴与 MN 夹角

则曲线在点 M 的切向量是 $\left(\frac{dx}{d\theta}, \frac{dy}{d\theta}\right)$ 。所以曲线在点 M 处的切线方程为

$$Y - y = \frac{\frac{dy}{d\theta}}{\frac{dx}{d\theta}}(X - x) \tag{2}$$

式中 X ——某时刻点 M 的 x 轴坐标
 Y ——某时刻点 M 的 y 轴坐标

则切线与 y 轴交点 N 的坐标为 $\left(0, y - \frac{\frac{dy}{d\theta}}{\frac{dx}{d\theta}}x\right)$ 。

令 $l_{MN} = a$, 所以

$$x^2 + x^2 \left(\frac{\frac{dy}{d\theta}}{\frac{dx}{d\theta}}\right)^2 = a^2 \tag{3}$$

因此,由式(3)可解得

$$\frac{dy}{d\theta} = \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{x} \frac{dx}{d\theta}$$

令 $x = a \sin \theta$, 则

$$dy = \frac{a \cos \theta}{a \sin \theta} a \cos \theta d\theta = a \left(\frac{1}{\sin \theta} - \sin \theta\right) d\theta \tag{4}$$

$$\text{即 } y = \int a \left(\frac{1}{\sin \theta} - \sin \theta\right) d\theta = a \left(\ln \tan \frac{\theta}{2} + \cos \theta\right) \tag{5}$$

所以求得以 y 轴为渐近线的参数方程为

$$\begin{cases} x = a \sin \theta \\ y = a \left(\ln \tan \frac{\theta}{2} + \cos \theta\right) \end{cases} \tag{6}$$

将 $\sin \theta = \frac{x}{a}$ 代入式(6)中,整理可得曳物线方程为

$$y = a \ln \frac{a - \sqrt{a^2 - x^2}}{x} + \sqrt{a^2 - x^2} \tag{7}$$

对式(7)求导可得

$$y' = \frac{a^3 - a^2 \sqrt{a^2 - x^2}}{ax \sqrt{a^2 - x^2} - a^2 x + x^3} - \frac{x}{\sqrt{a^2 - x^2}} \tag{8}$$

如图 4 所示,设 $P(x_1, y_1)$ 、 $Q(x_2, y_2)$ 两点的斜率分别为 k_P 、 k_Q , 则

$$k_P = \tan \delta_1 = \frac{a^3 - a^2 \sqrt{a^2 - x_1}}{ax_1 \sqrt{a^2 - x_1^2} - a^2 x_1 + x_1^3} - \frac{x_1}{\sqrt{a^2 - x_1^2}} \tag{9}$$

$$k_Q = \tan \delta_2 = \frac{a^3 - a^2 \sqrt{a^2 - x_2}}{ax_2 \sqrt{a^2 - x_2^2} - a^2 x_2 + x_2^3} - \frac{x_2}{\sqrt{a^2 - x_2^2}} \tag{10}$$

式中 δ_1 ——点 P 入土角 δ_2 ——点 Q 入土角
根据公式(9)、(10)求得 P 、 Q 两点的横坐标 x_1 、 x_2 为

$$x_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a \sqrt{\cos(2\delta_1) + 1} \tag{11}$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} a \sqrt{\cos(2\delta_2) + 1} \tag{12}$$

则

$$l_{PQ} = x_2 - x_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a \sqrt{\cos(2\delta_2) + 1} - \frac{\sqrt{2}}{2} a \sqrt{\cos(2\delta_1) + 1} \tag{13}$$

由式(13)可得

$$a = \frac{2l_{PQ}}{\sqrt{2}(\sqrt{\cos(2\delta_1) + 1} - \sqrt{\cos(2\delta_2) + 1})} \tag{14}$$

将式(14)代入式(7)中,可得前刀曲线方程为

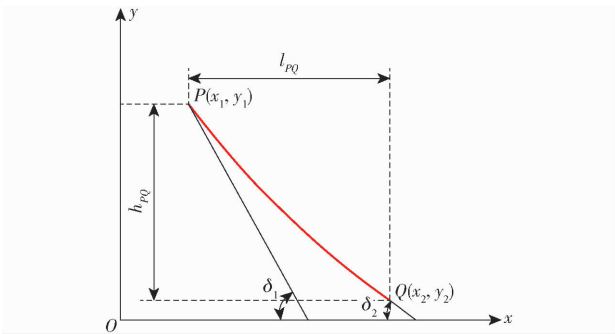


图 4 前刀示意图
Fig. 4 Rake diagram

$$y = \frac{2l_{pQ}}{\sqrt{2}(\sqrt{\cos(2\delta_1)} + 1 - \sqrt{\cos(2\delta_2)} + 1)} \cdot \ln \frac{\frac{2l_{pQ}}{\sqrt{2}(\sqrt{\cos(2\delta_1)} + 1 - \sqrt{\cos(2\delta_2)} + 1)} - \sqrt{\left[\frac{2l_{pQ}}{\sqrt{2}(\sqrt{\cos(2\delta_1)} + 1 - \sqrt{\cos(2\delta_2)} + 1)}\right]^2 - x^2}}{x} + \sqrt{\left[\frac{2l_{pQ}}{\sqrt{2}(\sqrt{\cos(2\delta_1)} + 1 - \sqrt{\cos(2\delta_2)} + 1)}\right]^2 - x^2} \quad (15)$$

由公式(15)可知,前刀曲线形状由 δ_1 、 δ_2 以及 l_{pQ} 决定,参照文献[17],取 $\delta_1 = 55^\circ$ 、 $\delta_2 = 25^\circ$,根据农艺要求,大豆播种开沟深度在 30 ~ 50 mm 为宜,因此为了保证开沟器具有足够的作业空间, h_{pQ} 取 60 mm, l_{pQ} 取 60 mm,由式(14)解得 $a = -180$ mm,则可得前刀刃的曲线方程为

$$y = -180 \ln \frac{-180 - \sqrt{180^2 - x^2}}{x} + \sqrt{180^2 - x^2} \quad (16)$$

2.2 锯齿形侧刃设计

2.2.1 侧刃曲线设计

前茬作物玉米根土结合体较大且垄向分布不均匀,田间实际生长情况如图 5 所示。在播种作业时,破茬刀和施肥铲只能沿前进方向将根土结合体纵向切开,地表下的根土结合体仍然团聚较大,严重影响大豆双行播种深度均匀性和行距一致性。因此,针对上述问题在开沟器主体两侧设计侧刃,横向切割相应根系,以提高开沟器工作性能。



图 5 垄上玉米根系实际排列

Fig. 5 Actual arrangement of corn stubble on ridge

等进螺线具有较好的滑切性能^[18],因此侧刃曲线采用等进螺线,其方程为

$$r_n = r_0 + r\varphi \quad (17)$$

式中 r_0 ——起点极径,mm

r_n ——螺线极径

r ——极角每增加一弧度时极径的增量,mm

φ ——任意点的极角,rad

借助 S150 型旋耕刀来计算 r ,查阅文献[19]可知 $r_n = 130$ mm, $r_0 = 92$ mm。

$$\begin{cases} \varphi_n = \frac{r_n - r_0}{r} \tan \tau \\ r = \frac{r_n - r_0}{\varphi_n} \end{cases} \quad (18)$$

式中 τ ——螺线终点处的滑切角, ($^\circ$)

φ_n ——螺线终点的极角,rad

由文献[19]可知 τ 取 55° 。由式(18)解得 $\varphi_n = 0.42$ rad, $r = 90.48$ mm。

则螺线方程为

$$r_n = 92 + 90.48\varphi \quad (19)$$

由于侧刃安装在开沟器主体两侧,所以其螺线的弦长为定值。为保证侧刃安装的精确性,首先借助 AutoCAD 测定其所需弧长。其方法是根据螺线方程式绘制出 $0 \sim 2\pi$ 范围内曲线,进而绘制其弦长,测得弧长 l 为 105 mm。由螺线弧长公式

$$\int_0^\varphi (92 + 90.48\varphi) d\varphi = l \quad (20)$$

计算可得 $\varphi = 0.81$ rad,故 φ 的范围为 $(0, 0.81 \text{ rad})$ 。考虑到侧刃在进行切割时具有足够的强度以及方便加工,侧刃厚度设计为 1.5 mm。

2.2.2 侧刃切割根系力学分析

取根系体内一质点 O 为研究对象,假定该质点随拖拉机沿 z 方向进行平行移动,侧刃切割根系过程中,质点 O 的受力如图 6 所示(m 为侧刃切线方向, n 为侧刃法线方向)。

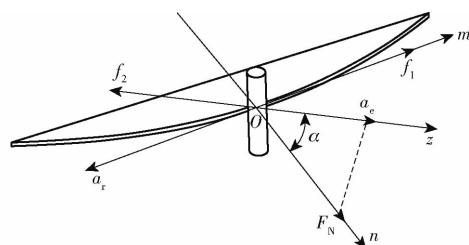


图 6 质点 O 受力分析

Fig. 6 Force analysis of particle O

侧刃切割根系时质点 O 的动力学关系式为

$$\begin{cases} F_N - f_1 \cos \alpha = m' a_e \cos \alpha \\ f_1 \sin \alpha - f_2 = m' (a_r - a_e \sin \alpha) \\ f_1 = \mu F_N \sin \alpha \\ f_2 = \mu F_N \end{cases} \quad (21)$$

式中 a_e ——点 O 的牵连加速度, m/s^2
 a_r ——点 O 的相对加速度, m/s^2
 F_N ——侧刃对点 O 的法向压力, N
 f_1 ——侧刃对点 O 的切向摩擦力, N
 f_2 ——侧刃对点 O 的竖向摩擦力, N
 α ——滑切角, $(^\circ)$
 m' ——质点 O 的质量, kg
 μ ——侧刃与根系的摩擦因数
由关系式(21)可解得

$$\begin{cases} a_e = \frac{F_N \left(1 - \frac{1}{2} \mu \sin(2\alpha) \right)}{m' \cos\alpha} \\ a_r = \frac{F_N (\mu \cos(2\alpha) + \tan\alpha)}{m'} \end{cases} \quad (22)$$

质点 O 的受力直接影响侧刃切割根系的效果, 由式(22)可知, F_N 、 μ 、 α 影响 a_r 的大小。因此, 相较光滑的等进螺旋形侧刃, 在等进螺旋形侧刃的基础上增加锯齿, 可以增大摩擦因数 μ , 从而使 a_r 增大, 故可提高侧刃切割根系的能力。为此下面通过农艺学测量, 以等进螺旋形侧刃为基础, 对锯齿进行设计。

2.3 物料滑动摩擦角测定及锯齿设计

由于玉米根土结合体内摩擦因数复杂多变, 所以具有固定滑切角的斜刃切割玉米根土结合体时效果不佳^[20]。因此为了提高侧刃切割根系的能力, 对玉米根土结合体划分区段, 利用斜面法测其滑动摩擦角, 由农艺要求可知, 大豆播种深度为 30 ~ 50 mm, 故选择距地面 50 mm 的根系及土壤取样, 测定其滑动摩擦角。试验样品取自东北农业大学校内试验田, 为了使试验样品具有完整性及代表性, 进行随机取样, 取样方法参考文献[21], 如图 7 所示。将试验样品按直径对玉米根土结合体划分为 5 个区段, 如图 8 所示, 切取根土结合体相应区段的物料进行试验, 利用斜面法对物料的滑动摩擦角进行测定,



图7 根土结合体样品

Fig. 7 Sample of root-soil amalgame

测定方法参考文献[22], 试验结果剔除错误数据后取其平均值。不同区段划定范围以及对应平均滑动摩擦角如表 1 所示。

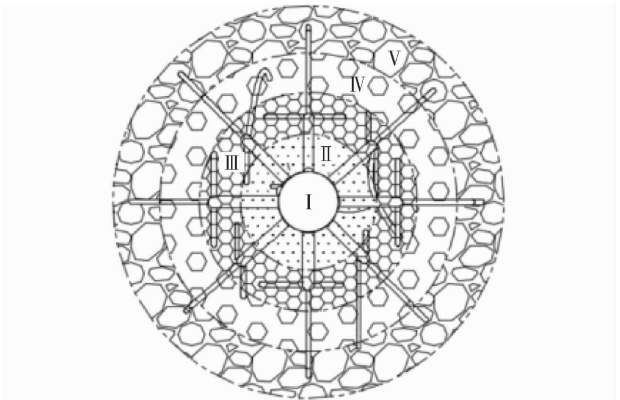


图8 区域划分简图

Fig. 8 Schematic of area division

表 1 不同直径范围物料平均滑动摩擦角

Tab.1 Average sliding friction of materials with different diameter ranges					
参数	区域				
	I	II	III	IV	V
边界直径/mm	30	60	90	120	150
摩擦角平均值/($^\circ$)	37.1	34.6	32.3	29.5	26.7

遵循滑切角大于摩擦角的结论, 参考文献[20] 中摩擦角 γ 与滑切角 α 的关系式

$$\begin{aligned} &2\tan^2\gamma\tan^3\alpha + 4\tan^2\gamma\tan\alpha + 4\tan\gamma\tan^4\alpha + \\ &4\tan\gamma\tan^2\alpha + 4\tan\gamma - 24\tan^5\alpha = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

借助 Matlab 软件, 计算对应滑切角, 结果取其整数, 如表 2 所示。

表 2 滑动摩擦角对应的滑切角

Tab.2 Sliding friction angle corresponded to sliding cut angle (°)					
参数	区域				
	I	II	III	IV	V
滑动摩擦角	37.1	34.6	32.3	29.5	26.7
最优滑切角	42	40	38	35	31

以滑动摩擦角为横坐标, 滑切角为纵坐标, 通过 Matlab 软件进行拟合, 得到侧刃齿形曲线, 如图 9 所示。拟合齿形曲线方程为

$$y = 0.003\,168x^3 - 0.344x^2 + 13.27x - 138.2 \quad (24)$$

若齿距太小, 不能很好地体现所拟合曲线切割性能; 太大则锯切效果不明显, 结合所设计开沟器主体尺寸, 齿宽 B 取 25 mm。在侧刃进行锯切时, 假定间隔时间 T 时, 将会有一个新的齿参与锯切, 锯切速度根据机组前进速度而定, 速度 v 取 $1.8\,\text{m/s}^{[9]}$, 则

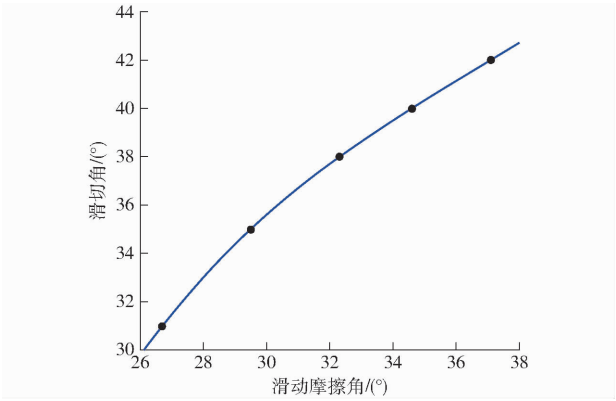


图 9 齿形拟合曲线
Fig.9 Tooth shape fitting curve

$$T=\frac{B}{v}$$

(25)

由式(25)可解得时间间隔 T 为 0.013 9 s。

由于侧刃主要解决垄向阻碍开沟器前进的玉米根土结合体对其工作性能的影响,在锯切过程中,锯切行程只要满足玉米根系根深在 50 mm 时根幅最大半径即可,参考文献[23]取根幅最大半径 R 为 70 mm,则侧刃切割根系的时间 t 为

$$t=\frac{R}{v}$$

(26)

由式(26)可得 t 为 0.039 s。

因此,同一时刻参与锯切的平均齿数 Z 为

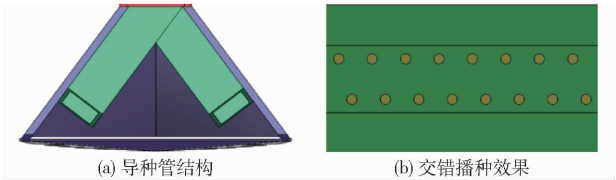
$$Z=\frac{t}{T}$$

(27)

由式(27)解得平均齿数 Z 为 2.8,因此侧刃齿数取整数 3。

2.4 其他部件设计

大豆种子为球形,在播种过程中极易发生弹跳,因此在开沟器主体内部设计导种管,以最大程度减小因种子弹跳而导致播种均匀性差的问题。同时导种管采用前后交错布置,实现双行交错播种。导种管结构如图 10a 所示,交错播种效果如图 10b 所示。在开沟器主体上下两侧安装挡土板,左右两侧安装梯形挡土板,且导种管设计为梯形,以防止土壤进入开沟器内部,造成导种管堵塞。



(a) 导种管结构 (b) 交错播种效果

图 10 导种管及播种效果

Fig.10 Seed guide tube and sowing effect

为了更好地将排种器排出的种子送入开沟器主体内的导种管中,铲柄方管内部中间采用隔板分开。锯齿式开沟器开沟深度可在 30 ~ 50 mm 范围

内调节,种子横向距离在 100 ~ 120 mm 之间。为方便入土,设计入土隙角为 5°^[19]。

3 离散元仿真验证

3.1 模型建立

3.1.1 土壤模型

利用 EDEM 软件进行土壤模型建立,根据前茬作物玉米的农艺要求以及大豆播种开沟器的尺寸,土槽尺寸设定长×宽×高为 1 600 mm×500 mm×150 mm。土壤颗粒模型设定为单一颗粒,颗粒半径设定为 6 mm。因为试验用地为东北壤土,土壤模型具体参数见表 3^[24-25]。土壤颗粒间的接触模型采用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,利用颗粒工厂进行土壤颗粒填充,颗粒数量不限,在土壤颗粒重力的作用下,使得土壤颗粒填满模型。为了使得土壤颗粒之间粘结更好,待第一次颗粒填满模型后进行沉降,沉降后继续填充,直至填满模型。

表 3 土壤模型基本参数

Tab.3 Basic parameters of soil model

参数	数值
颗粒间临界法向应力/MPa	200
颗粒间法向接触黏结刚度/(N·m ⁻¹)	3.4×10 ⁸
土壤颗粒粘结半径/mm	9.2
颗粒间临界切向应力/MPa	6.8×10 ⁵
颗粒间切向接触黏结刚度/(N·m ⁻¹)	1.5×10 ⁸
土壤动摩擦因数	0.14
土壤剪切模量/MPa	1.24
土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 850
土壤恢复系数	0.6
土壤泊松比	0.38
土壤静摩擦因数	0.33

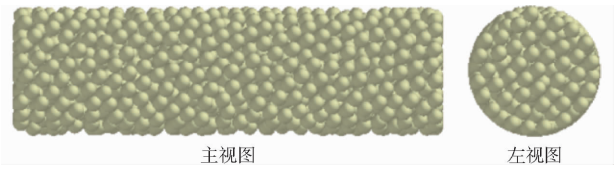
3.1.2 秸秆模型

本次离散元仿真验证试验涉及到破茬刀切割破碎秸秆,因此为了模拟秸秆破碎状态,秸秆模型建立同土壤模型类似,采用 EDEM 软件中的 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型。根据文献[22]中的秸秆模型参数进行秸秆模型建立,秸秆颗粒半径设置为 1.5 mm,具体参数如表 4 所示,秸秆模型如图 11 所示。

3.1.3 根系模型

一般根系离散元模型建立时采用刚性不可变几何体,这种模型可以很好地输出受力^[26],但不能很好地模拟根系破碎与变形情况。因此为了验证开沟器切割根系的效果,本试验根系模型采用根系颗粒粘结生成。土壤颗粒和根系之间的接触模型选择 JKR 模型,根系与土壤表面能设定为 10 J/m²^[22],根系模型其他参数参考文献[25],具体参数如表 5 所

示,玉米根系几何参数如图 12 所示。



主视图
图 11 玉米秸秆模型
Fig. 11 Corn straw model

表 4 秸秆模型基本参数

Tab. 4 Basic parameters of straw model	
参数	数值
秸秆颗粒黏结半径/mm	0.001 6
颗粒间临界法向应力/Pa	8.72×10^5
颗粒间法向接触黏结刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	9.60×10^6
颗粒间临界切向应力/Pa	7.50×10^5
颗粒间切向接触黏结刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	6.80×10^6
秸秆剪切模量/MPa	1.00
秸秆静摩擦因数	0.30
秸秆密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	241
秸秆泊松比	0.40
秸秆动摩擦因数	0.01
秸秆恢复系数	0.60

表 5 根系模型基本参数

Tab. 5 Basic parameters of root stubble model	
参数	数值
根系恢复系数	0.6
根系静摩擦因数	0.573
根系动摩擦因数	0.21
土壤-根系恢复系数	0.60
土壤-根系静摩擦因数	0.60
土壤-根系动摩擦因数	0.02
根系密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	107.64
根系泊松比	0.33
根系剪切模量/MPa	6.293
颗粒间法向接触黏结刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	1.034×10^6
颗粒间切向接触黏结刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	1.034×10^6
颗粒间临界法向应力/MPa	5.0×10^5
颗粒间临界切向应力/MPa	5.0×10^5
根系颗粒黏结半径/mm	0.001 7

3.1.4 整体模型

整体模型由根系、土壤、秸秆 3 部分组成,其中秸秆随机覆盖在土壤表面,秸秆覆盖量设定为 1.0 kg/m^2 ^[22]。本试验模型根系数选取 4 个,根系之间的距离设定为 300 mm。由于在播种时种子与播种行中心存在距离偏差,同时为了更好地验证开沟器锯齿形侧刃切割根系的效果,根系布置如图 13 所示。1 号根系与 3 号根系中心位于中心线上,2 号根系与 4 号根系的几何中心偏离土壤模型中心 15 mm。

为验证锯齿式开沟器设计思路的合理性及可行

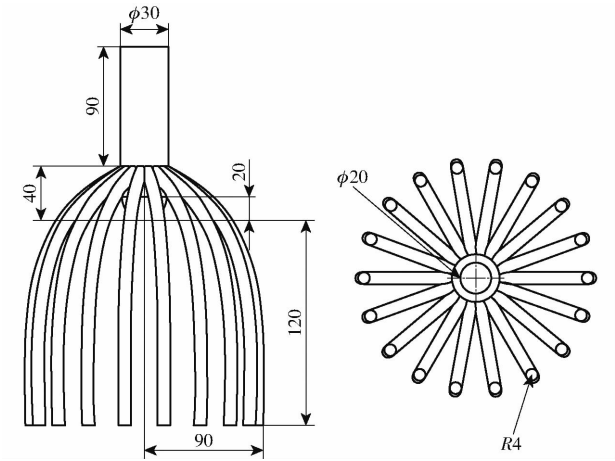


图 12 玉米根系几何参数示意图
Fig. 12 Schematic of geometric parameters of corn root system

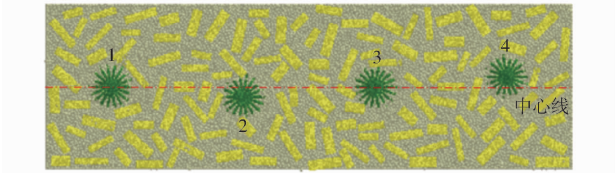


图 13 整体仿真模型
Fig. 13 Global simulation model

性,利用三维软件 SolidWorks 构建破茬刀-施肥铲-开沟器几何模型,保存为 step 格式导入 EDEM 软件整体模型中。设置机组前进速度分别为 5、7、9 km/h,开沟器入土深度为 50 mm,进行 3 组离散元仿真试验,如图 14 所示。

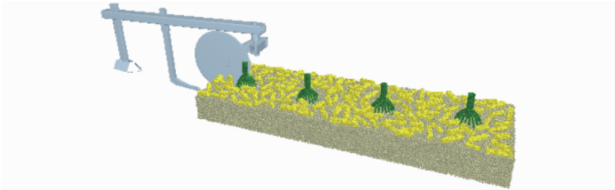


图 14 离散元仿真
Fig. 14 Discrete element simulation

3.2 仿真结果分析

3.2.1 切割根系能力

锯齿式开沟器锯齿形侧刃切割根系效果如图 15 所示,1、3 号根系在模型中心线上,破茬刀对其进行纵向切割,之后又被施肥铲作用,所以根系上方的留茬被切掉。由于破茬刀与施肥铲只对留茬以及根系进行纵向切割,切割宽度范围在 30 ~ 60 mm 之间,而开沟器底面宽达 120 mm,所以 1、3 号根系被开沟器锯齿形侧刃进行了横向锯切。2、4 号根系由于不在模型中心线上,故不在破茬刀及施肥铲的作用范围内,所以留茬没有遭到破坏,而根系被开沟器锯齿形侧刃进行了横向锯切。由仿真结果分析可知,模型中 4 个根系均被锯齿式开沟器锯齿形侧刃

横向锯切,验证了锯齿式开沟器锯齿形侧刃设计的可行性。

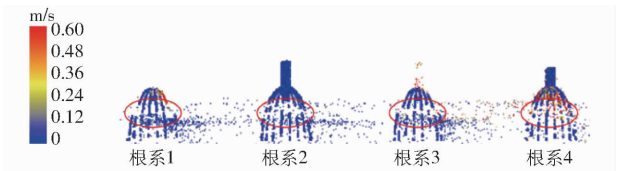


图 15 根系切割效果

Fig. 15 Discrete element simulation process

3.2.2 工作阻力

工作阻力以及随速度增大开沟阻力的平稳性是验证开沟器工作性能的重要指标^[27]。为验证锯齿式开沟器的工作性能,在开沟深度 50 mm 的条件下,机组前进速度分别以 5、7、9 km/h 进行离散元仿真试验。仿真结束后,输出开沟器的水平合力。

如图 16 所示,开沟器水平合力为负值,表示与前进方向相反,即开沟器阻力。图 16 中,在 39.02、39.37、39.70、40.03 s 时刻合力波动幅度较大,是由于开沟器与根系进行作用,阻力增大。39.02、39.37、39.70、40.03 s 时刻分别对应图 15 中开沟器依次与根系 1、2、3、4 作用。其中 39.02、39.70 s 时刻是开沟器分别与根系 1、3 作用,1、3 根系由于布置在模型中心线上,所以也受到破茬刀、施肥铲的作用,所以在开沟器对根系 1、3 作用时阻力较小。39.37、40.03 s 时刻为开沟器分别与根系 2、4 进行作用,而根系 2、4 的布置与模型中心线有偏差,与根系 1、3 相比,几乎没有被破茬刀和施肥铲作用,所以开沟器对根系 2、4 作用时阻力较大。合力除 4 个峰值外,其他时刻开沟器只与土壤和秸秆作用,合力在 -220 ~ 200 N 范围内波动,波动幅度较小,趋于平稳。

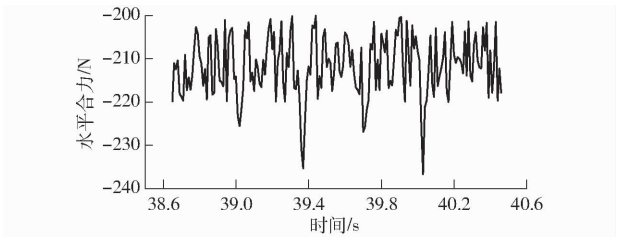


图 16 速度为 5 km/h 时开沟器水平合力变化曲线

Fig. 16 Change curve of resultant horizontal force of opener when speed was 5 km/h

如图 17 所示,为机组前进速度 7 km/h 时,开沟器水平合力随时间变化的趋势。此时峰值与机组前进速度 5 km/h 时的峰值相差 ± 5 N。除峰值外,合力也在 -220 ~ -200 N 范围内波动,同速度在 5 km/h 时的合力变化趋势接近。

图 18 为机组前进速度在 9 km/h 条件下,开沟器水平合力的变化趋势。与机组前进速度在 5 km/h

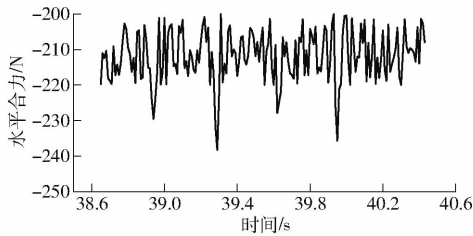


图 17 速度为 7 km/h 时开沟器水平合力变化曲线

Fig. 17 Change curve of resultant horizontal force of opener when speed was 7 km/h

和 7 km/h 条件下进行比较,峰值相差不大,除峰值外,其他时刻阻力略有增加,符合阻力随速度增大而增大的规律。

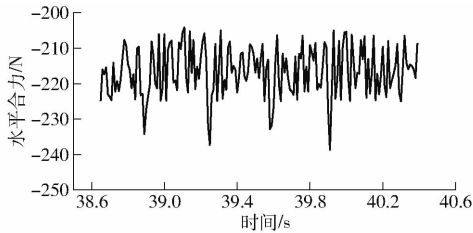


图 18 速度为 9 km/h 时开沟器水平合力变化曲线

Fig. 18 Change curve of resultant horizontal force of opener when speed was 9 km/h

综上所述,前刀为曳物线形的锯齿式开沟器可有效提高开沟器的工作稳定性。

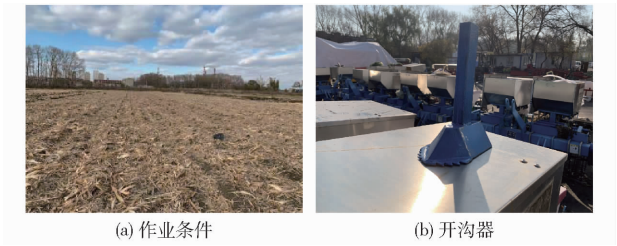
4 田间试验

通过离散元仿真表明,所设计的锯齿式开沟器达到了设计预期效果。为进一步验证锯齿式开沟器田间作业综合性能,进行田间性能试验,且与双圆盘开沟器进行对比试验。

4.1 试验材料

试验条件:田间试验于 2020 年 10 月 21—28 日在东北农业大学校内试验基地 (126.73°E, 45.74°N; 海拔:136 m) 实施。试验地为东北黑壤土,是垄作玉米收获后秸秆还田地,有秸秆和残茬覆盖,平均留茬高度 110 mm,秸秆覆盖量为 1.0 kg/m²,秸秆平均含水率 28%,土壤平均含水率 (20 ± 1)%,土壤容重 1.65 g/cm³,土壤硬度 1 504 kPa。试验地如图 19a 所示。

试验主要仪器设备:2BM-2 型大豆免耕播种机、奔野 454 型拖拉机、约翰迪尔 354 型拖拉机、GPS-10A 型机动车多功能检测仪、锯齿式开沟器、双圆盘开沟器、SC-900 型土壤硬度仪、钢卷尺、电子天平、种沟测量尺(分别用于测量开沟深度、开沟宽度、种子的横向位移等数据)等。试验种子选用东农 253 号大豆,种子平均粒径 8.0 mm,净度 99.3%。开沟器实物如图 19b 所示。



(a) 作业条件 (b) 开沟器

图 19 试验条件与设备

Fig. 19 Test conditions and equipment

4.2 试验方法

田间性能试验时,在机组前进速度 7 km/h,开沟深度 50 mm 条件下,以根系切断率为主要评价指标,验证开沟器锯齿形侧刃的锯切性能。田间对比试验时,在开沟深度为 50 mm 条件下,分别设置机组前进速度为 5、6、7、8、9 km/h,以开沟深度变异系数、横向粒距变异系数为主要评价指标,进行锯齿式开沟器与双圆盘开沟器对比试验。每组行程设置为 60 m,每组试验重复 3 次。指标测量方法参照文献[11,22,27]。

4.3 试验结果分析

图 20 为机组前进速度 7 km/h,开沟深度 50 mm 条件下,根系被锯齿式开沟器横向锯切切断效果。由田间性能试验结果可知,锯齿式开沟器平均切断根系率为 97.25%,与离散元仿真试验结果基本一致。图 21 为播种效果,达到了预期的播种效果,同时也验证了挡土板和导种管设计的合理性,有效防止了管口堵塞。这表明所设计的锯齿式开沟器不仅可以开出平整沟型,而且提高了播种质量,为大豆的生长发育提供了良好的条件。



图 20 切割根系效果

Fig. 20 Root system cutting effect

为验证锯齿式开沟器的工作性能,同双圆盘开沟器进行对比试验,其中锯齿式开沟器作业过程如图 22 所示。以机组前进速度 6 km/h,开沟深度 50 mm 为例,两种开沟器作业效果如图 23 所示,可见锯齿式开沟器对土壤扰动较双圆盘开沟器明显小。

由图 24 可知,锯齿式开沟器平均开沟深度为 50.81 mm,开沟深度变异系数为 6.77%,双圆盘开



图 21 播种效果

Fig. 21 Sowing effect



图 22 锯齿式开沟器作业

Fig. 22 Zigzag opener operation

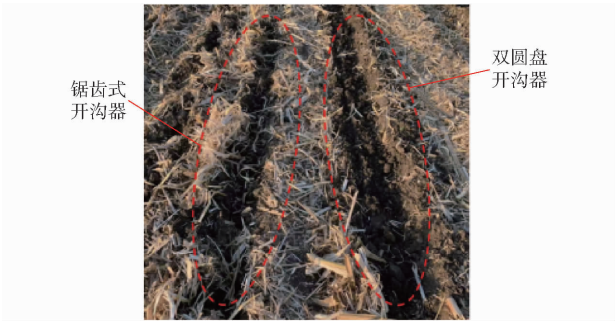


图 23 两种开沟器作业效果

Fig. 23 Two kinds of opener operation effect

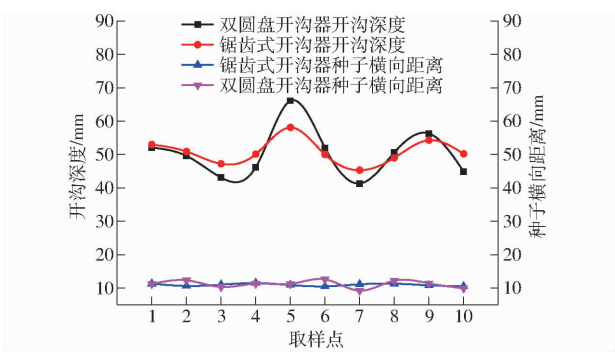


图 24 开沟器开沟深度及种子横向距离试验结果

Fig. 24 Test results of furrow depth and transverse grain spacing

沟器平均开沟深度为 50.22 mm,开沟深度变异系数为 13.68%,锯齿式开沟器开沟深度变异系数小于双圆盘开沟深度变异系数;锯齿式开沟器横向距离平均值为 10.95 mm,横向距离变异系数为 3.06%,双圆盘开沟器横向距离平均值为 11.16 mm,横向距

离变异系数为 9.27%，锯齿式开沟器横向距离变异系数也小于双圆盘开沟器。因此，该作业条件下，锯齿式开沟器开出的种沟相较双圆盘开沟器更平整。

由图 25 可知，不同速度条件下，锯齿式开沟器平均开沟深度变异系数为 7.054%，双圆盘开沟器平均开沟深度变异系数为 12.45%。相较双圆盘开沟器，锯齿式开沟器开沟深度变异系数降低了 43.33%。由图 26 可知，锯齿式开沟器平均种子横向距离变异系数为 3.59%，双圆盘开沟器平均种子横向距离变异系数为 9.16%，锯齿式开沟器种子横向距离变异系数较双圆盘降低了 60.81%。表明锯齿式开沟器的工作稳定性和种子横向分布均匀性均优于双圆盘开沟器。

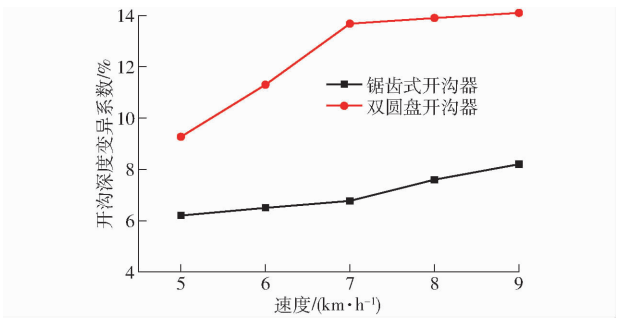


图 25 开沟器开沟深度变异系数变化曲线

Fig. 25 Variation curves of ditching depth variation coefficient of ditch opener

5 结论

(1) 为解决玉米-大豆轮作免耕播种模式下，前茬作物玉米根土结合体对大豆双行播种开沟器工作

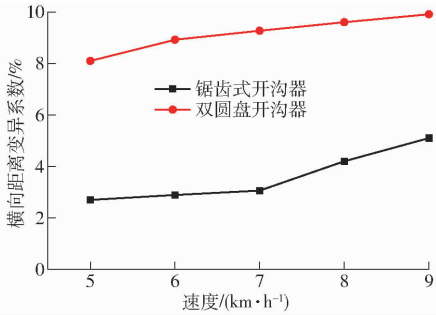


图 26 开沟器种子横向距离变异系数变化曲线

Fig. 26 Variation curves of transverse seed spacing variation coefficient of opener seeds

性能的影响，设计了一种锯齿式大豆垄上双行播种开沟器，提高了播种深度均匀性、行距一致性，实现了交错播种。

(2) 离散元仿真试验表明，锯齿式开沟器可有效切断根系；其工作阻力随作业速度的增大而愈加平稳，表明锯齿式开沟器具有平稳的工作性能。

(3) 田间性能试验表明，锯齿式开沟器达到了预期的作业效果；能有效防止管口堵塞，表明挡土板和导种管有较强的防堵能力；锯齿式开沟器横向平均根系切断率达 97.25%，表明锯齿形侧刃具有较优的锯切能力。

(4) 田间对比试验表明，锯齿式开沟器较双圆盘开沟器开沟深度变异系数降低 43.33%，种子横向距离变异系数降低 60.81%，表明锯齿式开沟器工作性能的稳定性高于双圆盘开沟器，满足大豆播种农艺要求。

参 考 文 献

[1] SUN Z,LIU L,MA Y,et al. The effect of nitrogen addition on soil respiration from a nitrogen-limited forest soil[J]. Agricultural & Forest Meteorology,2014,197: 103 – 110.

[2] 王琦琪. 东北黑土区玉米大豆轮作模式及比价研究[D]. 北京:中国农业科学院,2018.

WANG Qiqi. Study on corn and soybean rotation pattern and price comparison in the black soil region of Northeast China[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2018. (in Chinese)

[3] VERMEULEN S J,CAMPBELL B M,INGRAM J I. Climate change and food systems[J]. Annual Review of Environment and Resources,2012,37: 195 – 222.

[4] 张卓. 基于玉米大豆轮作模式的大豆精密播种技术研究及配套耕播机设计[D]. 长春:吉林大学,2019.

ZHANG Zhuo. Research on soybean precision seeding technology based on corn and soybean rotation mode and design of supporting tillage planter[D]. Changchun: Jilin University,2019. (in Chinese)

[5] 陈美舟,刁培松,张银平,等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(21): 8 – 16.

CHEN Meizhou,DIAO Peisong,ZHANG Yinping,et al. Design of single-disc and double-row air-suction seeder for soybean narrow-row dense planting planter[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(21): 8 – 16. (in Chinese)

[6] MEDINA V,GILBERT M E. Physiological trade-offs of stomatal closure under high evaporative gradients infield grown soybean [J]. Functional Plant Biology,2016,43(1): 40 – 51.

[7] ZHANG Z Q,QIANG H J,MCHUGH A D,et al. Effect of conservation farming practices on soil organic matter and st-ratification in a mono-cropping system of Northern China[J]. Soil and Tillage Research,2016,156: 173 – 181.

[8] 林静,刘安东,李宝筏,等. 2BG-2 型玉米垄作免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(6): 43 – 46.

LIN Jing,LIU Andong,LI Baofa,et al. 2BG-2 type cron ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6): 43 – 46. (in Chinese)

[9] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 大豆播种机双 V 型筑沟器设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(1): 323 – 331.

JIA Honglei,ZHENG Jiaxin,YUAN Hongfang,et al. Design and test of double V-shaped furrow builder for soybean planter [J].

- Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 323–331. (in Chinese)
- [10] 吕彬, 杨悦乾, 刘宏俊, 等. 大豆双行侧深施肥免耕播种机关键部件设计与试验[J]. 大豆科学, 2015, 34(6): 1047–1052.
LÜ Bin, YANG Yueqian, LIU Hongjun, et al. Design and test of key components of soybean double-row deep fertilizing no-tillage planter[J]. Soybean Science, 2015, 34(6): 1047–1052. (in Chinese)
- [11] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地大豆垄上双行开沟器结构参数优化[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(2): 71–78.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Structural parameter optimization of double-row furrow cutters on ridge of soybean in the original stubble-field[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(2): 71–78. (in Chinese)
- [12] 赵淑红, 谭贺文, 陈君执, 等. 深施肥条件下双圆盘播种开沟器性能优化[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(11): 86–96.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, CHEN Junzhi, et al. Performance optimization of double disc seed furrow opener under deep fertilization[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(11): 86–96. (in Chinese)
- [13] BOTTA G F, TOLON-BECERRA A, LASTRA-BRAVO X, et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L) yields in Argentinean pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 147–167.
- [14] VAMERALI T, BERTOCCOB M, SARTOTRI L. Effects of a new wide-sweep opener for no-till seeder on seed zone properties and root establishment in maize: a comparison with double-disk opener[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89: 196–209.
- [15] 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38–42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and test of sliding knife trench cutters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38–42. (in Chinese)
- [16] 张祥彩, 李洪文, 杜瑞成, 等. 滑动式开沟器关键结构参数对种床土壤特性的影响[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2017, 29(3): 7–15, 32.
ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, DU Ruicheng, et al. Influence of key structural parameters of sliding-type furrow cutters on soil characteristics of seed beds[J]. China Agricultural Abstract-Agricultural Engineering, 2017, 29(3): 7–15, 32. (in Chinese)
- [17] 苟文, 马荣朝, 杨文钰, 等. 小麦免耕播种机开沟器的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 21–25.
GOU Wen, MA Rongchao, YANG Wenyu, et al. Design of opener on no-till wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 21–25. (in Chinese)
- [18] 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京: 械工业出版社, 1997.
- [19] 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.
- [20] 权龙哲, 佟金, 曾百功, 等. 玉米根系铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 13–17.
QUAN Longzhe, TONG Jin, ZENG Baigong, et al. Optimization design of sliding cutting edge curve of corn rootstalk cutting tool[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 13–17. (in Chinese)
- [21] 曾百功. 玉米根系收集装置研制及关键机构机理分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
ZENG Baigong. Development of corn stubble collection device and mechanism analysis of key mechanism[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [22] 赵淑红, 刘汉朋, 杨超, 等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 75–87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered deep loose shovel for corn straw mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75–87. (in Chinese)
- [23] 孙剑. 玉米根系结构和力学特征及与土壤的摩擦学性能[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
SUN Jian. Structural and mechanical characteristics of corn stubble and its tribological properties against soil[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [24] 王加一. 免耕条件下破茬深松装置设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
WANG Jiayi. Design and experiment of subsoiler-stubble chopper device in no-tillage[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 刘俊安. 基于离散元方法的深松铲参数优化及松土综合效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
LIU Jun'an. Study on subsoiler parameters optimization and comprehensive effect of subsoiling based on the discrete element method[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [26] 高国华, 谢海峰, 王天宝. 设施蔬菜收获机拉拔力学性能 EDEM 仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 24–31.
GAO Guohua, XIE Haifeng, WANG Tianbao. EDEM simulation and experiment of pullout force of protected vegetable harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 24–31. (in Chinese)
- [27] 郑嘉鑫. 大豆精密播种机种沟构建技术及开沟装置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
ZHENG Jiaxin. Research on seed furrow construction technology and furrow opening device of soybean precision seeding machine[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)